



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Doutorado



ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE LOUÇAS SANITÁRIAS EM BAIXAS TEMPERATURAS

por

Ricardo Soares Gomez

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção
do grau de doutor

RICARDO SOARES GOMEZ

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE
LOUÇAS SANITÁRIAS EM BAIXAS TEMPERATURAS**

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do Grau de
Doutor.

Orientadora: Profa. Dra. Kelly Cristiane Gomes
Coorientador: Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G633e Gomez, Ricardo Soares.

Estudo teórico e experimental da secagem de louças sanitárias em baixas temperaturas / Ricardo Soares Gomez. - João Pessoa, 2023.

178 f. : il.

Orientação: Kelly Cristiane Gomes.

Coorientação: José Maurício Alves de Matos Gurgel.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Cerâmica - Bacia Sanitária - Secagem. 2. Louça sanitária - Secagem. 3. Transferência de Calor e Massa. I. Gomes, Kelly Cristiane. II. Gurgel, José Maurício Alves de Matos. III. Título.

UFPB/BC

CDU 666.3.047(043)

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE LOUÇAS SANITÁRIAS EM BAIXAS TEMPERATURAS

por

RICARDO SOARES GOMEZ

Tese aprovada em 31 de julho de 2023



Documento assinado digitalmente
KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA
Data: 02/08/2023 22:14:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA
Orientadora – UFPB



Documento assinado digitalmente
JOSE MAURICIO ALVES DE MATOS GURGEI
Data: 03/08/2023 00:58:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ MAURÍCIO ALVES DE MATOS GURGEL
Co-orientador - UFPB



Documento assinado digitalmente
GUSTAVO CHARLES PEIXOTO DE OLIVEIRA
Data: 08/08/2023 17:20:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GUSTAVO CHARLES PEIXOTO DE OLIVEIRA
Examinador Interno – UFPB

Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES
Examinador Interno - UFPB



Documento assinado digitalmente
ANTONIO GILSON BARBOSA DE LIMA
Data: 05/08/2023 08:04:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ANTONIO GILSON BARBOSA DE LIMA
Examinador Externo – UFCG



Documento assinado digitalmente
SEVERINO RODRIGUES DE FARIAS NETO
Data: 07/08/2023 21:47:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. SEVERINO RODRIGUES DE FARIAS NETO
Examinador Externo - UFCG

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por estar sempre ao meu lado.

Aos meus familiares, em especial meus pais, Rosana Soares e Ricardo Gomez, pelo apoio e amor incondicional.

À minha esposa, Viviane Ramos de Azevêdo, pelo amor e incentivo.

À Profa. Dra. Kelly Cristiane Gomes pela dedicação na orientação deste trabalho, pelos ensinamentos e esforço para resolver todas as questões burocráticas que esse trabalho exigiu.

Ao Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel, pela coorientação deste trabalho e pelas constantes palavras de apoio.

Ao Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pelas contribuições ao trabalho, ensinamentos, oportunidades concedidas na participação de outras pesquisas e pelo exemplo de profissional e ser humano.

À empresa Dexco S.A, pela parceria na realização desta pesquisa. Agradecimento especial aos colaboradores Jassem Andrade e Laís Belizário.

Aos funcionários do CEAR-UFPB (Centro de Energias Alternativas e Renováveis) e aos professores, técnicos e pesquisadores do Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LABFILM) e do Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais (TECNOMAT), pelo acolhimento e ajuda durante a realização dos experimentos: Eliane, Lia, Profa. Dra. Flávia Aquino, Fábio, Joelda, Chrystian, Prof. Dr. Sandro Torres, Ricardo, Nely, Wesley e Glauco.

Aos demais professores que participaram da banca examinadora, por dedicarem seu precioso tempo para avaliar e contribuir com o aprimoramento deste trabalho: Prof. Dr. Gustavo Oliveira e Prof. Dr. Severino Farias Neto.

Aos amigos e colegas de pós-graduação que compartilharam comigo essa jornada: Túlio Porto, Hortência Magalhães, Raíssa Queiroga, Felipe Silva, Yuri Moraes e Francisco Procópio.

Ao CNPQ pelo suporte financeiro durante a vigência do doutorado.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho.

RESUMO

A secagem é uma operação de transferência de calor e massa envolvendo a remoção de umidade, sendo uma etapa importante e de elevado custo no processo de manufatura de diversos produtos. Para materiais cerâmicos, o processo de secagem é necessário para retirar o excesso de água que é adicionado na etapa de moldagem e conferir a resistência necessária para reduzir as falhas durante a queima do produto. Para louças sanitárias, é necessário realizar uma etapa de pré-secagem logo após a retirada da peça do molde, em ambiente com temperatura entre 30 e 40°C, acarretando em um custo energético adicional. Este trabalho tem por objetivo estudar, teórica e experimentalmente, o processo de secagem de louças sanitárias a baixas temperaturas, com particular referência às bacias sanitárias. Foram realizados sete experimentos de secagem em estufa com diferentes condições operacionais (temperatura, umidade relativa, convecção natural e forçada). Em seguida, foi realizada uma modelagem matemática empírica e cálculos para avaliar o desempenho da secagem. Os resultados experimentais indicam que o aumento da temperatura e a redução da umidade relativa do ar resultam em secagens mais rápidas. Constatou-se que para algumas situações físicas, é mais interessante dedicar esforços para reduzir a umidade relativa do ar de secagem em vez de buscar soluções para aumentar sua temperatura. Além disso, não foram observadas trincas ou fissuras durante a realização dos experimentos e constatou-se uma correlação linear inversa entre a retração linear e o teor de umidade de modo que a perda de umidade é acompanhada de encolhimento da amostra. Por fim, os resultados do consumo de energia específico médio (CEE_M) indicam que quanto menor a temperatura do ar de secagem, mais eficiente é o processo. Entretanto, na faixa de temperatura de estudo, a diferença relativa máxima para o CEE_M entre experimentos foi menor que 3%, indicando que outros fatores devem ser levados em consideração na definição das condições operacionais do ar no setor de pré-secagem de louças sanitárias, tais como tempo de processamento, condições climáticas e demanda de mercado pelo produto.

Palavras-Chaves: Bacia Sanitária; Cerâmica; Argila; Secagem; Transferência de Calor e Massa.

ABSTRACT

Drying is a heat and mass transfer operation involving the removal of moisture, being an important and expensive task in the manufacturing process of several products. For ceramic materials, the drying process is necessary to remove the water that is added to the clay in the molding stage and to provide the necessary strength to reduce the chances of failure during the product firing stage. For sanitary ware, it is necessary to carry out a pre-drying stage immediately after removing the part from the mold, in an environment with a temperature between 30 and 40°C, resulting in an additional energy cost. This thesis aims to study, both theoretically and experimentally, the low-temperature drying process of sanitary wares, especially sanitary toilets. Seven drying experiments were carried out in an oven under different operating conditions (temperature, relative humidity; natural and forced convection). Subsequently, an empirical mathematical modeling and calculations were performed to evaluate the drying performance. The experimental results indicate that increasing the temperature and reducing the relative humidity of the air lead to faster drying. It was found that for certain physical situations, it is more advantageous to focus on reducing the relative humidity of the drying air rather than seeking solutions to increase its temperature. Furthermore, no cracks or fissures were observed during the experiments, and an inverse linear correlation was found between linear retraction and moisture content, whereby moisture loss is accompanied by sample shrinkage. Finally, the results of the average specific energy consumption (ASEC) indicate that the lower the drying air temperature, the more efficient the process. However, within the temperature range studied, the maximum relative difference in ASEC between experiments was less than 3%, indicating that other factors should be considered in defining the operational conditions of the air in the pre-drying sector of sanitary ware, such as processing time, weather conditions, and market demand for the product.

Keywords: Sanitary toilet; Ceramics; Clay; Drying; Heat and mass transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Argila.	29
Figura 2.2 - Fluxograma do processo de fabricação de produtos da cerâmica vermelha.	32
Figura 2.3 - Fluxograma do processo de fabricação de louças sanitárias.	33
Figura 2.4 - Curva de secagem representada na forma do teor de umidade adimensional.	43
Figura 2.5 - Curva típica de secagem.	45
Figura 2.6 - Curva típica de secagem representada na forma do teor de umidade adimensional.	45
Figura 2.7 - Curva típica da taxa de secagem.	45
Figura 2.8 - Secagem natural de tijolos cerâmicos em galpões cobertos.	48
Figura 2.9 - Câmara de secagem artificial.	48
Figura 2.10 - Esquema de um secador contínuo.	49
Figura 2.11 - Classificação dos secadores contínuos: (a) fluxo concorrente; (b) fluxo contracorrente; (c) fluxo cruzado.	50
Figura 2.12 - Representação esquemática da secagem do sistema argila-água.	53
Figura 2.13 - Variação da retração de secagem em função da água de conformação (curva de Bigot).	53
Figura 2.14 - Sentidos das transferências de calor e de umidade no corpo para secagem por convecção.	65
Figura 2.15 - Sentidos das transferências de calor e de umidade no corpo na secagem por micro-ondas.	65
Figura 3.1 - Bacia sanitária antes do experimento de secagem.	69
Figura 3.2 - Estufa com circulação e renovação de ar forçada utilizada nos experimentos de secagem.	70
Figura 3.3 - Balança digital utilizada nos experimentos de secagem.	70
Figura 3.4 - Trena para medições dimensionais das amostras durante os experimentos de secagem.	71
Figura 3.5 - Termohigrômetro digital para medição das condições do ar fora da estufa.	71
Figura 3.6 - Termohigrômetro digital para medição das condições do ar no interior da estufa.	72
Figura 3.7 - Termômetro infravermelho digital para medição da temperatura superficial das amostras durante os experimentos de secagem.	72
Figura 3.8 - Anemômetro de fio quente com leitura digital.	73
Figura 3.9 - Câmera termográfica para medição dos gradientes de temperatura das amostras durante os experimentos de secagem.	73
Figura 3.10 - Falha na base da bacia sanitária recém moldada durante experimento de secagem.	74
Figura 3.11 - Amostra no interior da estufa.	75

Figura 3.12 – Pontos de medição da temperatura superficial da amostra.	76
Figura 3.13 - Orifícios para renovação de ar localizados na lateral esquerda da estufa.....	78
Figura 3.14 - Ventilador da estufa para convecção forçada e orifícios internos para renovação do ar.	78
Figura 3.15 - Principais medidas da bacia para cálculo da retração linear.....	83
Figura 4.1 - Condensação do vapor d'água observado apenas para o experimento com convecção natural (Caso 7).....	92
Figura 4.2 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 23\%$).	93
Figura 4.3 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 20\%$).	93
Figura 4.4 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 14\%$).	93
Figura 4.5 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$).	94
Figura 4.6 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$).	94
Figura 4.7 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$).	94
Figura 4.8 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 63\%$).	95
Figura 4.9 - Teor de umidade médio em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.	96
Figura 4.10 - Teor de umidade médio adimensional em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.	98
Figura 4.11 - Taxa de secagem em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.....	98
Figura 4.12 - Taxa de secagem em função do teor de umidade médio para todos os casos analisados.	99
Figura 4.13 - Amostra utilizada no Caso 2 (LABFILM; $T = 35,0^{\circ}\text{C}$; $\text{UR} = 20\%$) antes (a) e após (b) o experimento de secagem em estufa.	100
Figura 4.14 - Amostra utilizada no Caso 4 (TECNOMAT; $T = 30,0^{\circ}\text{C}$; $\text{UR} = 51\%$) antes (a) e após (b) o experimento de secagem em estufa.	100
Figura 4.15 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 23\%$).	101
Figura 4.16 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 20\%$).	102
Figura 4.17 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 14\%$).	102
Figura 4.18 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$).	102

Figura 4.19 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$).	103
Figura 4.20 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$).	103
Figura 4.21 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 7 ($T = 35,1,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 63\%$).	103
Figura 4.22 - Temperatura superficial da amostra em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.	105
Figura 4.23 - Temperatura superficial da amostra em função do teor de umidade médio para todos os casos analisados.	106
Figura 4.24 - Temperatura adimensional em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.	106
Figura 4.25 - Temperatura adimensional em função do teor de umidade médio adimensional.	107
Figura 4.26 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 23\%$).	114
Figura 4.27 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 20\%$).	114
Figura 4.28 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 14\%$).	114
Figura 4.29 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$).	115
Figura 4.30 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$).	115
Figura 4.31 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$).	115
Figura 4.32 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 63\%$).	116
Figura 4.33 - Retração linear em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.	116
Figura 4.34 - Retração linear em função do teor de umidade médio para todos os casos analisados.	117
Figura 4.35 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 23\%$).	118
Figura 4.36 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 20\%$).	119
Figura 4.37 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 14\%$).	119
Figura 4.38 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$).	119
Figura 4.39 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$).	120

Figura 4.40 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$).....	120
Figura 4.41 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 63\%$).....	120
Figura 4.42 - Calor sensível para aquecer a bacia sanitária (QS) em função do tempo (a) $0 < t < 48\text{h}$ e (b) $0 < t < 342\text{h}$	122
Figura 4.43 - Calor latente para evaporação da água (QL) em função do tempo (a) $0 < t < 48\text{h}$ e (b) $0 < t < 342\text{h}$	123
Figura 4.44 - Calor total absorvido pela amostra (QT) em função do tempo (a) $0 < t < 48\text{h}$ e (b) $0 < t < 342\text{h}$	124
Figura 4.45 - Consumo de energia específico (CEE) em função do tempo (a) $0 < t < 48\text{h}$ e (b) $0 < t < 342\text{h}$	125
Figura B.1 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 23\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{h}$ (b) $t = t_{\text{eq}} = 166\text{h}$	170
Figura B.2 - Termograma da amostra utilizada no Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 20\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{h}$ e (b) $t = t_{\text{eq}} = 120\text{h}$	171
Figura B.3 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 14\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{h}$ e (b) $t = t_{\text{eq}} = 102\text{h}$	171
Figura B.4 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{h}$ e (b) $t = t_{\text{eq}} = 178\text{h}$	171
Figura B.5 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{h}$ e (b) $t = t_{\text{eq}} = 132\text{h}$	172
Figura B.6 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{h}$ e (b) $t = t_{\text{eq}} = 106\text{h}$	172
Figura B.7 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 63\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{h}$ e (b) $t = t_{\text{eq}} = 342\text{h}$	172
Figura C.1 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 23\%$).....	173
Figura C.2 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 20\%$).....	173
Figura C.3 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 14\%$).....	173
Figura C.4 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$).....	174
Figura C.5 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$).....	174
Figura C.6 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$).....	174
Figura C.7 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 63\%$).....	175

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais setores cerâmicos, matérias-primas utilizadas e características do processo de fabricação.	30
Tabela 2.2 - Tipos de secagem e suas principais vantagens.	49
Tabela 3.1 - Casos estudados experimentalmente.	79
Tabela 3.2 - Modelos empíricos para prever o teor de umidade médio adimensional.	88
Tabela 4.1 - Resultados de massa inicial, de equilíbrio e massa seca para cada experimento.	91
Tabela 4.2 - Resultados de teor de umidade inicial e de equilíbrio, tempo para alcançar a condição de equilíbrio e temperatura de equilíbrio para cada experimento de secagem.	108
Tabela 4.3 - Comparação entre os tempos necessários para reduzir o teor de umidade médio da amostra de 20% para 15, 10, 5 e 1%.	110
Tabela 4.4 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 23\%$).	111
Tabela 4.5 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 20\%$).	111
Tabela 4.6 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 14\%$).	111
Tabela 4.7 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 51\%$).	112
Tabela 4.8 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 41\%$).	112
Tabela 4.9 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 35\%$).	112
Tabela 4.10 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 63\%$).	112
Tabela 4.11 - Resultados da retração linear final e variação mássica final para todos os experimentos de secagem.	113
Tabela 4.12 - Parâmetros da Equação (3.16) obtidos após ajuste do teor de umidade médio adimensional aos dados experimentais, para cada experimento de secagem.	121
Tabela 4.13 - Resultados das medidas de qualidade de ajuste do modelo para os diferentes casos analisados.	121
Tabela 4.14 - Parâmetros de desempenho de secagem para os diferentes casos analisados.	126
Tabela A.1 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 23\%$).	151
Tabela A.2 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 20\%$).	154
Tabela A.3 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 14\%$).	156

Tabela A.4 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$).	158
Tabela A.5 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$).	161
Tabela A.6 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$).	163
Tabela A.7 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 63\%$).	165
Tabela D.1 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 23\%$).	176
Tabela D.2 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 20\%$).	176
Tabela D.3 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 14\%$).	177
Tabela D.4 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$).	177
Tabela D.5 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$).	178
Tabela D.6 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$).	178
Tabela D.7 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 63\%$).	179

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD – Computational Fluid Dynamics (Dinâmica dos Fluidos Computacional)

LABFILM - Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos

TECNOMAT - Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais

LISTA DE SÍMBOLOS

Δm_a	Varição da massa de água na amostra entre duas medições consecutivas	[kg]
Δt	Intervalo de tempo entre duas medições consecutivas	[s]
Δt_i	Intervalo de tempo entre os instantes de tempo t_i e t_{i+1}	[s]
c_1	Parâmetro para modelo empírico de secagem	[]
c_2	Parâmetro para modelo empírico de secagem	[]
c_p	Calor específico da amostra	[J/(kgK)]
CEE	Consumo de energia específico	[J/kg]
CEE _M	Consumo de energia específico médio	[J/kg]
$dM/dt(t)$	Taxa de secagem	[]
$E_{\text{máx}}$	Erro máximo	[]
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água	[J/kg]
k_1	Parâmetro para modelo empírico de secagem	[]
k_2	Parâmetro para modelo empírico de secagem	[]
L_i	Valor da medida i para cálculo da retração linear da amostra	[mm]
m	Massa da amostra	[g]
m_a	Massa de água da amostra	[g]
m_{a0}	Massa de água inicial da amostra	[g]
m_s	Massa seca da amostra	[g]
m_0	Massa inicial da amostra	[g]
m_A	Massa do ar seco	[kg]
m_v	Massa do vapor d'água no ar	[kg]
M_v	Massa molecular da água	[kg/kmol]
M_A	Massa molecular o ar seco	[kg/kmol]
M	Teor de umidade em base seca	[kg/kg]
M_e	Teor de umidade de equilíbrio	[kg/kg]
M_0	Teor de umidade inicial	[kg/kg]
M^*	Teor de umidade adimensional	[]
$\bar{M}$	Teor de umidade médio	[kg/kg]
$\overline{M_e}$	Teor de umidade de equilíbrio médio	[kg/kg]

$\overline{M}_0$	Teor de umidade médio inicial	[kg/kg]
$\overline{M}^*$	Teor de umidade médio adimensional	[]
n	Número de observações (cálculo do coeficiente de determinação)	[]
N	N é o número de intervalos de medição	[]
P	Pressão atmosférica ao nível do mar	[kPa]
P_A	Pressão Parcial do ar seco	[kPa]
P_g	Pressão de vapor de saturação	[kPa]
P_v	Pressão de vapor	[kPa]
$\dot{Q}_L$	Calor latente para evaporação da água	[W]
$\dot{Q}_S$	Calor sensível para aquecer a amostra	[W]
$\dot{Q}_T$	Calor total absorvido pela amostra	[W]
Q_L	Energia latente para evaporação da água	[J]
Q_S	Energia sensível para aquecer a amostra	[J]
Q_T	Energia total absorvida pela amostra durante todo o experimento de secagem	[J]
S	Erro padrão	[]
$SQ_{\text{regressão}}$	Soma dos quadrados da regressão	[]
SQ_{total}	Soma total dos quadrados	[]
$SQ_{\text{resíduos}}$	Soma dos quadrados dos resíduos	[]
t	Instante de tempo	[h]
t_0	Instante de tempo inicial	[h]
T	Temperatura	[°C]
T_0	Temperatura inicial da amostra	[°C]
T_{amostra}	Temperatura superficial da amostra	[°C]
$T_{\text{ar_ext}}$	Temperatura do ar externo	[°C]
T_e	Temperatura de equilíbrio da amostra	[°C]
T^*	Temperatura adimensional	[]
UR	Umidade relativa	[%]
$UR_{\text{ar_estufa}}$	Umidade relativa do ar no interior da estufa	[%]
$UR_{\text{ar_ext}}$	Umidade relativa do ar externo	[%]
v	Velocidade	[m/s]

$\forall$	Volume	$[m^3]$
ω	Umidade absoluta do ar	$[kg_{vapor}/kg_{arseco}]$
y_i	Valor observado (cálculo do coeficiente de determinação)	$[]$
$\hat{y}_i$	Valor estimado (cálculo do coeficiente de determinação)	$[]$
$\bar{y}$	Média das observações (cálculo do coeficiente de determinação)	$[]$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Objetivo geral	24
1.2	Objetivos específicos	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Cerâmica	25
2.1.1	Aspectos históricos	25
2.1.2	Principais segmentos	27
2.1.3	Matéria-prima	29
2.1.4	Processo de manufatura	31
2.1.5	Defeitos do processo de fabricação	38
2.1.6	Destino das peças cerâmicas defeituosas	39
2.2	O processo de secagem	40
2.2.1	Fundamentos.....	40
2.2.2	Mecanismos de secagem	43
2.2.3	Curva de secagem.....	44
2.3	Secagem de materiais cerâmicos	47
2.3.1	Aspectos gerais	47
2.3.2	Aspectos energéticos	51
2.3.3	Aspectos mecânicos: retração do produto durante a secagem.....	52
2.3.4	Aspectos mecânicos: tensões induzidas pelo processo de secagem.....	54
2.3.5	Aspectos de qualidade do produto cerâmico: defeitos do processo de secagem.....	55
2.3.6	Fatores que influenciam no processo de secagem	56
2.3.7	Controle do processo de secagem.....	58
2.3.8	Modelagem matemática do processo de secagem	59
2.3.9	Otimização do processo de secagem	61
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	69
3.1	Secagem em estufa.....	69
3.1.1	Materiais e equipamentos utilizados nos experimentos de secagem	69
3.1.2	Procedimentos experimentais	74
3.1.3	Locais de realização dos experimentos de secagem	79
3.1.4	Casos estudados	79
3.2	Cálculos auxiliares	80
3.3	Tratamento estatístico dos dados	85
3.3.1	Medidas de qualidade de ajuste	85
3.3.2	Modelo empírico de secagem	87

3.4	Desempenho de secagem	89
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	91
4.1	Resultados experimentais de secagem.....	91
4.2	Resultados empíricos	118
4.3	Resultados do desempenho de secagem	121
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
5.1	Conclusões	127
5.2	Contribuições científicas.....	128
5.3	Sugestões para trabalhos futuros.....	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
	APÊNDICES	150
	APÊNDICE A	151
	APÊNDICE B.....	170
	APÊNDICE C.....	173
	APÊNDICE D	176

1 INTRODUÇÃO

A indústria cerâmica participa da economia brasileira com cerca de 1% do PIB nacional, sendo aproximadamente 40% desta participação representada pela cerâmica vermelha ou estrutural (SANTOS, 2019). Segundo dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica, este setor é composto por aproximadamente 7000 empresas, que geram 293 mil empregos diretos e 900 mil empregos indiretos, sendo responsável por um faturamento anual em torno de R\$ 18 bilhões, que corresponde a cerca de 4,8% da indústria da construção civil (ANICER, 2021). Por representar um setor de grande importância na geração de empregos e na distribuição de renda, tem merecido a atenção de setores do governo, institutos de pesquisa, universidades e entidades diversas (LIMA et al., 2021).

Nos últimos anos, a procura pelo produto brasileiro praticamente dobrou em alguns países do continente. Mesmo enfrentando momentos turbulentos da econômica mundial, o setor ceramista brasileiro realiza excelentes negócios no mercado asiático. A abundância de matérias-primas naturais, as fontes alternativas de energia e a disponibilidade de tecnologias embutidas nos equipamentos industriais fizeram com que as indústrias cerâmicas brasileiras evoluíssem rapidamente e diversos tipos de seus produtos atingissem nível de qualidade internacional (GOMEZ; MAGALHÃES; et al., 2020).

O Brasil é um dos protagonistas mundiais do setor de revestimento cerâmico, ocupando, no ano de 2019, a terceira posição em produção (909 milhões de m²), segunda em consumo (796 milhões de m²) e sexta em exportação (101 milhões de m²), vendendo seus produtos para mais de 111 países, tendo como destinos principais América do Sul, América Central, América do Norte e Caribe (ANFACER, 2021).

As regiões do Brasil que mais contribuem com a produção e exportação de produtos cerâmicos são a sul e sudeste, onde estão localizados os maiores polos cerâmicos do país (FIEMG; FEAM, 2013). As principais razões para que tais regiões tenham destaque no cenário nacional são a maior atividade industrial e agropecuária, infraestrutura, densidade demográfica, distribuição de renda, além de facilidades de matérias-primas, energia, universidades, centros de pesquisa e escolas técnicas (SILVA, 2018; SANTOS, 2019). No entanto, é importante ressaltar que as demais regiões do país têm apresentado certo grau de desenvolvimento nos últimos anos, especialmente o Nordeste, que tem instalado novas fábricas cerâmicas na região devido a fatores como grande disponibilidade de recursos minerais, gás natural, fontes de energia alternativas e mercado em expansão (FIEMG; FEAM, 2013; TAVARES, 2018).

O setor cerâmico é formado por um elevado número de indústrias com diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico e capacidades produtivas. Embora algumas empresas se destaquem no setor, o mesmo é caracterizado por um considerável número de micro e pequenas empresas, geralmente de estrutura familiar, distribuídas por todo o país (CABRAL JUNIOR et al., 2019a). Quanto ao nível tecnológico, algumas apresentam elevado grau de desenvolvimento tecnológico em todo o processo de produção, seja na preparação da matéria-prima, na fabricação das peças, ou na secagem ou na queima. Entretanto esta não é a regra geral, e muitas empresas ainda estão num estágio bastante primitivo quanto à modernização, com processos produtivos e tecnologia defasados e pouco eficientes (MACIEL; FREITAS, 2013).

Enquanto os setores de cerâmica vermelha e revestimentos cerâmicos são caracterizados por uma estrutura industrial descentralizada e de capital nacional, o segmento de louças sanitárias é concentrado em poucas empresas e tem grande participação de capital estrangeiro. As empresas nacionais são responsáveis por 60% da produção do país e as duas empresas líderes, Dexco (nacional) e Roca (espanhola), detém mais de 60% do mercado (CABRAL JUNIOR et al., 2019b). Atualmente, o Brasil está entre os 5 maiores produtores mundiais de louças sanitárias, conta com 26 unidades fabris de médio a grande porte e produz cerca de 22 milhões de louças para cozinha e banheiro, entre bacias com caixa acoplada (37%), cubas (25%), bacia convencional (20%), lavatório e coluna (10%), tanques (5%) e mictórios (3%) (ANFACER, 2021).

Os materiais cerâmicos apresentam diversas propriedades que contribuem para sua larga aplicação na construção civil e na engenharia: elevada resistência mecânica, elevada dureza, alta temperatura de fusão, alta resistência à abrasão, grande resistência ao calor, estabilidade química e térmica, durabilidade, capacidade de isolamento térmico e acústico (CAVALCANTE, 2005; SANTOS, 2019; SILVA et al., 2020). A partir de pesquisas e desenvolvimento de tecnologias em laboratórios especializados, o setor cerâmico vem passando por uma série de avanços, possibilitando aplicações inovadoras na medicina (CARTER; NORTON, 2007), odontologia (DENRY; HOLLOWAY, 2010), setor automotivo (OKADA, 2008), tratamento de água produzida (MAGALHÃES et al., 2020), turbinas (JULIAN-JANKOWIAK; VALLE; PARLIER, 2016), blindagem térmica de ônibus espaciais (MONTI; FUMO; SAVINO, 2006), sensores para medição de qualidade do ar e detecção de gases tóxicos, inflamáveis e explosíveis (AKBAR; DUTTA; LEE, 2006), e outras aplicações industriais (LUQUE; GÓMEZ; ÁLVAREZ, 2008; SHI, 2012; MESTRE et al., 2019) e eletrônicas

(LEVINSON; HASSAN; DARWISH, 1988; SCHWARTZ, 1988; HARRIS, 1998; JAKATHAMANI et al., 2021).

As principais etapas do processo de manufatura dos materiais cerâmicos são: exploração das jazidas, preparação da matéria-prima, conformação e processamento térmico (secagem e queima) (GOMEZ; PORTO; et al., 2020). Na etapa de preparação da matéria-prima, água é adicionada à argila com o objetivo de aumentar a sua plasticidade, permitindo que a peça seja moldada ou conformada facilmente sem rachar (SILVA et al., 2011, 2012, 2016). Após moldada, a peça deve passar pela etapa de secagem, que consiste em um processo termodinâmico em que a remoção de umidade do material poroso ocorre mediante o fornecimento de energia (calor) ao mesmo.

A secagem é considerada uma etapa bastante delicada e complexa no processo de fabricação de materiais cerâmicos, pois remoção de água é acompanhada de transferência de calor, tensões internas oriundas dos gradientes de temperatura e umidade, e alterações dimensionais expressivas (ZACCARON et al., 2019; ZACCARON; NANDI; BERNARDIN, 2021), devendo ser realizada de maneira uniforme e controlada para evitar a formação de trincas, torções, empenamentos e outros tipos de defeitos ou até mesmo a explosão do produto na etapa de queima (BATISTA; NASCIMENTO; LIMA, 2009; SILVA et al., 2011; ALMEIDA et al., 2014).

Os processos de secagem e queima de produtos cerâmicos são caracterizados pelo elevado consumo de energia (MEZQUITA; MONFORT; ZAERA, 2009; MEZQUITA et al., 2014; KOČÍ et al., 2020). Silva et al. (2020), indicam que o custo energético, durante as etapas de secagem e queima, tem um peso considerável sobre o preço do produto final, representando cerca de 30% do custo médio total de produção. Em se tratando de louças sanitárias, é comum haver um custo energético adicional na etapa de pré-secagem, que ocorre logo após a retirada das peças dos moldes e consiste em mantê-las em um grande ambiente com temperatura entre 30 e 40°C de um a três dias com o objetivo de reduzir o teor de umidade do material a valores ideais para a etapa de secagem (GOMEZ et al., 2023). Normalmente é queimada grande quantidade de gás natural para manter tais ambientes na faixa de temperatura ideal para realização da pré-secagem.

Além da preocupação financeira, tem-se o impacto ambiental, pois a energia necessária durante as etapas de processamento térmico normalmente é fornecida pela queima de combustíveis que, durante a reação de combustão, emitem gases poluentes na atmosfera. Sabe-se que as consequências do aquecimento global e mudanças climáticas provocadas pelas

emissões de gases de efeito estufa são catastróficas para o ecossistema: derretimento das calotas polares, que provoca aumento do nível do mar e inundações (OVERPECK et al., 2006; CHURCH et al., 2008), extinção de espécies (STRASSBURG et al., 2012), agravamento da segurança alimentar (HASEGAWA et al., 2018), diversos problemas de saúde e até mortes prematuras por asma, doenças cardiovasculares e pulmonares (SHAKIR; MOHAMMED, 2013; ERICKSON, 2017; MIKHAYLOV et al., 2020).

Desta forma, fica evidente que otimizar os processos de secagem e queima de produtos cerâmicos resulta em um produto de qualidade superior, reduções no desperdício de matéria-prima, no tempo de processamento e no consumo energético, promovendo ganhos econômicos e ambientais e, consequentemente, desempenhando um papel importante para as indústrias que desejam se manter competitivas no mercado (GOMEZ et al., 2019).

Uma das formas de otimizar o processo de secagem é através da modelagem matemática (GOMEZ; MAGALHÃES; et al., 2020). Diversos pesquisadores vêm realizando testes experimentais para compreender os fenômenos físicos que ocorrem durante a etapa de secagem e, consequentemente, auxiliar na modelagem matemática do processo (BATISTA et al., 2009; SILVA et al., 2011, 2012, 2020; ALMEIDA et al., 2014; NASCIMENTO; BELO; LIMA, 2015). A partir da modelagem matemática é possível escolher o método de secagem e as condições de operação mais adequadas para cada tipo de produto (LIMA et al., 2021)

Os modelos matemáticos que descrevem o processo de secagem podem ser classificados em empíricos (experimental), analíticos ou numéricos. Na secagem, os modelos empíricos consistem na obtenção de uma formulação que relaciona o teor de umidade médio da amostra e o tempo de processamento (LIMA, 2017), não sendo possível prever, por exemplo, os campos de temperatura e teor de umidade no interior do produto. Modelos teóricos partem das equações fundamentais (conservação da massa, espécies, momento e energia), geralmente na forma diferencial. Para resolver o problema da secagem utilizando abordagens analíticas, faz-se necessário realizar uma série de simplificações que distanciam o modelo matemático do fenômeno físico real.

Na literatura consultada, não foram encontrados trabalhos que avaliam o processo de secagem de materiais cerâmicos a baixas temperaturas (inferiores a 50°C). Além disto, tais trabalhos estão limitados a geometrias mais simples, como tijolos vazados e blocos cerâmicos. Percebeu-se também que o único parâmetro operacional avaliado nos trabalhos de secagem de materiais cerâmicos reportados na literatura foi a temperatura do ar de secagem, não sendo avaliado, por exemplo, casos com mesma temperatura e umidades relativas e/ou velocidades

diferentes. Em se tratando de louças sanitárias, os trabalhos são ainda mais escassos, não sendo encontrado sequer trabalhos experimentais de secagem para tais produtos.

Desta forma, a motivação desta pesquisa está relacionada com a carência de trabalhos de secagem de louças sanitárias a baixas temperaturas (30°C a 40°C), sendo possível contribuir para melhoria do processo de pré-secagem dos produtos neste seguimento da indústria cerâmica. A partir de análises experimentais em estufa, foi possível estudar a cinética de secagem e retração linear de bacias sanitárias para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar, e tipo de convecção (natural ou forçada). Tais resultados devem fornecer uma base para auxiliar na tomada de decisões visando uma pré-secagem mais eficiente, seja reduzindo o consumo de energia ou o tempo de processamento, e alcançando rapidamente o teor de umidade desejado para o produto nas etapas subsequentes do processo de fabricação.

1.1 Objetivo geral

Estudar teórica e experimentalmente o fenômeno de secagem de louças sanitárias na escala industrial a baixas temperaturas (30 a 40°C).

1.2 Objetivos específicos

- a) Realizar experimentos de secagem de bacias sanitárias em estufa para diferentes condições operacionais, como temperatura e umidade relativa do ar;
- b) Avaliar experimentalmente a influência das variações da temperatura e umidade relativa do ar na cinética de secagem das bacias sanitárias;
- c) Avaliar a retração linear das amostras em cada experimentos de secagem em estufa;
- d) Comparar os resultados experimentais de secagem de bacias sanitárias em estufa utilizando convecção forçada com alta renovação de ar externo e convecção natural com baixa renovação de ar externo;
- e) Propor um modelo matemático empírico que descreva a perda de umidade das bacias sanitárias para diferentes condições operacionais de secagem;
- f) Avaliar e comparar o desempenho de secagem para os diferentes experimentos realizados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cerâmica

Cerâmica ou material cerâmico é uma classe de material inorgânico e não metálico que é obtido após tratamento térmico a altas temperaturas (DELPECH; AXCELL; JOUHARA, 2017). Esses materiais são provenientes da queima da argila num formato específico (telhas, tijolos, blocos, pisos, artefatos artísticos e de decoração, etc.), e são largamente utilizados na construção civil (GOMEZ; MAGALHÃES; et al., 2020).

2.1.1 Aspectos históricos

Por apresentar uma série de aplicações e vantagens, a cerâmica surgiu em diversas civilizações, em períodos diferentes e em todos os continentes, já no final do período paleolítico (BOCH; NIEPCE, 2010), sendo considerado o material artificial mais antigo produzido pelo homem (VLASOV; KARABANOVA, 1993; GOMEZ; MAGALHÃES; et al., 2020).

Várias descobertas arqueológicas indicam que as primeiras peças de material argiloso surgiram em Dolni Vestonice (sítio arqueológico da República Tcheca) por volta de 26000 a.C., depois na Sibéria em 12000 a.C., China em 11.000 a.C. e, também, na Mesopotâmia em 8.000 a.C (VANDIVER, 1990; MARGUERON, 2003; BOCH; NIEPCE, 2010).

A disseminação da cerâmica ocorre no período em que o homem deixa de ser nômade e torna-se sedentário, ou seja, quando deixou de se deslocar de um lugar para o outro, passando a viver em um único local. Este fato foi observado na Ásia, Oriente Médio e Europa no final do período Neolítico, entre 7.000 e 6.000 a.C. e foi possível graças à agricultura e domesticação de animais (porcos, gados, cabras e ovelhas) (COLE, 1959; LARSON et al., 2007; BOCH; NIEPCE, 2010). Com este novo estilo de vida, o homem sentiu a necessidade de armazenar água, alimentos e sementes, e criar abrigos para se proteger do frio e de animais selvagens. Daí surgiram as primeiras vasilhas cerâmicas e tijolos (TITE, 1999; BANNING, 2003; KAWAGUTI, 2005).

O império romano foi pioneiro na produção de materiais cerâmicos como atividade industrial (WAKSMAN et al., 2007). Isto aconteceu por conta das necessidades crescentes de construção devido a sua constante expansão territorial (ARADAS, 1996), e a grande importância do comércio, fazendo com que diversos artefatos cerâmicos fossem transportados por longas distâncias (OYEN, 2016).

Até o final do século XIX, o sistema produtivo de peças cerâmicas passou apenas por pequenas mudanças (MILLER, 1980). Antes desse período as peças eram confeccionadas manualmente, e utilizava-se da secagem solar para desumidificar as peças. Então as peças eram submetidas à queima, em fornos denominados de *caieira*, que é, basicamente, um forno intermitente aquecido pela queima de biomassa de alto consumo de energia, o que conduz a um baixo desempenho energético. Somente a partir da Revolução Industrial e da introdução da primeira máquina a vapor, o sistema de produção começou a evoluir significativamente, mecanizando a operação de preparação e extrusão da argila, e aumentando a eficiência e capacidade de produção (SANTOS, 2001). O desenvolvimento do primeiro forno anular tipo Hoffman é conhecido por ter revolucionado a indústria cerâmica, permitindo obter um produto de melhor qualidade, além da redução do consumo de combustível, redução de mão de obra e ascensão da capacidade de produção (JOHN, 2018).

No Brasil, há mais de 2000 anos, antes mesmo da incursão exploratória portuguesa, já havia produção de artefatos cerâmicos, tais como potes, baixelas e outros (SEBRAE, 2008). A cerâmica mais sofisticada foi encontrada na Ilha de Marajó (Pará), onde os indígenas desenvolveram um estilo próprio que posteriormente ficou conhecido como marajoara (AMBONI, 1997). Os índios brasileiros queimavam a argila no chão utilizando lenha, razão pela qual os artefatos descobertos apresentarem coloração escura, o que revela que foram “mal cozidos” (BELLINGIERI, 2003).

Os artefatos cerâmicos produzidos pelos índios brasileiros eram normalmente decorativos ou para acondicionamento e transporte de líquidos e alimentos. Foram os colonizadores europeus, no século XVI, que trouxeram as técnicas para fabricação de cerâmica utilitária, tais como telhas e tijolos (BELLINGIERI, 2003).

Em 1808, a família portuguesa, fugindo das tropas francesas de Napoleão Bonaparte, em uma grande frota escoltada por navios de guerra britânicos, chegou ao Brasil e acelerou o desenvolvimento da sua colônia tropical. Desde então, muitas edificações foram construídas para servir como casas, palácios, igrejas, teatros, repartições governamentais, etc., utilizando principalmente tijolos de barro (CORRÊA, 2012).

A partir do final do século XIX o setor cerâmico se organizou como atividade industrial, acompanhando o desenvolvimento socioeconômico vivenciado pelo país (BELLINGIERI, 2003). No entanto, o grande avanço do setor cerâmico nacional só ocorreu, efetivamente, a partir da década de 1960, com a implementação de políticas públicas habitacionais, tais como

a instituição do Sistema Financeiro da Habitação e do Banco Nacional da Habitação (CABRAL JUNIOR et al., 2019a).

2.1.2 Principais segmentos

O setor cerâmico possui uma grande variedade de produtos, sendo dividido em subsetores em função de fatores como matéria-prima, propriedades físico-químicas e área de utilização. Em geral, o setor cerâmico é dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha (ou estrutural), cerâmica branca, revestimentos, refratários, isolantes térmicos, fritas e corantes, abrasivos, cerâmica avançada (ou de alta tecnologia), vidro, cimento e cal.

- **Cerâmica vermelha:** compreende os materiais de coloração avermelhada utilizados na construção civil: tijolos, blocos de vedação e estruturais, telhas, tubos cerâmicos e argila expandida. Também está presente em utensílios domésticos e objetos ornamentais, tais como filtros cerâmicos, vasos, potes e panelas de barro (LIMA et al., 2021).
- **Cerâmica branca:** Compreende os materiais constituídos tradicionalmente por um corpo branco ou claro. Normalmente são recobertos por uma camada fina e contínua de esmalte que, após a queima, adquire aspecto vítreo transparente. Esta camada tem por finalidade aprimorar os aspectos estéticos e higiênicos, tornar a peça impermeável e melhorar as propriedades mecânicas e elétricas. Fazem parte deste segmento as louças sanitárias, louças de mesa, isoladores elétricos para alta e baixa tensão, cerâmica artística (utilitária e decorativa) e cerâmica técnica para fins diversos, tais como químico, elétrico, térmico e mecânico (CABRAL JUNIOR et al., 2019c).
- **Revestimentos cerâmicos:** materiais com formato de placas utilizados na construção civil para cobrir e dar acabamento a superfícies lisas, tais como paredes, pisos, bancadas e piscinas (LIMA, E S, 2020). Recebem designações comerciais como pastilha, porcelanato, azulejo, grês, lajota, piso, etc (CABRAL JUNIOR et al., 2019d).
- **Materiais refratários:** classe de materiais cerâmicos que tem como objetivo suportar as condições críticas de certos processos e equipamentos industriais, como elevadas temperaturas, esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações (CABRAL JUNIOR et al., 2019a).
- **Isolantes térmicos:** materiais caracterizados pela sua capacidade de retardar a transferência de calor, característica necessária em diversos processos industriais. São classificados de acordo com a temperatura de uso e massa específica: refratários isolantes; isolantes térmicos não refratários, que compreendem produtos como lã de

vidro, lã de rocha e vermiculita expandida, que são empregados em temperaturas de até 1.100°C; fibras ou lãs cerâmicas que apresentam composições, tais como sílica, sílica-alumina, alumina e zircônia, que podem chegar a temperaturas de utilização de 2.000°C ou mais (ABECERAM, 2021).

- **Fritas e corantes:** são matérias-primas utilizadas em diversos segmentos cerâmicos que necessitam de acabamento superficial. Frita (ou vidrado fritado) é um vidro moído obtido a partir da fusão seguida de resfriamento rápido de mistura controlada de diferentes matérias-primas. Corantes constituem-se de óxidos puros ou misturas de pigmentos inorgânicos sintéticos, sendo usados como aditivos aos vidrados. Esses materiais combinados são aplicados na superfície do material cerâmico (processo de esmaltação) que, após a queima, forma uma camada vítrea. Este acabamento tem como objetivo aprimorar a estética, tornar a peça impermeável, aumentar a resistência mecânica e melhorar ou proporcionar características específicas (CABRAL JUNIOR et al., 2019b).
- **Abrasivos:** por utilizarem matérias-primas e processos semelhantes ao da cerâmica, constituem um segmento cerâmico. Os produtos abrasivos são destinados ao trabalho de corte, desbaste, retífica e polimento: lixas, discos de corte e desgaste, rebolos, pedras de afiar, etc (CABRAL JUNIOR et al., 2019a).
- **Vidro, cimento e cal:** são três importantes segmentos cerâmicos e que, por suas especificidades relacionadas às características de processo, matérias-primas, porte e relevância econômica, são muitas vezes considerados à parte da cerâmica (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).
- **Cerâmica avançada (ou de alta tecnologia):** materiais desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por processos rigorosamente controlados. Os produtos podem apresentar diferentes formatos e aplicações e são classificados de acordo com suas funções: mecânicas, químicas, térmicas, biológicas, eletrônicas, ópticas, magnéticas e nucleares. As principais aplicações são em naves espaciais, usinas nucleares, ferramentas de corte, implantes, aparelhos de som e vídeo, sensores (umidade, gases e outros), satélites, brinquedos, acendedores de fogão, etc (CAVALCANTE, 2005).

2.1.3 Matéria-prima

Segundo Brongniart (1844) a argila (Figura 2.1) é uma matéria-prima de granulação fina que apresenta grande abundância na superfície da terra, podendo ser facilmente manuseada e moldada quando úmida, endurecendo após ser aquecida a elevadas temperaturas, sendo utilizada em muitas aplicações práticas. Quimicamente, as argilas são materiais formados por silicatos hidratados de ferro, alumínio e magnésio, denominados argilominerais (TAVARES, 2018).

Figura 2.1 - Argila.



Fonte: Brazilian Kimberlite Clay (2021).

De acordo com Macedo et al. (2008), as argilas são materiais muito heterogêneos de tal forma que suas características e propriedades dependem da sua formação geológica e, conseqüentemente, do local de extração. Dependendo do tipo de produto, a argila é misturada com outras matérias-primas, tais como caulim, feldspato, rochas feldspáticas (pegmatito, granito e leucofilito), filito, talco, calcário, zircônio e quartzo (SILVA, 2018; CABRAL JUNIOR et al., 2019a, 2019b). Tais misturas tem por finalidade a obtenção de uma massa que proporcione as propriedades desejadas para cada tipo de produto, bem como garantir a qualidade do mesmo (ausência de defeitos) e reduzir custos, principalmente energéticos, durante o processamento.

Na determinação da matéria-prima para a fabricação de produtos cerâmicos (massa cerâmica), muitos fatores devem ser levados em consideração, tais como composição química, tamanho e distribuição do tamanho das partículas, pureza, plasticidade, cor de queima, reatividade, potencialidade de extração, custos (extração e transporte), dentre outros (CAVALCANTE, 2005; MACEDO et al., 2008).

A Tabela 2.1 relaciona os principais segmentos cerâmicos com seus produtos, matérias-primas utilizadas e algumas características do processo de manufatura (tipo de moagem, processo de conformação e temperatura de queima). O produto é classificado como cerâmica

silicada de base argilosa (ou tradicional) quando a composição principal é de matéria-prima plástica (argila comum ou argila plástica).

Tabela 2.1 - Principais setores cerâmicos, matérias-primas utilizadas e características do processo de fabricação.

Classificação			Produto	Matéria-prima								Moagem via úmida	Moagem via seca	Processo de conformação				Temperatura de queima (°C)					
Tipo de cerâmica	Setor			Plástica			Não-plástica							Extrusão	Torneamento	Prensagem	Colagem	800	900	1000	1100	1200	>1200
				Argila comum	Argila plástica	Caulim	Feldspato	Filito	Talco	Calcário	Quartzo												
Cerâmica silicada de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica vermelha	Blocos, lajes	P										P									
			Telhas	P				O						P		P							
			Agregado leve	P								O		P									
	2	Cerâmica branca	Grés sanitário		P	S	P		O		S	O	P										
			Porcelana mesa		P	P	P				P		P		S	S		O					
			Porcelana elétrica		P	P	P				P		P		S	S		O					
			Faiança		P	O	S	S	S	P	S		P					P					
	3	Cerâmica de revestimento	Pisos rústicos	P										P									
			Pisos via seca	P									P				P						
			Azulejos		P	P							P				P						
			Piso gresificado	O	P								P		O		P						
			Grés porcelanato		P		P						P				P						
Outras	4	Refratários			O					O	P												
	5	Isolantes				O				O	P												
	6	Especiais								O	P												
	7	Cimento	S							P	S	O		P									
	8	Vidro				S				S	P	P											
P	Processo ou composição principal (>20%)		S	Processo ou composição secundária (<10%)								O	Processo ou composição ocasional										

Fonte: MOTTA; ZANARDO; CABRAL JÚNIOR (2001).

As argilas plásticas apresentam granulometria muito fina (partículas menores que 2 µm) e necessitam de uma elevada quantidade de água para desenvolver a plasticidade. Devido ao elevado grau de compactação, a remoção de umidade durante o processo de secagem é dificultada, aumentando as chances de formação de trincas e outros defeitos, conforme estudo desenvolvido por Zaccaron et al. (2021). Para reduzir a plasticidade da massa e,

consequentemente, facilitar o processo de manufatura, a argila plástica é misturada com argilas mais arenosas e materiais não plásticos, obtendo-se uma distribuição de tamanho de partículas mais adequada para processamento e às características de qualidade desejadas para o produto acabado (PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997).

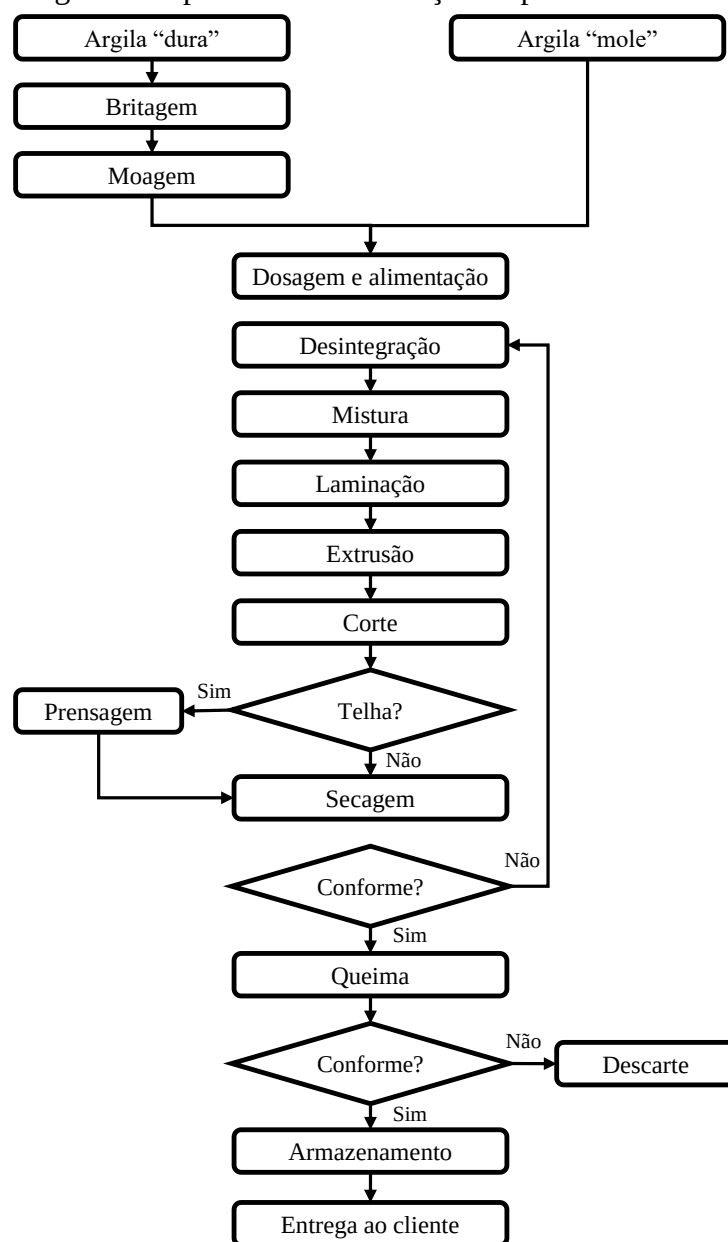
Uma amostra de argila pode ser classificada como meio poroso, onde os poros são normalmente preenchidos com água no estado líquido ou gasoso (KOWALSKI, 2012). A água de conformação é a água que se encontra entre partículas minerais nos capilares e que pode se mover livremente entre eles. Esta água de conformação pode ser dividida em dois tipos: água intersticial, que preenche os poros das partículas e água de plasticidade (ou água livre), que se localiza entre as partículas argilosas, separando-as e facilitando a trabalhabilidade no processo de conformação (VIEIRA; FEITOSA; MONTEIRO, 2003). Como é apresentado adiante, a água de plasticidade é a primeira a ser removida durante a etapa de secagem, sendo responsável pela retração da peça.

2.1.4 Processo de manufatura

Os principais estágios no processo de fabricação de produtos cerâmicos são: extração e preparação da matéria-prima (por moagem via seca ou via úmida), conformação (por extrusão, prensagem ou fundição), secagem e queima. Dependendo do tipo de produto, outras etapas também podem existir, tais como esmaltação e decoração (FERRER et al., 2015). As Figuras 2.2 e 2.3 ilustram os fluxogramas das etapas do processo de fabricação de produtos da indústria de cerâmica vermelha e de louças sanitárias, respectivamente.

O processo produtivo de cerâmica vermelha é bastante difundido no mundo todo, apresentando pequenas variações dependendo das características da matéria-prima, equipamentos disponíveis e produto final (LIMA et al., 2021). Se a argila disponível é do tipo “dura”, ela deve passar pelas etapas de britagem e moagem, que normalmente são dispensáveis para argilas “moles”. Enquanto algumas empresas utilizam equipamentos de baixa eficiência e processos rudimentares, com forte dependência da mão-de-obra, outras empregam equipamentos de elevada eficiência e processos sofisticados, permitindo a automação e, consequentemente, maior grau de produção. Dependendo do produto final, algumas etapas complementares serão necessárias, como é o caso da produção de telhas e vasos, em que as peças deverão ser prensadas e torneadas, respectivamente, no formato desejado antes de serem submetidas ao processo de secagem.

Figura 2.2 - Fluxograma do processo de fabricação de produtos da cerâmica vermelha.

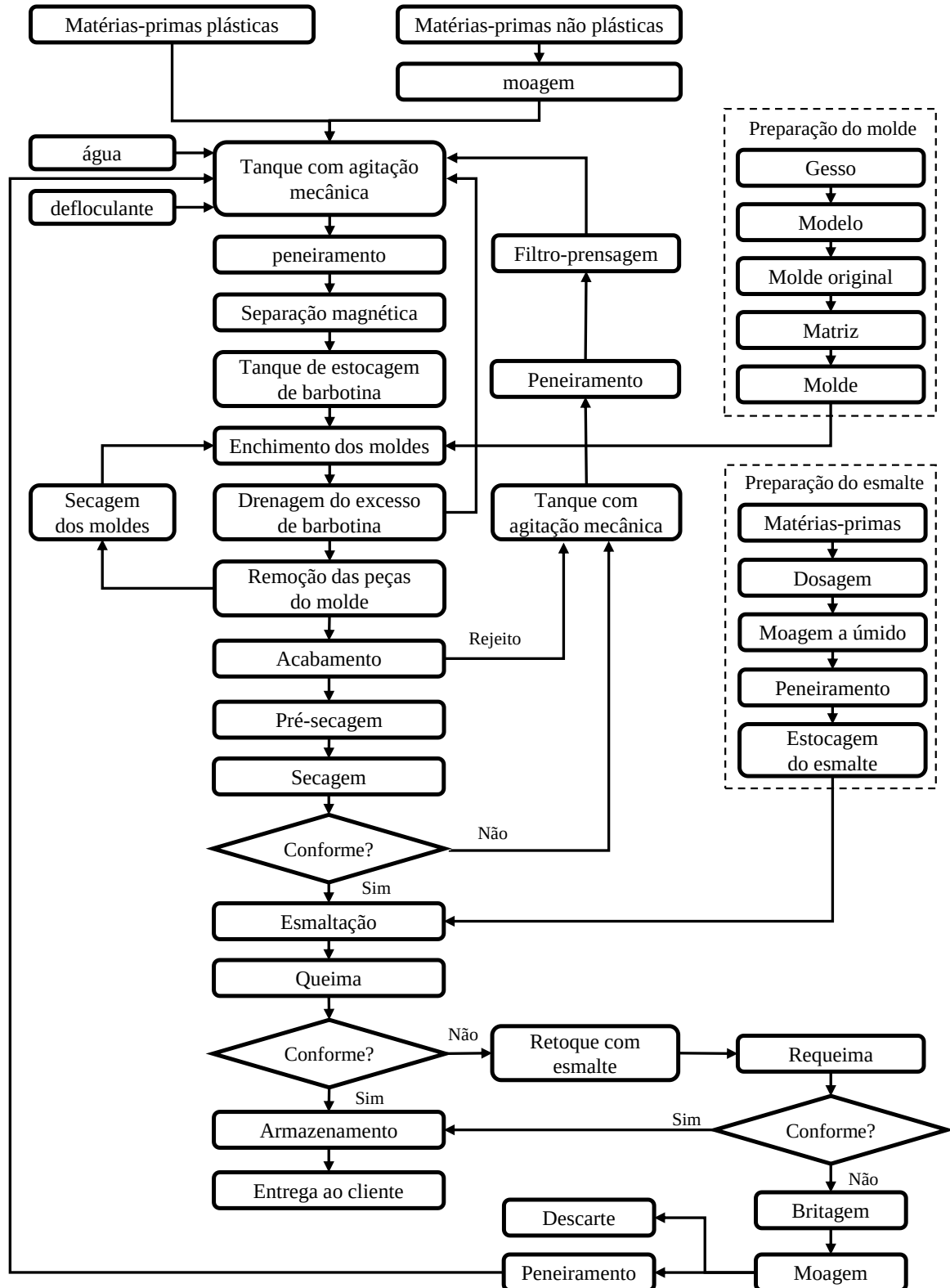


Fonte: Adaptado de CABRAL JUNIOR et al. (2019a).

A massa cerâmica para fabricação de louças sanitárias é composta por matérias-primas plásticas (argila e caulim) e não plásticas (feldspato, filito e quartzo) (SILVESTRI et al., 2020). De modo geral, as matérias-primas não plásticas são moídas a seco, até atingirem a granulometria adequada, para então serem misturadas com as matérias-primas plásticas, água e defloculante (usualmente silicato de sódio) em tanques com agitação mecânica (CAVALCANTE, 2005). A polpa assim obtida, conhecida como barbotina, é peneirada e bombeada para o setor de fundição, onde é feita a colagem das peças sanitárias em moldes de gesso ou de resina (CABRAL JUNIOR et al., 2019b). Depois de moldadas, as peças passam

pelas etapas de pré-secagem, secagem, esmaltação e queima para então serem estocadas e entregues ao cliente.

Figura 2.3 - Fluxograma do processo de fabricação de louças sanitárias.



Fonte: Adaptado de CAVALCANTE (2005) e CABRAL JUNIOR et al. (2019b).

A produção de revestimentos cerâmicos é bastante similar a produção de louças cerâmicas. As principais diferenças são que para o caso de revestimentos cerâmicos a mistura é moída e homogeneizada em moinhos de bola, em meio aquoso, seca e granulada em atomizador (spray dryer), conformada por prensagem a seco, para seguir então para as etapas de secagem, esmaltação / decoração e queima (LV et al., 2019).

a) Extração, recebimento e preparação da matéria-prima

O processo de fabricação de materiais cerâmicos se inicia com a extração de argila, que ocorre a céu aberto, preferencialmente nos meses de menor precipitação, utilizando pás carregadeiras, escavadeiras, tratores de esteira com lâmina e outros equipamentos (TAVARES, 2018).

Após a extração, a argila é entregue aos depósitos para posterior preparação. Ao receber a matéria-prima, é recomendado que o responsável técnico faça a coleta de uma pequena amostra para ensaio de resíduo para comprovar a qualidade da mesma, haja vista que é muito mais fácil identificar problemas nessa etapa do que após a secagem ou queima do produto (FIEMG; FEAM, 2013). Os autores também sugerem que a argila passe por um período de descanso, preferencialmente coberto com lona plástica, para acelerar o processo de decomposição da matéria orgânica e sais solúveis e, conseqüentemente, melhorar os resultados na conformação do produto acabado.

As argilas na forma de rochas sedimentares (táguas) devem passar por um processo de beneficiamento, que consiste em aplicar técnicas de cominuição, isto é, operações de britagem seguidas de moagem com o intuito de fragmentar o minério em partículas menores (ZACCARON, 2018).

Na indústria de cerâmica vermelha, a próxima etapa do processo é realizar a dosagem e alimentação das diferentes argilas, normalmente em um caixão alimentador, com intuito de obter a formulação desejada para a massa cerâmica. A formulação da massa é normalmente realizada de forma empírica pelo ceramista, envolvendo a mistura de uma argila “gorda”, composta essencialmente de argilominerais e caracterizada pela granulometria fina e alta plasticidade, com uma argila “magra”, rica em quartzo e menos plástica, que auxilia na remoção de umidade durante as etapas de secagem e queima (CABRAL JUNIOR et al., 2019a).

Em seguida, a massa passa por um desintegrador que tritura os pedaços maiores de argila, facilitando as operações subsequentes (LIMA et al., 2021). Posteriormente, a matéria-prima segue para o misturador, onde é adicionada água até que a massa cerâmica adquira a

plasticidade necessária para a etapa de conformação. A quantidade de água deverá ser controlada, pois a sua adição em baixa quantidade dificultará a conformação. Água em excesso poderá implicar em maior consumo energético e formação de fissuras e outros defeitos visíveis apenas após a etapa de queima (SANTOS, 2019).

Por fim, a massa cerâmica passa pelo laminador, constituído de dois cilindros que trabalham em rotações contrárias e velocidades distintas, visando a fragmentação dos aglomerados que não foram retidos nos passos anteriores (ZACCARON, 2018).

b) Conformação mecânica

Há diversas maneiras de proporcionar a forma desejada aos produtos cerâmicos e a definição do processo depende fundamentalmente da geometria e características da peça e plasticidade da matéria-prima (LIMA et al., 2021). Para a maioria dos produtos da indústria cerâmica, em que a geometria da peça é mais simples, a forma é alcançada após as etapas de extrusão e corte (HÄNDLE, 2007). Exemplos de produtos que passam pelas etapas de extrusão e corte são tijolos, telhas, blocos cerâmicos e tubos cerâmicos.

A extrusão é uma operação que consiste em forçar, por pressão, a massa cerâmica a passar por uma matriz com dimensões e formato apropriados ao tipo de peça a ser produzida (FIEMG; FEAM, 2013). Esta operação é comumente empregada em produtos de seção transversal constante, apresentando elevada produtividade e grande importância para homogeneização e retirada do ar da massa cerâmica (ALMEIDA, 2009).

O bloco material contínuo que sai da extrusora é então cortado nos tamanhos padronizados por meio de uma cortadeira manual ou automática. O corte automático opera em sincronia com o deslocamento do bloco de extrusão, possibilitando uma maior produção de peças quando comparado com o corte manual (LIMA, E S, 2020).

Para o caso de produtos com geometrias complexas, geralmente utiliza-se um processo conhecido como colagem, ou fundição, em alusão ao processo de fabricação de peças metálicas em que o molde é preenchido com metal líquido.

O processo de fundição, comumente empregado na indústria de louças sanitárias, consiste em preencher um molde poroso (normalmente de gesso) com a barbotina proveniente da etapa de preparação da matéria-prima. A suspensão (barbotina) permanece no molde por um período de tempo suficiente para que a água contida nela seja absorvida pelo gesso. Com a difusão da água para o interior do molde, que ocorre devido à diferença de pressão, as partículas sólidas da barbotina vão se acumulando na superfície do molde, formando, assim, uma parede com o formato interno do molde. A absorção da água pelo molde reduzirá à medida que a parede torna-

se mais espessa, até a formação completa da peça a verde (crua) (COLLA JUNIOR, 2004; BEHEARY; EL-MATARY, 2012).

À medida que a água é absorvida pelo molde, ocorre uma retração volumétrica na peça a verde, facilitando assim a sua retirada do molde. Posteriormente, é realizado um acabamento na peça, com o intuito de reparar fissuras e remover as rebarbas, pontas e excesso de material oriundos da fundição (FORTUNA; FORTUNA; MARTINI, 2017).

Devido a absorção de água, o molde adquire um elevado teor de umidade, que acaba prejudicando a fundição de futuras peças. Desta forma, é necessário reduzir a umidade do molde para que uma nova peça seja confeccionada. Normalmente a secagem do molde é realizada através da ventilação de ar quente e/ou injeção de ar comprimido em canais internos pré-confeccionados nos moldes de gesso (CAVALCANTE, 2005).

c) Processamento térmico

Após a etapa de conformação, as peças são submetidas ao processamento térmico, que consiste nas operações de secagem e queima. É no processamento térmico que ocorrem a remoção de umidade, transformações de estrutura e composição do material, responsáveis pela obtenção das propriedades finais como porosidade, cor, brilho, resistência à flexão, às elevadas temperaturas, ao gretamento, ao ataque de agentes químicos, entre outros (PAULETTI, 2001).

A secagem é um processo termodinâmico por meio do qual a umidade contida no sólido é removida por evaporação mediante o fornecimento de uma quantidade elevada de energia térmica, sendo considerada uma etapa delicada e complexa do processo de fabricação de materiais cerâmicos (SILVA et al., 2020).

É fundamental que o material cerâmico seja submetido ao processo de secagem para garantir que o mesmo possua a resistência e consistência durante a queima (CADÉ; NASCIMENTO; LIMA, 2005). Caso a umidade da peça não seja removida durante a secagem, a elevada temperatura no forno forçará a saída da água durante o processo de queima, elevando as chances de formação de defeitos e, até mesmo, de explosão do produto (SILVA et al., 2011; ALMEIDA et al., 2014).

A secagem das peças cerâmicas geralmente ocorre dentro de câmaras de secagem e visa reduzir o teor de umidade das peças de 22-25% para algo em torno de 0-1% após o processo (BROSNAN; ROBINSON, 2003).

Durante o processo de secagem, o material cerâmico sofre retração volumétrica (encolhimento) à medida que os espaços que eram ocupados pela água dentro do material se

esvaziam após a evaporação (SANTOS et al., 2018; ZACCARON et al., 2021). Esse fenômeno de encolhimento não só resulta em variações dimensionais na peça, mas também é responsável pela formação de tensões internas (OUMMADI et al., 2020). Dessa forma, é importante que o processo de secagem seja cuidadosamente controlado para reduzir tais tensões e, consequentemente, a formação de defeitos no produto.

Para o caso de louças sanitárias, a secagem das peças ocorre em duas etapas, sendo a primeira uma perda de umidade para o ambiente (pré-secagem ou secagem à verde), que normalmente ocorre no próprio setor de fundição, por um período que varia de um a três dias, dependendo do tipo de produto (FORTUNA et al., 2017), reduzindo o teor de umidade das peças até aproximadamente 13% (MOREIRA, 2016). A temperatura do ar no setor de pré-secagem é inferior a 40°C e a umidade relativa pode ultrapassar 80% (SOKOLOV; GAK, 1959; BROSNAN; ROBINSON, 2003). Em seguida, as peças são inseridas em uma estufa ou secador contínuo, com controle de umidade e temperatura (entre 60 e 90°C) onde permanecem por mais 7 a 9 horas.

Ao sair do secador, normalmente as peças passam por uma rápida inspeção visual para detecção de defeitos. Se alguma não conformidade for identificada, a peça é retirada da linha de produção e o material é reaproveitado na etapa de preparação da matéria-prima. Após a secagem a peça fica sensível a choques, devendo-se evitar que sofram trepidações no transporte entre o secador e o forno (FIEMG; FEAM, 2013)

Além disso, é recomendável que o material seja encaminhado o mais rapidamente possível para o forno para evitar a reabsorção de umidade do ambiente. Se o intervalo de tempo para o transporte do material entre os equipamentos é elevado e a umidade do ambiente é alta, o processo de reabsorção pode provocar expansões e alterações nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas da peça, levando a formação de defeitos durante a etapa de queima (MUÑOZ et al., 2016). Vale ressaltar que para louças sanitárias e revestimentos cerâmicos, as peças passam pelo processo de esmaltação antes de serem encaminhadas para o forno (LV et al., 2019).

A etapa de queima consiste em submeter as peças a elevadas temperaturas em um forno, que para a maioria dos produtos situa-se entre 800°C e 1000°C (FIEMG; FEAM, 2013; TAVARES, 2018), sendo responsável por uma série de transformações físico-químicas, tais como perda da massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem (sinterização) das partículas (MORAIS, 2011). A queima pode ser realizada em fornos intermitentes ou contínuos, e está dividida em três estágios:

- Aquecimento até a temperatura desejada;
- Permanência durante certo tempo na temperatura máxima;
- Resfriamento até temperaturas inferiores a 200°C.

Dependendo do tipo de produto e da tecnologia empregada, a queima pode variar de algumas horas até vários dias.

d) Expedição

A expedição é a última etapa do processo produtivo de materiais cerâmicos, podendo ser subdividida nas seguintes etapas (AVELINO, 2018).

- Inspeção e controle de qualidade: realizado na saída do forno, rejeitando as peças trincadas, queimadas ou com outro tipo de defeito.
- Armazenamento (ou estocagem): realizado em área coberta, permanecendo no local até que haja demanda pelo produto.
- Entrega ao cliente: efetuada através de caminhões por vias rodoviárias, utilizando veículos próprios ou serviços terceirizados.

Normalmente o controle de qualidade é feito somente por meio de inspeção visual. Entretanto, algumas empresas realizam análises e testes de laboratório em amostras a fim de detectar possíveis defeitos que não são perceptíveis a olho nu.

Para louças cerâmicas, caso sejam identificados defeitos reparáveis, como pequenos furos ou aparência inadequada do esmalte, a peça é retrabalhada, com inserção do próprio esmalte e direcionada para um processo de requeima. Após a requeima, o produto passa por uma nova inspeção para verificar se os padrões de qualidade foram atendidos e, consequentemente, definir se a mesma será estocada ou rejeitada (BEHEARY; EL-MATARY, 2012; FORTUNA et al., 2017). Caso a peça seja rejeitada após a requeima, a mesma é cominuída (britada e moída) sendo parcialmente reincorporada à massa cerâmica e parcialmente enviada para aterros ou empresas parceiras para aproveitamento em outros produtos (CABRAL JUNIOR et al., 2019b). É importante ressaltar que todas as bacias sanitárias são testadas funcionalmente, em equipamentos apropriados, antes da sua liberação final (CAVALCANTE, 2005).

2.1.5 Defeitos do processo de fabricação

O processamento térmico deve ser realizado de forma controlada para evitar a formação de defeitos e garantir que os produtos serão capazes de cumprir suas respectivas funções. Além da temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e tempo de permanência, fatores como

distribuição e disposição das peças nos secadores e fornos podem interferir na qualidade do produto. Entretanto, nem todos os defeitos que se manifestam nas peças na saída do secador ou do forno têm sua origem nas etapas de secagem e queima, respectivamente. Uma homogeneização incorreta da massa cerâmica, por exemplo, gera retrações locais diferenciais (maiores contrações nos locais de maior umidade), resultando em fissuras (SANTOS, 2019). Diante disto, os principais defeitos oriundos do processo de manufatura de produtos cerâmicos são os seguintes:

- **Empenamentos:** Trata-se de uma deformação na peça causada por fatores como secagem não uniforme do produto em que uma face seca mais rapidamente do que as demais, formando gradiente de tensões no interior do produto (SILVA, 2009).
- **Trincas:** São pequenas fissuras que geralmente iniciam-se nas bordas e propagam-se para o centro da peça devido à secagem rápida (temperatura e velocidade do ar de secagem elevadas). As trincas também podem ter origem na etapa de queima, ocorrendo durante o aquecimento ou resfriamento. As trincas de aquecimento são pouco sinuosas, abertas e de bordas dentadas, enquanto que as de resfriamento são muito finas de bordas fechadas, normalmente em forma de S (LIMA et al., 2021).
- **Eflorescência:** São depósitos salinos que se formam na superfície externa do material cerâmico, apresentando cores e manchas indesejáveis. Se exposto ao ambiente externo, o material cerâmico pode absorver a umidade do ar, da água da chuva e do solo, dissolvendo os sais contidos nos mesmos. Entretanto, se o ambiente externo se torna mais seco, ocorre o caminho inverso: a água da superfície evapora, dando lugar a cristalização dos sais (MENEZES et al., 2006).
- **Coração negro:** São manchas negras e/ou cinzas que surgem ao longo da seção transversal do produto após a queima, estando associado à presença de compostos contendo carbono. A existência do “coração negro” está relacionada com a escassez de oxigênio, impedindo a oxidação completa da matéria orgânica e dos compostos de carbono (DAMIANI et al., 2001).

2.1.6 Destino das peças cerâmicas defeituosas

É importante enfatizar que, independentemente do produto final, caso seja identificado algum defeito no material até o final da etapa de secagem, o mesmo poderá ser reintroduzido no processo de fabricação, mais especificamente na etapa de preparação da matéria-prima.

Segundo Tavares (2018), se o defeito for identificado após a etapa de queima, o material não poderá ser reincorporado ao processo de fabricação pois as transformações físico-químicas ocorridas nesta etapa conferem outras características ao material. Quando o defeito não pode ser consertado, a partir de uma requeima por exemplo, o material é descartado da produção, sendo quebrado e destinado para uso em outras aplicações, tais como indústria de cimento, aterros, etc.

Entretanto, segundo Cabral Junior et al. (2019b), cerca 5% da massa cerâmica utilizada na indústria de louças sanitárias é composta de refugo queimado (pitcher), fazendo com que boa parte das peças reprovadas após a requeima sejam reincorporada no processo de fabricação.

Em contrapartida, Oliveira et al. (2016) realizaram estudo para avaliar a reincorporação do resíduo de telhas queimada na massa cerâmica utilizada na produção de blocos cerâmicos de vedação. Para uma concentração de 5% de resíduo na massa cerâmica, foi observado uma melhoria nas propriedades mecânicas do produto final, viabilizando uma alternativa para a indústria cerâmica reduzir custos e impactos ambientais gerados pelo descarte de resíduos sólidos.

2.2 O processo de secagem

2.2.1 Fundamentos

A secagem consiste na remoção parcial de uma fase líquida ou gasosa (normalmente água) da matéria sólida, mediante fornecimento de energia, sendo considerada uma importante operação para diversos produtos industrializados. O processo de secagem envolve vários fenômenos físicos que são responsáveis pela redução de umidade no material, como transferências de calor, massa, momento linear e variações dimensionais (ARAÚJO; DELGADO; LIMA, 2017). Os três modos de transferência de calor são (BROSNAN; ROBINSON, 2003; CENGEL, 2007; BERGMAN et al., 2011):

- **Condução:** transferência de calor em um meio estacionário, que pode ser sólido ou líquido, devido a um gradiente de temperatura;
- **Convecção:** transferência de calor entre a superfície de um sólido e um fluido em movimento, que estão em temperaturas distintas;
- **Radiação:** transferência de calor entre um corpo e outro por ondas eletromagnéticas.

A secagem é um processo acompanhado do deslocamento da umidade do interior do material em direção a superfície, evaporação da umidade e contrações no objeto (KOWALSKI, 2012). Tais contrações devem ser minimizadas durante o processo para evitar o surgimento de

defeitos no produto. Desta forma, a secagem é influenciada por condições externas, como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem (FORD, 2013). Além disto, propriedades do material, como as difusividades térmica e de massa e os coeficientes de expansão térmica e de umidade também influenciam no processo (KEUM; JEONG; AUH, 2000).

De acordo com Kowalski (2012), a secagem pode ser realizada por processo térmico, mecânico ou físico-químico. A secagem mecânica permite reduzir apenas uma parte da umidade (água livre) e o método de secagem físico-químico é realizado utilizando agentes químicos para absorver a água do produto. Este último método não tem aplicações industriais e, portanto, não é abordado neste trabalho. Diante deste fato, a secagem térmica é comumente entendida como um processo que utiliza algum tipo de energia térmica com a finalidade de reduzir o teor de umidade de um corpo. Tal energia térmica pode ser fornecida para o produto por uma corrente de ar quente (secagem convectiva), por radiação solar (secagem solar), por micro-ondas, por infravermelho, por contato entre as partículas, como também por uma combinação entre elas. Além disso, os parâmetros do processo como velocidade, temperatura e umidade relativa do ar de secagem, podem variar ao longo do tempo, caracterizando-se, assim, uma secagem intermitente.

Na secagem convectiva, método mais empregado em indústrias cerâmicas, o ar quente transfere calor para a superfície do material por convecção, aquecendo-o e criando um gradiente de temperatura no seu interior (transferência de calor por condução). O aquecimento da água presente no sólido, por sua vez, aumentará a pressão de vapor, criando condições favoráveis para a migração dessa água do interior para a superfície do sólido (formação de um gradiente de umidade no interior do sólido). Por fim, a água é evaporada na superfície e absorvida pelo ar de secagem devido a uma diferença de pressão parcial do vapor d'água entre a superfície do material e o ar que o circunda, criando novos gradientes de temperatura e umidade no interior do sólido.

O teor de umidade representa a quantidade de água contida em um material e representa um parâmetro de grande importância na secagem. A curva de secagem, por exemplo, é um gráfico que relaciona o teor de umidade do produto em função do tempo.

As duas formas de representar o teor de umidade são em base seca e em base úmida, como segue (BROSNAN; ROBINSON, 2003):

$$\text{Teor de Umidade (\% base seca)} = \frac{\text{Massa da água na amostra}}{\text{Massa da amostra seca}} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$\text{Teor de Umidade (\% base úmida)} = \frac{\text{Massa da água na amostra}}{\text{Massa da amostra úmida}} \times 100\% \quad (2.2)$$

onde a massa seca é a massa final do material após a remoção da água no processo de secagem até que a amostra atinja um peso constante, e massa úmida é a massa da amostra medida em qualquer tempo durante o processo de secagem.

É muito mais comum utilizar o teor de umidade em base seca que, de acordo com Ford (2013), facilita o entendimento de alterações físicas que ocorrem durante a secagem, como o encolhimento.

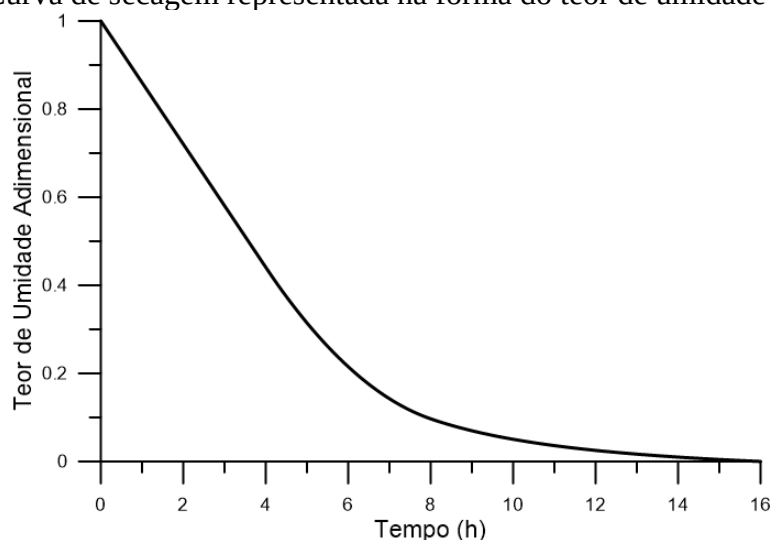
É uma prática comum utilizar o teor de umidade médio adimensional em função do tempo de processamento na apresentação da curva de secagem (BATISTA; NASCIMENTO; LIMA, 2008; BATISTA et al., 2009; SILVA et al., 2011, 2012, 2016; BRITO et al., 2016; ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017), como pode ser observado na Figura 2.4. Esse parâmetro de secagem, em cada instante de tempo pode ser escrito como segue:

$$\bar{M}^*(t) = \frac{\bar{M}(t) - \bar{M}_e}{\bar{M}_0 - \bar{M}_e} \quad (2.3)$$

onde $\bar{M}(t)$ é o teor de umidade médio no instante de tempo t , $\bar{M}_e$ é o teor de umidade de equilíbrio médio e $\bar{M}_0$ é o teor de umidade médio inicial.

A partir da Figura 2.4, observa-se que durante o processo de secagem, o teor de umidade adimensional do material varia de 1, quando $\bar{M} = \bar{M}_0$, até 0, quando $\bar{M} = \bar{M}_e$. O teor de umidade no final do processo de secagem, ou teor de umidade de equilíbrio ($\bar{M}_e$), praticamente nunca é igual a zero, sendo fortemente dependente da estrutura do sólido, umidade relativa e temperatura do ar de secagem (ARAÚJO, 2019). Zagrouba et al. (2002) realizaram, experimentalmente, processos de secagem de amostras de argila variando as condições operacionais, observando que o aumento na umidade relativa do ar de secagem implica em um aumento no teor de umidade de equilíbrio médio.

Figura 2.4 - Curva de secagem representada na forma do teor de umidade adimensional.



2.2.2 Mecanismos de secagem

O entendimento dos mecanismos envolvidos na secagem permite, por exemplo, uma melhor compreensão dos defeitos que ocorrem durante o processo e das formas de como evitá-los (VIEIRA et al., 2003). Na secagem, a água deve mover-se do interior da peça até a superfície, onde ela evapora e é levada pela massa de ar (corrente de ar) no secador (BROSNAN; ROBINSON, 2003).

O fenômeno da migração de umidade em meios porosos durante o processo de secagem ainda não é totalmente compreendido (SILVA et al., 2016; KHAN et al., 2018). Alguns autores (HASATANI; ITAYA; HAYAKAWA, 1992; KETELAARS et al., 1992; ITAYA; TANIGUCHI; HASATANI, 1997; SILVA et al., 2011, 2012; LIMA et al., 2016), talvez por efeito de simplificação, consideram que durante a secagem o mecanismo de migração de umidade dominante é o transporte por difusão líquida, sendo, portanto, baseado na segunda Lei de Fick.

Entretanto, outros pesquisadores (ZANDEN, VAN DER; SCHOENMAKERS; KERKHOF, 1996; ZANDEN, VAN DER; TURNER; MUJUMDAR, 1996; SU, 1997; BATISTA et al., 2009; FORD, 2013) afirmam que o transporte de umidade acontece tanto na forma líquida quanto na forma de vapor, cada um predominando em certas etapas da secagem. Esses autores sugerem que o mecanismo de migração de umidade no interior do meio poroso é dominado pelo transporte por difusão líquida durante boa parte do processo de secagem e que somente no final do processo, em que as temperaturas são elevadas e o teor de umidade é baixo, o transporte de umidade acontece na forma de vapor, ou seja, a evaporação da água ocorre nos poros do material. Mais especificamente no segundo período de taxa decrescente, a água

contida nos poros é insuficiente para a migração líquida continuar e a migração da umidade na forma de vapor passa a ocorrer de forma predominante (FORD, 2013).

2.2.3 Curva de secagem

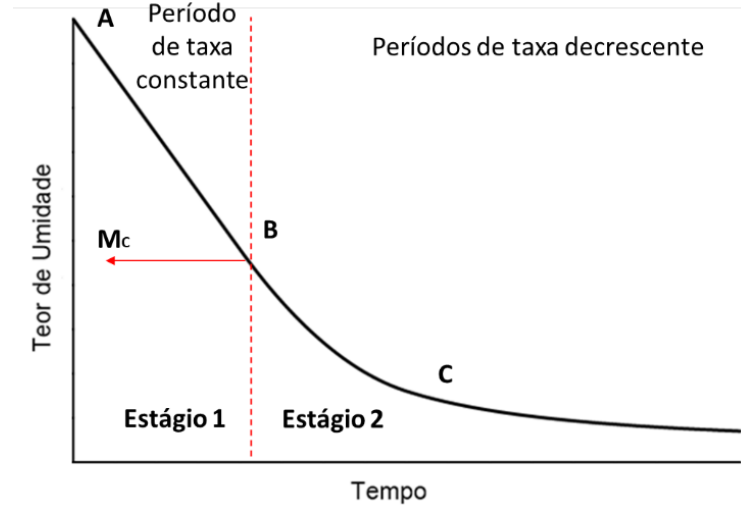
A maneira como o teor de umidade de um dado produto varia com o tempo durante um processo de secagem é conhecido como curva de secagem (Figuras 2.5 e 2.6). A secagem é normalmente dividida em três períodos diferentes, conforme a taxa de secagem (FORTES; OKOS, 1980; BROSAN; ROBINSON, 2003; FORD, 2013; OUMMADI et al., 2019):

- Período de taxa constante (ou primeiro estágio de secagem), no qual a taxa de evaporação da água contida no produto independe do teor de umidade no mesmo;
- Primeiro período de taxa decrescente, em que a taxa de secagem é uma função linear do teor de umidade.
- Segundo período de taxa decrescente, no qual a taxa de secagem apresenta uma relação curvilínea com o teor de umidade.

A curva da taxa (velocidade) de secagem em função do tempo apresenta um comportamento semelhante ao ilustrado na Figura 2.7, sendo obtida derivando a curva de secagem (Figura 2.5) com relação ao tempo. Para algumas situações, dependendo do tipo de material e das condições de secagem, não é possível diferenciar o primeiro e o segundo período de taxa decrescente. Nesses casos, a curva de secagem é dividida em um período de taxa constante e um único período de taxa decrescente, conforme Figura 2.7.

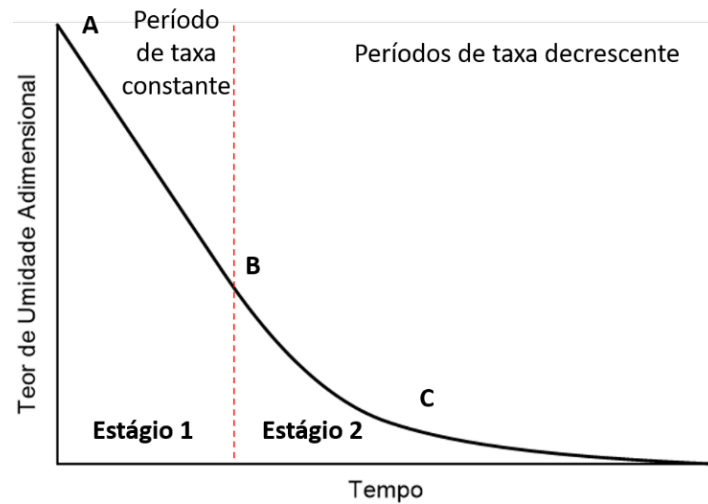
No primeiro estágio de secagem, a taxa de evaporação da água na superfície do produto é função das condições externas e independe do material a ser secado, sendo determinada pela taxa de difusão do vapor de água através da película estacionária de ar no entorno do material (camada limite de concentração) (FORD, 2013). A taxa de difusão, por sua vez, é proporcional a diferença entre a pressão parcial do vapor de água na superfície do material e a pressão parcial de vapor do ar de secagem. Além disso, a taxa de difusão cresce com o aumento da velocidade do ar de secagem devido à elevação dos coeficientes de transferência de calor e massa por convecção (ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017).

Figura 2.5 - Curva típica de secagem.



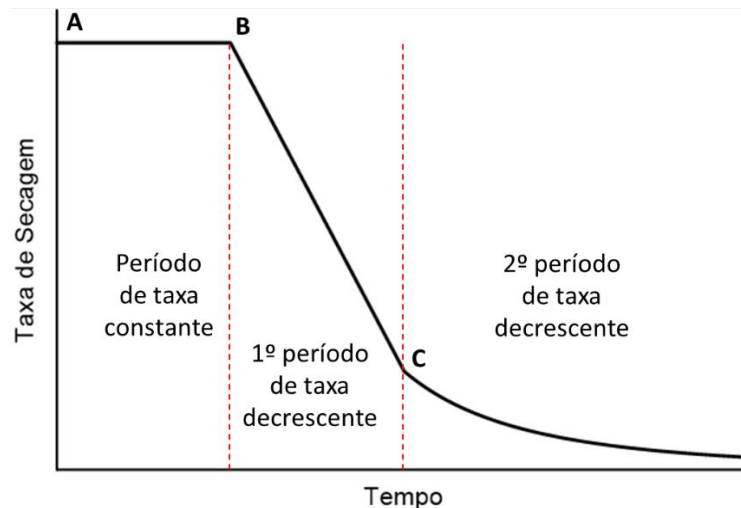
Fonte: Gomez; Magalhães et al. (2020).

Figura 2.6 - Curva típica de secagem representada na forma do teor de umidade adimensional.



Fonte: Gomez; Magalhães et al. (2020).

Figura 2.7 - Curva típica da taxa de secagem.



Fonte: Gomez; Magalhães et al. (2020).

No período de taxa constante, a superfície do material se comporta como uma superfície de água livre, ou seja, existe um filme de água cobrindo toda a superfície do meio poroso e este filme absorve todo o calor fornecido pelo ar de secagem. Este período de secagem ocorre enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto é suficiente para acompanhar a perda de água por evaporação na superfície (FORD, 2013).

Se a secagem for acelerada demasiadamente no início do processo (ar de secagem com elevadas temperatura e velocidade), ocorrerá o ressecamento da superfície do material, levando a uma notável e imediata redução da taxa de secagem no segundo estágio, impedindo a saída da umidade contida no interior do material, além de ocasionar deformações indesejadas, formação de trincas e outros defeitos que comprometem a qualidade do produto (ITAYA; HASATANI, 1996). Isto ocorre quando os poros, ainda cheios de água, mas muito estreitos, não transportam a umidade a uma taxa equivalente à da evaporação na superfície do produto. A superfície do material sofre então uma contração, dificultando ainda mais a transferência de umidade do interior para a superfície do produto, limitando a velocidade de secagem.

No período de taxa de secagem constante, considerando que o único mecanismo de transferência de calor entre o ambiente e a peça cerâmica é a convecção, a temperatura da superfície do produto é a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, fato observado por diversos pesquisadores (HASATANI et al., 1992, 1993; ITAYA et al., 1997; ZAGROUBA et al., 2002; MIHOUBI et al., 2004; BANASZAK; KOWALSKI, 2005). Outros pesquisadores observaram que a temperatura na superfície do produto no primeiro estágio de secagem foi maior que a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, sendo justificado pelo efeito da transferência de calor por radiação pelas paredes do secador (ITAYA; MABUCHI; HASATANI, 1995; ITAYA; MORI; HASATANI, 1999). A transição entre o período de taxa constante e o primeiro período de taxa decrescente é conhecido como teor de umidade crítico (M_c), sendo dependente do material e das condições de secagem (MARTINES-LOPEZ; LIRA-CORTES, 2013) e representado pelo ponto B nas Figuras 2.5–2.7. A partir do ponto B, a água líquida ainda flui do interior para a superfície do material e a evaporação ainda ocorre a partir da superfície, embora a mesma não seja água livre, mas sim água ligada (ou intersticial) (FORD, 2013).

No primeiro período de taxa decrescente, há uma redução significativa no fenômeno de encolhimento, de tal modo que a secagem pode ser conduzida sem risco de produzir grandes deformações, trincas, empenamentos ou outros tipos de defeitos no produto (BROSNAN; ROBINSON, 2003; KHALILI; BAGHERIAN; KHISHEH, 2014). Segundo Cussler (2009),

dependendo do produto, a evaporação da água livre, no período de taxa constante, pode causar 90% da mudança total na massa e a evaporação da água ligada, nos períodos de taxa decrescente, pode levar 90% do tempo total de secagem. Além disto, a taxa de difusão no interior do produto a ser secado controla a taxa de secagem (BROSNAN; ROBINSON, 2003), dependendo fortemente das condições de transporte de umidade dentro do material (KOWALSKI, 2012). Neste sentido, é muito comum aumentar a temperatura e a velocidade do ar após o teor de umidade crítico (M_c) ser atingido, com o intuito de acelerar o processo de secagem (BROSNAN; ROBINSON, 2003).

Outra característica do estágio de taxa decrescente é o aumento contínuo da temperatura do produto, a partir da temperatura de bulbo úmido até a temperatura do meio de secagem, momento em que o equilíbrio térmico é alcançado (KOWALSKI, 2012). A energia térmica fornecida pelo ar de secagem é transferida para a superfície do produto por convecção e a partir deste, para o interior do meio poroso por condução, elevando a temperatura do produto ao longo do processo.

No segundo período de taxa decrescente, a água residual dos capilares internos e a água da superfície é removida e a evaporação passa a ocorrer dentro do sólido e o vapor atinge a superfície por difusão através dos poros (FORD, 2013). No instante em que a curva da taxa de secagem intercepta o eixo das abscissas (Figura 2.7), a transferência de umidade do material para o ar de secagem se torna nula e, conseqüentemente, o equilíbrio é alcançado.

2.3 Secagem de materiais cerâmicos

2.3.1 Aspectos gerais

De forma geral, as peças cerâmicas podem ter seu teor de água reduzido de modo natural ou artificial. Na secagem natural as peças são secadas pelo ar ambiente em galpões cobertos (Figura 2.8), sendo dispostas em prateleiras ou simplesmente empilhadas no chão (ALMEIDA et al., 2013; ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017). A duração da secagem depende de fatores como temperatura e umidade relativa do ar de secagem, geometria da peça e ventilação do local, podendo levar períodos de até seis semanas (ALMEIDA et al., 2013; ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017). Apesar de ser bastante empregada em pequenas fábricas devido aos baixos custos de aquisição, operação e manutenção, a secagem natural apresenta algumas desvantagens: processo muito lento, manuseio excessivo das peças, baixo controle, ocupação de grandes áreas

para exposição das peças e necessidade de condições climáticas favoráveis (MUJUMDAR, 2006; ZACCARON et al., 2021).

Figura 2.8 - Secagem natural de tijolos cerâmicos em galpões cobertos.



Fonte: Kerplas Estufas (2021).

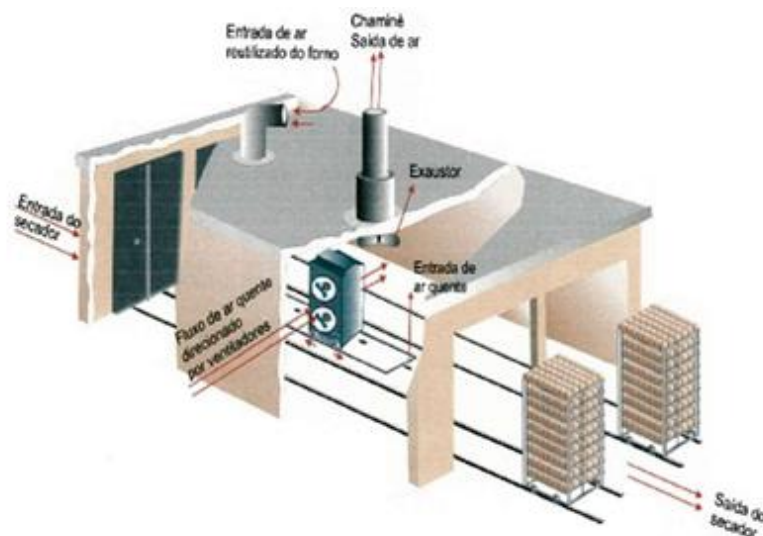
Com o objetivo de reduzir o tempo de secagem para valores entre 12 e 24 horas e garantir um maior controle sobre o processo, a secagem artificial é uma alternativa viável na produção de produtos cerâmicos. A mesma é realizada em câmaras de secagem (Figura 2.9) ou secadores contínuos (Figura 2.10), geralmente utilizando calor residual proveniente dos fornos na etapa de queima para obtenção de uma maior eficiência energética do processo (ALMEIDA et al., 2013; SILVA et al., 2016; ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017). Na secagem artificial, a temperatura do ar varia entre 50 °C e 100 °C e a umidade relativa pode exceder 80%. A Tabela 2.2 apresenta as principais vantagens de cada tipo de secagem.

Figura 2.9 - Câmara de secagem artificial.



Fonte: Progetti (2021).

Figura 2.10 - Esquema de um secador contínuo.



Fonte: Almeida (2009).

Tabela 2.2 - Tipos de secagem e suas principais vantagens.

Tipo de secagem	Vantagens
Natural	• Menor custo inicial • Menor custo de operação • Menor custo de manutenção • Requer menor conhecimento técnico do operador
Artificial	• Menor tempo de secagem • Maior produtividade • Maior capacidade de produção • Baixo manuseio de peças • Não depende de fatores climáticos • Menor área para realizar secagem • Maior controle do processo • Maior homogeneidade de secagem • Produto de maior qualidade

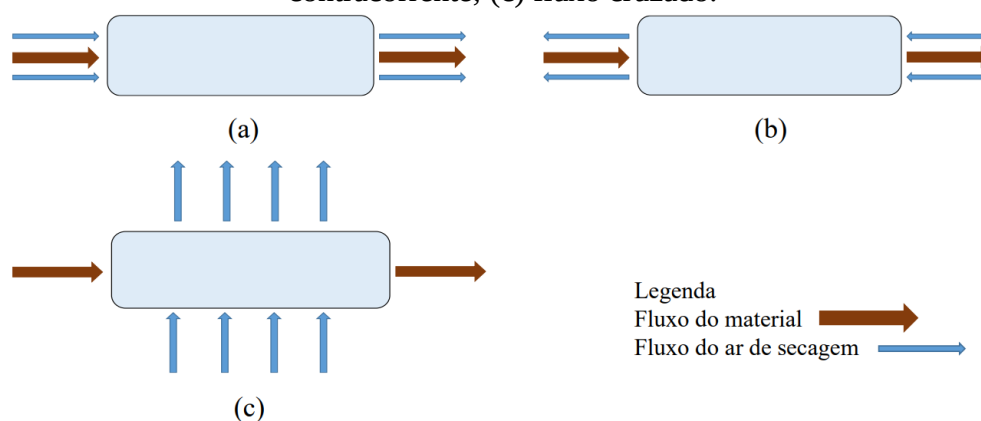
Brosonan e Robinson (2003) definem secadores como equipamentos que, pela transferência de energia, são capazes de criar um ambiente favorável para a retirada de umidade de um material úmido. A otimização do processo de secagem está diretamente relacionada ao secador, devendo este ser projetado ou selecionado de modo que uma combinação favorável de custo inicial, consumo energético e qualidade final do produto seja atendida.

De acordo com Facincani (1992), os secadores artificiais podem ser classificados como secadores intermitentes (ou estáticos), contínuos e semicontínuos. Nos secadores estáticos os produtos a secar ficam imóveis durante todo o processo, sendo então retirados através da mesma abertura pela qual foram colocados no interior do equipamento. São empregados para fabricação de peças especiais, complexas, de grande porte, com espessuras irregulares ou que exijam o máximo de flexibilidade e condições de secagem que variam bastante com o tempo. Como desvantagens, tem-se a baixa eficiência térmica, não sendo recomendável para grandes produções (TAVARES, 2018).

Os secadores contínuos são aqueles em que a carga e a descarga do material ocorrem de forma contínua e automática. São constituídos por várias vagonetas (carros transportadores), onde as peças são introduzidas no equipamento por uma abertura, percorrendo o secador sob as condições especificadas e retiradas por outra abertura na extremidade oposta. Como vantagens, destacam-se as maiores produtividade e eficiência energética e como desvantagens, tem-se o elevado custo inicial e menor flexibilidade de operação. Os secadores contínuos podem ser classificados, ainda, quanto ao movimento relativo entre o fluxo do produto e o fluxo do ar de secagem (Figura 2.11) em:

- Secador contínuo de fluxo concorrente: fluxos de material e ar de secagem são paralelos e apresentam o mesmo sentido.
- Secadores contínuos de fluxo contracorrente: fluxos de material e ar são paralelos e ocorrem em sentidos opostos.
- Secadores contínuos de fluxo cruzado: fluxos de material e ar são perpendiculares.

Figura 2.11 - Classificação dos secadores contínuos: (a) fluxo concorrente; (b) fluxo contracorrente; (c) fluxo cruzado.



Fonte: Tavares (2018).

Os secadores semicontínuos apresentam circulação interna de ar, sendo similares aos secadores contínuos quanto ao carregamento dos produtos e percurso das vagonetas, diferenciando-se apenas no ritmo empregado durante o processo. Quanto mais longos forem os turnos de produção e o ciclo de secagem, mais próximo os secadores semicontínuos serão dos secadores contínuos (SCHWOB et al., 2016).

Segundo Keey (1982), a escolha do tipo de secador deve ser feita levando-se em consideração critérios econômicos, capacidade de produção, custo e periodicidade da manutenção, facilidade de operação, tipo de produto e segurança.

2.3.2 Aspectos energéticos

A secagem é essencial para o processamento de grãos, frutas, legumes, têxteis, papel, madeira, pós, cerâmica, minerais, produtos farmacêuticos, e polímeros (GOMEZ; LIMA; et al., 2020), entre outros materiais, representando aproximadamente de 10 a 25% do consumo nacional da energia consumida em processos industriais (DEFRAEYE, 2014). Com o avanço da tecnologia aplicada ao setor industrial e o aprimoramento das técnicas relacionadas ao processo produtivo, os custos energéticos tornaram-se responsáveis por grande parte do custo total de produção das indústrias em decorrência do aumento da produtividade (GOMEZ; MAGALHÃES; et al., 2020).

A evaporação da água, em qualquer condição que ocorra, é um fenômeno físico acompanhado de forte absorção de calor. Por exemplo, para evaporar 1 kg de água nas temperaturas médias dos secadores industriais, consome-se de 2420 a 2500 kJ, isso sem levar em consideração a energia para elevar a temperatura do produto e as demais perdas intrínsecas ao processo de secagem (LEHMKUHL, 2004). Entre as perdas inevitáveis do processo de secagem, encontram a energia para aquecer as vagonetas, tubulações, paredes e demais componentes estruturais do secador, e a energia perdida para o exterior, seja devido ao isolamento insuficiente ou à falta de estanqueidade do secador (saída de ar quente e/ou entrada de ar frio). Desta forma, a energia útil efetivamente utilizada para evaporar a água do produto representa apenas uma parcela da energia total fornecida pelo ar de secagem (SILVA et al., 2020)

Alves et al. (2008) indicam que o processo de secagem de revestimentos cerâmicos tem uma participação de cerca de 30% no consumo de energia térmica, enquanto que o processo de queima é responsável pelos outros 70%. Esses valores são bem representativos, devendo ser considerados na análise do processo de manufatura de peças cerâmicas.

Brosnan e Robinson (2003) e Reed (1995) indicam que, ao se tomar os devidos cuidados durante a operação de secagem é possível minimizar o custo com energia térmica, além de obter um produto de melhor qualidade. APICER (2016) sugerem uma série de recomendações com a finalidade de promover um processo de secagem mais eficiente energeticamente:

- Realizar o controle automatizado das condições de operação (temperatura e umidade);
- Garantir melhor isolamento térmico nas paredes laterais do equipamento;
- Evitar o funcionamento do equipamento quando desnecessário;
- Otimizar a recirculação de ar nos secadores;
- Priorizar secadores horizontais em vez de secadores verticais, haja vista que os primeiros, em geral, apresentam ciclos de secagem mais curtos;
- Otimizar a passagem entre o secador e o forno, utilizando por exemplo a zona de pré-aquecimento do forno para finalizar o processo de secagem;
- Aproveitar o calor dos gases de exaustão dos fornos no processo de secagem;
- Aproveitar o calor residual do ar dos processos de secagem para outros fins;
- Garantir a limpeza e manutenção adequada de todos os componentes.

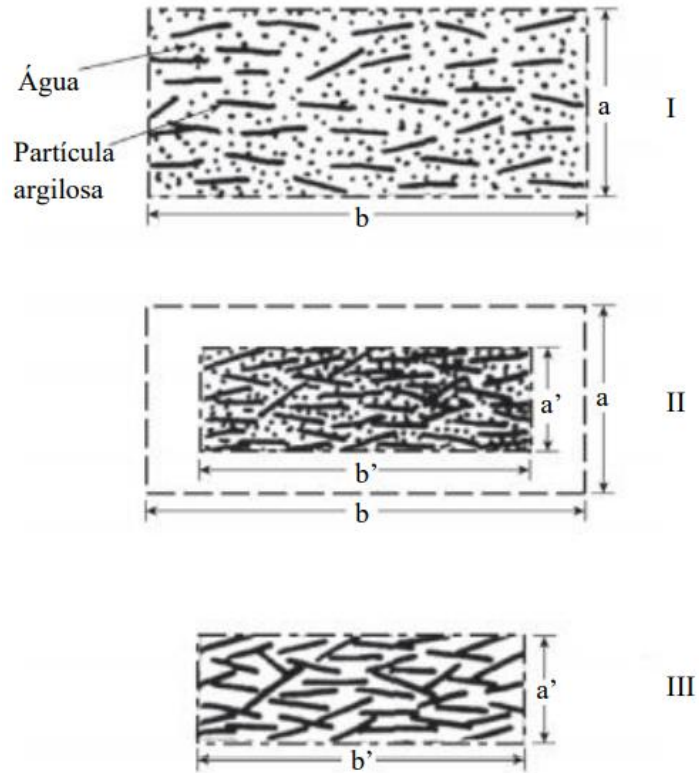
2.3.3 Aspectos mecânicos: retração do produto durante a secagem

A retração sofrida por produtos cerâmicos durante o processo de secagem é um parâmetro de grande importância tecnológica. A Figura 2.12 ilustra a eliminação da água de conformação e consequente retração de uma massa cerâmica. Em I está representado o sistema argila-água no início do processo de secagem. Em II, após um certo período de tempo, a água de plasticidade (água livre) já foi evaporada do material, promovendo uma retração volumétrica (encolhimento) quando comparado ao estágio inicial. Em II ainda há água intersticial (água ligada) nos poros, que por sua vez é eliminado em III. Observa-se que após a eliminação da água intersticial, a peça não apresenta retração em relação ao estágio II (VIEIRA et al., 2003).

O desenvolvimento da retração de secagem em função da perda de água de conformação é representado pela curva de Bigot (Figura 2.13). O ponto A indica, na ordenada E, o percentual de água de conformação na peça no início do processo de secagem e na abscissa, a retração total. A linha A-B representa o primeiro estágio de secagem, em que ocorre a eliminação da água plástica, sendo considerada a fase mais problemática da secagem, já que é acompanhada de elevada retração. A linha B-C representa o segundo estágio de secagem, caracterizada pela eliminação da água intersticial. A ordenada D separa os dois tipos de água de conformação. A

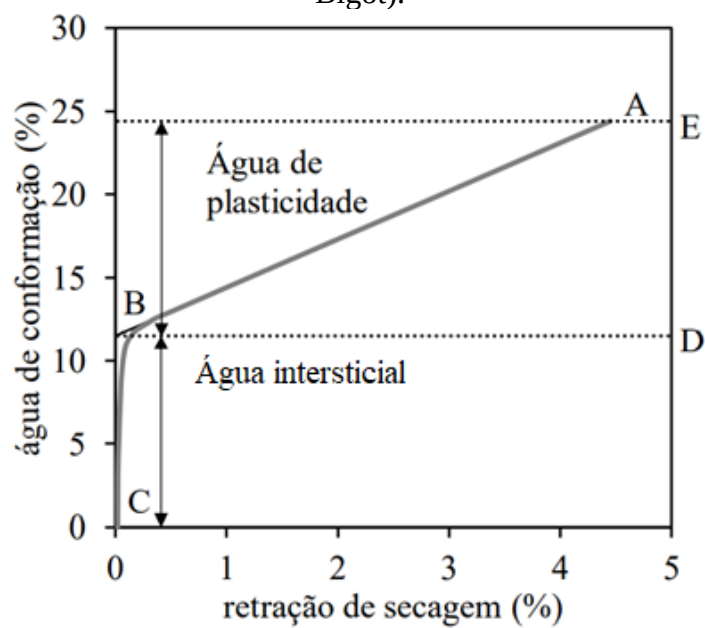
água de plasticidade corresponde ao intervalo E-D, enquanto a água intersticial é representada pelo segmento D-C (VIEIRA et al., 2003).

Figura 2.12 - Representação esquemática da secagem do sistema argila-água.



Fonte: Vieira et al. (2003).

Figura 2.13 - Variação da retração de secagem em função da água de conformação (curva de Bigot).



Fonte: Vieira et al. (2003).

2.3.4 Aspectos mecânicos: tensões induzidas pelo processo de secagem

No início do processo de secagem, as partículas de argila estão separadas umas das outras por uma fina película de água. Com o progresso da secagem devido à remoção da água, a separação entre as partículas diminui, gerando contrações no material e, consequentemente, tensões induzidas pelo processo de secagem (KINGERY; BOWEN; UHLMANN, 1976; AUGIER et al., 2002; CALLISTER; RETHWISCH, 2011; CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012).

Quando a taxa de eliminação da água pela superfície do material for maior que a taxa de difusão de água no interior do sólido, tem-se que a superfície secará mais rapidamente que o interior, bem como encolherá de forma mais intensa (SILVA et al., 2012; ALMEIDA et al., 2014). Esse fato, aliado com a baixa resistência da argila antes do processo de queima, pode levar à formação de rachaduras caso a tensão supere a tensão de resistência do material (BROSNAN; ROBINSON, 2003; CADÉ et al., 2005; KHALILI et al., 2014). O encolhimento diferencial entre partes do corpo também pode ocorrer devido a fatores operacionais, como o fluxo de ar irregular durante o processo de secagem (BROSNAN; ROBINSON, 2003).

Um fato característico dos produtos cerâmicos é que durante o processo de secagem, a argila pode sofrer contrações significativas, podendo resultar em mudanças na forma do produto, o que é um importante parâmetro de qualidade (ITAYA et al., 1999). Quando a distribuição das tensões não é adequada em partes do material, obtém-se deformações e/ou falhas que podem comprometer a utilização do produto (MIHOUBI et al., 2004).

A análise dos campos de temperatura e umidade relativa no interior do produto permite verificar regiões com maior probabilidade de ocorrer trincas, rachaduras e deformações elevadas. De acordo com diversos pesquisadores (HASATANI et al., 1993; AUGIER et al., 2002; BROSNAN; ROBINSON, 2003; CADÉ et al., 2005; BATISTA et al., 2008, 2009; SILVA et al., 2011, 2012, 2016; ALMEIDA et al., 2013, 2014; KHALILI et al., 2014; BRITO et al., 2016; ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017; ARAÚJO; SANTOS; et al., 2017), regiões com maiores gradientes de umidade e temperatura estão mais susceptíveis ao fenômeno de encolhimento e, consequentemente, a formação de elevadas tensões que levam ao surgimento de falhas.

Além disso, foi observado em diversas pesquisas que os maiores gradientes de temperatura e umidade ocorrem nos cantos (vértices) dos produtos cerâmicos (AUGIER et al., 2002; CADÉ et al., 2005; BATISTA et al., 2008, 2009; SILVA et al., 2012, 2011; ALMEIDA

et al., 2014; KHALILI et al., 2014; BRITO et al., 2016; ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017; ARAÚJO; SANTOS; et al., 2017), de tal forma que tais regiões estão mais propensas a formação de rachaduras e fissuras.

A geração de trincas e deformações da argila moldada são problemas indesejáveis durante a secagem. Além disso, a magnitude das tensões durante o processo de secagem é função das propriedades termofísicas e elásticas, bem como dos coeficientes de contração e expansão do material (ITAYA et al., 1997; SILVA et al., 2011). Portanto, para compreender e otimizar o processo de secagem de peças cerâmicas, é necessário conhecer as propriedades mecânicas da argila úmida. Dados experimentais para alguns tipos de argila estão disponíveis na literatura (SHIRAKI, 1955a, 1955b; SHIRAKI; FUKUURA, 1955; SHIRAKI; KOMAKI, 1955; ETUK; AKPABIO; UDOH, 2003).

2.3.5 Aspectos de qualidade do produto cerâmico: defeitos do processo de secagem

O processo de secagem é a principal fonte de defeitos na maioria dos produtos cerâmicos (KHALILI et al., 2014). Se a secagem não for conduzida de forma controlada, diversos tipos de defeitos podem ocorrer durante o processo de secagem, tais como rachaduras, empenamento, descoloração, redução das propriedades mecânicas e outros (BROSNAN; ROBINSON, 2003; BRITO et al., 2016). Tais defeitos levam à redução da qualidade ou perda do produto, causando danos econômicos e industriais para as indústrias de cerâmicas, haja vista que o processo de secagem é responsável por elevado consumo energético e parte desse produto pode não ser reaproveitado (ITAYA; OKOUCHI; MORI, 2001; MIHOUBI et al., 2004; BRITO et al., 2016).

Em geral, os defeitos oriundos do processo de secagem são provenientes do encolhimento diferencial do material, que podem ter várias causas (ITAYA; HASATANI, 1996; ITAYA et al., 2001; BROSNAN; ROBINSON, 2003; FORD, 2013):

- Taxa de perda de umidade e aquecimento do corpo;
- Formação de gradientes de umidade e temperatura no corpo;
- Encolhimento anisotrópico devido à orientação das partículas durante a moldagem;
- Restrição mecânica do encolhimento devido ao contato com a superfície em que o mesmo está apoiado;
- Ressecamento da superfície proveniente de uma elevada taxa de secagem no primeiro estágio de secagem.

Em compensação, nem todo defeito ocasionado nos produtos cerâmicos tem origem no processo de secagem, podendo ser causados pela seleção errônea da matéria-prima, procedimentos de mistura e conformação, bem como forma do produto (BROSNAN; ROBINSON, 2003). Portanto, a simples modificação da matéria-prima, bem como a otimização do projeto e dos processos de manufatura podem fazer com que a taxa de secagem e aquecimento das peças ocorram de forma mais rápida e sem causar danos ao produto final.

Uma característica do produto que pode ter grande influência na formação de rachaduras durante o processo de secagem são as seções com espessuras distintas (BROSNAN; ROBINSON, 2003). O problema acontece pelo fato de uma mesma taxa de secagem ser aplicada para ambas as seções, embora a seção de maior espessura contenha mais água a ser removida. Isso faz com que a remoção de água aconteça de forma mais rápida na seção de menor espessura levando a um gradiente de contração entre as mesmas. Esse gradiente de contração implica na formação de tensões mais elevadas, podendo causar defeitos no material. De maneira geral, quanto maior, mais pesada e mais irregular a peça, maiores são as chances de aparecimento de defeitos durante o processo de secagem.

2.3.6 Fatores que influenciam no processo de secagem

De acordo Gomez (2019), as variáveis operacionais que influenciam a secagem de materiais cerâmicos são: temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do ar de secagem, tempo, forma, espessura, relação área/volume, umidade inicial, granulometria e propriedades do material. O entendimento de tais variáveis é importante para a determinação da curva ideal de secagem para cada tipo de produto (GOMEZ, 2019). A forma com que cada variável operacional influencia a secagem de materiais cerâmicos foi objetivo de estudo de diversas pesquisas. Fixadas as outras variáveis, os principais resultados são apresentados a seguir:

- Os mecanismos de transferência de massa, calor e o fenômeno do encolhimento são mais intensos em peças com umidade inicial alta e, principalmente, em materiais cerâmicos de granulometria fina (REED, 1995; ITAYA; HASATANI, 1996; BATISTA et al., 2008, 2009; SILVA, 2009; SILVA et al., 2011, 2012; ALMEIDA et al., 2014; ZACCARON et al., 2021).
- Maior temperatura do ar de secagem implica em maior taxa de secagem e, consequentemente, menor tempo total de processo (BATISTA et al., 2008, 2009; SILVA et al., 2012, 2020; ALMEIDA et al., 2014; TAVARES et al., 2014; KHALILI

- et al., 2014; MARTINS, 2016; SILVA, 2018; ARAÚJO, 2019; SANTOS, 2019; GOMEZ; LIMA; et al., 2020; LIMA et al., 2020, 2021; NASCIMENTO et al., 2020).
- Menor umidade relativa do ar de secagem resulta em secagem mais rápida do material (BATISTA et al., 2008, 2009; SILVA et al., 2012; ALMEIDA et al., 2014; SANTOS, 2019; LIMA et al., 2020).
 - Quanto maior a velocidade do ar de secagem, maior é o gradiente de temperatura no material cerâmico (MARTINS, 2016; ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017).
 - O aumento da velocidade do ar de secagem implica remoção de umidade mais rápida (aumento da taxa de secagem) do material cerâmico (MARTINS, 2016; ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017).
 - Quanto maior o tempo de secagem menor será o teor médio de umidade, em qualquer ponto dentro do sólido (SILVA et al., 2011, 2012; ALMEIDA et al., 2014, 2016; KHALILI et al., 2014; MARTINS, 2016; SILVA, 2018; ARAÚJO, 2019; ARAÚJO; PEREIRA; et al., 2019; ARAÚJO; SANTOS; et al., 2019; SANTOS, 2019; ARAÚJO et al., 2020; SANTOS et al., 2020).
 - Os gradientes de temperatura e umidade no interior do sólido crescem com o tempo de secagem, atingem um valor máximo e voltam a decrescer (MARTINS, 2016; ARAÚJO, 2019).
 - Para temperaturas de secagem mais elevadas, o material cerâmico atinge suas condições de equilíbrio térmico e higroscópico em um menor tempo de processo (SILVA, 2009, 2018; NASCIMENTO et al., 2020; SILVA et al., 2020; LIMA et al., 2021).
 - Em geral, quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar de se secagem, menor é o teor de umidade de equilíbrio do material (SILVA, 2009, 2018).
 - Quanto maior a temperatura do ar de secagem, maiores são os coeficientes de transferência de calor e massa por convecção (ARAÚJO, 2019; SANTOS, 2019; ARAÚJO et al., 2020; LIMA et al., 2020, 2021; NASCIMENTO et al., 2020).
 - Para temperaturas de secagem mais elevadas, o material cerâmico apresenta maiores retrações volumétricas ao final do processo de secagem (SILVA, 2009, 2018; SILVA et al., 2012, 2020; NASCIMENTO et al., 2020; LIMA et al., 2021).
 - A forma do corpo interfere na cinética de secagem. Quanto maior a relação área/volume, mais rápida será a secagem (CADÉ et al., 2005; BATISTA et al., 2008, 2009; SILVA et al., 2012, 2016; KHALILI et al., 2014; SANTOS et al., 2018; SANTOS, 2019).

- Maiores níveis do teor de umidade inicial implicam em maiores índices de retração volumétrica (BATISTA et al., 2008, 2009).
- As difusividades térmica e de massa influenciam fortemente nas transferências de calor e massa, respectivamente, durante a secagem, sendo responsáveis pela velocidade com que cada processo ocorre (SILVA et al., 2016; SANTOS et al., 2018; ARAÚJO, 2019; ARAÚJO et al., 2020).
- As áreas próximas aos vértices (cantos) ou extremidades do produto cerâmico apresentam as maiores taxas de transferência de calor e massa (AUGIER et al., 2002; CADÉ et al., 2005; BATISTA et al., 2008, 2009; SILVA et al., 2011, 2012; ALMEIDA et al., 2014; KHALILI et al., 2014; BRITO et al., 2016; ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017; ARAÚJO; SANTOS; et al., 2017, 2019; SANTOS et al., 2018, 2020; ARAÚJO, 2019; SANTOS, 2019; ARAÚJO; PEREIRA; et al., 2019; ARAÚJO et al., 2020). Tais regiões estão mais susceptíveis a formação de defeitos;
- Como mencionado anteriormente, a temperaturas do ar de secagem elevadas e umidades relativas baixas são condições operacionais que influenciam numa secagem mais rápida do material. Estes efeitos são, por sua vez, mais acentuados que os gerados pela relação área/volume e pelo teor de umidade inicial (BATISTA et al., 2008, 2009). É válido ressaltar que, quando a temperatura e a umidade relativa do ambiente de secagem são as mesmas para peças cerâmicas diferentes, o teor de umidade inicial e a relação área/volume dominam a cinética de secagem (BATISTA et al., 2008, 2009).

2.3.7 Controle do processo de secagem

Um dos principais objetivos durante o processo de secagem é minimizar a contração do material cerâmico, de modo a reduzir a intensidade das tensões mecânica e térmica no interior da peça, minimizando os defeitos (BROSNAN; ROBINSON, 2003) e maximizando a qualidade do produto. Desta forma, o controle da formação de tensões torna-se fundamental para as indústrias de produtos cerâmicos que desejam se manter competitivas no mercado.

Após definida a curva de secagem ótima para o produto cerâmico, seja de forma experimental ou por meio da modelagem matemática, e os parâmetros de secagem (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem), faz-se o controle do processo. O controle é crucial para garantir que a curva de secagem previamente estabelecida seja alcançada na prática, bem como para obter secagem uniforme no produto, que pode evitar danos estruturais durante o processo de queima (ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017).

Como os defeitos são afetados pelos gradientes de umidade e temperatura, e pelos coeficiente de expansão térmica e de expansão de umidade (KEUM et al., 2000), bem como pelas propriedades do material, não controladas durante o processo, é necessário que a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar sejam controladas durante a secagem para minimizar a intensidade das tensões e evitar falhas no produto.

A secagem uniforme é difícil de ser realizada, porque a temperatura, velocidade e a umidade relativa do ar de secagem, bem como os coeficientes locais de transferência de calor e massa são muitas vezes dependentes da localização e posição da peça no secador industrial (ITAYA; HASATANI, 1996). Almeida et al. (2013) estudaram a secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador do tipo túnel com fluxo cruzado em escala industrial e observaram que os tijolos da primeira fileira secam e aquecem um pouco mais rápido quando comparados com os da última fileira. Isso é justificado pelo fato de que o ar de secagem dos tijolos da primeira fila contém baixa umidade absoluta e, à medida que vai penetrando nas filas subsequentes de produto vai ficando saturado, de tal forma que a umidade relativa do ar de secagem varia de uma posição para outra dentro do secador. Outro fato observado na literatura (ARAÚJO et al., 2022) é que o posicionamento da peça em relação ao fluxo de ar pode influenciar nos gradientes de temperatura e teor de umidade no interior do material, podendo causar gradientes de contração diferenciados e, conseqüentemente, empenando a peça.

É importante ressaltar que até o deslocamento dos produtos do secador para o forno (processo de queima) deve ser realizado de maneira controlada. Dependendo do tipo de argila, se o tempo necessário para deslocar as peças de um equipamento para outro for elevado e o ambiente estiver com umidade relativa alta, é provável que aconteça um processo de reidratação (adsorção), o qual pode provocar quebras e/ou explosões quando o material entra no forno e aquece intensamente (SILVA et al., 2016).

Diante do exposto, torna-se evidente que o controle do processo de secagem é essencial para reduzir defeitos no material, perda de produtividade e consumo energético (GOMEZ; MAGALHÃES; et al., 2020).

2.3.8 Modelagem matemática do processo de secagem

Há basicamente três tipos de abordagens para solucionar os problemas físicos: abordagens analíticas, numéricas e experimentais. As abordagens analíticas e numéricas partem das equações fundamentais, que para a mecânica dos fluidos são as equações de conservação da massa, espécies, momento e energia.

Enquanto que os modelos analíticos fornecem soluções exatas em qualquer ponto e são aplicados para geometrias e condições de fronteira mais simples, os modelos numéricos fornecem soluções aproximadas em pontos discretos do domínio, podendo ser utilizados para geometrias e condições de contorno complexas. Normalmente os modelos analíticos e numéricos necessitam de validação experimental para garantir a confiabilidade dos resultados (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Na engenharia, os modelos matemáticos normalmente são utilizados para prever o comportamento dos fenômenos físicos visando otimizar sistemas, processos e produtos. Nos últimos anos, diversos modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos para descrever o processo de secagem, dos mais simplificados até os mais sofisticados. Dependendo da espessura do produto em estudo, estes modelos podem ser classificados em modelos de camada fina (ao nível de partícula) e em camada espessa (ao nível de secador) (TAVARES et al., 2014). Os modelos de camada fina são mais simples e limitados pelo fato de não levarem em consideração os efeitos de variação de temperatura e umidade no interior do produto (SANTOS et al., 2020). Já os modelos em camada espessa são mais complexos e levam em consideração as propriedades termofísicas do material, mecanismos de transferência de calor e massa no interior do sólido, condições ambientais externas (temperatura, velocidade e umidade relativa do ar) e, as vezes, o fenômeno de encolhimento ou retração volumétrica (SANTOS et al., 2020; LIMA et al., 2021).

Apesar de muitos autores atribuírem a formação de tensões e deformações aos gradientes de temperatura e de umidade (CADÉ et al., 2005; BATISTA et al., 2008, 2009; SILVA et al., 2011, 2012, 2016; ALMEIDA et al., 2013, 2014; ARAÚJO et al., 2016, 2017; BRITO et al., 2016), alguns sugerem que é importante realizar análise de tensão-deformação simultaneamente com as transferências de calor e massa (ITAYA et al., 1999). Desta forma, modelagens e simulações precisas do fenômeno do encolhimento e da formação de tensões durante a secagem podem ser utilizadas para prever a ocorrência de defeitos bem como para projetar precisamente a peça e desenvolver processos de secagem com maiores taxas, menores consumos de energia e, portanto, mais eficientes (ITAYA et al., 1999; KHALILI et al., 2014).

Para obtenção do perfil de temperatura, distribuição de umidade, formação de tensões e deformações em produtos cerâmicos, diversos pesquisadores desenvolveram formulações matemáticas utilizando o método numérico dos elementos finitos para solução das equações diferenciais que descrevem o fenômeno da secagem (COMINI; LEWIS, 1976; HASATANI et

al., 1992; ITAYA et al., 1995, 1999, 2001; ITAYA; UCHIYAMA; MORI, 2007; KEUM et al., 2000; AUGIER et al., 2002; KHALILI et al., 2014).

Trabalhos de revisão da literatura (JAMALEDDINE; RAY, 2010; DEFRAEYE et al., 2012; RAMACHANDRAN et al., 2018) indicam que os modelos matemáticos validados experimentalmente representam com fidelidade o processo de secagem, auxiliando no desenvolvimento de novas técnicas de secagem e no aprimoramento de técnicas clássicas.

2.3.9 Otimização do processo de secagem

A otimização de processos de secagem está fundamentada em três aspectos principais (BANASZAK; KOWALSKI, 2005; BATISTA et al., 2009; KOWALSKI; MUSIELAK; BANASZAK, 2010; ARAÚJO; DELGADO; et al., 2017):

- Melhoria da qualidade do produto final;
- Redução do tempo necessário para concluir o processo;
- Redução do consumo energético;

Em geral, a otimização da secagem dos produtos cerâmicos era realizada a partir da experiência dos engenheiros e o processo geralmente levava muito tempo, reduzindo a produtividade do processo (HASATANI et al., 1992, 1993). Se as condições operacionais forem alteradas sem controle, de tal forma que sejam alcançadas maiores taxas de transferência de calor e massa, o tempo de processamento diminuirá, porém poderá produzir defeitos internos no produto (SILVA et al., 2016).

Desta forma, com o auxílio de desenvolvimentos tecnológicos, modelagens matemáticas, bem como resultados obtidos por pesquisadores, é importante que as empresas realizem modificações nos projetos e nos processos de manufatura visando aumentar a produtividade e obter produtos de melhor qualidade, para se manterem competitivas no mercado. A obtenção de produto de melhor qualidade não está relacionada apenas a sua aparência externa, mas também às características mecânicas e geométricas, como módulo de elasticidade, tensões residuais, tenacidade, resistência a fratura, tolerâncias dimensionais. Neste sentido, a avaliação quantitativa destes parâmetros é essencial (KEUM et al., 2000). Além disso, é importante que as empresas busquem minimizar o consumo de energia, haja vista que o processo de secagem é responsável por elevada parcela do custo energético industrial (KOWALSKI et al., 2010).

Para aperfeiçoar o processo de secagem de materiais cerâmicos, algumas técnicas têm sido usadas, como secagem intermitente, secagem por aquecimento volumétrico, e por micro-ondas. Estas técnicas são discutidas na sequência.

a) Secagem intermitente

A secagem intermitente é um método alternativo de secagem em que as condições operacionais variam ao longo do processo. Isto pode ser alcançado variando a umidade relativa, a temperatura do ar de secagem, a pressão ou o modo de fornecimento de energia (ex. aquecimento por convecção, radiação, micro-ondas) (KUMAR; KARIM; JOARDDER, 2014).

A secagem intermitente oferece algumas vantagens quando comparada com a secagem contínua (CIHAN; KAHVECI; HACIHAFIZOĞLU, 2007). A sua principal vantagem é o custo, sendo considerado um dos processos de secagem mais eficientes em termos energéticos (KUMAR et al., 2014). Essa vantagem pode ser explicada pela redução do uso de energia térmica, bem como da massa de ar em contraste com a secagem convectiva (CHUA; MUJUMDAR; CHOU, 2003).

Kowalski e Pawlowski (2011) analisaram a secagem intermitente de uma amostra de argila caulim variando a temperatura e a umidade do ar de secagem tanto numérica quanto experimentalmente. Observou-se que, modificando as condições de secagem nos momentos apropriados, pode-se evitar a fratura do material, garantindo um produto de boa qualidade. O produto com melhor qualidade foi obtido variando a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, esse método apresentou um consumo energético significativamente maior quando comparado com os outros analisados. Kowalski e Pawlowski (2011) concluíram que é possível obter um produto de melhor qualidade e menor consumo energético na secagem intermitente, variando a temperatura ao longo do processo, quando comparado com a secagem contínua, sem um prolongamento significativo do tempo total de secagem.

Itaya et al. (1999, 2001, 2007) estudaram a influência da secagem intermitente na formação de tensões em peças cerâmicas. A distribuição tridimensional da tensão-deformação foi obtida numericamente utilizando o método dos elementos finitos. Os autores observaram que a temperatura e o teor de umidade na secagem intermitente flutuam acima e abaixo dos resultados obtidos na secagem contínua. Além disso, a tensão máxima na secagem intermitente oscilou notavelmente e a tensão de pico em cada ciclo excedeu a magnitude obtida na secagem contínua. Conclui, portanto, que a secagem intermitente não é sempre vantajosa para a secagem de peças cerâmicas quando comparada com a secagem contínua. Por isso, para evitar falhas

durante o processo de secagem intermitente, é de suma importância controlar as tensões de pico para evitar que alcancem a tensão de resistência do material.

Os resultados obtidos por Itaya et al. (1999, 2001, 2007) estão de acordo com o fato de que o fornecimento de calor intermitente é benéfico apenas para materiais que são secados principalmente no período de taxa decrescente, em que a difusão interna de calor e umidade controlam a taxa geral de secagem (CHUA et al., 2003). Portanto, não é recomendado utilizar aquecimento intermitente no primeiro estágio de secagem para materiais cerâmicos, haja vista que a taxa de secagem deve ser suficientemente lenta para evitar o desenvolvimento de tensões elevadas que podem comprometer a qualidade da peça. É importante ressaltar que a secagem intermitente já é um método bastante difundido na secagem de alimentos (KUMAR et al., 2014) e bioprodutos (CHUA et al., 2003).

Outro fato interessante observado por Itaya et al. (1999) é que na secagem intermitente, o perfil de temperatura no período de menor número de Biot é mais elevado quando comparado com o período de maior número de Biot. Como o número de Biot é diretamente proporcional ao coeficiente de transferência de calor por convecção, tem-se que, para baixos números de Biot, a contribuição da transferência de calor por radiação pelas paredes do secador é significativamente maior. Com isso, a temperatura da superfície da amostra úmida é maior que a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem já no estágio inicial do processo de secagem.

b) Secagem por aquecimento interno

Itaya et al. (2001, 2005) estudaram o comportamento de secagem de peças cerâmicas utilizando diferentes modos de aquecimento, dentre eles convecção contínua, convecção intermitente e aquecimento interno. A distribuição tridimensional da tensão-deformação, bem como a transferência de calor e de umidade na peça moldada foram resolvidas simultaneamente pelo método dos elementos finitos durante todo o processo transiente de secagem.

Os pesquisadores observaram que, na secagem por aquecimento interno, a temperatura da superfície é menor quando comparada com a temperatura no interior do corpo, diferentemente do que acontece nos demais processos de secagem em que a temperatura decresce no sentido da superfície para o centro do corpo. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que a superfície da peça perde calor por evaporação e/ou convecção para o ambiente de menor temperatura (ITAYA et al., 2001, 2007), reduzindo assim sua temperatura local. Outro fato observado por esses pesquisadores é que o aquecimento interno apresenta um aumento na taxa de secagem e na temperatura média do corpo quando comparado com os outros

modos de secagem, embora a taxa de aquecimento no modelo seja considerada semelhante em todos os casos. Quando a peça moldada é aquecida internamente, a pressão de vapor interna tende a aumentar, sendo responsável por um aumento do movimento da umidade que resulta em um aumento na taxa de secagem (ITAYA et al., 2007).

Por fim, constatou-se que a secagem por aquecimento interno apresentou tensões máximas de tração inferiores que as secagens por convecção, sendo assim, apontado pelos pesquisadores como o modo mais eficiente para secagem da peça cerâmica sob a consideração de que a tensão máxima de tração esteja relacionada à causa da geração de falhas. A razão para a menor formação de tensões no modo de aquecimento interno é explicada pelos pesquisadores da seguinte forma: a secagem por convecção acontece rapidamente nos cantos da peça, que por sua vez apresentam os maiores valores de temperatura, bem como maiores gradientes de umidade e temperatura. No entanto, quando o corpo é aquecido internamente, a temperatura, a taxa de secagem e, conseqüentemente as tensões são reduzidas nos cantos da peça (ITAYA et al., 2001, 2007).

c) Secagem por micro-ondas

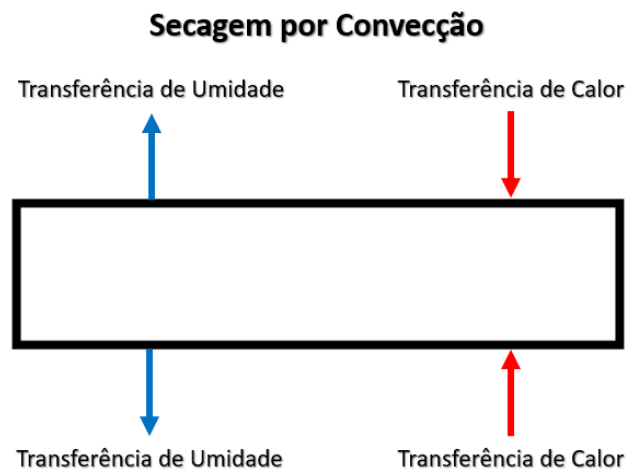
Aquecimento por micro-ondas é considerado como um candidato promissor na secagem por aquecimento interno (ITAYA et al., 2001, 2005, 2007). Diversas aplicações de secagem por micro-ondas são relatadas na literatura, tais como: cerâmicas, pós, grânulos, blocos, folhas, alimentos, massas, madeira, plásticos, têxteis, produtos farmacêuticos, etc (CLARK; SUTTON, 1996; EDGAR; OSEPCHUK, 2001; OSEPCHUK, 2002; ITAYA et al., 2005, 2007). Tecnologias de radiação, como micro-ondas, são especialmente interessantes em operações de secagem por permitir entrada de energia imediata e significativa para o produto (MIHOUBI; BELLAGI, 2009).

As secagens por convecção e por micro-ondas diferenciam-se uma da outra pelo modo de transferência de calor. Na secagem por convecção, o calor é fornecido pelo ar quente em contato com as superfícies do material a ser secado. Com isso, o calor é transferido da superfície para o interior do corpo enquanto que a umidade é transportada no sentido contrário, como indica a Figura 2.14. Por outro lado, na secagem por micro-ondas o calor é produzido dentro da peça como resultado da absorção de uma quantidade de energia de micro-ondas pelas moléculas de água contidas nos poros (KOWALSKI; RAJEWSKA; RYBICKI, 2005). Desta forma, na secagem por micro-ondas a temperatura no interior do objeto é maior que a temperatura na superfície fazendo com que a transferência de calor e massa ocorram no mesmo sentido

(KOWALSKI; RYBICKI, 2004), como pode ser observado na Figura 2.15. Tal coincidência de fluxos aumenta a vazão de umidade e modera a sua distribuição dentro do material (KOWALSKI; MIELNICZUK, 2007). Deste modo, espera-se que a secagem por micro-ondas apresente as seguintes vantagens quando comparado com a secagem por convecção:

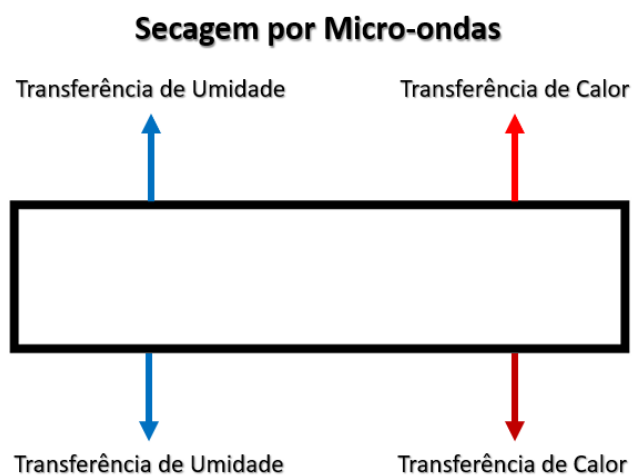
- Taxas de secagem mais rápidas, levando a um tempo de processamento mais curto;
- Menores gradientes de umidade dentro do corpo que implica em menores tensões durante o processo de secagem;
- Produto de melhor qualidade.

Figura 2.14 - Sentidos das transferências de calor e de umidade no corpo para secagem por convecção.



Fonte: Gomez; Magalhães et al. (2020).

Figura 2.15 - Sentidos das transferências de calor e de umidade no corpo na secagem por micro-ondas.



Fonte: Gomez; Magalhães et al. (2020).

Itaya et al. (2005, 2007) analisaram experimentalmente o efeito do aquecimento interno por micro-ondas no comportamento de secagem de uma placa de argila. Foi observado que qualquer amostra aquecida com potência superior a 200 W foi quebrada quando a temperatura interna alcançou a temperatura de ebulição da água. Quando aplicado uma potência constante de 100 W, em que a temperatura interna não superou 97°C, nenhuma rachadura foi gerada na amostra.

Itaya et al. (2001, 2005, 2007) observaram que na secagem por micro-ondas a falha que acontece nas peças é causada pela expansão proveniente da elevada pressão de vapor interno, enquanto que na secagem convencional a falha acontece pelas tensões de tração proveniente do encolhimento do produto durante a fase inicial do processo de secagem.

Itaya et al. (2005, 2007) observaram que o comportamento transiente da secagem por micro-ondas foi significativamente diferente da secagem utilizando ar quente. Tanto a temperatura quanto a taxa de secagem flutuaram de forma complexa durante todo o processo de secagem, sendo considerado pelos autores um fenômeno característico do processo de secagem por micro-ondas.

Itaya et al. (2007) concluíram que uma forma alternativa e eficiente de fazer a secagem por micro-ondas seria controlar a potência de tal forma que a temperatura interna da peça não atinja a temperatura de ebulição da água. Dessa forma, a secagem acontece de forma mais rápida que aplicando uma potência constante além de não causar falhas proveniente da elevada pressão de vapor interno.

Itaya et al. (2007) realizou experimento controlando a potência de forma dinâmica, como descrito anteriormente, e a secagem foi completada com sucesso sem formação de rachaduras e com um tempo relativamente curto. O tempo de secagem foi de aproximadamente 37% do tempo necessário para secar o produto por aquecimento convectivo e equivale a 15% do tempo total utilizando secagem por radiação.

Kowalski et al. (2004, 2005) analisaram a distribuição e evolução temporal da temperatura, do teor de umidade e das tensões induzidas durante os processos de secagem convectiva e secagem por micro-ondas em uma amostra cilíndrica de argila caulim. A análise teórica das tensões induzidas por secagem e das deformações dos materiais a serem secados é baseada nos modelos constitutivos elástico e viscoelástico. O modelo de secagem termomecânica é resolvido numericamente usando os métodos de elementos finitos e de diferenças finitas. Os resultados teóricos são confrontados com os dados experimentais obtidos pelo método de emissão acústica, que permitem monitorar o desenvolvimento das tensões

induzidas pela secagem. Os pesquisadores observaram que o calor fornecido volumetricamente na secagem de micro-ondas faz com que os fluxos de calor e umidade fluam na mesma direção e isso resulta em uma distribuição do teor de umidade mais uniforme quando comparado com a secagem por convecção. Além disso, foi observado que a taxa de secagem é mais rápida quando utilizado micro-ondas e que na secagem por convecção há uma maior geração de tensões em toda a peça.

Kowalski et al. (2005) mostraram que o aquecimento volumétrico intensivo do material envolve transições de fase de elevada taxa e aumento drástico da pressão dos poros, causando danos explosivos ao material.

Segundo Mihoubi e Bellagi (2009), a geração de calor volumétrico durante o processo de secagem por micro-ondas é função das propriedades do material, da frequência, da intensidade do aquecimento aplicado e da distância entre fonte e a superfície do produto.

Itaya et al. (2005) afirma que a taxa de penetração de micro-ondas é proporcional a uma exponencial do produto entre o teor de umidade e espessura. Dessa forma, fica claro que a taxa de penetração de micro-ondas tende a diminuir durante o processo de secagem, reduzindo a eficiência do mesmo.

d) Secagem convectiva e por micro-ondas combinadas

Kowalski e Mielniczuk (2007) estudaram a eficiência da secagem por micro-ondas e por convecção com respeito a taxa de secagem e formação de tensões em uma amostra de argila caulim na forma de uma placa fina. Foi observado que a quantidade de energia absorvida no processo de secagem por micro-ondas diminui ao longo do processo fazendo com que a taxa de secagem fique pior do que a secagem por convecção para elevados instantes de tempo. Esses autores concluíram que a secagem por micro-ondas é altamente eficiente apenas no primeiro período de secagem, em que o teor de umidade é relativamente alto. Por isso, o mesmo sugere o uso do aquecimento por micro-ondas no primeiro período de secagem e, em seguida, continuar o processo utilizando secagem por convecção ou ainda, aplicar imediatamente uma combinação de secagem por convecção e micro-ondas. Além disso, esses autores descobriram que uma secagem combinada com micro-ondas e convecção é mais eficiente tanto na redução de tensões quanto na obtenção de uma maior taxa de secagem. A secagem foi examinada experimentalmente durante todo o processo, utilizando o método de emissão acústica (AE), monitorando a formação de micro- e macro-trincas provenientes das tensões formadas no corpo.

Kowalski et al. (2010) desenvolveram um modelo matemático que descreve a cinética da secagem combinada de micro-ondas e convecção para todo o processo. A influência da deformação do corpo durante o processo de secagem na transferência de calor e massa é negligenciada. Com isso, o modelo é aplicável somente em materiais que deformam muito pouco durante a secagem. Os processos experimentais realizados em uma amostra cilíndrica de argila caulim permitiram estimar os coeficientes do material necessários para resolução do modelo bem como validar o modelo de secagem híbrida proposto. Assim, esses pesquisadores concluíram que o modelo matemático deve ser utilizado como base para otimização do processo de secagem. Além disso, mostraram que os gráficos de teor de umidade em função do tempo de secagem apresentam curvas complexas que refletem os mecanismos de secagem variáveis em estágios distintos de secagem.

Mihoubi e Bellagi (2009) compararam a formação de tensões em uma amostra de argila provenientes dos processos de secagem por convecção e por combinação de convecção e micro-ondas. Para tal, foi desenvolvido um modelo matemático que descreve a transferência de calor e massa acoplado com as equações de equilíbrio mecânico (tensão e deformação). O modelo foi solucionado numericamente utilizando o método dos elementos finitos. Eles concluíram que a secagem híbrida é mais eficiente quando comparado com a secagem por convecção, tanto na formação de tensões quanto na redução do tempo de secagem. Além disso, os pesquisadores variaram parâmetros no modelo híbrido e concluíram que as tensões geradas durante o processo de secagem dependem mais da temperatura do ar de secagem do que da potência do micro-ondas. Variando a temperatura do ar de secagem de 20°C para 50°C mais que dobrou a tensão máxima obtida no processo.

Segundo Kowalski et al (2005), o principal impedimento da utilização de secagem por micro-ondas em processos industriais deve-se ao elevado custo do equipamento. Sendo assim, tal processo de secagem é comumente empregado em produtos sensíveis e de elevado custo (KOWALSKI, 2012).

Diante do exposto, para alcançar um processo de secagem otimizado, é importante que os engenheiros analisem os métodos especiais de secagem bem como métodos combinados (híbridos), em que diferentes fontes de energia são utilizadas ao mesmo tempo, para verificar a viabilidade dos mesmos para tal fim.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Secagem em estufa

Com o objetivo de avaliar a influência da temperatura e umidade relativa no teor de umidade, temperatura e dimensões do produto, foram desenvolvidos experimentos de secagem em estufa.

3.1.1 Materiais e equipamentos utilizados nos experimentos de secagem

Os materiais utilizados nos experimentos de secagem em estufa foram bacias sanitárias convencionais (Figura 3.1), cedidas gentilmente pela empresa parceira, DEXCO S.A. As principais dimensões da peça depois da retirada do molde e antes do início dos experimentos de secagem foram:

- Altura: 430 ± 5 mm;
- Comprimento da parte superior: 511 ± 2 mm;
- Largura da parte superior: 413 ± 3 mm;
- Comprimento da parte inferior: 426 ± 2 mm;
- Largura da parte inferior: 220 ± 1 mm.

Figura 3.1 - Bacia sanitária antes do experimento de secagem.



Para realização dos experimentos e determinação dos parâmetros de secagem, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Estufa digital de esterilização e secagem com controlador de temperatura, circulação e renovação forçada de ar, dimensões internas 50 x 60 x 60 cm (altura x largura x

profundidade), marca MYLABOR EQUIPAMENTOS modelo SSD-180L (Figura 3.2). A faixa de temperatura de trabalho da estufa varia de temperatura ambiente + 5°C até 250°C.

Figura 3.2 - Estufa com circulação e renovação de ar forçada utilizada nos experimentos de secagem.



- b) Balança digital marca RAMUZA, modelo DP-35 com capacidade máxima de 35 kg e resolução de 5g (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Balança digital utilizada nos experimentos de secagem.



- c) Trena da marca SQ de comprimento 5 m e largura da fita 19 mm para medição das principais variações dimensionais das amostras durante os processos de secagem (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Trena para medições dimensionais das amostras durante os experimentos de secagem.



- d) Termohigrômetro digital marca KASVI, modelo K29-5070h para medição da temperatura e umidade relativa do ar ambiente fora da estufa (Figura 3.5).

Figura 3.5 - Termohigrômetro digital para medição das condições do ar fora da estufa.



- e) Termohigrômetro digital marca ICEL, modelo HT-220 para medição da temperatura e umidade relativa do ar no interior da estufa (Figura 3.6).

Figura 3.6 - Termohigrômetro digital para medição das condições do ar no interior da estufa.



- f) Termômetro infravermelho digital marca KZED, modelo 8801 utilizado para medição da temperatura superficial da amostra durante o processo de secagem (Figura 3.7).

Figura 3.7 - Termômetro infravermelho digital para medição da temperatura superficial das amostras durante os experimentos de secagem.



- g) Anemômetro de fio quente com leitura digital marca INSTRUTEMP modelo AMI 300 com resolução de 0,01 m/s para medição da velocidade do ar no interior da estufa (Figura 3.8).

Figura 3.8 - Anemômetro de fio quente com leitura digital.



- h) Câmera termográfica portátil da marca FLIR e modelo C5 para medição da temperatura superficial da amostra, possibilitando verificar possíveis gradientes de temperatura na superfície da amostra durante o processo de secagem (Figura 3.9).

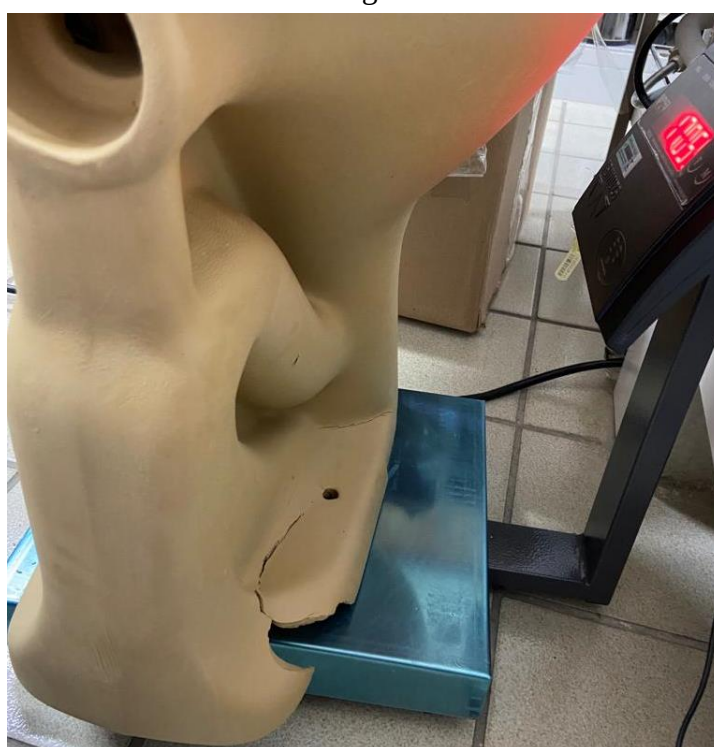
Figura 3.9 - Câmera termográfica para medição dos gradientes de temperatura das amostras durante os experimentos de secagem.



3.1.2 Procedimentos experimentais

A primeira tentativa de realizar os experimentos de secagem das bacias sanitárias não ocorreu conforme planejado após poucas medições, como pode ser observado na Figura 3.10. Após a falha, o experimento foi comprometido e a peça foi retornada para a empresa com o objetivo de reaproveitar o material na etapa de preparação da matéria-prima. Tal falha ocorreu pois o comprimento da base da amostra é superior as dimensões da base da balança, gerando uma região de concentração de tensão na peça devido ao contato inadequado e o peso próprio.

Figura 3.10 - Falha na base da bacia sanitária recém moldada durante experimento de secagem.



Para contornar tal problema nos demais experimentos, foi confeccionada uma chapa de aço galvanizado com dimensões 45 x 35 cm e bitola 18 (1,2 mm de espessura), mantendo-a sobre a base da balança durante os procedimentos de pesagem. Para escolha do material e espessura da chapa, levou-se em consideração características como baixa rugosidade superficial, para não reter umidade, resistência mecânica, resistência a corrosão, facilidade de corte nas dimensões adequadas, custo e disponibilidade no mercado. Também foi utilizada uma outra chapa sobre a bandeja inferior da estufa, pois esta última contém rasgos que contribuem na geração de tensões locais, podendo danificar a base da bacia após pouco tempo de experimento (Figura 3.11).

Figura 3.11 - Amostra no interior da estufa.



Além disto, nesta primeira tentativa de realização do experimento de secagem, percebeu-se que após poucos manuseios, a peça apresentou deformações significativas nas regiões de contato com as mãos. Como a mesma foi levada para o laboratório logo após a retirada do molde, a mesma ainda estava muito úmida e apresentava rigidez mínima.

Para os demais experimentos de secagem, a coleta de cada uma das amostras foi realizada na empresa parceira aproximadamente 2 horas após a retirada das mesmas dos seus respectivos moldes. Considerou-se importante esperar esse período de tempo para que as bacias sanitárias adquirissem a rigidez necessária para futuros e constantes manuseios durante o experimento de secagem em estufa.

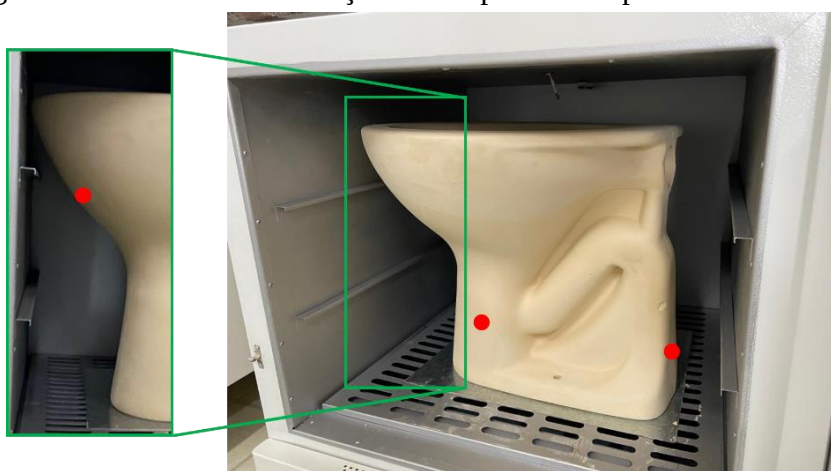
O tempo entre a coleta da amostra na empresa parceira e o início do experimento de secagem em estufa na UFPB, para cada um dos experimentos, foi de aproximadamente 30 minutos. Buscou-se realizar a coleta das amostras sempre no mesmo horário, também, na tentativa de fazer com que os teores de umidade iniciais das amostras apresentem valores próximos, auxiliando na comparação dos resultados.

Depois de a amostra chegar no laboratório, o primeiro passo foi realizar medições da massa, temperatura superficial e principais dimensões da bacia sanitária, assim como temperatura e umidade relativa do ar. As principais dimensões da bacia sanitária medidas foram: altura, comprimento e largura da parte superior, comprimento e largura da parte inferior. Em seguida, a bacia sanitária foi levada ao interior da estufa para realização do experimento de secagem. Para tanto, a temperatura do ar no interior da estufa foi fixada no valor desejado para

cada experimento (30°C, 35°C ou 40°C) utilizando um controlador de temperatura do equipamento.

Em intervalos pré-definidos, a bacia sanitária era retirada da estufa para realizar medições de temperatura superficial, massa e principais dimensões da mesma. A temperatura superficial da amostra em cada instante de tempo é definida como sendo a média calculada a partir das medições em três pontos previamente estabelecidos, utilizando termômetro infravermelho digital. Os três pontos são um na parte frontal, um na parte lateral e outro na parte traseira da bacia sanitária, conforme ilustrado na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Pontos de medição da temperatura superficial da amostra.



A partir da literatura, sabe-se que as taxas de perda de umidade são mais elevadas no início do processo de secagem, independentemente do material analisado, requerendo a leitura de dados em intervalos de tempo menores. À medida que o processo se desenvolve, o intervalo de tempo pode ser aumentado. Desta forma, as medições foram realizadas com intervalos de 10, 20 e 30 minutos, com 6 repetições para cada uma. Em seguida, foram realizadas 12 medições com intervalo de 1 hora cada, seguido de medições a cada 2 horas até o momento em que a massa da amostra permaneceu constante por 4 medições em sequência. Posteriormente, a amostra permaneceu na estufa por mais 24 horas, na mesma temperatura de operação, para obtenção da massa de equilíbrio e depois por mais 24 horas à temperatura de 105°C para obtenção da massa seca da amostra. Tais parâmetros são úteis para calcular o teor de umidade da amostra em função do tempo de secagem. O procedimento descrito foi adaptado dos trabalhos desenvolvidos por Silva (2009) e Silva (2018), que estudaram, experimentalmente, a secagem de tijolos cerâmicos vazados e blocos cerâmicos industriais, respectivamente.

É importante ressaltar que no primeiro experimento, em cada instante de tempo em que a bacia sanitária foi retirada da estufa, também foram realizadas medições de temperatura e umidade relativa do ar, tanto no interior da estufa quanto na região externa à mesma.

A partir do primeiro experimento de secagem com convecção forçada, percebeu-se que as umidades absolutas nas regiões interior e exterior da estufa são muito próximas para um mesmo instante de tempo. Isto ocorre devido a uma boa renovação do ar no interior da estufa. Desta forma, para os demais experimentos utilizando convecção forçada, a umidade relativa interna foi calculada ao invés de medida experimentalmente. Essa metodologia facilita a realização dos experimentos e reduz o tempo em que a amostra permanece fora da estufa. Como o termohigrômetro utilizado para medição das condições do ar de secagem precisou ser posicionado no fundo da estufa (atrás da peça), só era possível fazer a leitura no mesmo após retirar a peça da estufa. É importante ressaltar que essa mesma metodologia é empregada em diversos outros trabalhos experimentais de secagem de materiais cerâmicos (SILVA, 2009; SILVA 2018).

No Tópico 3.2. é apresentado a metodologia utilizada nos experimentos de convecção forçada para calcular a umidade relativa interna em função das temperaturas interna e externa da estufa, e da umidade relativa na região externa da estufa, adotando a consideração de que as umidades absolutas nas duas regiões são iguais em cada instante de tempo.

Para o experimento realizado com convecção natural, percebeu-se que a premissa adotada anteriormente não é válida. A umidade absoluta no interior da estufa é sempre superior àquela medida na região externa. Isto acontece devido à baixa renovação de ar para tal condição. Desta forma, assim como para o primeiro experimento, foi utilizado um termohigrômetro no interior da estufa para medição da temperatura e umidade relativa no interior da estufa.

A partir do primeiro experimento, percebeu-se também que as variações dimensionais da amostra ocorrem de maneira muito lenta. Desta forma, as medições dimensionais das bacias sanitárias foram realizadas da seguinte forma: medições após uma, três, seis e doze horas do início do experimento, seguidas de medições com intervalos de 12 horas. Com essa mesma periodicidade, foram tiradas fotos das amostras com uma câmera termográfica para verificar a existência de gradientes de temperatura na superfície da peça.

Na Figura 3.13 é possível observar os orifícios localizados na lateral inferior esquerda da estufa, os quais permitem realizar a renovação de ar. É possível manter um, dois, três ou quatro orifícios abertos, ou todos fechados. Todos os experimentos foram realizados com os quatro orifícios abertos, possibilitando melhor renovação do ar interno.

Figura 3.13 - Orifícios para renovação de ar localizados na lateral esquerda da estufa.



Na Figura 3.14 observa-se o ventilador da estufa, acionado por motor elétrico e localizado abaixo da bandeja inferior, que permite a realização de experimentos com convecção forçada. Para realização do experimento com convecção natural, interrompeu-se o fornecimento de energia elétrica ao motor que aciona o ventilador.

Figura 3.14 - Ventilador da estufa para convecção forçada e orifícios internos para renovação do ar.



3.1.3 Locais de realização dos experimentos de secagem

Os experimentos de secagem das bacias sanitárias foram realizados em dois laboratórios distintos:

- Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LABFILM), pertencente ao Centro de Energias Alternativas e Renováveis da Universidade Federal da Paraíba em João Pessoa – PB.
- Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais (TECNOMAT), vinculado ao departamento de Engenharia de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB.

A razão de realizar os experimentos de secagem em dois laboratórios distintos deveu-se ao interesse de avaliar a influência da umidade relativa do ar, para temperaturas iguais, no processo de secagem.

Como o LABFILM é um laboratório que têm dois aparelhos de ar condicionado e um desumidificador que permanecem ligados 24 horas por dia, a temperatura, a umidade relativa e, conseqüentemente, a umidade absoluta deste ambiente são bastante reduzidas.

Apesar de o TECNOMAT também ter aparelhos de condicionamento de ar, os mesmos foram mantidos desligados durante a realização dos experimentos para evitar a desumidificação do ar ambiente. Além disto, uma porta que dá acesso ao lado externo da edificação foi mantida aberta durante todos os experimentos para garantir ventilação e renovação de ar no laboratório, além de manter a umidade relativa do ambiente elevada.

3.1.4 Casos estudados

A Tabela 3.1 apresenta os casos estudados experimentalmente com seu respectivo local de realização, tipo de ventilação, temperatura (T), umidade relativa (UR) e velocidade (v) médias do ar de secagem, massa (m_0) e temperatura (T_0) iniciais da bacia sanitária.

Tabela 3.1 - Casos estudados experimentalmente.

Caso	Local	Tipo de Ventilação	Ar de secagem			Bacia sanitária	
			T (°C)	UR (%)	v (m/s)	m_0 (g)	T_0 (°C)
1	LABFILM	Forçada	30,1	23	0,1	16370	26,0
2	LABFILM	Forçada	35,0	20	0,1	15355	24,0
3	LABFILM	Forçada	40,0	14	0,1	18120	25,0
4	TECNOMAT	Forçada	30,0	51	0,1	15890	24,8
5	TECNOMAT	Forçada	35,1	41	0,1	16200	24,3
6	TECNOMAT	Forçada	40,0	35	0,1	15980	25,1
7	TECNOMAT	Natural	35,1	63	0,001	16515	24,0

Os valores de temperatura e umidade relativa para o ar de secagem apresentados na Tabela 3.1 são as médias das medições que foram realizadas durante todo o processo de secagem nos instantes de tempo pré-estabelecidos, conforme descrito anteriormente.

O valor da velocidade do ar de secagem para os casos com convecção forçada foi obtido fazendo uma média entre os valores lidos em 8 pontos distintos no espaço interior da estufa, utilizando anemômetro de fio quente, à temperatura ambiente e com uma amostra no interior. As medições foram realizadas com o ar na temperatura ambiente, pois considera-se que a velocidade não é influenciada pela temperatura do ar no interior da estufa e para evitar danificar o equipamento de medição. A amostra utilizada durante as medições de velocidade já tinha concluído o processo de secagem. Manteve-se a porta com uma abertura mínima necessária para fazer a leitura, reduzindo a influência do fluxo de ar para fora da estufa nos valores das medições.

Para o caso com convecção natural, utilizou-se uma estratégia diferente para medir a velocidade do ar de secagem, pois o seu valor é inferior à precisão do equipamento (0,01 m/s): mediu-se a velocidade do ar em diferentes orifícios da bandeja inferior, descobertos pela chapa de aço galvanizado (vide Figura 3.11), calculou-se a média e multiplicou o valor obtido pela razão entre a área dos orifícios e a área da seção transversal da estufa.

Esta pesquisa se diferencia dos demais trabalhos experimentais de secagem de materiais cerâmicos ao avaliar, para uma mesma temperatura, a influência da umidade relativa do ar, como pode ser observado ao comparar os parâmetros de secagem dos Casos 1 e 4 ($T = 30^{\circ}\text{C}$), Casos 2, 5 e 7 ($T = 35^{\circ}\text{C}$) e os Casos 3 e 6 ($T = 40^{\circ}\text{C}$).

Além disso, não foram encontrados na literatura resultados experimentais de secagem de materiais cerâmicos a baixas temperaturas (inferiores a 50°C). Em se tratando de louças sanitárias, não foram encontrados trabalhos experimentais de secagem.

3.2 Cálculos auxiliares

Após a realização dos experimentos de secagem, foram desenvolvidos cálculos auxiliares para determinação de parâmetros importantes a partir das variações da massa, dimensões e temperatura das amostras ao longo do processo, bem como temperatura e umidade relativa do ambiente. Tais parâmetros são úteis para comparar e discutir os resultados para os diferentes casos estudados.

- Massa de água

A quantidade de água na bacia sanitária (m_a), em cada tempo de medição, foi calculado em função da massa da amostra (m), no instante de tempo de interesse, e da massa seca da amostra (m_s), como segue:

$$m_a(t) = m(t) - m_s \quad (3.1)$$

Conforme mencionado anteriormente, a massa seca da amostra é o valor da massa obtido ao final do processo de secagem após a mesma permanecer na estufa por 24 horas à temperatura de 105°C. Considera-se que toda a água residual na amostra é evaporada após esse processo.

- Teor de umidade em base seca

O teor de umidade da amostra (M), em cada tempo de medição, foi calculado em função da massa de água da amostra (m_a), no instante de tempo de interesse, e da massa seca da amostra (m_s), conforme segue:

$$M(t) = \frac{m_a(t)}{m_s} \quad (3.2)$$

- Taxa de secagem

A taxa de secagem é definida como a derivada do teor de umidade pelo tempo de secagem. Desta forma, a taxa de secagem da amostra em um dado instante de tempo, $dM/dt(t)$, pode ser calculada como segue:

$$dM/dt(t) = - \frac{M(t) - M(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (3.3)$$

onde $M(t)$ é o teor de umidade no instante de tempo t , $M(t - \Delta t)$ é o teor de umidade no instante de tempo $t - \Delta t$, e Δt é o intervalo de tempo entre as duas medições. O sinal de menos foi introduzido na equação para obter valores positivos e decrescentes para a taxa de secagem.

- Teor de umidade adimensional

O teor de umidade adimensional da amostra (M^*), em cada tempo de medição, é calculado em função do teor de umidade (M), no instante de tempo de interesse, do teor de umidade inicial (M_0), e do teor de umidade de equilíbrio (M_e), como segue:

$$M^*(t) = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.4)$$

O teor de umidade de equilíbrio (M_e) é o teor de umidade da amostra calculado em função da massa de equilíbrio que, conforme descrito anteriormente, é o valor obtido no experimento de secagem após perceber que a massa da amostra não mais varia com o tempo e ainda manter na estufa por mais 24 horas, nas mesmas condições operacionais.

- Temperatura adimensional

A temperatura adimensional da amostra (T^*), em cada tempo de medição, é calculado em função da temperatura superficial da amostra (T), no instante de tempo de interesse, da temperatura inicial (T_0) e da temperatura de equilíbrio (T_e), conforme segue:

$$T^*(t) = \frac{T(t) - T_0}{T_e - T_0} \quad (3.5)$$

A temperatura de equilíbrio é a temperatura superficial da amostra no mesmo instante de tempo em que a massa de equilíbrio é obtida. Tal parâmetro é útil para comparar casos com diferentes temperaturas para o ar de secagem.

- Retração linear da amostra

Por se tratar de uma geometria complexa, é muito difícil quantificar a retração volumétrica das bacias sanitárias no decorrer dos experimentos de secagem. Em contrapartida, mediu-se cinco das principais medidas da bacia durante os experimentos de secagem. As cinco medidas foram altura, comprimento da base superior, largura da base superior, comprimento da base inferior e largura da base inferior, conforme Figura 3.15.

Figura 3.15 - Principais medidas da bacia para cálculo da retração linear.



Definiu-se, então, a retração linear da amostra em um dado instante de tempo (t) em função do somatório dessas cinco medidas no referido instante de tempo, $\sum_{i=1}^5 L_i(t)$, e do somatório dessas cinco medidas no início do processo de secagem $\sum_{i=1}^5 L_i(t_0)$, como segue:

$$\text{Retração linear } (t) = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^5 L_i(t)}{\sum_{i=1}^5 L_i(t_0)} \right) \times 100\% \quad (3.6)$$

onde L_i é o valor da medida i , que varia de 1 até 5.

- Umidade relativa do ar de secagem

Para calcular a umidade relativa do ar no interior da estufa para cada instante de tempo foi utilizada a seguinte metodologia:

A partir da temperatura (T) e umidade relativa do ar externo à estufa (UR), obtidos utilizando termohigrômetro digital, calcula-se a pressão de vapor de saturação (P_g) utilizando a equação de Tetens (1930), seguida pelo cálculo da pressão de vapor (P_v):

$$P_g = 0,61078e^{\left(\frac{17,27T}{T+237,3}\right)} \quad (3.7)$$

$$P_v = UR \cdot P_g \quad (3.8)$$

onde P_g e P_v são dados em kPa e T é a temperatura em graus Celsius (°C).

Posteriormente, é calculada a umidade absoluta do ar (ω) externo a estufa, definida como a razão entra a massa do vapor d'água no ar (m_v) e a massa do ar seco (m_A), conforme segue (MORAN; SHAPIRO; BOETTNER, 2009):

$$\omega = \frac{m_v}{m_A} = \frac{M_v P_v \forall / \bar{R}T}{M_A P_A \forall / \bar{R}T} = \frac{M_v \cdot P_v}{M_A \cdot P_A} = \frac{M_v \cdot P_v}{M_A \cdot (P - P_v)} = 0,622 \frac{P_v}{(P - P_v)} \quad (3.9)$$

onde 0,622 é a razão entra a massa molecular da água (M_v) e a massa molecular do ar seco (M_A). Além disso, assume-se que $P = 101,325\text{kPa}$ é a pressão atmosférica ao nível do mar.

Em seguida, considera-se que a umidade absoluta no interior da estufa é igual à umidade absoluta na região externa à estufa. Como as pressões atmosféricas são iguais, as pressões de vapor (P_v) nas duas regiões também são iguais. Posteriormente, calcula-se a pressão de vapor de saturação (P_g) para a temperatura do ar no interior da estufa utilizando-se novamente a Equação 3.7.

Por fim, conhecendo-se a pressão de vapor e a pressão de vapor de saturação, calcula-se a umidade relativa do ar no interior da estufa, como segue:

$$UR = \frac{P_v}{P_g} \quad (3.10)$$

É importante ressaltar que Monteith e Unsworth (2013) relatam que os valores da pressão de vapor de saturação da fórmula de Tetens apresentam um erro de até 1 Pa quando comparados com valores exatos para temperaturas até 35°C. Para confirmar a confiabilidade, compararam-se diversos resultados de umidade relativa no interior da estufa, para cada um dos experimentos realizados, utilizando a metodologia descrita, com os resultados exatos obtidos utilizando o software *Computer-Aided Thermodynamic Tables 3 (CATT3)*. A partir de tal análise, constatou-se que o erro absoluto máximo obtido para a umidade relativa no interior da estufa foi de 0,02%, garantindo a confiabilidade da formula de Tetens' na faixa de temperatura de estudo (entre 30 e 40°C).

3.3 Tratamento estatístico dos dados

O tratamento estatístico dos dados é realizado na estimativa do modelo empírico de secagem para cada caso analisado.

3.3.1 Medidas de qualidade de ajuste

Para selecionar e comprovar a qualidade dos modelos matemáticos adotados, três medidas de qualidade de ajustes foram calculadas: o coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão (S) e o erro máximo absoluto ($E_{\text{máx}}$).

a) Coeficiente de determinação (R^2)

Uma das principais formas de comparar modelos matemáticos com os dados observados é pelo cálculo do coeficiente de determinação (R^2), que se trata de uma medida de ajuste de um modelo estatístico linear generalizado. O coeficiente de determinação pode variar no intervalo entre 0 e 1 e quanto maior o seu valor, mais bem ajustado é o modelo matemático aos resultados experimentais.

O coeficiente de determinação é definido como a razão entre a soma dos quadrados da regressão e a soma total dos quadrados, como segue:

$$R^2 = \frac{SQ_{\text{regressão}}}{SQ_{\text{total}}} \quad (3.11)$$

Como a soma dos quadrados da regressão ($SQ_{\text{regressão}}$) é dado pela soma total dos quadrados (SQ_{total}) menos a soma dos quadrados dos resíduos ($SQ_{\text{resíduos}}$), tem-se:

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{\text{resíduos}}}{SQ_{\text{total}}} \quad (3.12)$$

Desta forma, tem-se:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.13)$$

onde y_i é o valor observado (obtido do experimento), $\hat{y}_i$ é o valor estimado (previsto pelo

modelo) de y_i , $\bar{y}$ é a média das observações e n é o número de observações.

Embora muitos softwares de estatística apresentem o R^2 como sendo a principal medida para validar um modelo estatístico, o mesmo não deve ser analisado exclusivamente, principalmente em se tratando de modelos não lineares (SPIESS; NEUMEYER, 2010). Segundo esses autores, utilizar apenas o R^2 em análise de regressão não linear levará ao modelo mais adequado apenas 28 a 43% das vezes.

b) Erro padrão (S)

O erro padrão (S) também fornece uma medida que possibilita avaliar a qualidade do ajuste com os dados observados (experimento). Diferentemente do coeficiente de determinação, o erro padrão fornece uma medida absoluta da distância típica entre os valores ajustados e observados.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.14)$$

onde y_i é o valor observado (obtido do experimento), $\hat{y}_i$ é o valor estimado (previsto pelo modelo) de y_i , $\bar{y}$ é a média das observações e n é o número de observações.

Pela Equação 3.14, percebe-se que a unidade do erro absoluto coincide com a unidade da variável dependente analisada. Quanto menor o seu valor, mais bem ajustado é o modelo dos dados experimentais. Além disso, o erro absoluto é mais indicado que o coeficiente de determinação (R^2) para análises de regressão não lineares (FROST, 2019).

c) Erro máximo absoluto ($E_{\text{máx}}$)

O erro máximo absoluto ($E_{\text{máx}}$) é uma outra forma de comparar diferentes modelos estatísticos com os dados observados, sendo matematicamente definido como segue:

$$E_{\text{máx}} = \max(|y_i - \hat{y}_i|)_{i=1}^n \quad (3.15)$$

Um elevado erro máximo absoluto indica um valor discrepante ou que o modelo é incapaz de identificar um dado fenômeno que esteja ocorrendo em uma condição específica (SHARMA, 2022). Desta forma, é importante ter esse parâmetro sob controle.

3.3.2 Modelo empírico de secagem

Modelos empíricos proporcionam uma relação direta entre o teor médio de umidade médio adimensional e o tempo de secagem. A Tabela 3.2 apresenta uma série de modelos matemáticos empíricos que são comumente utilizados na literatura. Tais modelos empíricos são compostos de uma certa quantidade de parâmetros que, por sua vez, são ajustados para cada experimento de secagem. Para obtenção dos valores de cada parâmetro, é necessário realizar uma análise de regressão, linear ou não linear. A maioria dos modelos apresentados na Tabela 3.2 são não-lineares, sendo necessário fazer uso de algoritmos iterativos para obtenção dos valores dos parâmetros que melhor ajustem o modelo aos dados experimentais.

Para determinar o modelo que melhor se adéqua aos resultados experimentais de um dado produto (frutas, vegetais, legumes, grãos, materiais cerâmicos...), é importante calcular e comparar as medidas de qualidade de ajustes, tais como o coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão (S) e o erro máximo absoluto ($E_{\text{máx}}$).

Os modelos apresentados na Tabela 3.2 foram testados utilizando o software *Statistica* e aquele que melhor se ajustou para todos os experimentos realizados foi o modelo de dois termos, conforme segue:

$$\overline{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t) + c_2 \exp(-k_2 t) \quad (3.16)$$

Os parâmetros empíricos c_1 , k_1 , c_2 e k_2 foram estimados utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt, com critério de convergência de 1×10^{-6} e número máximo de iterações de 1000.

Tabela 3.2 - Modelos empíricos para prever o teor de umidade médio adimensional.

nº	Nome do modelo	Modelo	Referência
1	Modelo de Newton	$\bar{M}^* = \exp(-k_1 t)$	EL-Beltagy, Gamea e Essa (2007)
2	Modelo de Page	$\bar{M}^* = \exp(-k_1 t^n)$	Akoy (2014); Tzempelikos et al. (2014)
3	Modelo de Page modificado (II)	$\bar{M}^* = \exp[-(k_1 t)^n]$	Vega et al. (2007)
4	Modelo de Page modificado (III)	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-t/k_1^2)^n$	Kumar, Hebbar e Ramesh (2006)
5	Modelo de Henderson e Pabis	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t^n)$	Meisami-Asl (2010); Hashim, Daniel e Rahaman (2014)
6	Modelo modificado de Henderson e Pabis	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t) + c_2 \exp(-k_2 t) + c_3 \exp(-k_3 t)$	Zenoozian et al. (2008)
7	Modelo de Midilli e colaboradores	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t) + c_2 t$	Darvishi e Hazbavi (2012); Ayadi et al. (2014)
8	Modelo logatímico	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t) + c_2$	Rayaguru e Routray (2012); Kaur e Singh (2014)
9	Modelo de dois termos	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t) + c_2 \exp(-k_2 t)$	Sacilik (2007)
10	Modelo exponencial de dois termos	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t) + (1 - c_1) \exp(-k_2 c_1 t)$	Dash et al. (2013)
11	Modelo de Hii e colaboradores	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t^n) + c_2 \exp(-k_2 t^n)$	Kumar, Sarkar e Sharma (2012)
12	Modelo de Demir e colaboradores	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t)^n + c_2$	Demir, Gunhan e Yagcioglu (2007)
13	Modelo de Verma e colaboradores	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t) + (1 - c_1) \exp(-k_2 t)$	Verma et al. (1985)
14	Modelo de difusão aproximado	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t) + (1 - c_1) \exp(-k_2 c_2 t)$	Yaldýz e Ertekýn (2001)
15	Modelo modificado de Midilli e colaboradores	$\bar{M}^* = c_1 \exp(-k_1 t) + c_2$	Gan e Poh (2014)
16	Modelo de Aghbashlo ecolaboadores	$\bar{M}^* = \exp\left(\frac{k_1 t}{1 + k_2 t}\right)$	Aghbashlo et al. (2009)
17	Modelo de Wang e Singh	$\bar{M}^* = 1 + k_1 t + k_2 t^2$	Omolola, Jideani e Kapila (2014)
18	Modelo de Diamante e colaboradores	$\ln(-\ln \bar{M}^*) = c_1 + c_2 (\ln t) + c_3 (\ln t)^2$	Diamante et al. (2010)
19	Modelo de Weibull	$\bar{M}^* = c_1 - c_2 \exp(-k_1 t^n)$	Tzempelikos et al. (2015)
20	Thompson	$t = c_1 \ln(\bar{M}^*) + c_2 [\ln(\bar{M}^*)]^2$	Pardeshi, Arora e Borker (2009)
21	Modelo de Silva e colaboradores	$\bar{M}^* = \exp(-c_1 t - c_2 \sqrt{t})$	Silva et al. (2014)
22	Modelo de Peleg	$\bar{M}^* = 1 - t/(c_1 + c_2 t)$	Silva et al. (2015)

Fonte: Adaptado de Lima (2020).

3.4 Desempenho de secagem

Para avaliar o desempenho do processo de secagem para cada experimento realizado, foram definidos alguns parâmetros, tais como o calor sensível para aquecer a bacia sanitária ($\dot{Q}_S$), o calor latente para evaporação da água ($\dot{Q}_L$), o calor total absorvido pela amostra ($\dot{Q}_T$), e o consumo de energia específico (CEE). Tais indicadores de desempenho do processo de secagem das bacias sanitárias são calculados em função das variações mássicas e de temperatura das amostras em cada intervalo de medição, conforme segue:

$$\dot{Q}_S = mc_p \frac{dT}{dt} = m_s(1 + \bar{M})c_p \frac{dT}{dt} \quad (3.17)$$

$$\dot{Q}_L = h_{fg} \frac{dm_a}{dt} = m_s h_{fg} \frac{d\bar{M}}{dt} \quad (3.18)$$

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_S + \dot{Q}_L \quad (3.19)$$

$$CEE = \frac{\dot{Q}_T \Delta t}{\Delta m_a} = \frac{\dot{Q}_T}{dm_a/dt} = \frac{\dot{Q}_T}{m_s d\bar{M}/dt} \quad (3.20)$$

onde c_p é o calor específico da amostra e h_{fg} é o calor latente de vaporização da água.

O calor específico da amostra (c_p) foi obtido experimentalmente a partir da técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial Modulada (THOMAS, 2005a, 2005b), do inglês Modulate Differential Scanning Calorimetry (MDSC). Para tanto, foi utilizado o equipamento Discovery SDT 650 da fabricante TA Instruments com temperatura variando de 25°C até 100°C, taxa de aquecimento de 3°C/min, amplitude de modulação de 1°C e período de modulação de 100s. Com base no experimento, o resultado do calor específico médio da amostra (c_p) e o seu respectivo desvio padrão, na faixa de temperatura de operação (30 a 40°C), foi de $1222,5 \pm 19,5$ J/(kgK).

O calor latente de vaporização da água (h_{fg}) em J/kg, em função da temperatura (T) em Kelvin, é obtido pela seguinte equação (HENDERSON-SELLERS, 1984):

$$h_{fg} = 1,91846 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{T}{T - 33,91} \right)^2 \quad (3.21)$$

Para determinar a energia sensível (Q_S), a energia latente (Q_L), a energia total (Q_T) absorvida pela amostra durante todo o processo de secagem, e o consumo de energia específico médio (CEE_M), foram utilizadas as seguintes equações:

$$Q_S = \int_0^{t_f} \dot{Q}_S(t) dt \cong \sum_{i=1}^N \dot{Q}_S(t_i) \times \Delta t_i \quad (3.22)$$

$$Q_L = \int_0^{t_f} \dot{Q}_L(t) dt \cong \sum_{i=1}^N \dot{Q}_L(t_i) \times \Delta t_i \quad (3.23)$$

$$Q_T = Q_S + Q_L \quad (3.24)$$

$$CEE_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CEE(t_i) \quad (3.25)$$

onde N é o número de intervalos de medição, $\dot{Q}_S(t_i)$, $\dot{Q}_L(t_i)$ são os calores sensível e latente, respectivamente, no instante de tempo t_i , $CEE(t_i)$ é o consumo de energia específico no instante de tempo t_i . t_f é o instante de tempo final do experimento e Δt_i é o intervalo de tempo entre os instantes de tempo t_i e t_{i+1} .

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados experimentais de secagem

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais de secagem em estufa de bacias sanitárias. A partir de tais resultados, torna-se possível avaliar a influência da temperatura e umidade relativa do ar de secagem na cinética de secagem.

A Tabela 4.1 indica as condições do ar de secagem para cada caso proposto, bem como a massa inicial (m_0), massa de água inicial (m_{a0}), massa de equilíbrio (m_e) e massa seca (m_s) das amostras. Observa-se que os valores de umidade relativa do ar de secagem para os três primeiros casos, que foram realizados no LABFILM, são menores que os valores obtidos nos demais casos, realizados no TECNOMAT. Isto ocorreu pois o LABFILM tem um desumidificador e dois aparelhos de ar condicionado que permaneceram ligados durante a realização dos experimentos, enquanto que os experimentos de secagem no TECNOMAT foram realizados sem desumidificador e com os aparelhos de ar condicionado desligados.

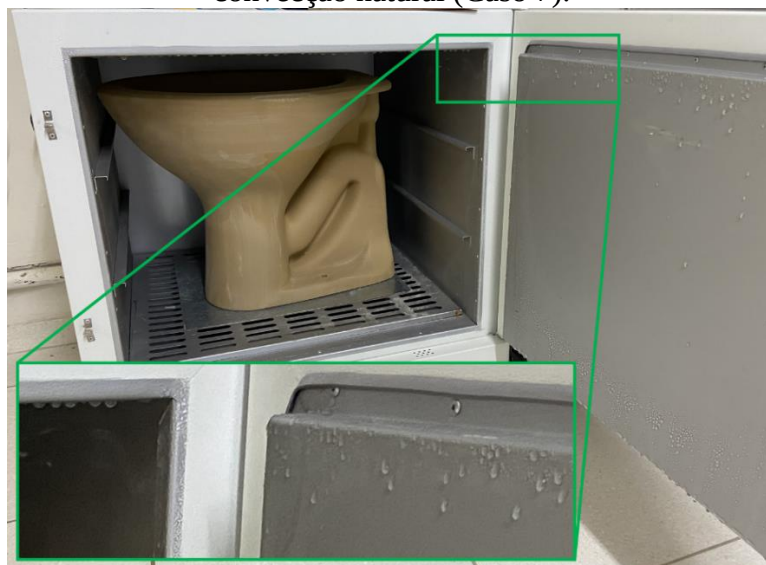
Tabela 4.1 - Resultados de massa inicial, de equilíbrio e massa seca para cada experimento.

Caso	Ar de secagem			Bacia sanitária			
	T (°C)	UR (%)	v (m/s)	m_0 (g)	m_{a0} (g)	m_e (g)	m_s (g)
1	30,1	23	0,1	16370	3040	13400	13330
2	35,0	20	0,1	15355	2785	12625	12570
3	40,0	14	0,1	18120	3080	15100	15040
4	30,0	51	0,1	15890	2865	13110	13025
5	35,1	41	0,1	16200	2700	13580	13500
6	40,0	35	0,1	15980	2875	13165	13105
7	35,1	63	0,001	16515	2985	13655	13530

Constata-se também que, para uma mesma condição ambiental externa (experimentos realizados no mesmo laboratório), quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor é a umidade relativa do ar. Este resultado está de acordo com o esperado pois com o aumento da temperatura há um aumento na pressão de vapor de saturação, aumentando a capacidade do ar em reter água no estado de vapor (umidade). A exceção é o Caso 7, que mesmo apresentando uma temperatura maior que o Caso 4, reportou uma maior umidade relativa média para o ar de secagem. Isto ocorreu pois o experimento foi realizado com convecção natural e, consequentemente, a renovação do ar no interior da estufa foi prejudicada. Desta forma, uma maior parte do vapor d'água que evapora da amostra durante o processo de secagem acaba ficando aprisionado no interior da estufa, aumentando a umidade absoluta do ar e,

consequentemente, a pressão do vapor d'água e a umidade relativa do ar de secagem. Este fato é corroborado pelo vapor de água que constantemente condensou nas partes internas do teto e da porta da estufa, observado apenas para o Caso 7, conforme evidenciado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Condensação do vapor d'água observado apenas para o experimento com convecção natural (Caso 7).



A partir da análise da Tabela 4.1, percebe-se também que embora se respeite o mesmo intervalo de tempo entre a retirada da amostra do molde e o início do experimento de secagem, há uma razoável diferença nas massas iniciais das amostras (m_0). Em termos absolutos, a diferença máxima entre as massas das amostras é de 2765g, comparando-se os Casos 2 e 3. Em termos percentuais, a massa da amostra 2 corresponde a 84,74% da massa da amostra 3. Isto pode ter ocorrido por três razões principais: diferenças dimensionais nos moldes das peças, tempo em que as amostras permaneceram nos moldes e diferenças na composição da barbotina (matéria-prima) em cada uma das amostras, visto que as coletas foram realizadas em semanas distintas. A massa inicial média das amostras nos 7 experimentos realizados e o respectivo desvio padrão foi 16347 ± 804 g.

Nas Tabelas A.1–A.7 do Apêndice A, são apresentados os principais dados obtidos, em cada instante de medição, para cada um dos sete experimentos de secagem realizados.

As Figuras 4.2–4.8 ilustram o teor de umidade médio e a taxa de secagem da amostra em função do tempo para cada um dos casos analisados. Tais resultados são importantes para entender a cinética de secagem de bacias sanitárias para diferentes condições de temperatura e umidade relativa.

Figura 4.2 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 23\%$).

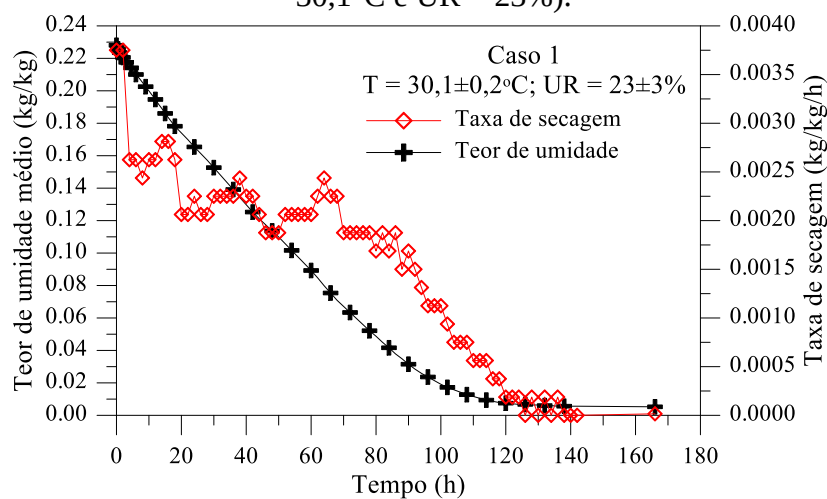


Figura 4.3 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 20\%$).

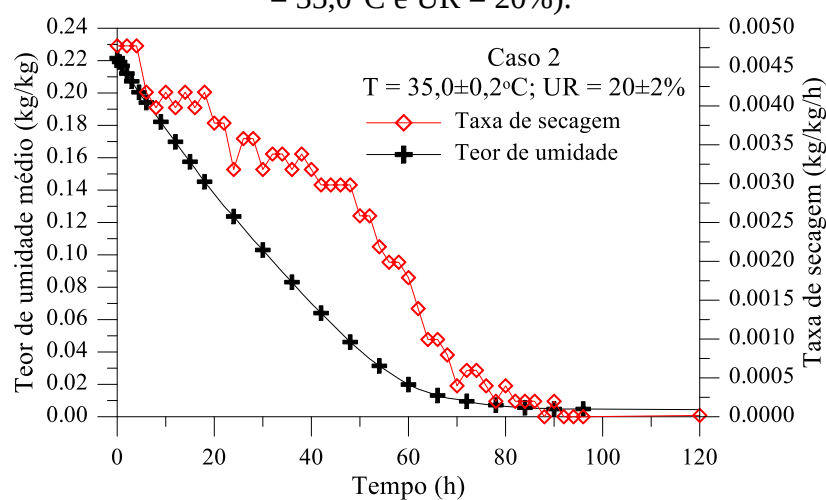


Figura 4.4 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 14\%$).

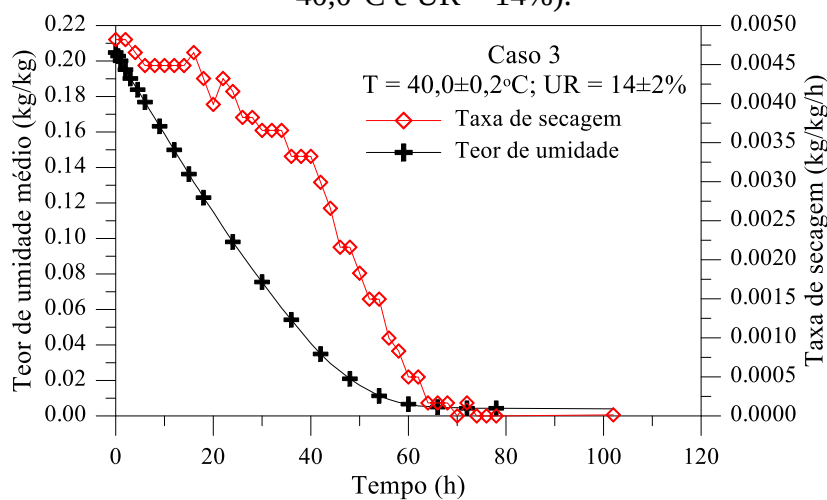


Figura 4.5 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$).

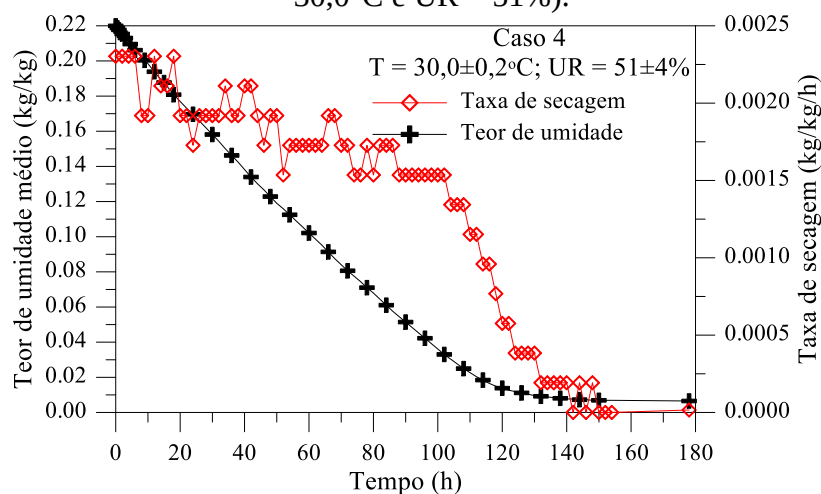


Figura 4.6 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$).

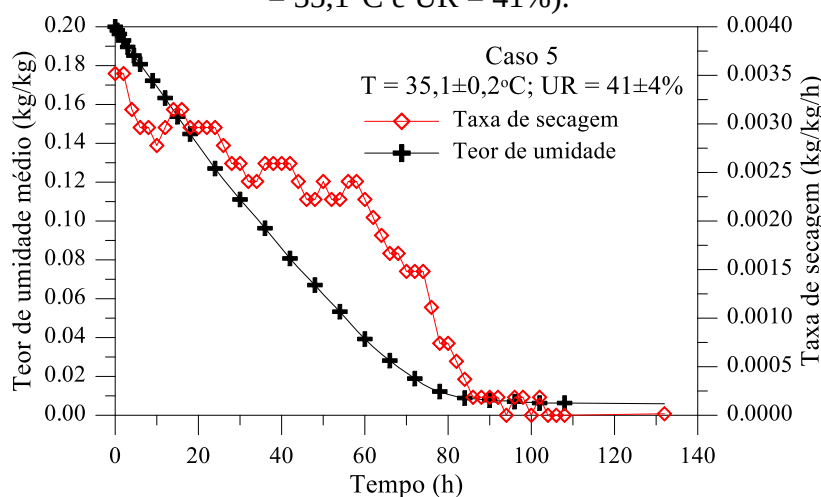


Figura 4.7 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$).

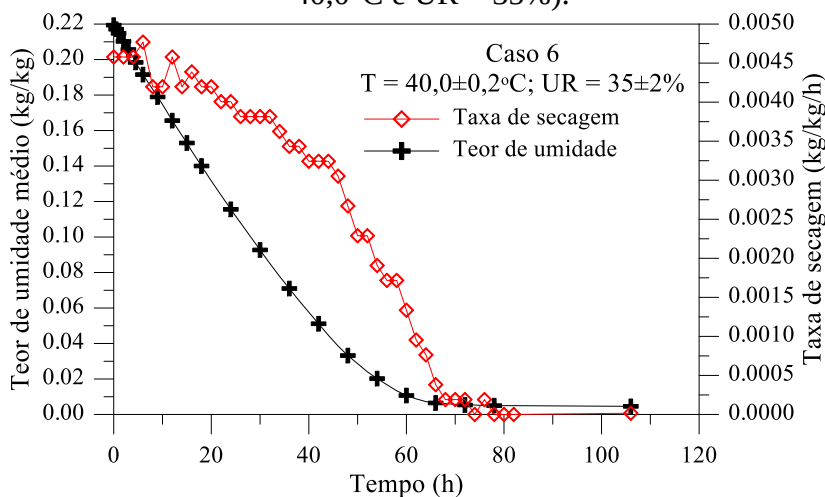
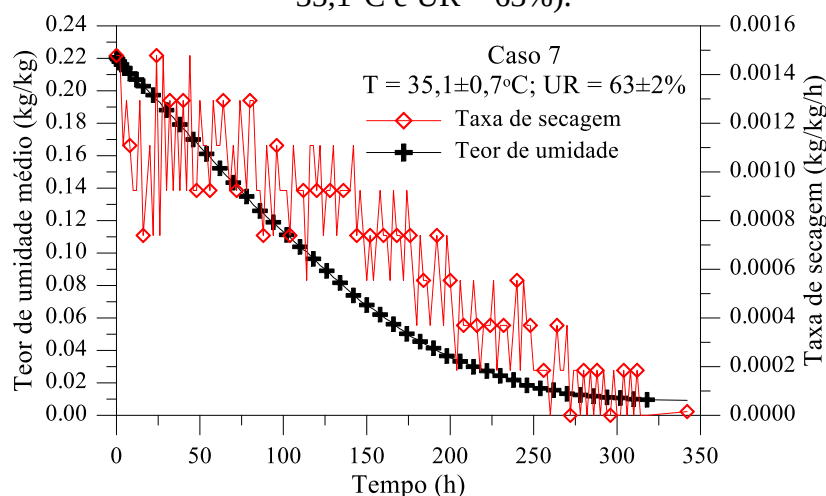


Figura 4.8 - Teor de umidade médio e taxa de secagem em função do tempo para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 63\%$).



Analisando as curvas de teor de umidade médio em função do tempo para cada um dos casos analisados, há a sensação de uma relação linear entre as duas variáveis nos instantes iniciais do processo, o que indicaria o primeiro estágio de secagem, no qual a taxa de evaporação da água contida no produto não varia com o tempo. Entretanto, ao analisar as curvas de taxa de secagem em função do tempo, observa-se que as mesmas decrescem com o tempo já nos nas primeiras horas do processo, embora decaimentos mais acentuados são observados, em geral, na segunda metade do experimento de secagem. Nas horas finais do processo de secagem, observa-se um decaimento assintótico da taxa de secagem com o tempo, tendendo para zero ao se aproximar da condição de equilíbrio higroscópico.

A ausência de um período de taxa de secagem constante também foi reportada na literatura para secagem de tijolos cerâmicos (SILVA, 2009; SILVA et al., 2012), blocos cerâmicos industriais (SILVA, 2018; SILVA et al., 2020) e fibra de sisal (DINIZ, 2018; DINIZ et al., 2021) com temperaturas do ar de secagem variando entre 50°C e 100°C . Entretanto, para tais casos, o decaimento mais acentuado da taxa de secagem com o tempo ocorreu nos instantes iniciais do processo. Razões para este fato são os menores valores de teor de umidade inicial das amostras, os maiores valores para temperatura do ar de secagem, composição do material, retrações volumétricas e geometria da peça, fatores estes que influenciam na difusividade mássica efetiva do produto.

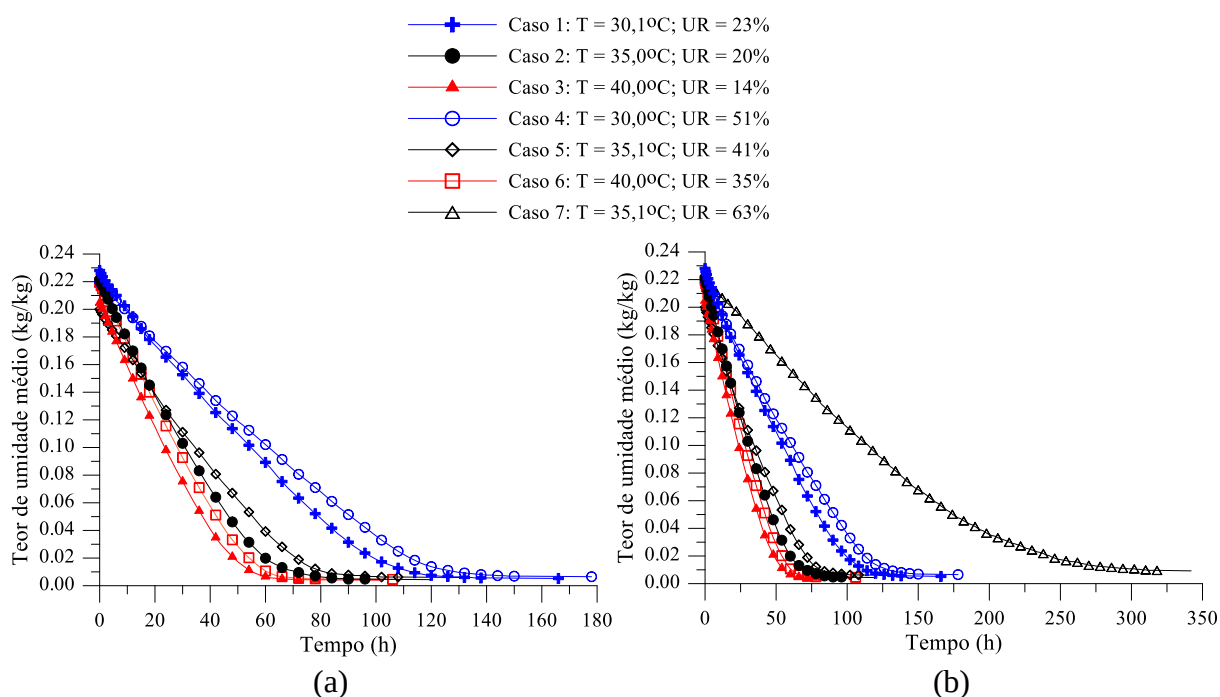
Observa-se que o gráfico da taxa de secagem para convecção natural (Caso 7) apresenta grandes oscilações durante todo o experimento. Isto ocorreu devido as grandes oscilações na temperatura do ar no interior da estufa, como é apresentado posteriormente, oriunda da baixa renovação de ar. Para os casos com convecção forçada, o desvio padrão máximo observado

para a temperatura do ar de secagem foi de $0,2^{\circ}\text{C}$, enquanto que para o experimento com convecção natural, o desvio padrão foi de $0,7^{\circ}\text{C}$.

Percebe-se que para os experimentos com convecção forçada (Casos de 1 a 6) também ocorrem oscilações na taxa de secagem, sendo mais evidentes nas primeiras horas do processo. Fatores que podem ter influenciado essas oscilações são: retiradas periódicas das amostras da estufa para medições de massa, temperatura e dimensões; precisão da balança (5 g) e intervalo de tempo entre duas medições seguidas. Conforme mencionado anteriormente, a partir de 18 horas até o final do experimento de secagem, o intervalo entre duas medições foi de apenas duas horas. Caso o intervalo adotado fosse maior, as oscilações na taxa de secagem seriam menos evidentes.

A Figura 4.9 compara os teores de umidade das amostras em função do tempo para todos os experimentos realizados, sendo a Figura 4.9a sem o resultado do Caso 7 e a Figura 4.9b com o resultado do Caso 7, pois o tempo de secagem deste último experimento é muito superior aos demais, dificultando a diferenciação entre as cinéticas de secagem dos casos com convecção forçada.

Figura 4.9 - Teor de umidade médio em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.



A partir da análise da Figura 4.9 observa-se que a secagem ocorreu de forma mais rápida para o experimento com maior temperatura (40°C) e menor umidade relativa (14%) do ar de secagem (Caso 3), ou seja, o teor de umidade reduziu do seu valor inicial até o valor de

equilíbrio em um menor tempo. O caso com a segunda secagem mais rápida foi aquele realizado no TECNOMAT (maior umidade relativa) com temperatura também de 40°C (Caso 6). Em seguida, tem-se os Casos 2 ($T = 35^{\circ}\text{C}$; $\text{UR} = 20\%$) e 5 ($T = 35^{\circ}\text{C}$; $\text{UR} = 41\%$), que apresentam curvas de secagem mais próximas dos experimentos realizados com temperatura de 40°C (Casos 3 e 6) do que dos casos com temperatura de 30°C (Casos 1 e 4).

Por fim, percebe-se que o Caso 7, mesmo apresentando uma temperatura do ar de secagem intermediária (35°C), apresentou uma curva de secagem muito mais lenta que os experimentos realizados com temperatura de 30°C. Isto ocorreu pois o Caso 7 foi realizado com convecção natural e, conseqüentemente, baixa renovação do ar no interior da estufa, fazendo com que a umidade relativa se mantenha em um nível elevado durante a maior parte do experimento de secagem.

Estes resultados evidenciam que a temperatura do ar de secagem não é o único fator que influencia na cinética de secagem. A umidade relativa do ar é um parâmetro de fundamental importância na secagem de materiais cerâmicos. A redução da umidade relativa do ar favorece a transferência de massa de água do interior da peça para o ar de secagem em consequência da maior evaporação de água na superfície. Desta forma, fica evidente que, para determinadas situações, é mais interessante dedicar esforços para reduzir a umidade do ar de secagem ao invés de buscar soluções para elevar a temperatura do mesmo.

A Figura 4.10 ilustra a comparação entre os teores de umidade médio adimensional das amostras em função do tempo para todos os experimentos realizados. Percebe-se que ao apresentar o teor de umidade desta forma, todas as curvas de secagem iniciam no mesmo ponto, no eixo das ordenadas, e terminam interceptando o eixo das abcissas. Normalmente os modelos empíricos de secagem são apresentados em termos do teor de umidade médio adimensional devido a uma maior facilidade no ajuste.

A Figura 4.11 mostra a comparação entre as taxas de secagem das amostras em função do tempo para todos os experimentos realizados. Observa-se a proximidade entre as taxas de secagem para os Casos 2, 3 e 6 durante praticamente todo o processo. Os Casos 1 e 4 também apresentam taxas de secagem próximas durante praticamente todo o processo.

Com relação ao Caso 5, percebe-se que a taxa de secagem se aproxima dos Casos 1 e 4 nos instantes iniciais e a partir de 50 horas apresenta um comportamento mais próximo dos Casos 2, 3 e 6. Não coincidentemente, a bacia sanitária utilizada no Caso 5 ($T = 35^{\circ}\text{C}$; $\text{UR} = 41\%$) foi aquela que apresentou um menor teor de umidade inicial dentre todas as amostras. É bem provável que se o teor de umidade inicial para amostra do Caso 5 fosse um pouco maior,

as curvas de teor de umidade e taxa de secagem se aproximariam mais dos Casos 1 e 4 (experimentos realizados com $T = 30^{\circ}\text{C}$) que dos Casos 2, 3 e 6. Isso corrobora a afirmação de que o aumento da umidade relativa do ar de secagem reduz a taxa de secagem do produto, fixadas as demais condições de secagem.

Figura 4.10 - Teor de umidade médio adimensional em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.

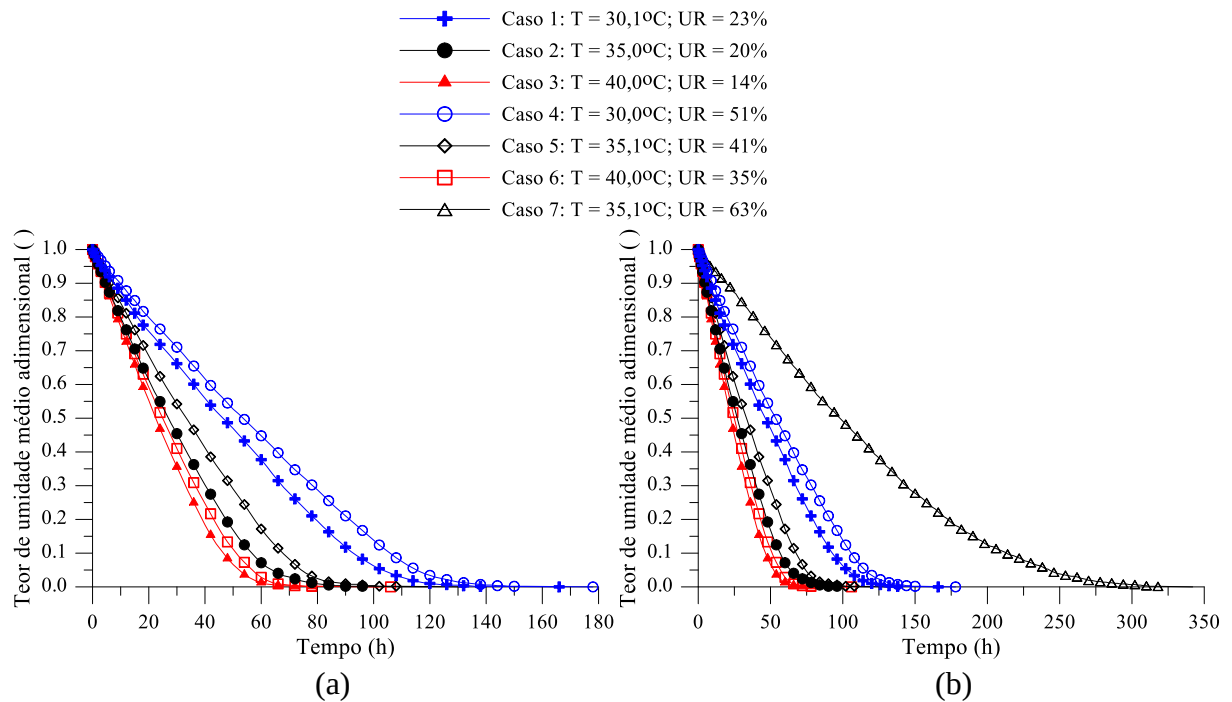
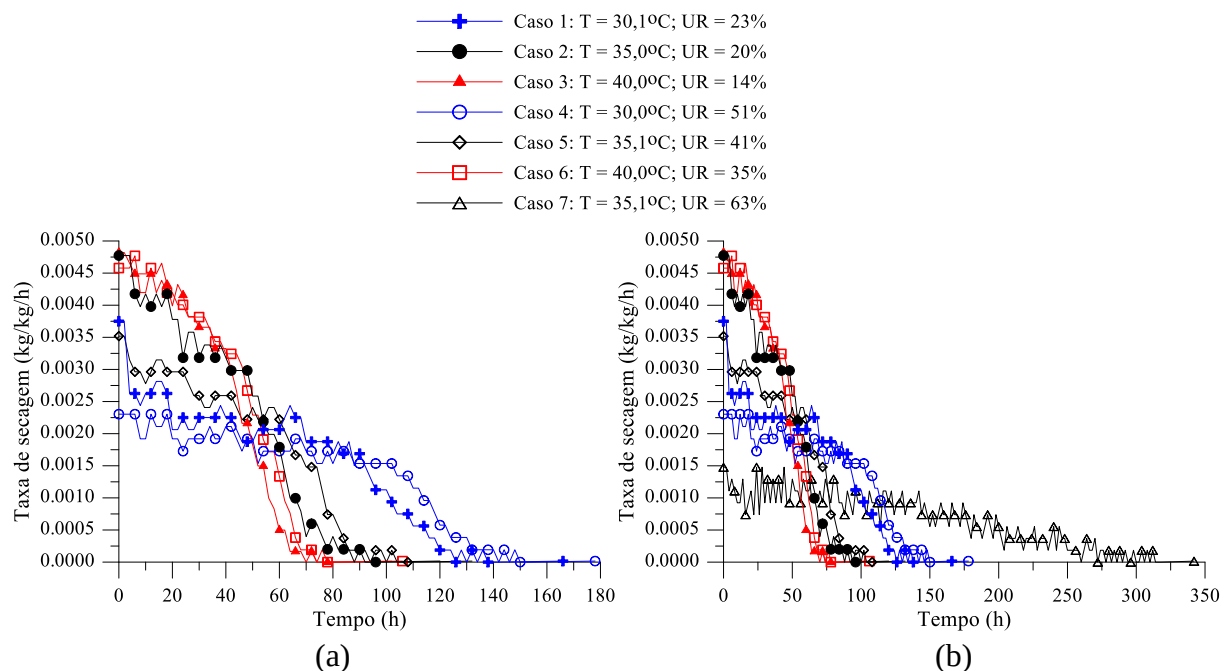
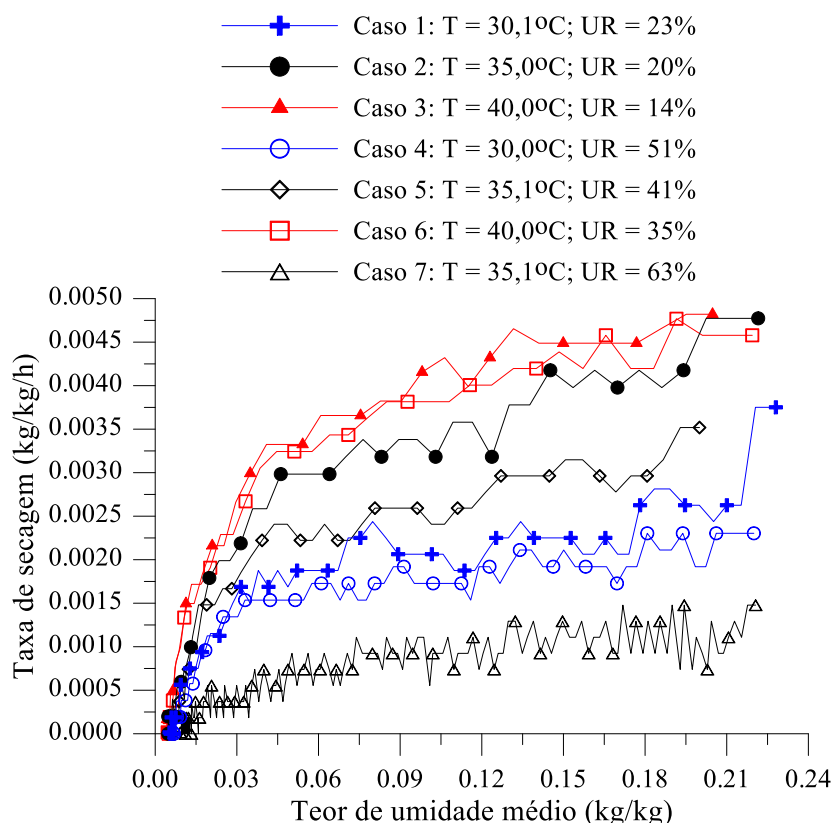


Figura 4.11 - Taxa de secagem em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.



A Figura 4.12 ilustra a comparação entre as taxas de secagem das amostras em função do teor de umidade médio para todos os experimentos realizados. Percebe-se que, para maioria dos experimentos, há um decaimento acentuado na taxa de secagem quando o teor de umidade médio da amostra se aproxima de 0,03 kg/kg.

Figura 4.12 - Taxa de secagem em função do teor de umidade médio para todos os casos analisados.



Nas Figuras 4.13 e 4.14 são apresentadas imagens das amostras utilizadas nos Casos 2 e 4, respectivamente, no início e final do processo de secagem. Observa-se uma nítida mudança na coloração da peça devido a perda de umidade durante o experimento. Entretanto, não foram observadas trincas ou fissuras em decorrência do processo de secagem. Esse resultado está de acordo com o esperado pois esses defeitos só ocorrem quando os gradientes de temperatura e teor de umidade na peça são elevados, e para materiais cerâmicos a tendência é que isto aconteça para elevadas temperaturas do ar de secagem. Estes resultados corroboram com os obtidos por Silva (2009), que só observou pequenas trincas em tijolos cerâmicos para temperaturas superiores a 80°C e Silva (2018), que relatou pequenas fissuras em blocos cerâmicos industriais para temperaturas a partir de 60°C.

Figura 4.13 - Amostra utilizada no Caso 2 (LABFILM; $T = 35,0^{\circ}\text{C}$; $UR = 20\%$) antes (a) e após (b) o experimento de secagem em estufa.

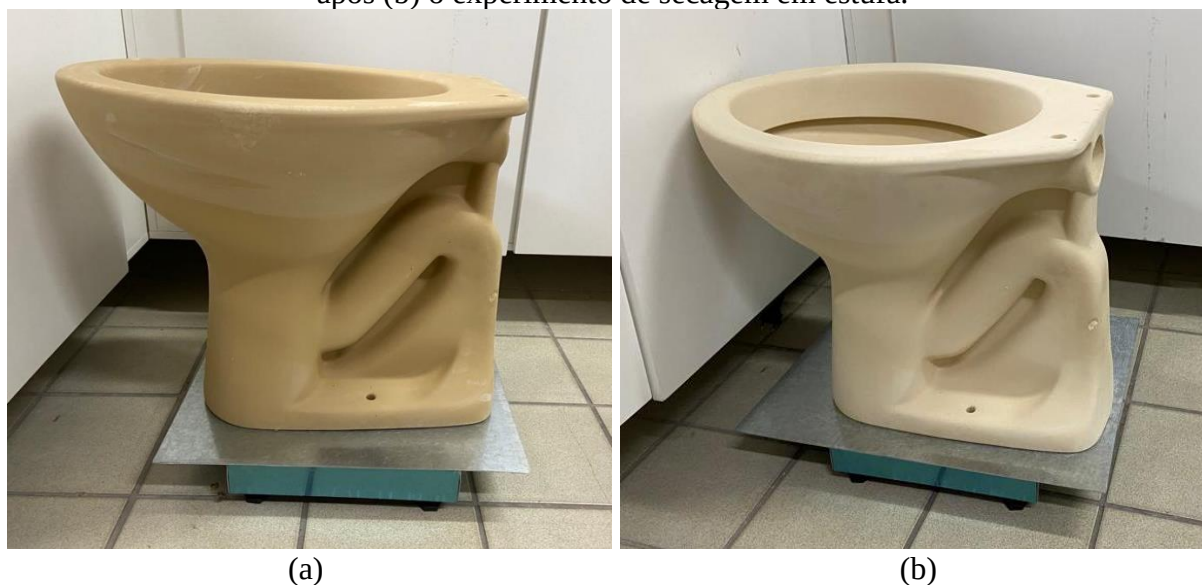


Figura 4.14 - Amostra utilizada no Caso 4 (TECNOMAT; $T = 30,0^{\circ}\text{C}$; $UR = 51\%$) antes (a) e após (b) o experimento de secagem em estufa.



As Figuras 4.15–4.21 ilustram a temperatura do ar de secagem, a temperatura superficial da amostra e a umidade relativa do ar de secagem em função do tempo de processo para cada um dos experimentos realizados. É interessante notar que, para todos os casos analisados, a temperatura superficial da amostra aumentou rapidamente de seu valor inicial até um valor intermediário, entre a temperatura inicial e a temperatura do ar de secagem, oscilando em torno deste valor intermediário durante o experimento, para só no final aproximar-se da temperatura do ar de secagem.

A partir de observações, percebeu-se que a temperatura superficial voltou a subir no momento em que a mudança na coloração da amostra tornou-se mais evidente, já nos instantes finais do processo de secagem. Desta forma, é razoável supor que a mudança na coloração da amostra modifica a emissividade do material, variável que influencia diretamente na temperatura lida pelo termômetro infravermelho digital. Além disso, neste momento de secagem, a amostra está quase seca e a energia por ela absorvida é utilizada quase totalmente como calor sensível para aumentar sua temperatura.

O aumento acentuado da temperatura superficial das amostras nos instantes iniciais dos processos de secagem é uma característica do primeiro período de taxa decrescente, sendo mais um indício de que nos experimentos realizados não houve o período de taxa constante (ou primeiro estágio de secagem), um processo que ocorre a temperatura constante e com valor igual à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem.

As maiores oscilações nos valores obtidos para a umidade relativa do ar nos Casos 4 e 5, ambos realizados no TECNOMAT, é justificada pelo fato de ter chovido em alguns momentos durante a realização destes experimentos. Como uma porta que dá acesso ao lado externo da edificação foi mantida aberta, ocorreu que nos momentos de chuva, a umidade relativa do ar no interior da estufa aumentou por influência da condição externa.

Figura 4.15 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 23\%$).

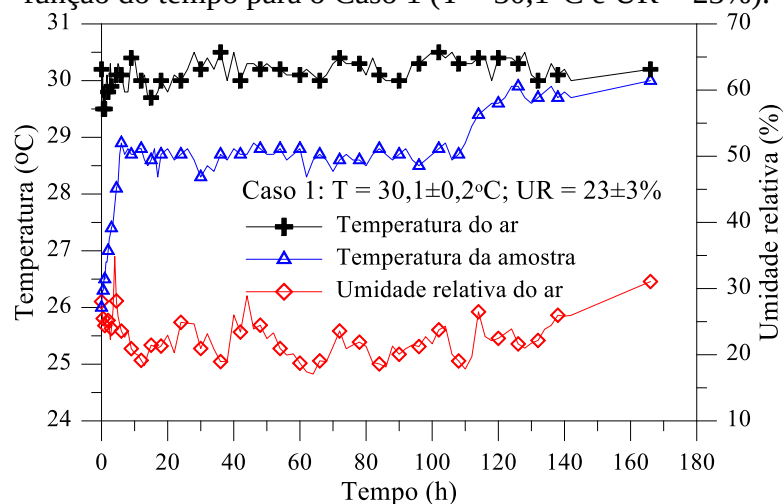


Figura 4.16 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 20\%$).

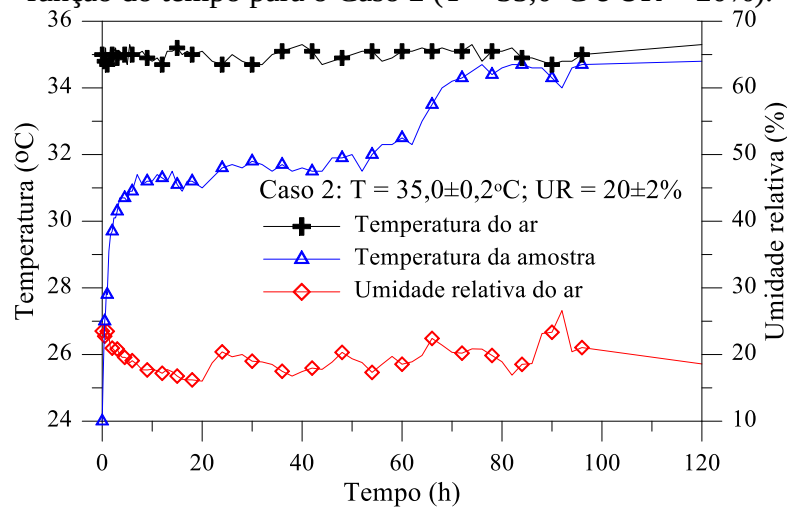


Figura 4.17 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 14\%$).

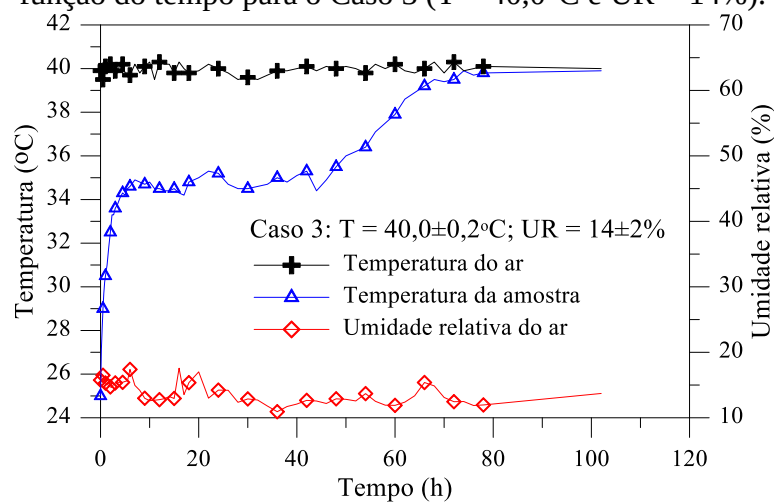


Figura 4.18 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$).

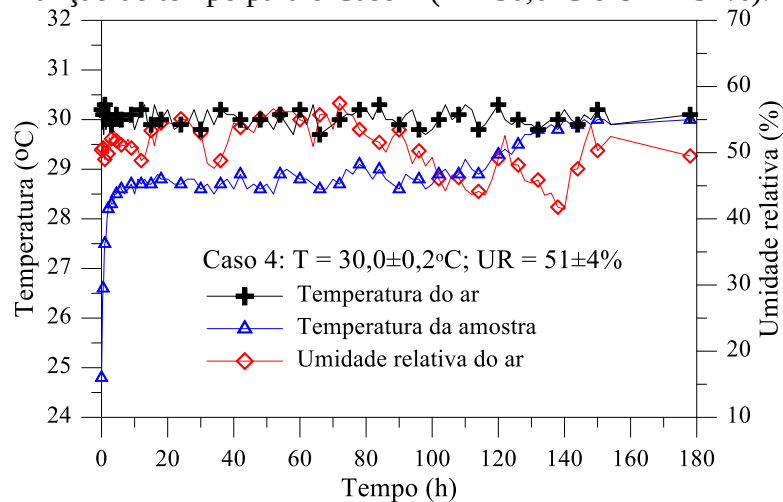


Figura 4.19 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 5 ($T = 35,1^\circ\text{C}$ e $UR = 41\%$).

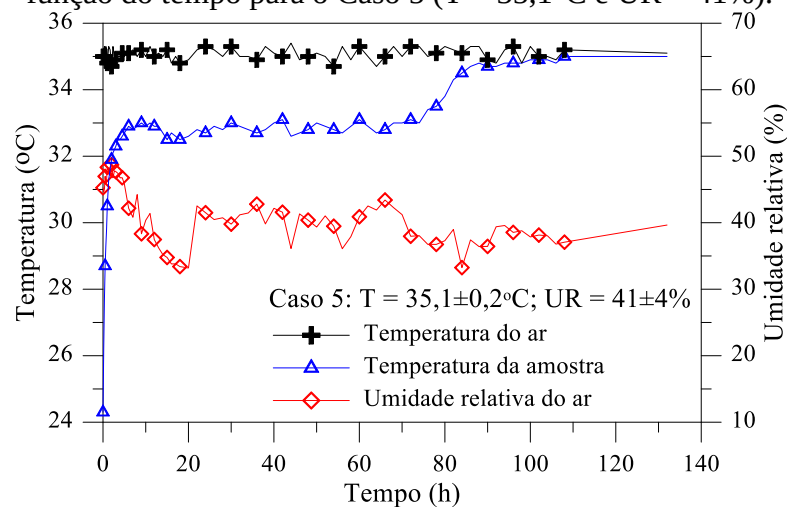


Figura 4.20 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 6 ($T = 40,0^\circ\text{C}$ e $UR = 35\%$).

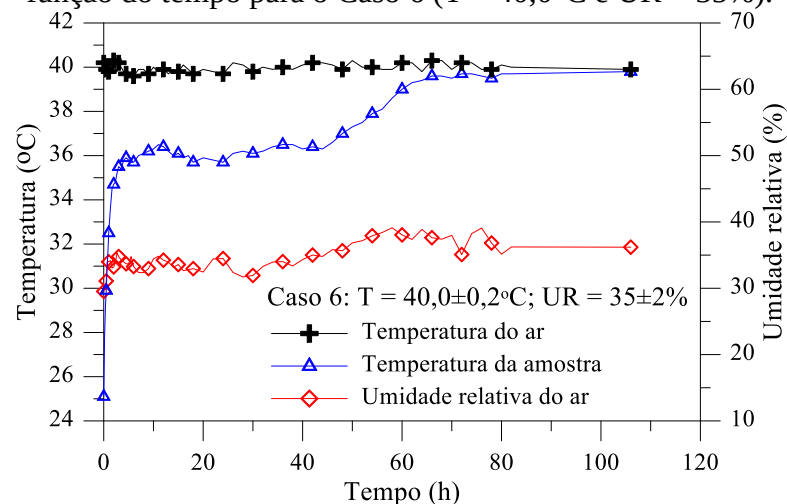
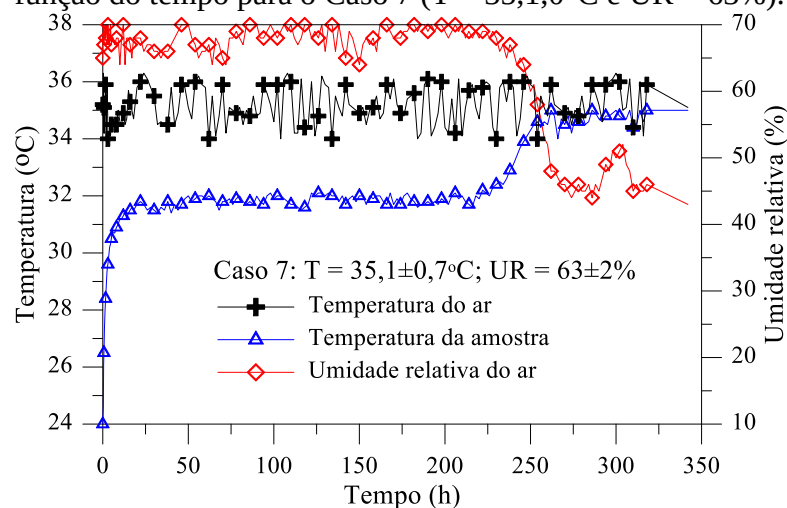


Figura 4.21 - Temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura superficial da amostra em função do tempo para o Caso 7 ($T = 35,1,0^\circ\text{C}$ e $UR = 63\%$).



Também foram observadas maiores oscilações na umidade relativa para o Caso 1, realizado no LABFILM. Isto ocorreu porque durante o primeiro experimento houve maior circulação de pessoas no laboratório em alguns períodos. Como as pessoas expiram ar mais úmido do que inspiram, e também pelas constantes renovações de ar sempre que a porta do laboratório era aberta para entrada ou saída de pessoas, seria natural que houvesse aumento na umidade relativa do ar ambiente e, conseqüentemente, do ar de secagem no interior da estufa em períodos de maior circulação de pessoas no laboratório.

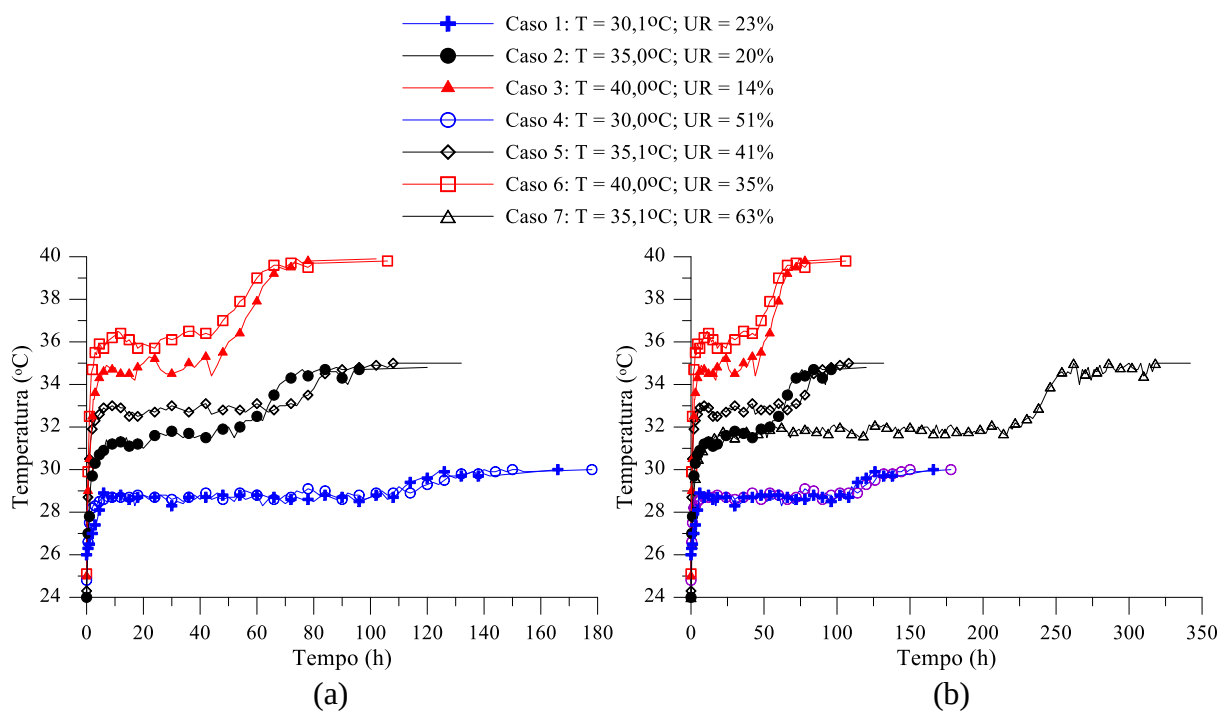
Observa-se que para o Caso 7 a umidade relativa do ar de secagem se manteve em patamar entre 65 e 70% durante boa parte do experimento e após 250 horas de experimento reduziu o seu valor para algo entre 45 e 50%. Isto ocorreu pois nessa fase do processo de secagem, o teor de umidade da peça já apresentava valores próximos do equilíbrio e, conseqüentemente, a perda de umidade do produto para o ar foi bastante reduzido. Nesta etapa final do processo, a umidade absoluta do ar no interior da estufa tendeu a se aproximar da umidade absoluta do ar na região externa a estufa, assim como nos experimentos com convecção forçada.

Com relação a temperatura do ar de secagem, percebe-se que para todos os experimentos realizados com ventilação forçada (Casos 1 a 6), as oscilações em torno dos valores definidos inicialmente foram mínimas, com variações máximas de 0,3 a 0,5°C dependendo do experimento e desvio padrão de aproximadamente 0,2°C para todos os casos. Já para o experimento realizado com convecção natural (Caso 7), a temperatura do ar no interior da estufa apresentou oscilações maiores. A temperatura mínima observada foi 34°C e a máxima de 36,3°C durante o experimento. O desvio padrão foi de 0,7°C. Essa é uma característica da estufa utilizada, que funciona com menores oscilações na temperatura do ar interno quando operada com convecção forçada (ventilador ligado).

A Figura 4.22 ilustra a comparação entre as temperaturas superficiais das amostras em função do tempo para todos os experimentos realizados. Entre os experimentos realizados a 40°C, percebe-se que a temperatura intermediária oscilante foi maior para o caso com maior umidade relativa (Caso 6). Além disto, percebeu-se que ambos os casos atingiram o patamar superior de temperatura aproximadamente no mesmo instante de tempo. Para os experimentos com temperatura de 35°C, o maior valor da temperatura intermediária foi observado para o caso com umidade relativa intermediária (Caso 5), enquanto que os Casos 2 e 7 apresentaram valores similares para a temperatura intermediária. Percebe-se também que o patamar superior de temperatura foi alcançado primeiro para o caso com menor umidade relativa (Caso 2), seguido do experimento com umidade relativa intermediária (Caso 5) e muito depois para o Caso 7. Os

experimentos realizados com temperatura de 30°C apresentaram um comportamento bastante similar ao longo de todo o experimento, tanto no valor da temperatura intermediária, quanto no instante em que o patamar superior de temperatura foi alcançado.

Figura 4.22 - Temperatura superficial da amostra em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.



Nas Figuras B.1–B.7 do Apêndice B são apresentados os termogramas obtidos em dois instantes de tempo para cada um dos casos analisados.

Na Figura 4.23 é apresentada a comparação entre as temperaturas superficiais das amostras em função do teor de umidade médio para todos os experimentos realizados. Mais uma vez, fica evidente que a temperatura superficial da amostra aumenta rapidamente do seu valor inicial até um valor intermediário, com uma pequena variação no teor de umidade médio, e permanece nesse patamar até que o teor de umidade médio atinja um valor próximo de 0,03, quando a temperatura volta a subir, aproximando-se da temperatura do ar de secagem.

A Figura 4.24 ilustra a comparação entre a temperatura adimensional das amostras em função do tempo para todos os experimentos realizados. Fica evidente que para todos os experimentos realizados, a temperatura adimensional rapidamente aumenta de 0 até um valor entre 0,6 e 0,8, dependendo do caso, permanece um tempo oscilando nessa faixa, para que apenas nos instantes finais do processo de secagem o seu valor retorna a subir, alcança um valor próximo de 1 e permanece oscilando próximo deste valor até a conclusão do experimento.

Figura 4.23 - Temperatura superficial da amostra em função do teor de umidade médio para todos os casos analisados.

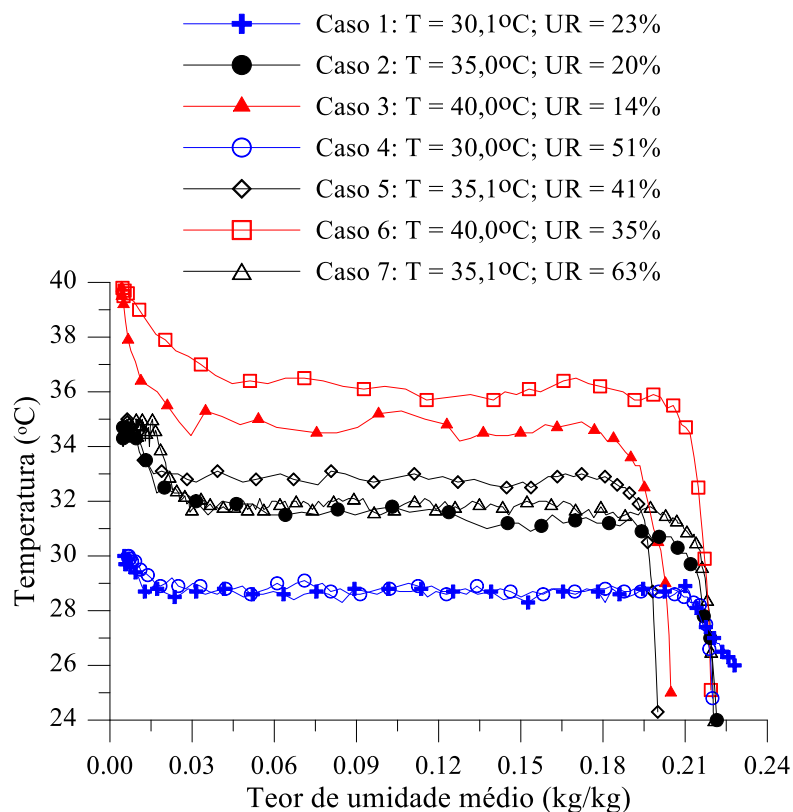
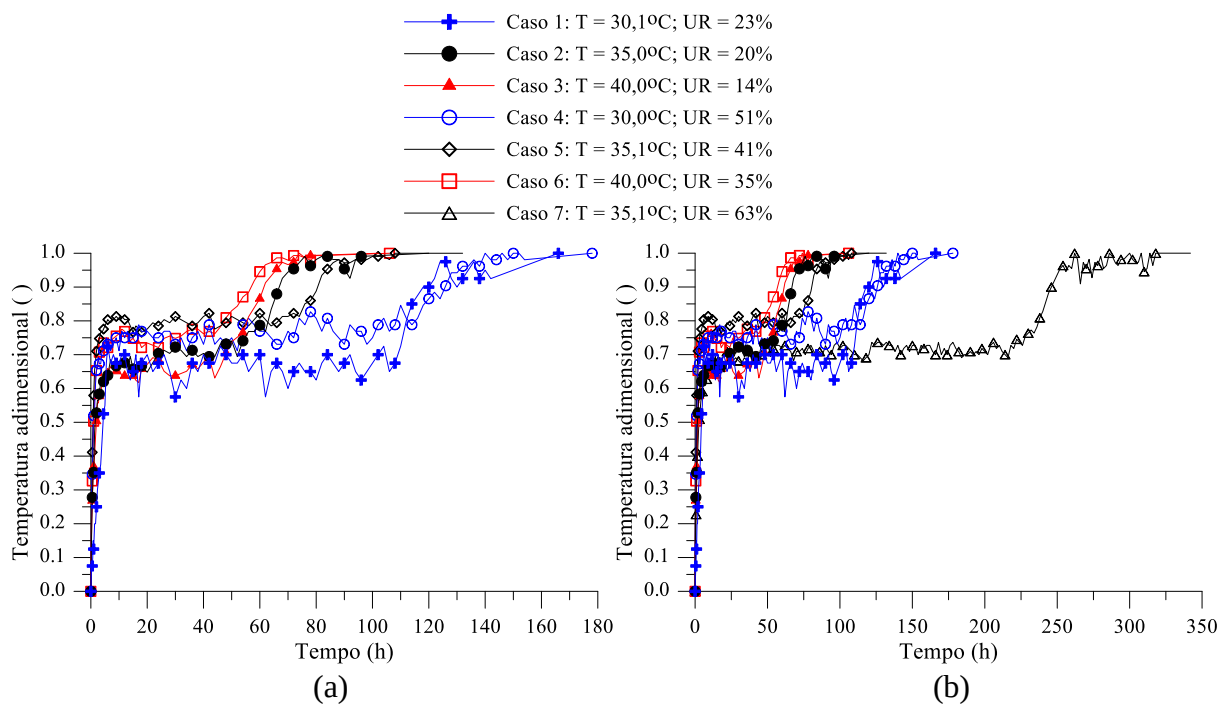
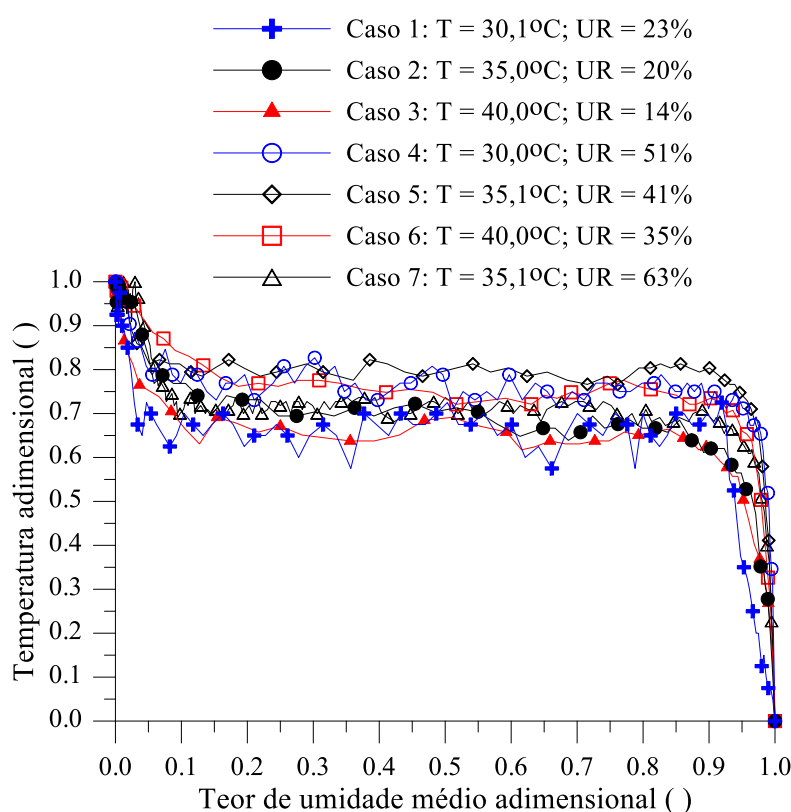


Figura 4.24 - Temperatura adimensional em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.



Ao observar a Figura 4.25, que ilustra a temperatura adimensional em função do teor de umidade médio adimensional da amostra para todos os experimentos realizados, é possível observar que a temperatura adimensional das amostras retoma o seu aumento quando o teor de umidade médio adimensional se encontra no intervalo entre 0,05 e 0,1. Tal constatação também pode ser verificada nas Figuras C.1–C.7 do Apêndice C, onde são apresentados o teor de umidade médio adimensional e a temperatura adimensional da amostra em função do tempo de secagem para cada um dos sete casos analisados experimentalmente.

Figura 4.25 - Temperatura adimensional em função do teor de umidade médio adimensional.



A Tabela 4.2 indica o teor de umidade inicial (M_0), o teor de umidade de equilíbrio (M_e), o tempo necessário para alcançar a condição de equilíbrio (t_e) e a temperatura superficial de equilíbrio (T_e) para cada um dos experimentos realizados. Observa-se que apesar de respeitar o mesmo intervalo de tempo entre a retirada da amostra do molde e o início do experimento de secagem, que foi de aproximadamente duas horas e meia, há uma razoável diferença nos teores de umidade iniciais das amostras.

Tabela 4.2 - Resultados de teor de umidade inicial e de equilíbrio, tempo para alcançar a condição de equilíbrio e temperatura de equilíbrio para cada experimento de secagem.

Caso	Ar de secagem			Bacia sanitária			
	T (°C)	UR (%)	v (m/s)	M ₀ (kg/kg, b.s)	M _e (kg/kg, b.s)	t _e (h)	T _e (°C)
1	30,1	23	0,1	0,22806	0,00525	166	30,0
2	35,0	20	0,1	0,22156	0,00438	120	34,8
3	40,0	14	0,1	0,20479	0,00399	102	39,9
4	30,0	51	0,1	0,21996	0,00653	178	30,0
5	35,1	41	0,1	0,20000	0,00593	132	35,0
6	40,0	35	0,1	0,21938	0,00458	106	39,8
7	35,1	63	0,001	0,22062	0,00924	342	35,0

O maior teor de umidade inicial foi observado para a amostra do Caso 1, com valor de 0,22806, enquanto que o menor valor foi observado para o Caso 5, com valor de 0,20000, uma diferença de 0,02806 em termos absolutos e 14,03% em termos percentuais. Comparando estes resultados com os resultados apresentados na Tabela 4.1, percebe-se que maiores valores de teores de umidade iniciais não estão associados com maiores valores de massa inicial.

Razões para os diferentes valores obtidos para os teores de umidade inicial são as possíveis diferentes condições do ar no setor da fundição da empresa parceira durante as etapas de enchimento do molde, drenagem do excesso de barbotina e remoção das peças do molde; tempo de permanência da peça no molde e eficiência de absorção de umidade do molde. Esta última, segundo Cavalcante (2005), tende a diminuir com o maior número de ciclos de utilização.

Constata-se que, com exceção do Caso 7, que foi realizado com convecção natural, quanto maior a temperatura no interior da estufa, menor foi o tempo necessário para alcançar a condição de equilíbrio (t_e) e que para dois experimentos realizados na mesma temperatura, o tempo foi menor para menores valores de umidade relativa. Desta forma, a ordem crescente do tempo total de secagem para os experimentos foi 3-6-2-5-1-4-7.

Observa-se que a diferença entre os tempos totais de secagem para os experimentos realizados com temperatura de 40°C foi de apenas quatro horas. Já para os demais experimentos realizados com convecção forçada, as diferenças no tempo total de secagem, entre casos realizados na mesma temperatura, foram de 12 horas. Isto indica que para temperaturas entre 30 e 35°C, a umidade relativa tem influência significativa no tempo total de secagem enquanto que para a temperatura de 40°C a influência é mínima.

Percebe-se que a ordem crescente dos teores de umidade de equilíbrio (M_e), 3-2-6-1-5-4-7 foi um pouco diferente da ordem crescente do tempo para alcançar a condição de equilíbrio (t_e). As diferenças foram que o teor de umidade de equilíbrio do Caso 2 ($T = 35,0^\circ\text{C}$ e $UR = 20\%$) foi menor que o valor obtido para o Caso 6 ($T = 40,0^\circ\text{C}$ e $UR = 35\%$) e o teor de umidade de equilíbrio para o Caso 1 ($T = 30,1^\circ\text{C}$ e $UR = 23\%$) foi menor que o valor obtido para o Caso 5 ($T = 35,1^\circ$ e $UR = 41\%$). As duas diferenças sugerem que os menores valores de umidades relativas (Casos 1 e 2) influenciaram de forma mais significativas que os maiores valores de temperatura (Casos 5 e 6) nos resultados obtidos para o teor de umidade de equilíbrio.

Com relação ao experimento realizado com convecção natural (Caso 7), percebe-se que o tempo necessário para alcançar a condição de equilíbrio corresponde a 1,92 vezes o tempo obtido para experimento mais lento com convecção forçada (Caso 4) e 3,35 vezes o tempo obtido para o experimento mais rápido com convecção forçada (Caso 3). O teor de umidade de equilíbrio para o Caso 7 corresponde a 1,42 vezes o valor obtido para o Caso 4 (maior valor para convecção forçada) e 2,32 vezes o valor obtido para o Caso 3 (menor valor para convecção forçada).

A Tabela 4.3 indica o intervalo de tempo necessário para reduzir o teor de umidade de 0,20 para 0,15 ($\Delta t_{M=0,20 \rightarrow 0,15}$), de 0,20 para 0,10 ($\Delta t_{M=0,20 \rightarrow 0,10}$), de 0,20 para 0,05 ($\Delta t_{M=0,20 \rightarrow 0,05}$) e de 0,20 para 0,01 ($\Delta t_{M=0,20 \rightarrow 0,01}$). Normalmente as empresas do setor de louças sanitárias definem um tempo fixo, com base em experiência, que cada tipo de produto deve permanecer no setor de pré-secagem antes de ir para a etapa de secagem propriamente dita. Normalmente este tempo é de um a três dias, dependendo do tipo de produto (FORTUNA et al., 2017). Uma melhor forma de fazer isto seria definir um teor de umidade ideal em que o produto deve ser levado para a secagem a altas temperaturas, como por exemplo, quando o seu valor for igual a 0,15. Como base no teor de umidade desejado e nas condições do ar no ambiente em que está sendo realizado a secagem a baixas temperaturas, é possível estimar quanto tempo o produto deve permanecer no setor de pré-secagem antes de ser levado para a secagem a altas temperaturas.

Desta forma, é possível adaptar o tempo de pré-secagem do produto em função das condições do ar no ambiente, que pode variar significativamente em diferentes épocas do ano, caso não haja um bom controle dos parâmetros do processo. Além disto, esta metodologia serve como tomada de decisão para obtenção de um menor tempo de operação no setor da pré-secagem, proporcionando uma redução no consumo energético.

Tabela 4.3 - Comparação entre os tempos necessários para reduzir o teor de umidade médio da amostra de 20% para 15, 10, 5 e 1%.

Caso	Ar de secagem			Bacia sanitária			
	T (°C)	UR (%)	v (m/s)	$\Delta t_{M=0,20 \rightarrow 0,15}$ (h)	$\Delta t_{M=0,20 \rightarrow 0,10}$ (h)	$\Delta t_{M=0,20 \rightarrow 0,05}$ (h)	$\Delta t_{M=0,20 \rightarrow 0,01}$ (h)
1	30,1	23	0,1	21,212	44,829	69,295	102,922
2	35,0	20	0,1	12,209	26,294	42,107	66,640
3	40,0	14	0,1	10,958	22,509	36,233	54,280
4	30,0	51	0,1	24,850	52,022	81,738	119,750
5	35,1	41	0,1	16,250	34,571	55,385	81,333
6	40,0	35	0,1	11,454	23,890	38,147	56,516
7	35,1	63	0,001	44,810	95,867	155,417	288,947

A mesma ordem crescente que foi observada para o tempo total de secagem também pode ser observada para os intervalos de tempo necessários para reduzir o teor de umidade médio de 0,20 para 0,15, 0,10, 0,05 e 0,01, ou seja, Casos 3-6-2-5-1-4-7. Desta forma, para os experimentos realizados com convecção forçada, quanto maior a temperatura no interior da estufa, menores são os intervalos de tempo necessários para reduzir o teor de umidade médio de 0,20 para 0,15, 0,10, 0,05 e 0,01, e que para dois experimentos realizados na mesma temperatura, os intervalos de tempo são menores para menores valores de umidade relativa. Observa-se que para experimentos realizados em um mesmo laboratório, os intervalos de tempo necessários para reduzir o teor de umidade médio de 0,20 para 0,15, 0,10, 0,05 e 0,01, para os casos com temperatura de 35°C são mais próximos quando comparados com os mesmos intervalos para os casos com 40°C do que para os casos com 30°C.

Comparando os intervalos de tempo para experimentos com convecção forçada realizados com mesma temperatura, percebe-se que há uma maior proximidade entre os casos realizados com 40°C do que para os casos realizados com 30°C e 35°C, assim como foi para o tempo total de secagem.

Com relação ao experimento realizado com convecção natural (Caso 7), percebe-se que os intervalos de tempo necessários para reduzir o teor de umidade médio de 0,20 para 0,15, 0,10, 0,05 e 0,01 correspondem a 1,80, 1,84, 1,90 e 2,41 vezes os valores obtidos para o experimento mais lento com convecção forçada (Caso 4), respectivamente, e 4,09, 4,26, 4,29 e 5,32 vezes os valores obtidos para o experimento mais rápido com convecção forçada (Caso 3), respectivamente.

Nas Tabelas 4.4–4.10 são indicados os dados das variações dimensionais e de massa antes e após a secagem para cada um dos casos analisados. É possível observar que, para todos

os casos analisados, as variações percentuais no comprimento e largura da parte inferior da amostra foram inferiores às variações percentuais obtidas para o comprimento e largura da parte superior e para a altura da amostra. Uma possível razão para isto ter ocorrido é que a chapa na qual a bacia sanitária é apoiada no interior da estufa pode ter promovido uma restrição dimensional devido ao contato direto e peso da amostra, limitando a retração da base da mesma. Outro fator que pode justificar este resultado é o efeito da área superficial da amostra que é maior na parte superior, favorecendo a transferência de massa de água para o ar de secagem por evaporação e, conseqüentemente, proporcionando maiores retrações nessa região.

Tabela 4.4 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 1 (T = 30,1°C e UR = 23%).

Caso 1	Altura (mm)	Parte superior		Parte inferior		Massa (g)
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	
Início da secagem	430	513	412	426	221	16370
Término da secagem	417	498	399	415	215	13400
Variação	-13	-15	-13	-11	-6	-2970
Variação percentual	-3,02%	-2,92%	-3,16%	-2,58%	-2,71%	-18,14%

Tabela 4.5 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 2 (T = 35,0°C e UR = 20%).

Caso 2	Altura (mm)	Parte superior		Parte inferior		Massa (g)
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	
Início da secagem	420	510	415	423	218	15355
Término da secagem	408	496	403	414	213	12625
Variação	-12	-14	-12	-9	-5	-2730
Variação percentual	-2,86%	-2,75%	-2,89%	-2,13%	-2,29%	-17,78%

Tabela 4.6 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 3 (T = 40,0°C e UR = 14%).

Caso 3	Altura (mm)	Parte superior		Parte inferior		Massa (g)
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	
Início da secagem	438	515	418	429	222	18120
Término da secagem	424	499	405	419	217	15100
Variação	-14	-16	-13	-10	-5	-3020
Variação percentual	-3,20%	-3,11%	-3,11%	-2,33%	-2,25%	-16,67%

Tabela 4.7 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 4 (T = 30,0°C e UR = 51%).

Caso 4	Altura (mm)	Parte superior		Parte inferior		Massa (g)
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	
Início da secagem	428	508	413	423	219	15890
Término da secagem	416	493	402	413	214	13110
Variação	-12	-15	-11	-10	-5	-2780
Variação percentual	-2,80%	-2,95%	-2,66%	-2,36%	-2,28%	-17,50%

Tabela 4.8 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 5 (T = 35,1°C e UR = 41%).

Caso 5	Altura (mm)	Parte superior		Parte inferior		Massa (g)
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	
Início da secagem	432	510	410	426	220	16200
Término da secagem	420	496	399	417	215	13580
Variação	-12	-14	-11	-9	-5	-2620
Variação percentual	-2,78%	-2,75%	-2,68%	-2,11%	-2,27%	-16,17%

Tabela 4.9 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 6 (T = 40,0°C e UR = 35%).

Caso 6	Altura (mm)	Parte superior		Parte inferior		Massa (g)
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	
Início da secagem	430	510	410	426	219	15980
Término da secagem	418	495	399	416	214	13165
Variação	-12	-15	-11	-10	-5	-2815
Variação percentual	-2,79%	-2,94%	-2,68%	-2,35%	-2,28%	-17,62%

Tabela 4.10 - Variações dimensional e de massa da amostra para o Caso 7 (T = 35,1°C e UR = 63%).

Caso 7	Altura (mm)	Parte superior		Parte inferior		Massa (g)
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	
Início da secagem	432	512	412	428	222	16515
Término da secagem	420	497	400	418	217	13655
Variação	-12	-15	-12	-10	-5	-2860
Variação percentual	-2,78%	-2,93%	-2,91%	-2,34%	-2,25%	-17,32%

Na Tabela 4.11 é apresentado os resultados de retração linear final e variação mássica final para todos os experimentos de secagem. Quanto maior o valor da retração linear final

indica que maior foi o encolhimento da peça durante o experimento de secagem. A ordem decrescente dos maiores encolhimentos foi 1-3-7-6-4-2-5 enquanto que a ordem decrescente das maiores variações mássicas foi 3-1-7-6-4-2-5. Nota-se que a única diferença nas ordens é que o maior encolhimento foi observado para o Caso 1, seguido do Caso 3, enquanto que a maior variação mássica foi observada para o Caso 3, seguido do Caso 1, comprovando que há uma relação direta entre a perda de umidade e o encolhimento da amostra nos experimentos de secagem.

Tabela 4.11 - Resultados da retração linear final e variação mássica final para todos os experimentos de secagem.

Caso	Ar de secagem			Retração linear final (%)	Variação mássica final (g)
	T (°C)	UR (%)	v (m/s)		
1	30,1	23	0,1	2,8799	-2970
2	35,0	20	0,1	2,5830	-2730
3	40,0	14	0,1	2,7993	-3020
4	30,0	51	0,1	2,6134	-2780
5	35,1	41	0,1	2,5182	-2620
6	40,0	35	0,1	2,6091	-2815
7	35,1	63	0,001	2,6418	-2860

Nas Tabelas D.1-D.7 do Apêndice D, são apresentadas as principais dimensões da bacia (altura, comprimento e largura da base superior, comprimento e largura da base inferior) e a retração linear, em cada instante de medição, para cada um dos sete experimentos de secagem realizados.

As Figuras 4.26-4.32 ilustram a retração linear e a massa da amostra em função do tempo de secagem para cada um dos casos analisados. A partir da análise das figuras, constata-se que as curvas de retração linear e massa da amostra ao longo do tempo apresentam correlação linear inversa (ou negativa) para cada um dos os experimentos realizados. Este fato é confirmado pelo cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, que foi de aproximadamente -0,997 para todos os casos analisados. Observa-se também maiores inclinações na retração linear nos instantes iniciais de secagem, indicando que o fenômeno de encolhimento de materiais cerâmicos é mais severo no início do processo. Além disto, percebe-se que nos instantes finais do processo de secagem de praticamente todos os experimentos, ocorrem oscilações nos valores da retração linear, provavelmente devido a erros de medição.

Figura 4.26 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 23\%$).

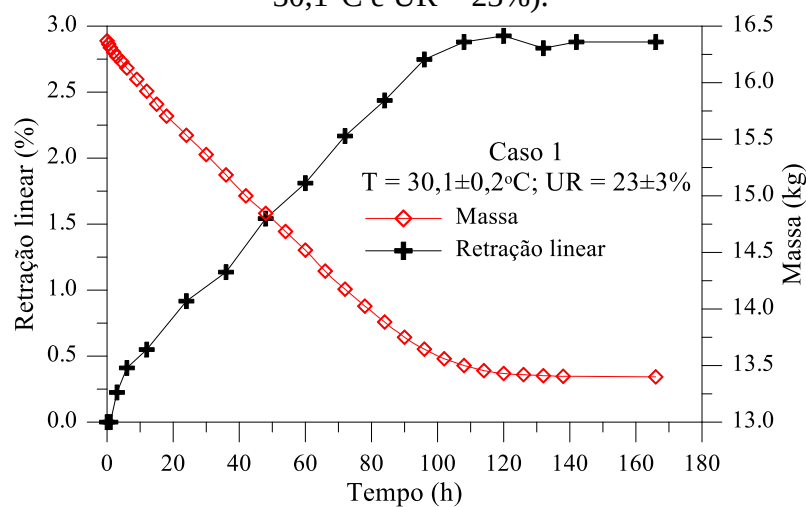


Figura 4.27 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 20\%$).

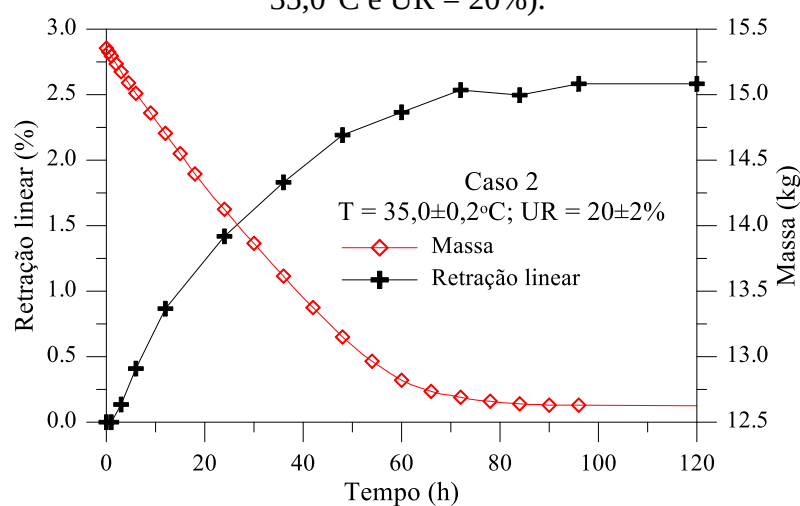


Figura 4.28 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 14\%$).

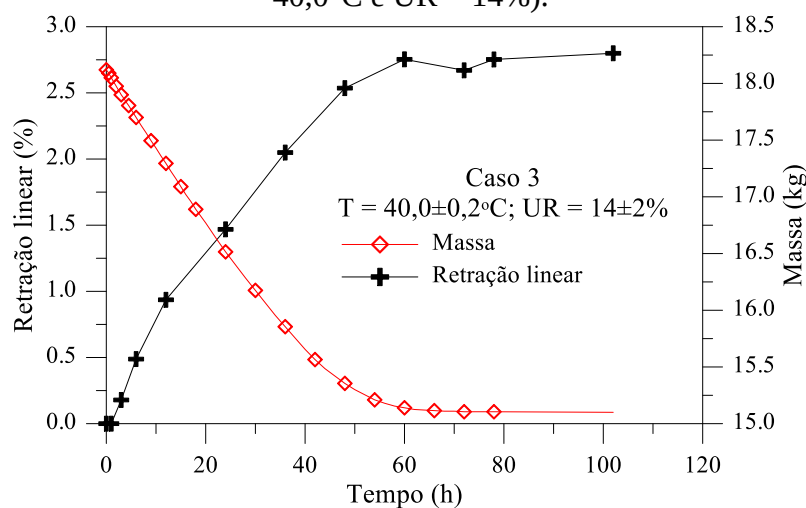


Figura 4.29 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 51\%$).

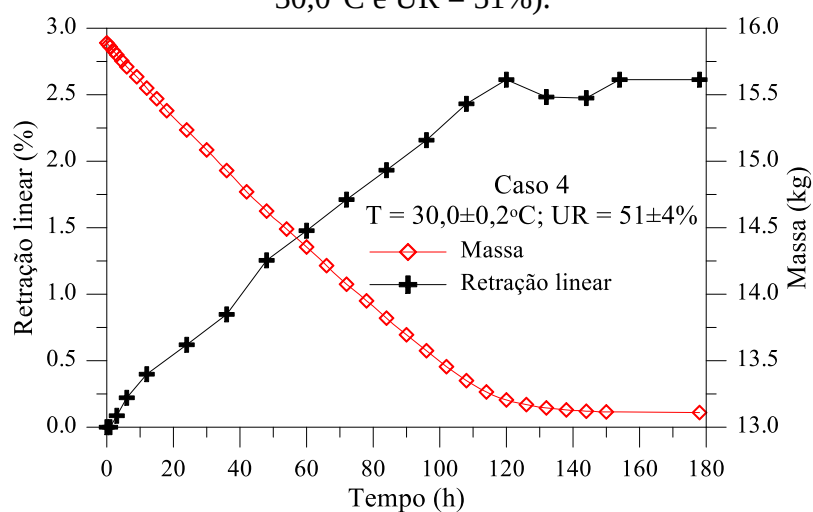


Figura 4.30 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$).

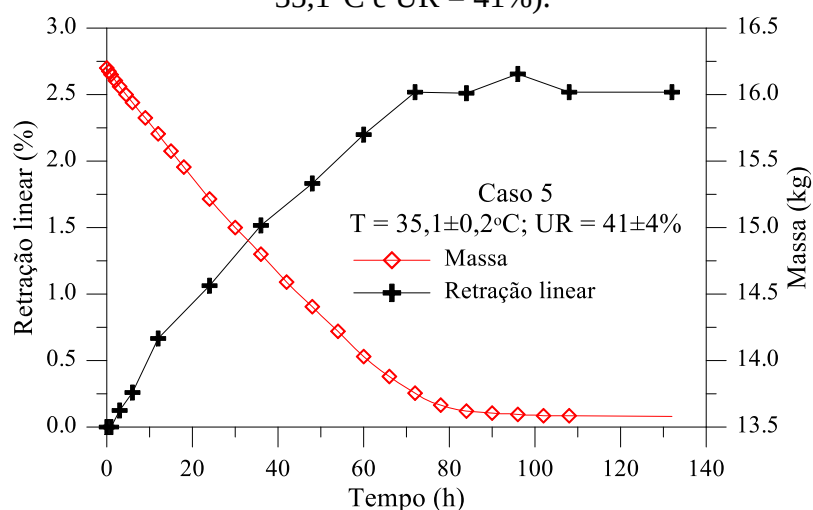


Figura 4.31 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$).

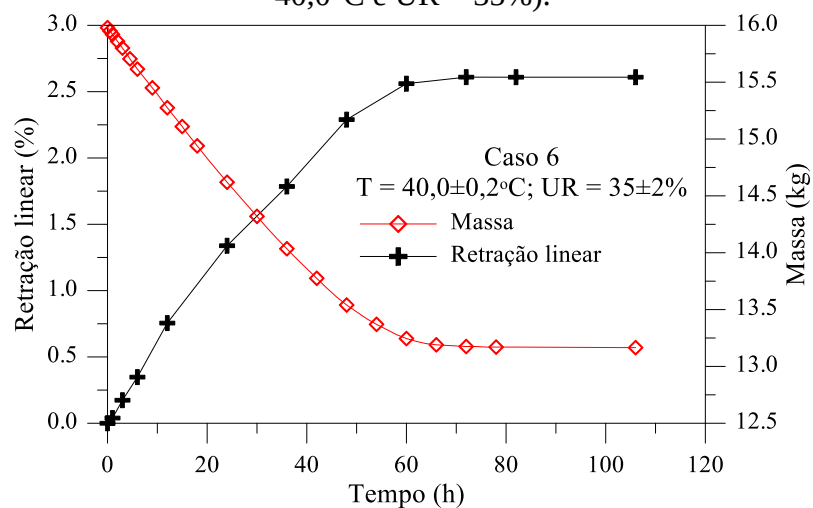
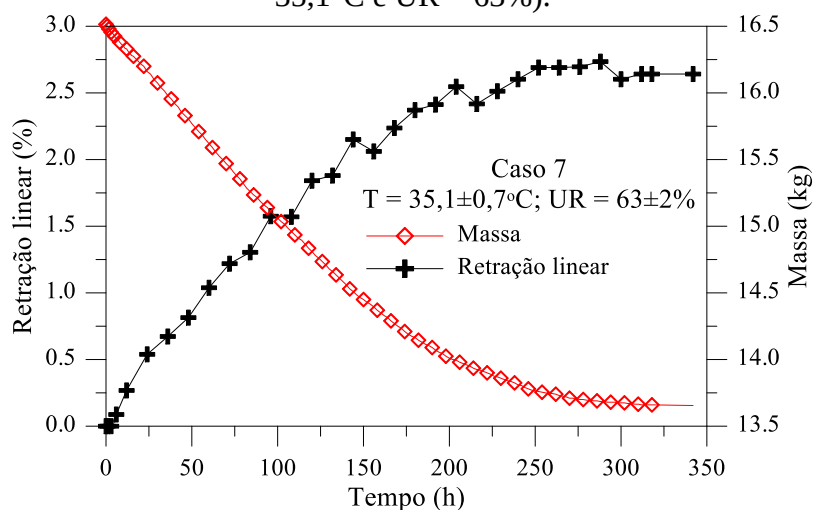
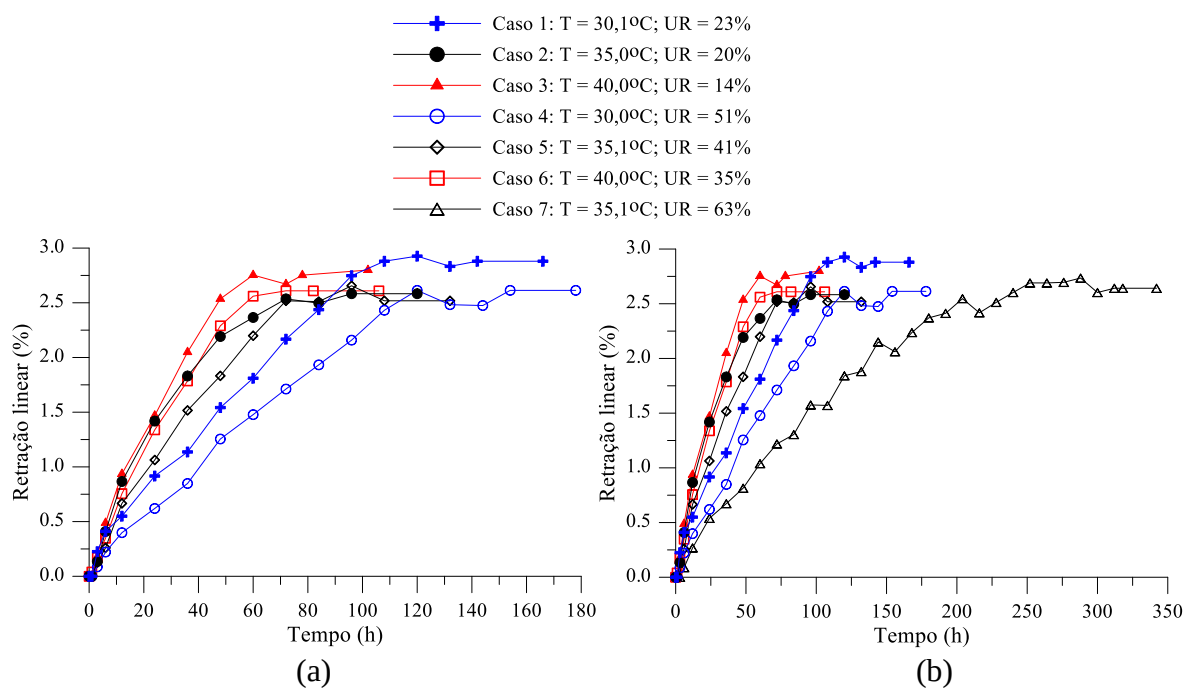


Figura 4.32 - Retração linear e massa da amostra em função do tempo para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 63\%$).



Na Figura 4.33 é apresentado uma comparação entre a retração linear das amostras em função do tempo para todos os experimentos realizados. Observa-se que, comparando os experimentos realizados com convecção forçada (Casos 1-6), quanto maior a temperatura do ar, maior é a inclinação da retração linear em função do tempo. Além disto, para uma mesma temperatura, quanto menor a umidade relativa do ar, maior é a inclinação da retração linear em função do tempo. Fica evidente também a proximidade entre as curvas de retração linear para os Casos 2 ($T = 35^{\circ}\text{C}$; $UR = 20\%$) e 6 ($T = 40^{\circ}\text{C}$; $UR = 35\%$), apesar das diferentes temperaturas para o ar de secagem.

Figura 4.33 - Retração linear em função do tempo (a) sem Caso 7 (b) com Caso 7.

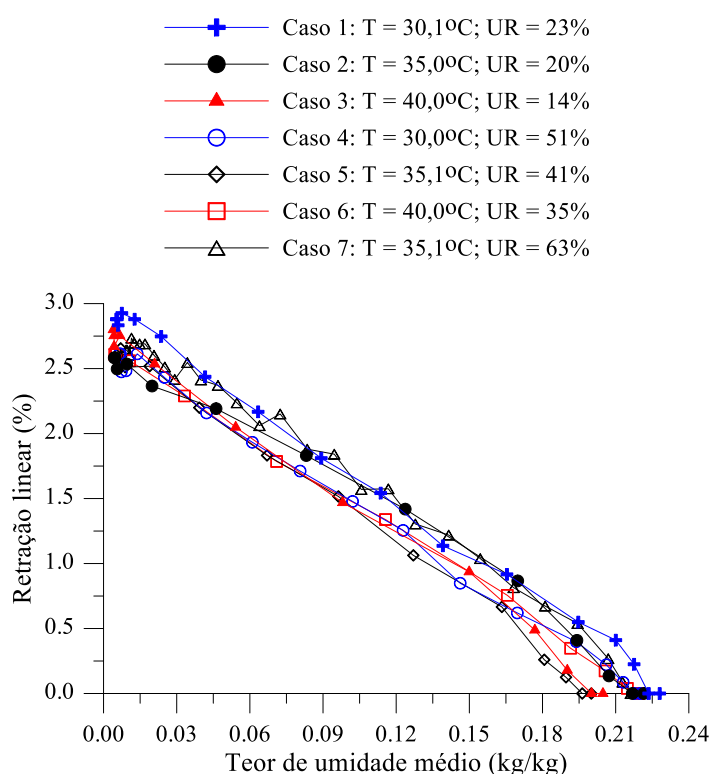


De modo geral, maiores inclinações na retração linear em função do tempo implicam em maiores chances na formação de defeitos. É por essa razão que se deve tomar um maior cuidado nos instantes iniciais do processo de secagem, principalmente quando este é realizado em elevadas temperaturas. Para tais situações, é aconselhável que a temperatura do ar de secagem seja elevada gradativamente nos instantes iniciais do processo, de modo que o fenômeno do encolhimento seja controlado nesta fase de risco mais elevado.

Assim como ocorreu para o teor de umidade médio, a curva de retração linear em função do tempo para o experimento realizado com convecção natural (Caso 7) apresenta uma inclinação mais suave em comparação com todos os outros experimentos de secagem com convecção forçada, mesmo apresentando uma temperatura intermediária para o ar de secagem.

A partir da Figura 4.34, que ilustra a retração linear em função do teor de umidade médio da amostra para todos os experimentos realizados, é possível observar que há uma correlação linear inversa entre as duas variáveis para todos os experimentos realizados. Para todos os casos analisados, à medida que o teor de umidade médio da amostra diminui no decorrer do experimento, a variável retração linear aumenta o seu valor, que por sua vez indica maiores encolhimentos na peça. Observa-se, também, uma grande proximidade entre as curvas obtidas para cada caso analisado.

Figura 4.34 - Retração linear em função do teor de umidade médio para todos os casos analisados.



4.2 Resultados empíricos

Nas Figuras 4.35–4.41 são ilustradas as curvas de ajuste do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem para cada experimento de secagem realizado. Na Tabela 4.12 são apresentados os resultados dos parâmetros obtidos para o teor de umidade médio adimensional em função do tempo utilizando o modelo de dois termos (Equação 3.16). Na Tabela 4.13 são apresentados os resultados do coeficiente de determinação (R^2), erro padrão (S), erro máximo absoluto ($E_{\text{máx}}$) e tempo, em horas, que ocorre o $E_{\text{máx}}$.

Embora as medidas de qualidade de ajuste apresentem excelentes resultados para o coeficiente de determinação, observa-se pelas Figuras 4.35–4.41 que os ajustes entre os resultados ajustados e experimentais não foram tão satisfatórios nos instantes finais dos processos de secagem. O valor do erro máximo absoluto para o teor de umidade médio adimensional variando de 0,0346 para o Caso 7 até 0,0611 para o Caso 4 corrobora essa afirmação. Ainda assim, dentre todos os modelos testados, o modelo de dois termos foi aquele que apresentou maiores valores para o coeficiente de determinação e menores valores para o erro padrão e erro máximo absoluto para todos os experimentos.

Figura 4.35 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 1 ($T = 30,1^\circ\text{C}$ e $UR = 23\%$).

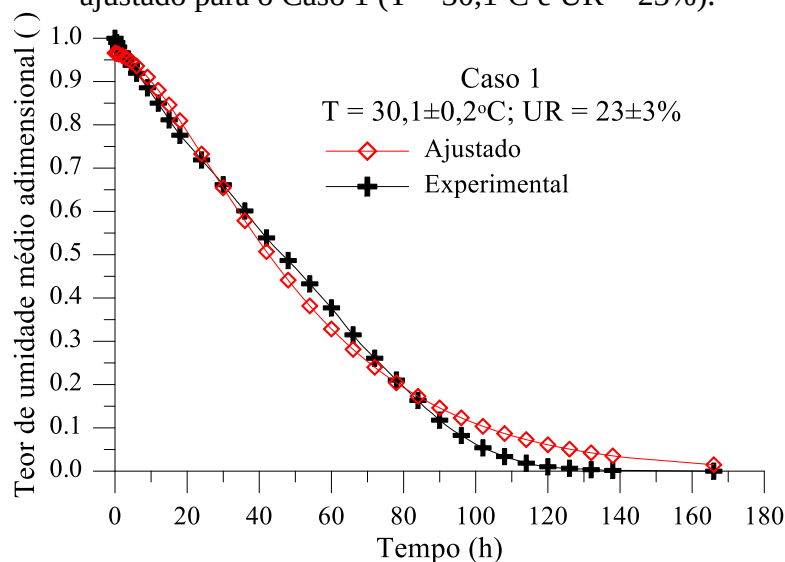


Figura 4.36 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 20\%$).

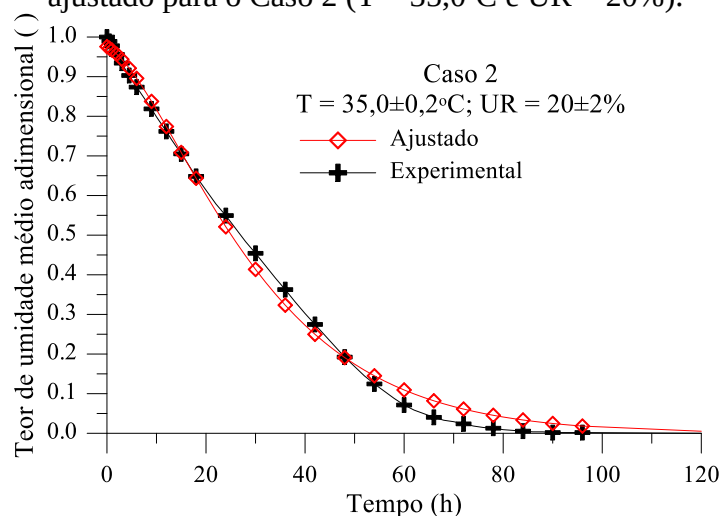


Figura 4.37 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 14\%$).

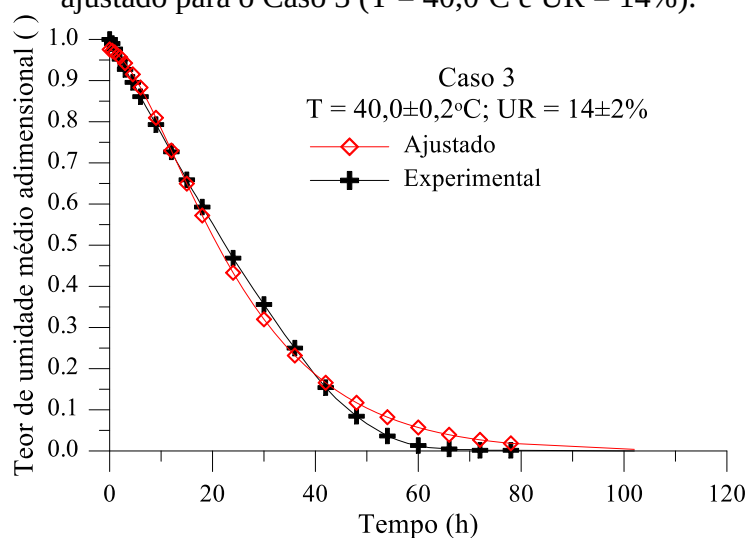


Figura 4.38 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 51\%$).

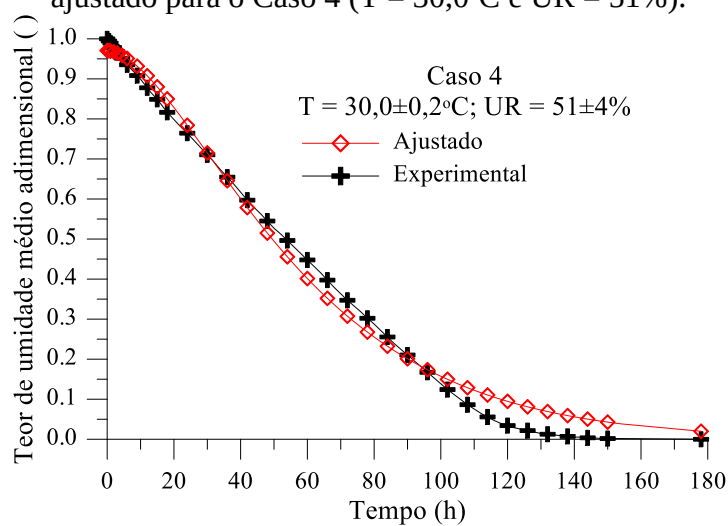


Figura 4.39 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 41\%$).

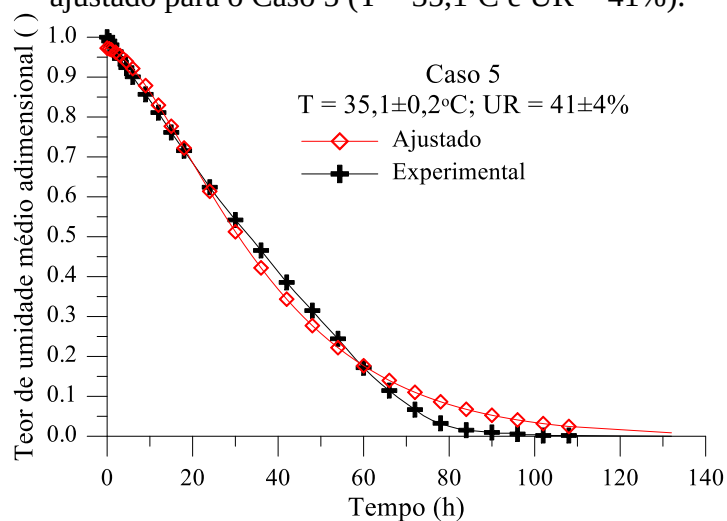


Figura 4.40 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 35\%$).

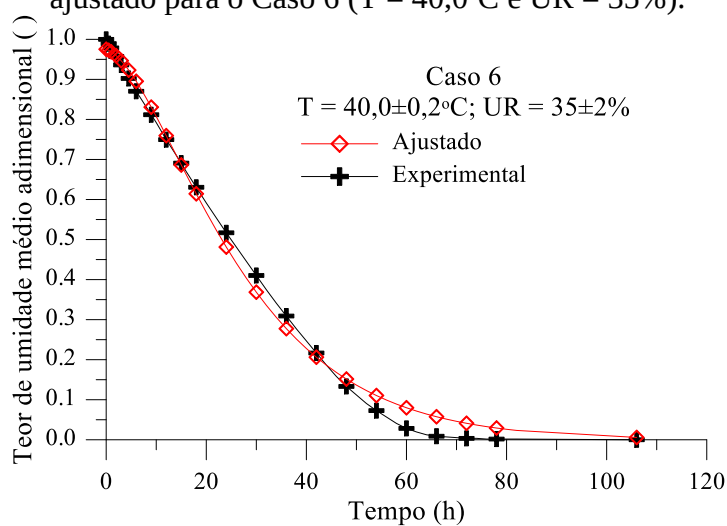


Figura 4.41 - Comparação entre os teores de umidade médios adimensional, experimental e ajustado para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 63\%$).

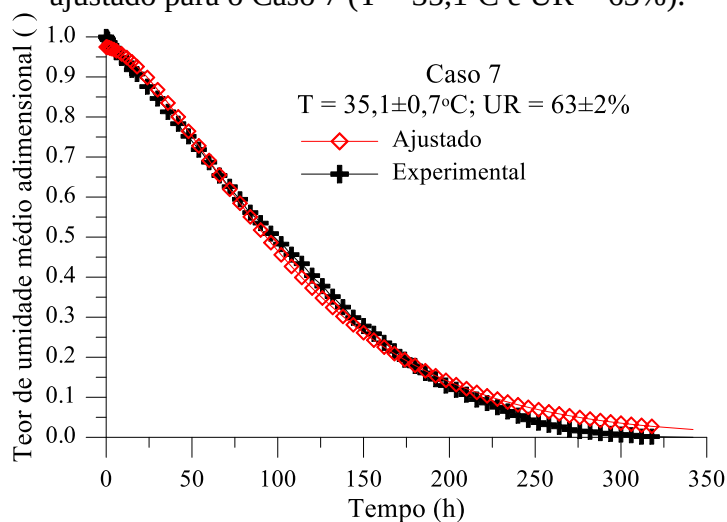


Tabela 4.12 - Parâmetros da Equação (3.16) obtidos após ajuste do teor de umidade médio adimensional aos dados experimentais, para cada experimento de secagem.

Experimentos			Parâmetros			
Caso	T (°C)	UR (%)	c ₁	k ₁	c ₂	k ₂
1	30,1	23	15,25283463	0,03560633	-14,28690732	0,03787115
2	35,0	20	9,31133449	0,05755766	-8,33564162	0,06344571
3	40,0	14	13,93353077	0,07230329	-12,95783876	0,07735763
4	30,0	51	12,52501590	0,03126186	-11,55431357	0,03382672
5	35,1	41	9,84843801	0,04859239	-8,87582806	0,05356094
6	40,0	35	6,78480403	0,06331046	-5,80952420	0,07316884
7	35,1	63	6,82216104	0,01579158	-5,84741170	0,01827203

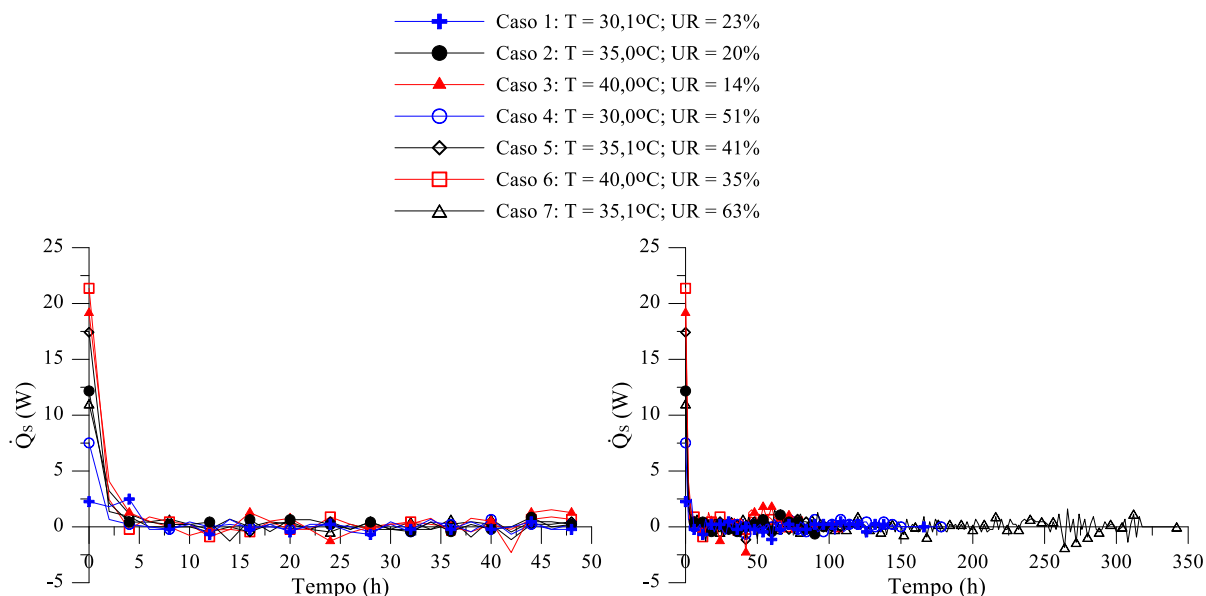
Tabela 4.13 - Resultados das medidas de qualidade de ajuste do modelo para os diferentes casos analisados.

Experimentos			Coeficiente de determinação (R ²)	Erro padrão (S)	Erro máximo absoluto (E _{máx})	Tempo (h) para E _{máx}
Caso	T (°C)	UR (%)				
1	30,1	23	0,99211752	0,03309339	0,05428346	114
2	35,0	20	0,99586661	0,02458375	0,04167707	66
3	40,0	14	0,99578136	0,02492770	0,04623435	56
4	30,0	51	0,99135814	0,03448936	0,06112547	122
5	35,1	41	0,99409808	0,02930162	0,05480388	80
6	40,0	35	0,99492994	0,02716927	0,05214824	62
7	35,1	63	0,99641952	0,02124229	0,03464472	270

4.3 Resultados do desempenho de secagem

A Figura 4.42 apresenta o calor sensível para aquecer a bacia sanitária ($\dot{Q}_s$) em função do tempo para todos os experimentos realizados. Observa-se um comportamento similar para todos os casos analisados: um elevado valor inicial para o calor sensível acompanhado de um decaimento acentuado, aproximando-se de zero já nas primeiras horas de experimento e oscilando próximo deste valor até o final do experimento. Isto ocorre pois o calor sensível está diretamente relacionado com a variação de temperatura na amostra. Conforme ilustrado na Figura 4.22, a temperatura da amostra experimenta um aumento acentuado a partir do seu valor inicial até um valor intermediário e já próximo do final do experimento a leitura do seu valor aumenta, porém de forma menos acentuada. Também é observado que quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior é o valor do calor sensível nos instantes iniciais de processo. Valores negativos de calor sensível indicam uma redução na medição da temperatura da amostra entre duas medidas consecutivas.

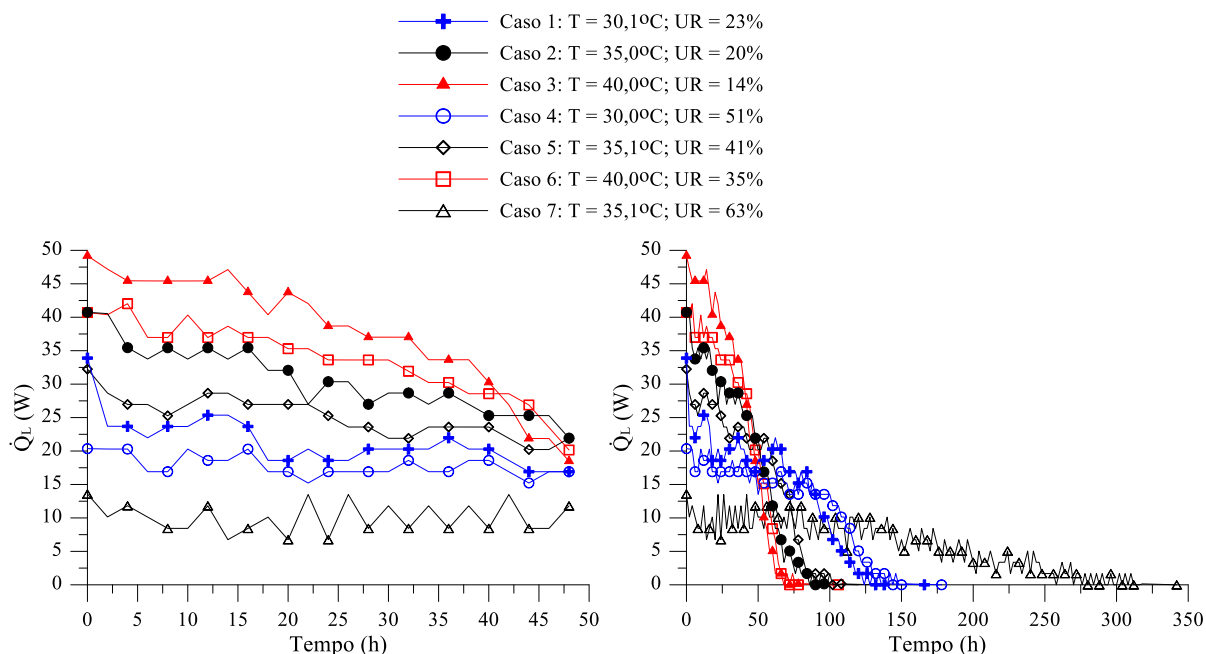
Figura 4.42 - Calor sensível para aquecer a bacia sanitária ($\dot{Q}_S$) em função do tempo (a) $0 < t < 48h$ e (b) $0 < t < 342 h$.



Na Figura 4.43 é ilustrado o calor latente para evaporação da água ($\dot{Q}_L$) em função do tempo para todos os casos analisados. Nota-se que as curvas de calor latente apresentam comportamento semelhante ao observado para às curvas de taxa de secagem (Figura 4.11). Isto ocorre pois o calor latente é definido como a multiplicação de uma constante pela taxa de secagem, onde a constante é o produto da massa seca da amostra (m_s) pelo calor latente de vaporização da água (h_{fg}), conforme definido na Equação 3.18. Diferentemente do que foi observado para calor sensível ($\dot{Q}_S$), o calor latente para evaporação da água ($\dot{Q}_L$) não apresentou valores negativos em nenhum dos experimentos conduzidos. Isto se deve ao fato de que não houve aumento na massa das amostras durante a condução dos experimentos, mesmo nos estágios finais de processo.

Na Figura 4.44 é apresentado o calor total absorvido pela amostra ($\dot{Q}_T$) em função do tempo para todos os experimentos realizados. Verifica-se que, para um mesmo caso, a curva do calor total apresenta uma notável semelhança com as curvas obtidas para o calor latente (Figura 4.43), exceto durante as primeiras horas de experimento. Isto ocorre pois o calor sensível apresenta valores significativamente diferentes de zero apenas na fase inicial dos experimentos e, conforme Equação 3.19, o calor total absorvido pela amostra é definido como a soma do calor sensível com o calor latente.

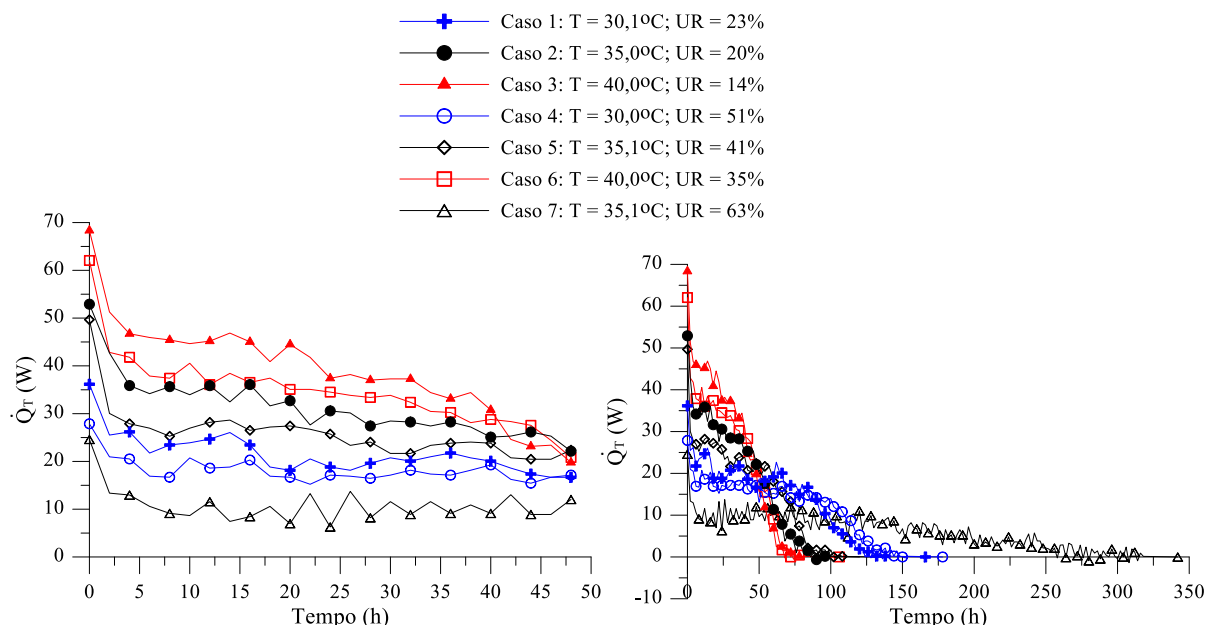
Figura 4.43 - Calor latente para evaporação da água ($\dot{Q}_L$) em função do tempo (a) $0 < t < 48$ h e (b) $0 < t < 342$ h.



Comparando os experimentos realizados com convecção forçada (Casos 1-6), é possível observar que, durante as primeiras 40 horas, quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior é o calor total absorvido pela amostra, seja para aquecer a amostra ou para evaporar a água contida na mesma. Além disso, para uma mesma temperatura, em um dado instante de tempo, o calor total absorvido pela amostra é maior para menores valores de umidade relativa do ar de secagem. Após o intervalo inicial de 40 horas, as curvas de calor total absorvido em função do tempo começam a se cruzar devido à aproximação do final do experimento para os casos com temperaturas mais altas.

A Figura 4.45 ilustra o consumo de energia específico (CEE) em função do tempo para todos os experimentos. Durante as primeiras 50 horas de experimento, observa-se um comportamento similar para todos os casos analisados: o consumo de energia específico diminui a partir de seu valor inicial e estabiliza-se em torno de 2400 kJ/kg, com ligeiras oscilações nessa faixa. É importante ressaltar que esse valor de 2400 kJ/kg é comparável ao calor latente de vaporização da água (h_{fg}), que varia de 2432,1 a 2412,7 kJ/kg na faixa de temperatura dos experimentos (30 a 40°C).

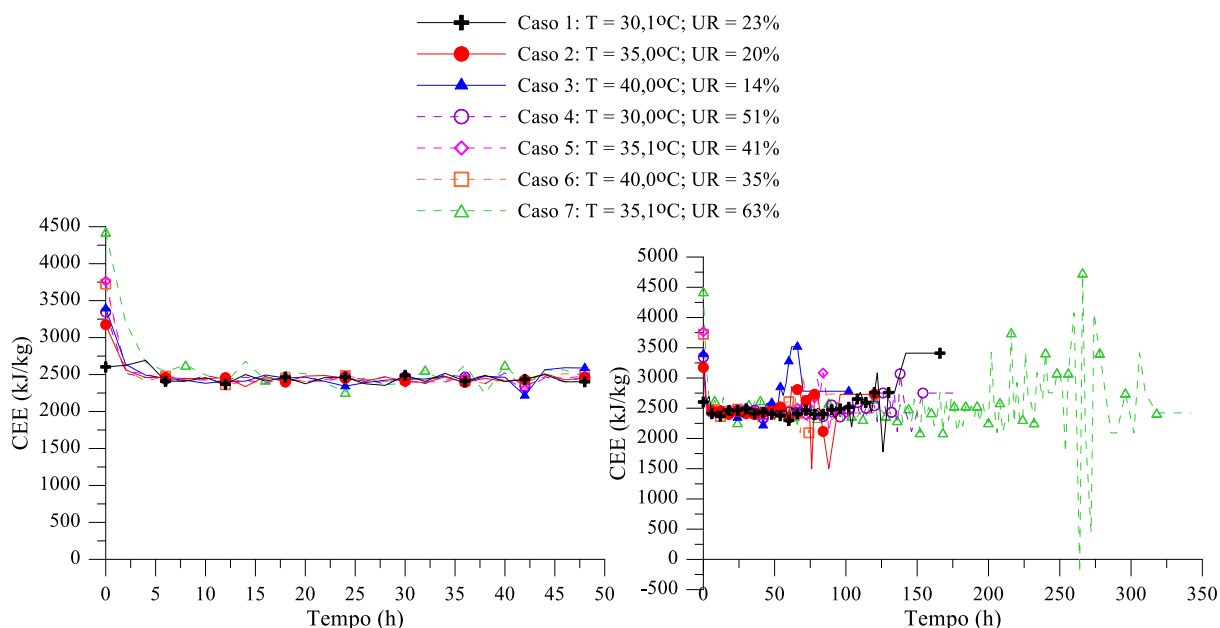
Figura 4.44 - Calor total absorvido pela amostra ($\dot{Q}_T$) em função do tempo (a) $0 < t < 48h$ e (b) $0 < t < 342 h$.



Ao manipular as Equações 3.18-3.20, nota-se que quando o calor sensível ($\dot{Q}_S$) é nulo, o consumo de energia específico (CEE) equivale ao calor latente de vaporização da água (h_{fg}). Assim, pode-se constatar que no intervalo entre 6 e 50 horas de experimento, para todos os casos analisados, o calor sensível para aquecer a bacia sanitária ($\dot{Q}_S$) é consideravelmente inferior ao calor latente para evaporação da água ($\dot{Q}_L$).

Após 50 horas de experimento, observam-se maiores oscilações no valor do consumo de energia específico (CEE). Essas oscilações ocorrem durante o estágio final do experimento, momento em que a variação na massa da amostra é pequena e, simultaneamente, ocorrem variações mais significativas na temperatura da amostra entre duas medições consecutivas. Para o Caso 7, inclusive, foram observados valores negativos para o consumo de energia específico. Esses valores ocorreram em intervalos de tempo em que o calor sensível liberado pela amostra, em decorrência da redução da temperatura da amostra entre duas medições consecutivas, foi maior que o calor latente recebido para evaporação da água.

Figura 4.45 - Consumo de energia específico (CEE) em função do tempo (a) $0 < t < 48\text{h}$ e (b) $0 < t < 342\text{h}$.



Na Tabela 4.14 são apresentados os principais parâmetros de secagem para todos os experimentos realizados. Observa-se que a energia sensível total absorvida pela amostra durante o experimento (Q_s) aumenta à medida que a temperatura do ar de secagem se eleva. Para uma mesma temperatura de ar de secagem, os valores de Q_s são relativamente próximos, exceto nos casos realizados com temperatura de 30°C , em que foi observada uma diferença de aproximadamente 54,3%. Essa diferença é justificada pela diferença de $1,2^{\circ}\text{C}$ na temperatura inicial entre as amostras utilizadas nos Casos 1 e 4, conforme Tabela 3.1.

Os maiores valores de energia total absorvida pela amostra para evaporação da água (Q_L) estão relacionados aos casos que apresentaram maior perda de massa durante a condução do experimento de secagem, ou seja, aqueles com diferenças mais significativas entre a massa inicial (m_0) e a massa de equilíbrio da amostra (m_e), conforme valores apresentados na Tabela 4.1.

A razão de energia sensível (Q_s / Q_T) evidencia que a energia sensível para aquecer a amostra representa apenas uma pequena parcela da energia total absorvida pela amostra. Essa é uma característica dos experimentos de secagem conduzidos a baixas temperaturas. Observa-se também que quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior é o valor da razão de energia sensível. Para efeito de comparação, Silva et al. (2020) relatou razões de energia sensível de 7,6 a 23,1% para experimentos de secagem de blocos cerâmicos industriais na faixa de temperatura de 50 a 100°C .

O consumo de energia específico médio (CEE_M) indica a quantidade de energia absorvida pela amostra (kJ) para evaporar uma determinada quantidade de água (kg). Assim, um valor mais elevado indica um processo menos eficiente (SILVA et al., 2020). Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.14, observa-se que o consumo de energia específico médio aumenta conforme a temperatura do ar de secagem aumenta. No entanto, a maior diferença observada no valor de CEE_M entre os experimentos foi de 70,305 kJ/kg, representando apenas 2,8% em termos percentuais. Portanto, outros fatores devem ser considerados para definir as condições do ar para o setor de pré-secagem de louças sanitárias, tais como tempo de processamento, condições climáticas e demanda de mercado pelo produto.

Tabela 4.14 - Parâmetros de desempenho de secagem para todos os casos analisados.

Caso	Ar de secagem			Parâmetros de desempenho				
	T (°C)	UR (%)	v (m/s)	Q _s (kJ)	Q _L (kJ)	Q _T (kJ)	Q _s / Q _T (%)	CEE _M (kJ/kg)
1	30,1	23	0,1	61,935	7256,455	7318,390	0,85%	2464,104
2	35,0	20	0,1	184,402	6656,075	6840,477	2,70%	2505,669
3	40,0	14	0,1	312,569	7341,349	7653,918	4,08%	2534,410
4	30,0	51	0,1	95,538	6780,534	6876,072	1,39%	2473,407
5	35,1	41	0,1	207,947	6382,071	6590,018	3,16%	2515,274
6	40,0	35	0,1	278,763	6836,147	7114,910	3,92%	2527,499
7	35,1	63	0,001	186,907	6957,559	7144,466	2,62%	2498,065

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de secagem é uma etapa importante na manufatura de produtos cerâmicos por conferir às peças a resistência necessária durante a etapa de queima. A água, que adicionada à matéria-prima deve ser retirada de forma homogênea para evitar a formação de defeitos durante o processo. Foram apresentados diversos tipos de secagem que podem ser utilizados para remoção da umidade dos materiais, sendo o mais comum, secagem por convecção artificial, que consiste em fornecer a energia térmica necessária passando uma corrente de ar quente pelo material, em estufas ou em câmaras de secagem.

5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa para secagem de louças sanitárias a baixas temperaturas, pode-se concluir que:

- Os resultados experimentais de secagem em estufa indicam que o aumento da temperatura e a redução da umidade relativa do ar resultam em secagens mais rápidas.
- O experimento realizado com maior temperatura e menor umidade relativa (Caso 3: $T = 40,0^{\circ}\text{C}$; $UR = 14\%$) foi aquele que apresentou uma curva de secagem mais rápida dentre todos os casos analisados.
- O experimento realizado com convecção natural (Caso 7: $T = 35,1^{\circ}\text{C}$; $UR = 63\%$) foi aquele que apresentou uma curva de secagem mais lenta dentre todos os casos analisados, mesmo apresentando uma temperatura intermediária para o ar de secagem.
- Para o experimento realizado com convecção natural observou-se que o vapor d'água constantemente condensou nas partes internas do teto e da porta da estufa devido à baixa renovação do ar interno.
- Para determinadas situações, é mais interessante dedicar esforços para reduzir a umidade do ar de secagem ao invés de buscar soluções para elevar a temperatura do mesmo.
- Não foram observadas trincas ou fissuras das bacias sanitárias em decorrência do processo de secagem a baixas temperaturas.
- Há uma correlação linear inversa entre as curvas de retração linear e massa da amostra, de modo que a perda de umidade é acompanhada de encolhimento da amostra nos experimentos de secagem;

- Para os experimentos com convecção forçada, quanto maior a temperatura do ar, maior é a inclinação da retração linear em função do tempo. Além disto, para uma mesma temperatura, quanto menor a umidade relativa do ar, maior é a inclinação da retração linear em função do tempo. Já o experimento realizado com convecção natural (Caso 7) apresentou um decaimento mais suave da retração linear em função do tempo.
- O calor sensível para aquecer a amostra possui uma contribuição significativa no calor total absorvido pela amostra apenas nos instantes iniciais do processo de secagem. À medida que o experimento avança, observa-se que a maior parte do calor absorvido pela amostra é utilizado para evaporar a água, caracterizada pelo calor latente.
- Os resultados do consumo de energia específico médio (CEE_M) indicam que a quantidade de energia absorvida pela amostra para evaporar uma determinada quantidade de água aumenta à medida que a temperatura do ar de secagem aumenta. Entretanto, na faixa de temperatura de estudo (30 a 40°C), foi observada uma diferença relativa máxima menor que 3%, entre experimentos. Isto sugere que outros fatores devem ser considerados ao definir as condições operacionais do ar no setor de pré-secagem de louças sanitárias, como tempo de processamento, condições climáticas e demanda de mercado pelo produto.

Finalmente, com este trabalho, espera-se contribuir com um melhor entendimento do processo de secagem de materiais cerâmicos, e fornecer subsídios para engenheiros, especialistas, acadêmicos e industriais, na tomada de decisões para otimizar o processo de secagem, visando melhoria na qualidade do produto e reduções no tempo de processamento, consumo energético e impactos ambientais. Desta forma, será possível conduzir as empresas do setor ceramista a um caminho que as tornem mais competitivas nos mercados nacional e internacional.

5.2 Contribuições científicas

Artigos publicados relacionados com o tema da tese:

- GOMEZ, R. S.; MAGALHÃES, H. L. F.; PORTO, T. R. N.; LIMA, E. S.; SANTANA, R. A. C.; GOMES, K. C.; LIMA, W. M. P. B.; LIMA, A. G. B. Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, p. e78591110300, 2020.

- GOMEZ, R. S.; GOMES, K. C.; GURGEL, J. M. A. M.; ALVES, L. B.; MAGALHÃES, H. L. F.; QUEIROGA, R. A.; SOUSA, G. C. P.; OLIVEIRA, A. S.; VILELA, A.F.; SILVA, B. T. A.; VASCONCELOS, D. B. T.; BRITO, G. R. F.; LIMA, A. G. B. Investigating the Drying Process of Ceramic Sanitary Ware at Low Temperature. **Energies**, v. 16, p. 4242, 2023.

Trabalho relacionado com o tema da tese apresentado em congresso internacional e que deverá ser publicado até o final do ano de 2023 na revista Defect and Diffusion Forum:

- GOMEZ, R. S.; GOMES, K. C.; GURGEL, J. M. A. M.; ALVES, L. B.; MAGALHÃES, H. L. F.; LIMA, A. G. B. Drying of Industrial Sanitary Ware at Low Temperature: A Theoretical and Experimental Investigation. In: 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIFFUSION IN SOLIDS AND LIQUIDS, 2023, Creta, Grécia.

Artigo relacionado com o tema da tese submetido e em etapa de revisão por pares:

- GOMEZ, R. S.; GOMES, K. C.; GURGEL, J. M. A. M.; ALVES, L. B.; QUEIROGA, R. A.; MAGALHÃES, H. L. F.; PINHEIRO, L. S. S.; SILVA, E. J. C.; OLIVEIRA, D. S.; MOREIRA, H. W. D.; BRITO, H. C.; DELGADO, J. M. P. Q.; LIMA, A. G. B. Investigating the Drying Process of Ceramic Sanitary Ware at Low Temperature. **Processes**, 2023.

Artigos publicados como primeiro autor, durante o período de realização do doutorado, que não estão diretamente relacionados com o tema da tese:

- GOMEZ, R. S.; PORTO, T. R. N.; MAGALHÃES, H. L. F.; SANTOS, A. C. Q.; VIANA, V. H. V.; GOMES, K. C.; LIMA, A. G. B. Thermo-Fluid Dynamics Analysis of Fire Smoke Dispersion and Control Strategy in Buildings. **Energies**, v. 13, p. 6000, 2020.
- GOMEZ, R. S.; PORTO, T. R. N.; GOMES, K. C.; LIMA, J. A.; GURGEL, J. M. A. M.; MAGALHÃES, H. L. F.; LIMA, E. S.; LIMA, W. M. P. B.; LIMA, A. G. B. Thermal analysis in an air conditioning duct: An experimental design approach. **Research, Society and Development**, v. 9, p. e20291211140, 2020.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como recomendações para trabalhos futuros, propõe-se:

- Desenvolver uma modelagem matemática tridimensional e transiente do processo de secagem de bacias sanitárias utilizando a técnica de dinâmica dos fluidos computacional (CFD).
- Validar o modelo matemático proposto comparando os resultados numéricos com os resultados experimentais da cinética de secagem apresentados neste trabalho;
- Propor uma equação matemática para descrever a dependência da difusividade mássica da bacia sanitária em função da temperatura e umidade relativa do ar de secagem;
- Simular numericamente casos com outras condições operacionais (temperatura e umidade relativa);
- Avaliar numericamente a influência do arranjo físico (distanciamento entre peças, quantidade e posicionamento de ventiladores) do setor de pré-secagem da empresa parceira na cinética de secagem de cada produto.
- Tendo em vista a importância do tema, para o mundo, sugere-se que novas pesquisas quantitativas relacionadas a secagem de produtos cerâmicos sejam conduzidas com técnicas tradicionais, tais como secadores em batelada e em forno contínuo, e secagens inovadoras como secagem por micro-ondas e infravermelho ou até mesmo a combinação de algumas delas, com vistas a ampliar os conhecimentos sobre este importante processo e seus efeitos na qualidade e custo final do produto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABECERAM. Informações técnicas - Definição e Classificação. 2021. Associação Brasileira de Cerâmica. Disponível em: <<https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>>. Acesso em: 11 de Maio 2021.

AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H.; KHANI, S.; GHASEMI, M. Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. **International Agrophysics**, v. 23, n. 4, p. 313–317, 2009.

AKBAR, S.; DUTTA, P.; LEE, C. High-temperature ceramic gas sensors: a review. **International journal of applied ceramic technology**, v. 3, n. 4, p. 302–311, 2006.

AKOY, E. O. M. Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices. **International Food Research Journal**, v. 21, n. 5, p. 1911, 2014.

ALMEIDA, G. S. **Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais**. 2009. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

ALMEIDA, G. S.; FERNANDES, M. A. F.; FERNANDES, J. N.; NEVES, G. A.; BARBOSA DE LIMA, W. M. P.; LIMA, A. G. B. Drying of industrial ceramic bricks: An experimental investigation in oven. **Defect and Diffusion Forum**, v. 353, p. 116–120, 2014.

ALMEIDA, G. S.; SILVA, J. B.; SILVA, C. J.; SWARNAKAR, R.; NEVES, G. A.; LIMA, A. G. B. Heat and mass transport in an industrial tunnel dryer: modeling and simulation applied to hollow bricks. **Applied Thermal Engineering**, v. 55, n. 1–2, p. 78–86, 2013.

ALMEIDA, G. S.; TAVARES, F. V. S.; LIMA, W.; BARBOSA DE LIMA, A. G. Energetic and exergetic analysis of the clay bricks drying in an industrial tunnel dryer. **Defect and Diffusion Forum**, v. 369, p. 104–109, 2016.

ALVES, H. J.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Consumo de gás natural na indústria de revestimentos cerâmicos brasileira (Consumption of natural gas in Brazilian ceramic tile industry). **Cerâmica**, v. 54, n. 331, p. 326–331, 2008.

AMBONI, N. **O caso Cecrisa SA: uma aprendizagem que deu certo**. 1997. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

ANFACER. Números do setor. 2021. Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. Disponível em <<https://www.anfacer.org.br/numeros-do-setor>>. Acesso em: 20 de abril de 2021.

ANICER. Dados do Setor. 2021. Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/anicer/setor>> Acesso em: 22 de abril de 2021.

APICER. Manual de Eficiência Energética. Sector Cerâmico. 2016. Associação Portuguesa das Indústria de Cerâmica e de Cristalaria.

ARADAS, M. E. C. **Avaliação de um forno intermitente de cerâmica vermelha usando bagaço de cana como combustível**. 1996. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 1996.

ARAÚJO, M. V. **Simulação numérica via CFD da secagem de tijolos cerâmicos industriais**. 2019. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

ARAÚJO, M. V.; CORREIA, B. R. B.; BRANDÃO, V. A. A.; OLIVEIRA, I. R.; SANTOS, R. S.; OLIVEIRA NETO, G. L.; SILVA, L. P. L.; LIMA, A. G. B. Convective drying of ceramic bricks by CFD: Transport phenomena and process parameters analysis. **Energies**, v. 13, n. 8, p. 2073, 2020.

ARAÚJO, M. V.; DELGADO, J. M. P. Q.; LIMA, A. G. B. On the Use of CFD in Thermal Analysis of Industrial Hollow Ceramic Brick. **Diffusion Foundations**, v. 10, p. 70–82, 2017.

ARAÚJO, M. V.; PEREIRA, A. S.; OLIVEIRA, J. L.; BRANDÃO, V. A. A.; BRASILEIRO FILHO, F. A.; SILVA, R. M.; LIMA, A. G. B. Industrial ceramic brick drying in oven by CFD. **Materials**, v. 12, n. 10, p. 1612, 2019.

ARAÚJO, M. V.; SANTOS, R. S.; SILVA, R. M.; BARBOSA DE LIMA, A. G. Drying of Industrial Hollow Ceramic Brick: Analysis of the Moisture Content and Temperature Parameters. **Defect and Diffusion Forum**, v. 380, p. 72–78, 2017.

ARAÚJO, M. V.; SANTOS, R. S.; SILVA, R. M.; NASCIMENTO, J. B.; SANTOS, W. R. G.; LIMA, A. G. B. Drying of industrial hollow ceramic brick: a numerical analysis using CFD. **Defect and Diffusion Forum**, v. 391, p. 48–53, 2019.

ARAÚJO, M. V.; SOUSA, A. C.; LUIZ, M. R.; CABRAL, A. S.; PESSOA, T. R. B.; MARTINS, P. C.; SILVA, A. M. V.; SANTOS, R. S.; OLIVEIRA, V. A. B.; LIMA, A. G. B. Computational Fluid Dynamics Studies in the Drying of Industrial Clay Brick: The Effect of the Airflow Direction. **Diffusion Foundations and Materials Applications**, v. 30, p. 69–84, 2022.

AUGIER, F.; COUMANS, W. J.; HUGGET, A.; KAASSCHIETER, E. F. On the risk of cracking in clay drying. **Chemical Engineering Journal**, v. 86, n. 1–2, p. 133–138, 2002.

AVELINO, D. O. **Transporte de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos vazados**. 2018. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

AYADI, M.; MABROUK, S. BEN; ZOUARI, I.; BELLAGI, A. Kinetic study of the convective drying of spearmint. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.

13, n. 1, p. 1–7, 2014.

BANASZAK, J.; KOWALSKI, S. J. Theoretical and experimental analysis of stresses and fractures in clay like materials during drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 44, n. 4, p. 497–503, 2005.

BANNING, E. B. Housing neolithic farmers. **Near Eastern Archaeology**, v. 66, n. 1–2, p. 4–21, 2003.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S.; 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, n. 1, p. 46–61, 2008.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. D. Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental. **Matéria, Rio de Janeiro**, v. 14, n. 4, 2009.

BEHEARY, M. S.; EL-MATARY, F. A. Management of heat stress in sanitary ware industry. In: 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ROLE OF ENGINEERING TOWARDS A BETTER ENVIRONMENT, 2012, **Anais...**, 2012. p. 1–14.

BELLINGIERI, J. C. A indústria cerâmica em São Paulo e a ‘invenção’ do filtro de água: um estudo sobre a Cerâmica Lamparelli–Jaboticabal (1920-1947). In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE HISTÓRIA ECONÔMICA, 2003, **Anais...**, Caxambu: 2003.

BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of heat and mass transfer**. John Wiley & Sons, 2011.

BOCH, P.; NIEPCE, J.-C. **Ceramic Materials: Processes, Properties, and Applications**. John Wiley & Sons, 2010.

BRAZILIAN KIMBERLITE CLAY. Propriedades Normalizadoras. 2021. Disponível em: <<https://braziliankimberliteclay.com/aplicacoes/propriedades-normalizadoras/>>. Acesso em 23 de março de 2021.

BRITO, M. K. T.; ALMEIDA, D. B. T.; LIMA, A. G. B.; ROCHA, L. A.; LIMA, E. S.; OLIVEIRA, V. A. B. Heat and Mass Transfer during Drying of Clay Ceramic Materials: A Three-Dimensional Analytical Study. **Diffusion Foundations**, v. 10, p. 93–106, 2016.

BRONGNIART, A. **Traité des arts céramiques ou des poteries considérées dans leur histoire, leur pratique et leur théorie**. Bechet; Mathias, 1844.

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

CABRAL JUNIOR, M.; AZEVEDO, P. B. M.; CUCHIERATO, G.; MOTTA, J. F. M. Estudo

Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica no Estado de São Paulo: Parte I—Introdução e a Indústria de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 1, p. 20–34, 2019a.

CABRAL JUNIOR, M.; AZEVEDO, P. B. M.; CUCHIERATO, G.; MOTTA, J. F. M. Estudo Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica no Estado de São Paulo: Parte III—Indústrias de Colorifícios, Sanitários e Cerâmica Técnica-Isoladores. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 3, p. 15–26, 2019b.

CABRAL JUNIOR, M.; AZEVEDO, P. B. M.; CUCHIERATO, G.; MOTTA, J. F. M. Estudo Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica no Estado de São Paulo: Parte IV—Indústria de Louça e Porcelana (Mesa, Utilitários e Decoração), Demanda Mineral e Análise de Fatores de Competitividade Setorial. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 4, p. 13–28, 2019c.

CABRAL JUNIOR, M.; AZEVEDO, P. B. M.; CUCHIERATO, G.; MOTTA, J. F. M. Estudo Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica no Estado de São Paulo: Parte II – Indústria de Revestimentos. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 2, p. 13–21, 2019d.

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

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. John Wiley & Sons, 2012.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering**. John Wiley & Sons NY, 2011.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. Ceramics in biology and medicine. . **Ceramic Materials**. New York: Springer, 2007. 635–651 p.

CAVALCANTE, W. F. V. **Aproveitamento de resíduos cerâmicos da indústria de louça sanitária para produção de massas para revestimento cerâmico**. 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

CENGEL, Y. A. **Heat and mass transfer**. Tata McGraw-Hill Education, 2007.

CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K. Intermittent drying of bioproducts—an overview. **Bioresource Technology**, v. 90, n. 3, p. 285–295, 2003.

CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; AARUP, T.; WILSON, W. S.; WOODWORTH, P. L.; DOMINGUES, C. M.; HUNTER, J. R.; LAMBECK, K. Understanding global sea levels: past, present and future. **Sustainability Science**, v. 3, n. 1, p. 9–22, 2008.

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOĞLU, O. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. **Journal of food engineering**, v. 79, n. 1, p. 293–298, 2007.

CLARK, D. E.; SUTTON, W. H. Microwave processing of materials. **Annual Review of Materials Science**, v. 26, n. 1, p. 299–331, 1996.

COLE, S. The neolithic revolution. **Paléorient**, v. 10, p. 49–60, 1959.

COLLA JUNIOR, J. **Desenvolvimento de uma massa cerâmica para produção de peças especiais esmaltadas para revestimento através do método de colagem**. 2004. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

COMINI, G.; LEWIS, R. W. A numerical solution of two-dimensional problems involving heat and mass transfer. **International journal of heat and mass transfer**, v. 19, n. 12, p. 1387–1392, 1976.

CORRÊA, M. R. S. The evolution of the design and construction of masonry buildings in Brazil. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 7, n. 2, p. 3–11, 2012.

CUSSLER, E. L. **Diffusion: mass transfer in fluid systems**. New York: Cambridge University Press, 2009.

DAMIANI, J. C.; PEREZ, F.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Coração negro em revestimentos cerâmicos: Principais causas e possíveis soluções. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 12–16, 2001.

DARVISHI, H.; HAZBAVI, E. Mathematical modeling of thin-layer drying behavior of date palm. **Global Journal of Science Frontier Research Mathematics and Decision Sciences**, v. 12, n. 10, p. 247–255, 2012.

DASH, K. K.; GOPE, S.; SETHI, A.; DOLOI, M. Study on thin layer drying characteristics star fruit slices. **Int. J. Agric. Food Sci. Technol**, v. 4, n. 7, p. 679–686, 2013.

DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes—A review. **Applied Energy**, v. 131, p. 323–344, 2014.

DEFRAEYE, T.; BLOCKEN, B.; DEROME, D.; NICOLAI, B.; CARMELIET, J. Convective heat and mass transfer modelling at air–porous material interfaces: Overview of existing methods and relevance. **Chemical Engineering Science**, v. 74, p. 49–58, 2012.

DELPECH, B.; AXCELL, B.; JOUHARA, H. A review on waste heat recovery from exhaust in the ceramics industry. **E3S Web of Conferences**, v. 22, p. 1–8, 2017.

DEMIR, V.; GUNHAN, T.; YAGCIOGLU, A. K. Mathematical modelling of convection drying of green table olives. **Biosystems engineering**, v. 98, n. 1, p. 47–53, 2007.

DENRY, I.; HOLLOWAY, J. A. Ceramics for dental applications: a review. **Materials**, v. 3, n. 1, p. 351–368, 2010.

DIAMANTE, L.; DURAND, M.; SAVAGE, G. P.; VANHANEN, L. P. Effect of temperature on the drying characteristics, colour and ascorbic acid content of green and gold kiwifruits. **International Food Research Journal**, v. 17, n. 2, p. 441-451, 2010.

DINIZ, J. F. B.; DELGADO, J. M. P. Q.; VILELA, A. F.; GOMEZ, R. S.; VIANA, A. D.; FIGUEIREDO, M. J.; DINIZ, D. D. S.; RODRIGUES, I. S.; ROLIM, F. D.; SANTOS, I. B. Drying of Sisal Fiber: A Numerical Analysis by Finite-Volumes. **Energies**, v. 14, n. 9, p. 2514, 2021.

DINIZ, J. F. DE B. **Transferência de calor e massa em sólidos porosos com forma paralelepípedica. Estudo de caso: secagem de fibras de sisal**. 2018. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

EDGAR, R. H.; OSEPCHUK, J. M. Consumer, commercial, and industrial microwave ovens and heating systems. . **Handbook of Microwave Technology for Food Application**. New York, USA: Marcel Dekker, 2001. 215–278 p.

EL-BELTAGY, A.; GAMEA, G. R.; ESSA, A. H. A. Solar drying characteristics of strawberry. **Journal of food engineering**, v. 78, n. 2, p. 456–464, 2007.

ERICKSON, L. E. Reducing greenhouse gas emissions and improving air quality: Two global challenges. **Environmental progress & sustainable energy**, v. 36, n. 4, p. 982–988, 2017.

ETUK, S. E.; AKPABIO, I. O.; UDOH, E. M. Comparison of the thermal properties of clay samples as potential walling material for naturally cooled building design. **Journal of environmental sciences**, v. 15, n. 1, p. 65–68, 2003.

FACINCANI, T. Tecnologia Ceramica: i Laterizi, Ed. **Faenza, Itália, 2ª edição**, p. 267p, 1992.

FERRER, S.; MEZQUITA, A.; GOMEZ-TENA, M. P.; MACHÍ, C.; MONFORT, E. Estimation of the heat of reaction in traditional ceramic compositions. **Applied Clay Science**, v. 108, p. 28–39, 2015.

FIEMG; FEAM. Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha. 2013. Belo Horizonte.: FIEMG (Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais) e FEAM (Fundação Estadual de Meio Ambiente). Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/3SMRR/guia_ceramica.pdf>. Acesso em 23 de março de 2021.

FORD, R. W. **Ceramics drying**. Oxford, England: Elsevier, 2013.

FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. **Advances in drying**, v. 1, p. 119–154, 1980.

FORTUNA, A.; FORTUNA, D. M.; MARTINI, E. An Industrial Approach to Ceramics:

Sanitaryware. **Plinius**, v. 43, p. 138–145, 2017.

FROST, J. **Regression analysis: An intuitive guide for using and interpreting linear models**. Statistics By Jim Publishing, 2019.

GAN, P. L.; POH, P. E. Investigation on the effect of shapes on the drying kinetics and sensory evaluation study of dried jackfruit. **International Journal of Science and Engineering**, v. 7, n. 2, p. 193–198, 2014.

GOMEZ, R. S. Estudo teórico de um forno intermitente a gás natural, para a indústria cerâmica: modelagem e análise térmica transiente. 2019. Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

GOMEZ, R. S.; GOMES, K. C.; GURGEL, J. M. A. M.; ALVES, L. B.; MAGALHÃES, H. L. F.; QUEIROGA, R. A.; SOUSA, G. C. P.; OLIVEIRA, A. S.; VILELA, A. F.; SILVA, B. T. A. Investigating the Drying Process of Ceramic Sanitary Ware at Low Temperature. **Energies**, v. 16, n. 10, p. 4242, 2023.

GOMEZ, R. S.; LIMA, A. G. B.; PORTO, T. R. N.; MAGALHÃES, H. L. F.; ALMEIDA, M. D. A.; VIEIRA NETO, J. DE M.; SOUZA, L. M. C. Thermal Analysis in an Intermittent Kiln with Thermal Insulation: An Experimental Design Approach. **Diffusion Foundations**, v. 27, p. 99–112, 2020.

GOMEZ, R. S.; MAGALHÃES, H. L. F.; PORTO, T. R. N.; LIMA, E. S. DE; SANTANA, R. A. C. DE; GOMES, K. C.; LIMA, W. M. P. B. DE; LIMA, A. G. B. DE. Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e78591110300–e78591110300, 2020.

GOMEZ, R. S.; PORTO, T.; MAGALHÃES, H. L. F.; GUEDES, C. A. L.; LIMA, E. S.; WANDERLEY, D.; LIMA, A. G. B. Transient Thermal Analysis in an Intermittent Ceramic Kiln with Thermal Insulation: A Theoretical Approach. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, 2020.

GOMEZ, R. S.; PORTO, T. R. N.; MAGALHÃES, H. L. F.; MOREIRA, G.; ANDRÉ, A. M.; MELO, R. B. F.; LIMA, A. G. B. Natural Gas Intermittent Kiln for the Ceramic Industry: A Transient Thermal Analysis. **Energies**, v. 12, n. 8, p. 1568, 2019.

HÄNDLE, F. **Extrusion in ceramics**. Heidelberg: Springer, 2007.

HARRIS, J. H. Sintered aluminum nitride ceramics for high-power electronic applications. **JOM**, v. 50, n. 6, p. 56–60, 1998.

HASATANI, M.; ITAYA, Y.; HAYAKAWA, K. -Viscoelastic Strain-Stress and Heat/Moisture Transfer. **Drying Technology**, v. 10, n. 4, p. 1013–1036, 1992.

HASATANI, M.; ITAYA, Y.; MUROIE, K.; TANIGUCHI, S. Contraction characteristics of

molded ceramics during drying. **Drying Technology**, v. 11, n. 4, p. 815–830, 1993.

HASEGAWA, T.; FUJIMORI, S.; HAVLÍK, P.; VALIN, H.; BODIRSKY, B. L.; DOELMAN, J. C.; FELLMANN, T.; KYLE, P.; KOOPMAN, J. F. L.; LOTZE-CAMPEN, H. Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 8, p. 699–703, 2018.

HASHIM, N.; DANIEL, O.; RAHAMAN, E. A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita moschata*) in a convective hot air dryer. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 2, p. 345–352, 2014.

HENDERSON-SELLERS, B. A new formula for latent heat of vaporization of water as a function of temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 110, n. 466, p. 1186–1190, 1984.

ITAYA, Y.; HASATANI, M. R & D Needs-Drying of Ceramics. **Drying Technology**, v. 14, n. 6, p. 1301–1313, 1996.

ITAYA, Y.; MABUCHI, S.; HASATANI, M. Deformation behavior of ceramic slabs by nonuniform drying. **Drying Technology**, v. 13, n. 3, p. 801–819, 1995.

ITAYA, Y.; MORI, S.; HASATANI, M. Effect of intermittent heating on drying-induced strain-stress of molded clay. **Drying Technology**, v. 17, n. 7–8, p. 1261–1271, 1999.

ITAYA, Y.; OKOUCHI, K.; MORI, S. Effect of heating modes on internal strain–stress formation during drying of molded ceramics. **Drying Technology**, v. 19, n. 7, p. 1491–1504, 2001.

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.

ITAYA, Y.; UCHIYAMA, S.; HATANO, S.; MORI, S. Drying enhancement of clay slab by microwave heating. **Drying Technology**, v. 23, n. 6, p. 1243–1255, 2005.

ITAYA, Y.; UCHIYAMA, S.; MORI, S. Internal heating effect and enhancement of drying of ceramics by microwave heating with dynamic control. **Transport in Porous Media**, v. 66, n. 1–2, p. 29–42, 2007.

JAKATHAMANI, S.; ANNALAKSHMI, O.; JOSE, M. T.; MATHIYARASU, R.; VENKATRAMAN, B. Ceramic based electronic component as retrospective radiation dosimeter. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 170, p. 109618, 2021.

JAMALEDDINE, T. J.; RAY, M. B. Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes: A review. **Drying technology**, v. 28, n. 2, p. 120–154, 2010.

JOHN, J. **Archaic Technology, Social Relations and Innovations in Brick Kilns**. New Delhi: Centre for Education and Communication, 2018.

JULIAN-JANKOWIAK, A.; VALLE, R.; PARLIER, M. Potential of innovative ceramics for turbine applications. **Materials at High Temperatures**, v. 33, n. 4–5, p. 578–585, 2016.

KAUR, K.; SINGH, A. K. Drying kinetics and quality characteristics of beetroot slices under hot air followed by microwave finish drying. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 12, p. 1036–1044, 2014.

KAWAGUTI, W. M. **Estudo do comportamento térmico de um fornos intermitentes tipo paulistinha utilizados na indústria de cerâmica vermelha**. 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 1982.

KERPLAS ESTUFAS. Cerâmica (secagem de blocos, tijolos, telhas etc.). 2021. Disponível em: <http://kerplasestufas.com.br/produtos_ver.php?cod=4>. Acesso em: 10 de março de 2021.

KETELAARS, A. A. J.; JOMAA, W.; PIGGALI, J. R.; COUMANS, W. J. Drying shrinkage and stresses. In: 8TH INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'92), AUGUST 2-5, 1992, MONTREAL, QUEBEC, CANADA, 1992, **Anais...** Montreal: Elsevier, 1992.

KEUM, Y. T.; JEONG, J. H.; AUH, K. H. Finite-element simulation of ceramic drying processes. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, v. 8, n. 4, p. 541, 2000.

KHALILI, K.; BAGHERIAN, M.; KHISHEH, S. Numerical simulation of drying ceramic using finite element and machine vision. **Procedia Technology**, v. 12, p. 388–393, 2014.

KHAN, M. I. H.; JOARDDER, M. U. H.; KUMAR, C.; KARIM, M. A. Multiphase porous media modelling: A novel approach to predicting food processing performance. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 58, n. 4, p. 528–546, 2018.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to ceramics**. Wiley New York, 1976.

KOČÍ, V.; SCHEINHERROVÁ, L.; MADĚRA, J.; KEPPERT, M.; SUCHORAB, Z.; ŁAGÓD, G.; ČERNÝ, R. Experimental and computational study of thermal processes in red clays exposed to high temperatures. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2211, 2020.

KOWALSKI, S. J. **Thermomechanics of drying processes**. Heidelberg: Springer, 2012.

KOWALSKI, S. J.; MIELNICZUK, B. Analysis of effectiveness and stress development during convective and microwave drying. **Drying Technology**, v. 26, n. 1, p. 64–77, 2007.

KOWALSKI, S. J.; MUSIELAK, G.; BANASZAK, J. Heat and mass transfer during microwave-convective drying. **AIChE journal**, v. 56, n. 1, p. 24–35, 2010.

KOWALSKI, S. J.; PAWŁOWSKI, A. Energy consumption and quality aspect by intermittent drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 50, n. 4, p. 384–390, 2011.

KOWALSKI, S. J.; RAJEWSKA, K.; RYBICKI, A. Mechanical effects in saturated capillary-porous materials during convective and microwave drying. **Drying Technology**, v. 22, n. 10, p. 2291–2308, 2004.

KOWALSKI, S. J.; RAJEWSKA, K.; RYBICKI, A. Stresses generated during convective and microwave drying. **Drying Technology**, v. 23, n. 9–11, p. 1875–1893, 2005.

KOWALSKI, S. J.; RYBICKI, A. Qualitative aspects of convective and microwave drying of saturated porous materials. **Drying Technology**, v. 22, n. 5, p. 1173–1189, 2004.

KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, v. 121, p. 48–57, 2014.

KUMAR, D. G. P.; HEBBAR, H. U.; RAMESH, M. N. Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices. **LWT-Food Science and Technology**, v. 39, n. 6, p. 700–705, 2006.

KUMAR, N.; SARKAR, B. C.; SHARMA, H. K. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. **Journal of food science and technology**, v. 49, n. 1, p. 33–41, 2012.

LARSON, G.; ALBARELLA, U.; DOBNEY, K.; ROWLEY-CONWY, P.; SCHIBLER, J.; TRESSET, A.; VIGNE, J.-D.; EDWARDS, C. J.; SCHLUMBAUM, A.; DINU, A. Ancient DNA, pig domestication, and the spread of the Neolithic into Europe. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 39, p. 15276–15281, 2007.

LEHMKUHL, W. A. **Análise numérica e experimental de um secador contínuo tipo túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha**. 2004. Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

LEVINSON, L; HASSAN, M. F.; DARWISH, M. G. Properties: Devices, and Applications. . In: LEVINSON, LM(Ed.). **Electronic Ceramics**. New York: Marcel Dekker, 1988. .

LIMA, A. G. B.; DELGADO, J.; NASCIMENTO, L. P. C.; LIMA, E. S.; OLIVEIRA, V. A. B.; SILVA, A. M. V; SILVA, J. V. Clay Ceramic Materials: From Fundamentals and Manufacturing to Drying Process Predictions. **Transport Processes and Separation Technologies**. Springer, 2021. 1–29 p.

LIMA, A. G. B.; SILVA, J. B.; ALMEIDA, G. S.; NASCIMENTO, J. J. S.; TAVARES, F. V.

S.; SILVA, V. S. Clay products convective drying: foundations, modeling and applications. . **Drying and Energy Technologies**. Springer, 2016. 43–70 p.

LIMA, E S. **Transferência de calor e massa em tijolos cerâmicos industriais via análise concentrada: estimativa de parâmetros do processo de secagem**. 2020. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

LIMA, E. S.; LIMA, W. M. P. B.; SILVA, S. K. B. M.; MAGALHÃES, H. L. F.; NASCIMENTO, L. P. C.; GOMEZ, R. S.; PORTO, T. R. N.; LIMA, A. G. B. Secagem de tijolos cerâmicos industriais e estimativa de parâmetros do processo: uma abordagem concentrada avançada. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 12, p. e48391211391–e48391211391, 2020.

LIMA, W. M. P. B. **Transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa via análise concentrada: modelagem e simulação**. 2017. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

LUQUE, S.; GÓMEZ, D.; ÁLVAREZ, J. R. Industrial applications of porous ceramic membranes (pressure-driven processes). **Membrane Science and Technology**, v. 13, p. 177–216, 2008.

LV, J.; GU, F.; ZHANG, W.; GUO, J. Life cycle assessment and life cycle costing of sanitary ware manufacturing: A case study in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 117938, 2019.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, n. 332, p. 411–417, 2008.

MACIEL, D. DOS S. C.; FREITAS, L. S. Análise do processo produtivo de uma empresa do segmento de cerâmica vermelha à luz da produção mais limpa. **Revista Produção Online**, v. 13, n. 4, p. 1355–1380, 2013.

MAGALHÃES, H. L. F.; MOREIRA, G.; GOMEZ, R. S.; PORTO, T.; CORREIA, B. R. B.; SILVA, A.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. Non-Isothermal Treatment of Oily Waters Using Ceramic Membrane: A Numerical Investigation. **Energies**, v. 13, n. 8, p. 2092, 2020.

MARGUERON, J. **Les mésopotamiens**. Editions A&J Picard, 2003.

MARTINES-LOPEZ, E.; LIRA-CORTES, L. Moisture transfer analysis during drying of brick by temperature and relative humidity profiles. **European Scientific Journal**, v. 9, n. 33, p. 109–122, 2013.

MARTINS, I. O. **Modelagem da secagem convectiva em contracorrente de cerâmicas**

vermelhas: aspectos fenomenológicos e de consumo de energia. 2016. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MEISAMI-ASL, E.; RAFIEE, S.; KEYHANI, A.; TABATABAEEFAR, A. Determination of suitable thin layer drying curve model for apple slices (variety-Golab). **Plant Omics**, v. 3, n. 3, p. 103–108, 2010.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. DE A.; FERREIRA, H. C. Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção-revisão. **Cerâmica**, v. 52, n. 321, p. 37–49, 2006.

MESTRE, S.; GOZALBO, A.; LORENTE-AYZA, M. M.; SÁNCHEZ, E. Low-cost ceramic membranes: A research opportunity for industrial application. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 39, n. 12, p. 3392–3407, 2019.

MEZQUITA, A.; BOIX, J.; MONFORT, E.; MALLOL, G. Energy saving in ceramic tile kilns: Cooling gas heat recovery. **Applied Thermal Engineering**, v. 65, n. 1–2, p. 102–110, 2014.

MEZQUITA, A.; MONFORT, E.; ZAERA, V. Ceramic tiles manufacturing and emission trading scheme: reduction of CO₂ emissions, european benchmarking. **Boletín De La Sociedad Española De Cerámica Y Vidrio**, v. 48, n. 4, p. 211–222, 2009.

MIHOUBI, D.; BELLAGI, A. Drying-induced stresses during convective and combined microwave and convective drying of saturated porous media. **Drying Technology**, v. 27, n. 7–8, p. 851–856, 2009.

MIHOUBI, D.; ZAGROUBA, F.; VAXELAIRE, J.; BELLAGI, A.; ROQUES, M. Transfer phenomena during the drying of a shrinkable product: modeling and simulation. **Drying Technology**, v. 22, n. 1–2, p. 91–109, 2004.

MIKHAYLOV, A.; MOISEEV, N.; ALESHIN, K.; BURKHARDT, T. Global climate change and greenhouse effect. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, v. 7, n. 4, p. 2897, 2020.

MILLER, G. L. Classification and economic scaling of 19th century ceramics. **Historical Archaeology**, v. 14, n. 1, p. 1–40, 1980.

MONTEITH, J.; UNSWORTH, M. **Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere.** New York, USA: Academic Press, 2013.

MONTI, R.; FUMO, M. S.; SAVINO, R. Thermal shielding of a reentry vehicle by ultra-high-temperature ceramic materials. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, v. 20, n. 3, p. 500–506, 2006.

MORAIS, D. S. G. **Análise das propriedades termofísicas, mecânicas e geométricas de telhas cerâmicas queimadas em forno caieira e forno abóbada**. 2011. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Grupo Gen-LTC, 2009.

MOREIRA, A. S. F. **Racionalização Energética em Indústria Cerâmica**. 2016. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JÚNIOR, M. As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 28–39, 2001.

MUJUMDAR, ARUN S. Principles, Classification, and Selection of Dryers. . In: MUJUMDAR, A. S.(Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006. 32 p.

MUÑOZ, P.; MORALES, M. P.; LETELIER, V.; MENDIVIL, M. A. Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 241–252, 2016.

NASCIMENTO, J. J. S.; BELO, F. A.; LIMA, A. G. B. Experimental drying of ceramics bricks including shrinkage. **Defect and Diffusion Forum**, v. 365, p. 106–111, 2015.

NASCIMENTO, L. P. C.; SILVA, S. K. B. M.; LIMA, E. S.; MAGALHÃES, H. L. F.; LIMA, W. M. P. B.; GOMEZ, R. S.; PORTO, T. R. N.; LIMA, A. G. B. Secagem de tijolos cerâmicos argilosos industriais: uma investigação teórica usando modelos concentrados. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e44291110064–e44291110064, 2020.

OKADA, A. Automotive and industrial applications of structural ceramics in Japan. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 5, p. 1097–1104, 2008.

OLIVEIRA, M. C.; MAGANHA, M. F. B. Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas branca e de revestimentos. 2006. São Paulo: CETESB. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/ceramica.pdf>>. Acesso em: 15 de abril de 2021.

OLIVEIRA, Y. L.; LINHARES JÚNIOR, Z.; ANCELMO, L.; SOARES, R. A. L. Estudo da Reutilização de Resíduos de Telha Cerâmica (Chamote) em formulação de massa para blocos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 21, n. 2, p. 45–50, 2016.

OMOLOLA, A. O.; JIDEANI, A. I. O.; KAPILA, P. F. Modeling microwave drying kinetics and moisture diffusivity of Mabonde banana variety. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 7, n. 6, p. 107–113, 2014.

OSEPCHUK, J. M. Microwave power applications. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 50, n. 3, p. 975–985, 2002.

OUMMADI, S.; NAIT-ALI, B.; ALZINA, A.; PAYA, M.-C.; GAILLARD, J.-M.; SMITH, D. S. Optical method for evaluation of shrinkage in two dimensions during drying of ceramic green bodies. **Open Ceramics**, v. 2, p. 100016, 2020.

OUMMADI, S.; NAIT-ALI, B.; ALZINA, A.; VICTOR, J.-L.; LAUNAY, Y.; MIRDRIKVAND, M.; DREHER, W.; REZWAN, K.; SMITH, D. S. Distribution of water in ceramic green bodies during drying. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 39, n. 10, p. 3164–3172, 2019.

OVERPECK, J. T.; OTTO-BLIESNER, B. L.; MILLER, G. H.; MUHS, D. R.; ALLEY, R. B.; KIEHL, J. T. Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability and rapid sea-level rise. **Science**, v. 311, n. 5768, p. 1747–1750, 2006.

OYEN, A. VAN. **How things make history: the Roman Empire and its terra sigillata pottery**. Amsterdam: Amsterdam University Press, 2016.

PARDESHI, I. L.; ARORA, S.; BORKER, P. A. Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. **Drying Technology**, v. 27, n. 2, p. 288–295, 2009.

PAULETTI, M. C. **Modelo para introdução de nova tecnologia em agrupamentos de micro e pequenas empresas: estudo de caso das indústrias de cerâmica vermelha no Vale do Rio Tijucas**. 2001. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 2, n. 1/2, p. 31–35, 1997.

PROGETTI. Ceramic Innovation - Dryers for Ceramic and More. 2021. Disponível em: <<http://www.progettiplant.it/ceramic-innovation/products/dryers-for-ceramic-and-more/>>. Acesso em 03 de maio de 2021.

RAMACHANDRAN, R. P.; AKBARZADEH, M.; PALIWAL, J.; CENKOWSKI, S. Computational fluid dynamics in drying process modelling—a technical review. **Food and bioprocess technology**, v. 11, n. 2, p. 271–292, 2018.

RAYAGURU, K.; ROUTRAY, W. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices. **International Food Research Journal**, v.19, n. 4, p. 1503–1510, 2012.

REED, J. S. **Principles of ceramics processing**. Wiley New York, 1995.

SACILIK, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of food engineering**, v. 79, n. 1, p. 23–30, 2007.

SANTOS, G. M. **Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha**. 2001. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SANTOS, R. S. **Estudo do processo de secagem de blocos cerâmicos estruturais: modelagem e simulação**. 2019. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

SANTOS, R. S.; FARIAS NETO, S. R.; BARBOSA DE LIMA, A. G.; SILVA JÚNIOR, J. B.; SILVA, A. M. V. Drying of ceramic bricks: thermal and mass analysis via CFD. **Diffusion Foundations**, v. 25, p. 133–153, 2020.

SANTOS, R. S.; PEÑA, D. P. A.; DINIZ, D. D. S.; COSTA, G. A.; QUEIROZ, J. G. A.; NETO, S. R. F. Brick Drying Simulations by Finite Volume Method. **Materials Science Forum**, v. 930, p. 115–119, 2018.

SCHWARTZ, B. Ceramic packaging of integrated circuits. . In: LEVINSON, L.(Ed.). **Electronic ceramics**. New York: Marcel Dekker, 1988. 1–44 p.

SCHWOB, M. R. V.; OLIVEIRA, A. A.; RODRIGUES, J. A. P.; HENRIQUES JÚNIOR, M. F. Manual de Sistemas de Secagem na Indústria de Cerâmica Vermelha. 2016. Rio de Janeiro: INT/MCTIC. Disponível em: <<https://www.gov.br/int/pt-br/central-de-conteudos/ceramica-vermelha/manual-sistemas-de-secagem>>. Acesso em 21 de maio de 2021.

SEBRAE. Cerâmica vermelha: estudos de mercado. 2008. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) / ESPM. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/2786168-Ceramica-vermelha-estudos-de-mercado-sebrae-espm-2008-relatorio-completo.html>>. Acesso em 29 de maio de 2021.

SHAKIR, A. A.; MOHAMMED, A. A. Manufacturing of Bricks in the Past, in the Present and in the Future: A state of the Art Review. **International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS)**, v. 2, n. 3, p. 145–156, 2013.

SHARMA, A. Process modeling in welding. . **Joining Processes for Dissimilar and Advanced Materials**. Elsevier, 2022. 461–483 p.

SHI, F. **Ceramic materials: progress in modern ceramics**. Rijeka, Croatia: InTech, 2012.

SHIRAKI, Y. Studies on Clay–Water System.(II-1) Plasticity of Clay. **Journal of the Ceramic Association of Japan**, v. 63, n. 709, p. 233–243, 1955a.

SHIRAKI, Y. Studies on Clay–Water System.(II-3) Theoretical Consideration to the Visco-Elastic Property of Clay–Water Masses. **Journal of the Ceramic Association of Japan**, v. 63, n. 712, p. 421–429, 1955b.

SHIRAKI, Y.; FUKUURA, Y. Studies on Clay–Water System.(II-4) Plastic Deformation of

Nearly Dry Clay, and Relations between Water Content and Modulus of Rupture and Modulus of Elasticity. **Journal of the Ceramic Association of Japan**, v. 63, n. 714, p. 527–532, 1955.

SHIRAKI, Y.; KOMAKI, T. Studies on Clay–Water System.(I-12) Visco-Elastic Properties of Clay Paste. **Journal of the Ceramic Association of Japan**, v. 63, n. 708, p. 194–197, 1955.

SILVA, A. M. V. **Secagem de blocos cerâmicos industriais: modelagem, simulação e experimentação**. 2018. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

SILVA, A. M. V.; DELGADO, J. M. P. Q.; GUIMARÃES, A. S.; LIMA, W. M. P. B.; GOMEZ, R. S.; FARIAS, R. P.; LIMA, E. S.; LIMA, A. G. B. Industrial Ceramic Blocks for Buildings: Clay Characterization and Drying Experimental Study. **Energies**, v. 13, n. 11, p. 2834, 2020.

SILVA, J. B. **Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados**. 2009. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

SILVA, J. B.; ALMEIDA, G. S.; LIMA, W. C. P. B.; NEVES, G. A.; LIMA, A. G. B. Heat and mass diffusion including shrinkage and hygrothermal stress during drying of holed ceramics bricks. **Defect and Diffusion Forum**, v. 312, p. 971–976, 2011.

SILVA, J. B.; ALMEIDA, G. S.; NEVES, G. A.; LIMA, W. C. P. B.; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A. G. B. Heat and mass transfer and volume variations during drying of industrial ceramic bricks: an experimental investigation. **Defect and Diffusion Forum**, v. 326, p. 267–272, 2012.

SILVA, V. S.; DELGADO, J.; LIMA, W. M. P. B.; LIMA, A. G. B. Heat and mass transfer in holed ceramic material using lumped model. **Diffusion Foundations**, v. 7, p. 30–52, 2016.

SILVA, W. P.; RODRIGUES, A. F.; SILVA, C. M. D. P. S.; CASTRO, D. S.; GOMES, J. P. Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 230–236, 2015.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M.; GAMA, F. J. A.; GOMES, J. P. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 13, n. 1, p. 67–74, 2014.

SILVESTRI, L.; FORCINA, A.; SILVESTRI, C.; IOPPOLO, G. Life cycle assessment of sanitaryware production: A case study in Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119708, 2020.

SOKOLOV, P. V; GAK, B. N. Accelerating the drying of sanitary ware. **Glass and Ceramics**, v. 16, n. 10, p. 561–565, 1959.

SPIESS, A.-N.; NEUMEYER, N. An evaluation of R2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach. **BMC pharmacology**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2010.

STRASSBURG, B. B. N.; RODRIGUES, A. S. L.; GUSTI, M.; BALMFORD, A.; FRITZ, S.; OBERSTEINER, M.; TURNER, R. K.; BROOKS, T. M. Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 5, p. 350–355, 2012.

SU, S.-L. Modeling of multi-phase moisture transfer and induced stress in drying clay bricks. **Applied Clay Science**, v. 12, n. 3, p. 189–207, 1997.

TAVARES, F.; NETO, S.; BARBOSA, E.; LIMA, A.; SILVA, C. Drying of ceramic hollow bricks in an industrial tunnel dryer: A finite volume analysis. **The International Journal of Multiphysics**, v. 8, n. 3, p. 297–312, 2014.

TAVARES, F. V. S. **Otimização e controle de secadores convectivos tipo túnel. Estudo de caso: secagem de tijolos cerâmicos vazados**. 2018. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

TETENS, O. Uber einige meteorologische Begriffe. **Z. geophys**, v. 6, p. 297–309, 1930.

THOMAS, L. C. Modulated DSC® Paper# 2 Modulated DSC® Basics; Calculation and Calibration of MDSC® Signals. **TA Instruments Technical Papers**, 2005a.

THOMAS, L. C. Modulated DSC® Paper# 3 Modulated DSC® Basics; Optimization of MDSC® Experimental Conditions. **TA Instruments Technical Papers**, p. 1–10, 2005b.

TITE, M. S. Pottery production, distribution, and consumption—the contribution of the physical sciences. **Journal of archaeological method and theory**, v. 6, n. 3, p. 181–233, 1999.

TZEMPELIKOS, D. A.; VOUIROS, A. P.; BARDAKAS, A. V.; FILIOS, A. E.; MARGARIS, D. P. Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 3, p. 79–85, 2014.

TZEMPELIKOS, D. A.; VOUIROS, A. P.; BARDAKAS, A. V.; FILIOS, A. E.; MARGARIS, D. P. Experimental study on convective drying of quince slices and evaluation of thin-layer drying models. **Engineering in agriculture, environment and food**, v. 8, n. 3, p. 169–177, 2015.

VANDIVER, P. B. Venuses and wolverines: the origins of ceramic technology, ca. 26 000 B. P. **Ceramics and Civilization**, 5 pp., v. 13, 1990.

VEGA, A.; URIBE, E.; LEMUS, R.; MIRANDA, M. Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. **LWT-Food Science and Technology**, v. 40, n. 10, p. 1698–1707, 2007.

VERMA, L. R.; BUCKLIN, R. A.; ENDAN, J. B.; WRATTEN, F. T. Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 1, p. 296–301, 1985.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics, The Finite Volume Method**. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.

VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 1, p. 42–46, 2003.

VLASOV, A. S.; KARABANOVA, T. A. Ceramics and medicine. **Glass and ceramics**, v. 50, n. 9–10, p. 398–401, 1993.

WAKSMAN, S. Y.; BOUQUILLON, A.; CANTIN, N.; KATONA, I. Archaeometric and archaeological approaches to ceramics. In: 8TH EUROPEAN MEETING ON ANCIENT CERAMICS, LYON 2005, **Anais...**, Lyon: Archaeopress, 2007.

YALDÝZ, O.; ERTEKÝN, C. Thin layer solar drying of some vegetables. **Drying Technology**, v. 19, n. 3–4, p. 583–597, 2001.

ZACCARON, A. **Estudo do processo de secagem rápida em argilas utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha**. 2018. Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.

ZACCARON, A.; DAL BÓ, M.; PETERSON, M.; NANDI, V. S.; MONTEDO, O. R. K.; ANGIOLETTO, E.; BERNADIN, A. M. Estudo das propriedades de secagem de cerâmica vermelha: Uma revisão. In: 63º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2019, **Anais...** Bonito, 2019. p. 382–404.

ZACCARON, A.; NANDI, V. S.; BERNARDIN, A. M. Fast drying for the manufacturing of clay ceramics using natural clays. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101877, 2021.

ZAGROUBA, F.; MIHOUBI, D.; BELLAGI, A. Drying of clay. II Rheological modelisation and simulation of physical phenomena. **Drying technology**, v. 20, n. 10, p. 1895–1917, 2002.

ZANDEN, A. J. J. VAN DER; SCHOENMAKERS, A. M. E.; KERKHOF, P. Isothermal vapour and liquid transport inside clay during drying. **Drying Technology**, v. 14, n. 3–4, p. 647–676, 1996.

ZANDEN, A. J. J. VAN DER; TURNER, I.; MUJUMDAR, A. S. Modelling and simulating simultaneous liquid and vapour transport in partially saturated porous materials. **Mathematical modelling and numerical techniques in drying technology/eds. Turner & Mujumdar**, p. 157–177, 1996.

ZENOOZIAN, M. S.; FENG, H.; RAZAVI, S. M. A.; SHAHIDI, F.; POURREZA, H. R. Image analysis and dynamic modeling of thin-layer drying of osmotically dehydrated pumpkin. **Journal of food processing and preservation**, v. 32, n. 1, p. 88–102, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Nas Tabelas A.1-A7 são apresentados os resultados da massa da amostra (m), o teor de umidade médio em base seca (M), a temperatura superficial da amostra (T_{amostra}), a temperatura ($T_{\text{ar_ext}}$) e a umidade relativa ($UR_{\text{ar_ext}}$) do ar externo, a temperatura ($T_{\text{ar_estufa}}$) e a umidade relativa ($UR_{\text{ar_estufa}}$) do ar no interior da estufa, em cada instante de medição, para cada um dos sete experimentos de secagem realizados. O teor de umidade médio é calculado, para todos os casos, e a umidade relativa interna também é calculada para os experimentos com convecção forçada. Os demais parâmetros apresentados são medidos durante a realização dos experimentos.

Tabela A.1 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 23\%$).

Tempo (h)	m (kg)	M (kg/kg) (b.s)	T_{amostra} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{ar_ext}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$UR_{\text{ar_ext}}$ (%)	$T_{\text{ar_estufa}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$UR_{\text{ar_estufa}}$ (%)
0,00	16,370	0,2280570143	26,0	22,2	45	30,2	28,04
0,17	16,360	0,2273068267	26,2	21,4	44	29,7	26,87
0,33	16,350	0,2265566392	26,3	21,3	43	30,2	25,36
0,50	16,340	0,2258064516	26,3	21,1	42	29,5	25,47
0,67	16,330	0,2250562641	26,4	21,5	42	29,9	25,51
0,83	16,320	0,2243060765	26,6	21,1	41	29,9	24,30
1,00	16,310	0,2235558890	26,5	20,8	41	29,5	24,41
1,33	16,295	0,2224306077	26,8	21,7	42	29,9	25,82
1,67	16,285	0,2216804201	26,8	21,4	42	30,1	25,06
2,00	16,270	0,2205551388	27,0	21,2	42	29,8	25,19
2,33	16,255	0,2194298575	27,2	21,3	40	29,9	24,00
2,67	16,245	0,2186796699	27,3	20,9	39	30,3	22,31
3,00	16,230	0,2175543886	27,4	21,7	39	29,9	23,98
3,50	16,215	0,2164291073	27,5	21,9	43	29,8	26,92
4,00	16,200	0,2153038260	27,8	22,8	53	29,9	34,84
4,50	16,185	0,2141785446	28,1	21,8	46	30,1	28,13
5,00	16,165	0,2126781695	28,2	21,3	44	30,3	25,80
5,50	16,150	0,2115528882	28,7	21,2	42	30,2	24,61
6,00	16,130	0,2100525131	28,9	21,2	40	30,1	23,58
7,00	16,100	0,2078019505	28,7	21,1	38	29,8	22,65
8,00	16,065	0,2051762941	28,8	21,3	39	29,8	23,53
9,00	16,030	0,2025506377	28,7	20,8	37	30,4	20,92
10,00	15,995	0,1999249812	28,7	20,7	36	30,4	20,23
11,00	15,960	0,1972993248	28,8	20,1	36	30	19,94
12,00	15,925	0,1946736684	28,8	19,9	35	30	19,15
13,00	15,885	0,1916729182	28,6	19,8	34	30,1	18,38

14,00	15,850	0,1890472618	28,5	20,4	35	29,7	20,09
15,00	15,810	0,1860465116	28,6	21,0	36	29,7	21,45
16,00	15,775	0,1834208552	28,8	20,4	37	29,7	21,24
17,00	15,740	0,1807951988	28,3	20,3	37	29,8	20,99
18,00	15,705	0,1781695424	28,7	20,3	38	30	21,31
20,00	15,650	0,1740435109	28,8	20,9	39	29,8	22,96
22,00	15,595	0,1699174794	28,6	21,4	34	30,1	20,29
24,00	15,535	0,1654163541	28,7	21,2	42	30	24,90
26,00	15,480	0,1612903226	28,8	22,1	40	30,2	24,77
28,00	15,425	0,1571642911	28,6	21,9	41	30,5	24,65
30,00	15,365	0,1526631658	28,3	20,2	38	30,2	20,94
32,00	15,305	0,1481620405	28,5	21,2	40	30,4	23,18
34,00	15,245	0,1436609152	28,4	21,0	36	30,2	20,84
36,00	15,185	0,1391597899	28,7	20,2	35	30,5	18,96
38,00	15,120	0,1342835709	28,6	19,8	35	30	19,03
40,00	15,060	0,1297824456	28,8	22,0	43	30,5	26,02
42,00	15,000	0,1252813203	28,7	21,0	40	30	23,42
44,00	14,945	0,1211552888	28,7	22,8	45	30,3	28,91
46,00	14,895	0,1174043511	28,9	21,2	41	30,3	23,89
48,00	14,845	0,1136534134	28,8	21,1	42	30,2	24,46
50,00	14,795	0,1099024756	28,7	19,8	42	30,3	22,45
52,00	14,740	0,1057764441	28,7	21,1	40	30,2	23,30
54,00	14,685	0,1016504126	28,8	20,2	38	30,2	20,94
56,00	14,630	0,0975243811	28,6	20,2	36	30,1	19,95
58,00	14,575	0,0933983496	28,7	20,8	35	30,1	20,13
60,00	14,520	0,0892723181	28,8	20,1	34	30,1	18,73
62,00	14,460	0,0847711928	28,3	19,5	33	30,2	17,41
64,00	14,395	0,0798949737	28,6	19,1	33	30,1	17,08
66,00	14,335	0,0753938485	28,7	20,3	34	30	19,07
68,00	14,275	0,0708927232	28,6	20,3	34	30,1	18,96
70,00	14,225	0,0671417854	28,4	20,5	38	30,3	21,21
72,00	14,175	0,0633908477	28,6	21,9	39	30,4	23,59
74,00	14,125	0,0596399100	28,7	20,7	37	30,3	20,91
76,00	14,075	0,0558889722	28,6	20,7	38	30,3	21,47
78,00	14,025	0,0521380345	28,6	20,6	39	30,3	21,90
80,00	13,980	0,0487621905	28,5	20,8	37	30,1	21,28
82,00	13,930	0,0450112528	28,7	20,0	35	30,4	18,83
84,00	13,885	0,0416354089	28,8	20,0	34	30,1	18,61
86,00	13,835	0,0378844711	28,7	19,5	34	30	18,14
88,00	13,795	0,0348837209	28,6	20,3	38	30	21,31
90,00	13,750	0,0315078770	28,7	20,2	36	30	20,07
92,00	13,710	0,0285071268	28,8	20,0	38	30	20,92
94,00	13,675	0,0258814704	28,6	20,7	38	30,3	21,47
96,00	13,645	0,0236309077	28,5	20,1	39	30,3	21,23

98,00	13,615	0,0213803451	28,6	21,3	39	30,4	22,74
100,00	13,585	0,0191297824	28,7	20,6	39	30,5	21,65
102,00	13,560	0,0172543136	28,8	21,7	40	30,5	23,76
104,00	13,540	0,0157539385	28,9	20,8	43	30,4	24,31
106,00	13,520	0,0142535634	28,6	20,2	37	30,5	20,04
108,00	13,500	0,0127531883	28,7	20,1	35	30,3	19,06
110,00	13,485	0,0116279070	28,9	19,5	34	30,3	17,84
112,00	13,470	0,0105026257	29,2	20,2	36	30,3	19,72
114,00	13,455	0,0093773443	29,4	22,2	43	30,4	26,49
116,00	13,445	0,0086271568	29,5	20,5	41	30,4	22,75
118,00	13,435	0,0078769692	29,6	20,9	38	30	22,12
120,00	13,430	0,0075018755	29,6	20,7	40	30,4	22,47
122,00	13,425	0,0071267817	29,7	20,8	41	30,4	23,18
124,00	13,420	0,0067516879	29,9	21,3	41	30,4	23,90
126,00	13,420	0,0067516879	29,9	20,4	39	30,3	21,63
128,00	13,415	0,0063765941	29,7	20,1	39	30,5	20,99
130,00	13,415	0,0063765941	29,6	20,3	39	30,1	21,75
132,00	13,410	0,0060015004	29,7	20,1	40	30	22,16
134,00	13,410	0,0060015004	29,8	20,5	42	30	23,85
136,00	13,405	0,0056264066	29,9	20,8	43	30,3	24,45
138,00	13,405	0,0056264066	29,7	20,5	46	30,1	25,97
140,00	13,405	0,0056264066	29,8	20,5	46	30,2	25,82
142,00	13,405	0,0056264066	29,7	20,4	46	30	25,96
166,00	13,400	0,0052513128	30,0	21,2	53	30,2	31,06

Tabela A.2 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 20\%$).

Tempo (h)	m (kg)	M (kg/kg) (b.s)	T_{amostra} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{ar_ext}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{UR}_{\text{ar_ext}}$ (%)	$T_{\text{ar_estufa}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{UR}_{\text{ar_estufa}}$ (%)
0,00	15,355	0,2215592681	24,0	23,4	46	35,0	23,52
0,17	15,345	0,2207637232	25,2	23,3	45	34,7	23,25
0,33	15,335	0,2199681782	26,2	23,4	45	34,7	23,39
0,50	15,325	0,2191726333	27,0	23,4	44	34,8	22,75
0,67	15,315	0,2183770883	27,3	23,4	44	35,2	22,25
0,83	15,305	0,2175815434	27,9	23,1	44	34,8	22,34
1,00	15,295	0,2167859984	27,8	23,1	46	34,7	23,48
1,33	15,275	0,2151949085	29,1	23,3	44	34,7	22,74
1,67	15,255	0,2136038186	29,6	23,1	42	35,2	20,86
2,00	15,235	0,2120127287	29,7	23,0	42	35,0	20,96
2,33	15,215	0,2104216388	30,1	23,3	41	35,1	20,72
2,67	15,195	0,2088305489	30,1	23,1	41	35,2	20,36
3,00	15,175	0,2072394590	30,3	23,2	41	34,9	20,83
3,50	15,145	0,2048528242	30,7	23,1	40	35,1	19,97
4,00	15,115	0,2024661893	30,7	23,1	39	35,0	19,58
4,50	15,090	0,2004773270	30,7	23,1	39	35,0	19,58
5,00	15,060	0,1980906921	30,6	23,1	38	34,7	19,40
5,50	15,035	0,1961018298	30,9	23,1	38	35,3	18,77
6,00	15,010	0,1941129674	30,9	23,1	38	35,0	19,08
7,00	14,960	0,1901352426	31,4	22,6	38	35,0	18,51
8,00	14,910	0,1861575179	31,1	22,4	37	35,1	17,71
9,00	14,860	0,1821797932	31,2	22,2	37	34,9	17,69
10,00	14,805	0,1778042959	31,2	22,2	37	34,8	17,78
11,00	14,755	0,1738265712	31,4	22,1	37	34,9	17,58
12,00	14,705	0,1698488465	31,3	22,0	36	34,7	17,19
13,00	14,650	0,1654733492	31,2	22,0	38	35,1	17,75
14,00	14,600	0,1614956245	31,5	21,7	38	35,1	17,42
15,00	14,550	0,1575178998	31,1	21,6	37	35,2	16,77
16,00	14,500	0,1535401750	30,9	21,4	36	35,0	16,30
17,00	14,445	0,1491646778	31,2	21,4	36	35,1	16,21
18,00	14,395	0,1451869531	31,2	21,3	36	35,0	16,20
20,00	14,300	0,1376292761	31,0	21,2	36	35,1	16,01
22,00	14,205	0,1300715990	31,3	22,2	39	34,8	18,75
24,00	14,125	0,1237072395	31,6	23,5	39	34,7	20,40
26,00	14,035	0,1165473349	31,7	23,6	38	35,0	19,66
28,00	13,945	0,1093874304	31,6	23,7	38	34,8	20,00
30,00	13,865	0,1030230708	31,8	23,2	37	34,7	19,00
32,00	13,780	0,0962609387	31,7	23,1	37	34,7	18,89
34,00	13,695	0,0894988067	31,5	22,6	38	35,0	18,51

36,00	13,615	0,0831344471	31,7	22,2	37	35,1	17,49
38,00	13,530	0,0763723150	31,5	21,6	37	35,2	16,77
40,00	13,450	0,0700079554	31,6	21,9	38	35,3	17,44
42,00	13,375	0,0640413683	31,5	22,2	38	35,1	17,96
44,00	13,300	0,0580747812	31,5	22,1	37	34,7	17,78
46,00	13,225	0,0521081941	31,9	22,3	39	34,8	18,86
48,00	13,150	0,0461416070	31,9	22,4	42	34,9	20,32
50,00	13,085	0,0409705648	32,0	22,1	41	35,0	19,37
52,00	13,020	0,0357995227	31,5	22,1	40	35,1	18,80
54,00	12,965	0,0314240255	32,0	21,6	38	35,1	17,32
56,00	12,915	0,0274463007	32,3	21,6	40	34,8	18,53
58,00	12,865	0,0234685760	32,3	22,3	41	34,9	19,72
60,00	12,820	0,0198886237	32,5	22,3	39	35,1	18,55
62,00	12,785	0,0171042164	32,3	22,2	40	35,1	18,91
64,00	12,760	0,0151153540	33,0	22,3	42	35,2	19,87
66,00	12,735	0,0131264916	33,5	22,7	46	35,1	22,42
68,00	12,715	0,0115354018	34,0	22,4	45	35,2	21,42
70,00	12,705	0,0107398568	34,2	22,2	43	35,1	20,33
72,00	12,690	0,0095465394	34,3	22,1	43	35,1	20,20
74,00	12,675	0,0083532220	34,5	22,8	43	35,3	20,85
76,00	12,665	0,0075576770	34,7	22,7	42	34,8	20,81
78,00	12,660	0,0071599045	34,4	22,6	41	35,1	19,86
80,00	12,650	0,0063643596	34,6	21,8	41	35,1	18,92
82,00	12,645	0,0059665871	34,7	21,3	38	35,2	16,91
84,00	12,640	0,0055688146	34,7	22,1	39	34,9	18,53
86,00	12,635	0,0051710422	34,6	22,2	39	34,9	18,64
88,00	12,635	0,0051710422	34,6	22,6	47	34,8	23,15
90,00	12,630	0,0047732697	34,3	22,3	48	34,7	23,34
92,00	12,630	0,0047732697	34,0	22,6	54	34,8	26,60
94,00	12,630	0,0047732697	34,6	22,0	43	34,8	20,42
96,00	12,630	0,0047732697	34,7	22,3	44	35,0	21,04
120,00	12,625	0,0043754972	34,8	22,1	40	35,3	18,59

Tabela A.3 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 14\%$).

Tempo (h)	m (kg)	M (kg/kg) (b.s)	T_{amostra} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{ar_ext}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{UR}_{\text{ar_ext}}$ (%)	$T_{\text{ar_estufa}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{UR}_{\text{ar_estufa}}$ (%)
0,00	18,120	0,2047872340	25,0	21,2	46	39,9	15,76
0,17	18,110	0,2041223404	27,1	20,7	49	39,9	16,28
0,33	18,100	0,2034574468	28,1	20,8	49	39,7	16,55
0,50	18,090	0,2027925532	29,0	20,9	48	39,5	16,49
0,67	18,075	0,2017952128	29,7	20,7	47	39,7	15,78
0,83	18,065	0,2011303191	30,2	20,7	47	39,6	15,86
1,00	18,050	0,2001329787	30,5	20,9	46	40,1	15,30
1,33	18,025	0,1984707447	31,0	20,7	46	40,0	15,20
1,67	18,000	0,1968085106	31,8	20,7	45	40,0	14,87
2,00	17,975	0,1951462766	32,5	20,7	45	40,2	14,71
2,33	17,950	0,1934840426	33,3	20,9	44	40,1	14,64
2,67	17,925	0,1918218085	33,3	21,4	44	40,0	15,18
3,00	17,900	0,1901595745	33,6	21,1	45	39,9	15,32
3,50	17,870	0,1881648936	33,8	21,0	45	39,8	15,31
4,00	17,835	0,1858377660	34,1	21,6	45	40,3	15,46
4,50	17,805	0,1838430851	34,3	21,1	46	40,2	15,41
5,00	17,770	0,1815159574	34,2	20,9	46	39,8	15,55
5,50	17,735	0,1791888298	34,5	21,0	46	39,8	15,65
6,00	17,700	0,1768617021	34,6	21,6	49	39,7	17,39
7,00	17,630	0,1722074468	34,9	20,6	46	40,2	14,94
8,00	17,565	0,1678856383	34,8	20,5	43	39,8	14,18
9,00	17,495	0,1632313830	34,7	20,1	41	40,1	12,98
10,00	17,430	0,1589095745	34,8	19,8	41	40,3	12,61
11,00	17,360	0,1542553191	34,5	19,6	40	39,5	12,68
12,00	17,295	0,1499335106	34,5	20,4	40	40,3	12,77
13,00	17,225	0,1452792553	34,4	20,5	40	40,2	12,92
14,00	17,160	0,1409574468	34,4	20,9	40	40,2	13,24
15,00	17,090	0,1363031915	34,5	20,2	40	39,8	12,95
16,00	17,020	0,1316489362	34,3	22,3	49	40,3	17,57
17,00	16,960	0,1276595745	34,2	20,3	42	40,0	13,54
18,00	16,890	0,1230053191	34,8	20,7	46	39,8	15,36
20,00	16,770	0,1150265957	35,0	22,1	47	39,9	17,01
22,00	16,640	0,1063829787	35,3	20,6	40	40,2	13,00
24,00	16,515	0,0980718085	35,2	21,1	42	40,0	14,22
26,00	16,400	0,0904255319	34,7	20,9	42	39,8	14,20
28,00	16,285	0,0827792553	34,5	19,6	39	39,5	12,36
30,00	16,175	0,0754654255	34,5	21,2	37	39,6	12,88
32,00	16,065	0,0681515957	34,6	20,9	37	39,5	12,71
34,00	15,955	0,0608377660	34,7	20,3	36	39,7	11,79

36,00	15,855	0,0541888298	35,0	19,7	35	39,9	10,93
38,00	15,755	0,0475398936	34,8	19,5	38	39,9	11,72
40,00	15,655	0,0408909574	35,1	20,1	38	40,0	12,10
42,00	15,565	0,0349069149	35,3	20,5	39	40,1	12,66
44,00	15,485	0,0295877660	34,4	20,2	39	39,9	12,56
46,00	15,420	0,0252659574	34,9	20,3	38	40,1	12,18
48,00	15,355	0,0209441489	35,5	20,3	40	40,0	12,89
50,00	15,300	0,0172872340	36,0	20,7	39	40,1	12,82
52,00	15,255	0,0142952128	36,2	20,3	39	40,0	12,57
54,00	15,210	0,0113031915	36,4	21,1	40	39,8	13,69
56,00	15,180	0,0093085106	37,1	20,4	39	40,2	12,51
58,00	15,155	0,0076462766	37,5	20,3	37	40,0	11,93
60,00	15,140	0,0066489362	37,9	20,0	38	40,2	11,90
62,00	15,125	0,0056515957	38,6	20,4	38	39,9	12,39
64,00	15,120	0,0053191489	38,9	20,3	41	39,8	13,36
66,00	15,115	0,0049867021	39,2	20,9	46	40,0	15,39
68,00	15,110	0,0046542553	39,5	21,7	43	40,3	14,87
70,00	15,110	0,0046542553	39,4	20,8	39	39,8	13,10
72,00	15,105	0,0043218085	39,5	20,0	40	40,3	12,45
74,00	15,105	0,0043218085	39,9	20,1	39	39,9	12,48
76,00	15,105	0,0043218085	39,7	19,8	38	40,0	11,87
78,00	15,105	0,0043218085	39,8	20,0	38	40,1	11,96
102,00	15,100	0,0039893617	39,9	20,9	41	40,0	13,71

Tabela A.4 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 51\%$).

Tempo (h)	m (kg)	M (kg/kg) (b.s)	T_{amostra} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{ar_ext}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$UR_{\text{ar_ext}}$ (%)	$T_{\text{ar_estufa}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$UR_{\text{ar_estufa}}$ (%)
0,00	15,890	0,2199616123	24,8	24,6	70	30,2	50,42
0,17	15,885	0,2195777351	25,6	24,8	69	29,8	51,46
0,33	15,880	0,2191938580	26,4	24,8	68	30,3	49,28
0,50	15,875	0,2188099808	26,6	24,6	70	30,1	50,71
0,67	15,870	0,2184261036	26,8	24,7	69	29,7	51,45
0,83	15,865	0,2180422265	27,3	24,7	68	30,1	49,55
1,00	15,860	0,2176583493	27,5	24,7	68	30,3	48,99
1,33	15,850	0,2168905950	27,6	24,9	68	29,8	51,02
1,67	15,840	0,2161228407	28,0	24,9	69	30,3	50,31
2,00	15,830	0,2153550864	28,2	24,8	68	30,1	49,85
2,33	15,820	0,2145873321	28,3	25,0	70	30,0	52,23
2,67	15,810	0,2138195777	28,4	25,0	70	30,1	51,93
3,00	15,800	0,2130518234	28,3	25,1	69	29,9	52,09
3,50	15,785	0,2119001919	28,3	25,2	70	29,9	53,17
4,00	15,770	0,2107485605	28,5	25,3	70	30,0	53,18
4,50	15,755	0,2095969290	28,5	25,2	69	30,1	51,81
5,00	15,740	0,2084452975	28,6	25,3	68	30,0	51,66
5,50	15,725	0,2072936660	28,7	25,0	68	30,0	50,74
6,00	15,710	0,2061420345	28,6	24,9	69	30,0	51,18
7,00	15,685	0,2042226488	28,5	24,7	70	30,1	51,01
8,00	15,660	0,2023032630	28,6	24,8	71	30,1	52,05
9,00	15,635	0,2003838772	28,7	24,6	70	30,1	50,71
10,00	15,610	0,1984644914	28,5	24,4	70	29,8	50,98
11,00	15,580	0,1961612284	28,8	24,4	70	30,0	50,39
12,00	15,550	0,1938579655	28,7	24,3	69	30,2	48,81
13,00	15,520	0,1915547025	28,8	24,3	70	30,3	49,24
14,00	15,495	0,1896353167	28,7	24,3	71	29,9	51,10
15,00	15,470	0,1877159309	28,7	24,1	75	29,9	53,33
16,00	15,440	0,1854126679	28,8	24,2	73	30,3	51,04
17,00	15,410	0,1831094050	28,9	24,1	76	30,1	53,43
18,00	15,380	0,1808061420	28,8	23,9	78	30,0	54,49
20,00	15,330	0,1769673704	28,8	23,9	79	30,2	54,56
22,00	15,280	0,1731285988	28,7	24,3	75	29,8	54,29
24,00	15,235	0,1696737044	28,7	25,1	73	29,9	55,11
26,00	15,185	0,1658349328	28,8	25,5	71	29,9	54,90
28,00	15,135	0,1619961612	28,8	25,6	70	30,2	53,52
30,00	15,085	0,1581573896	28,6	25,3	69	29,8	53,02
32,00	15,035	0,1543186180	28,7	24,9	66	30,2	48,40
34,00	14,980	0,1500959693	28,5	24,6	65	29,9	47,63

36,00	14,930	0,1462571977	28,7	24,3	69	30,2	48,81
38,00	14,880	0,1424184261	28,8	24,1	73	30,1	51,32
40,00	14,825	0,1381957774	28,6	23,8	79	30,1	54,54
42,00	14,770	0,1339731286	28,9	23,7	78	30,0	53,84
44,00	14,720	0,1301343570	28,6	23,7	77	29,8	53,76
46,00	14,675	0,1266794626	28,7	24,1	75	30,0	53,03
48,00	14,625	0,1228406910	28,6	25,0	74	30,0	55,22
50,00	14,575	0,1190019194	28,7	25,6	72	30,0	55,68
52,00	14,535	0,1159309021	28,5	25,7	72	29,8	56,66
54,00	14,490	0,1124760077	28,9	25,5	73	30,1	55,80
56,00	14,445	0,1090211132	29,0	25,2	74	29,9	56,20
58,00	14,400	0,1055662188	28,9	25,0	74	29,7	56,18
60,00	14,355	0,1021113244	28,8	24,9	75	30,2	55,00
62,00	14,310	0,0986564299	28,8	24,7	74	29,9	54,55
64,00	14,265	0,0952015355	28,7	24,4	72	30,3	50,95
66,00	14,215	0,0913627639	28,6	24,2	77	29,7	55,72
68,00	14,165	0,0875239923	28,6	24,1	78	29,8	55,79
70,00	14,120	0,0840690979	28,8	24,4	74	29,9	53,58
72,00	14,075	0,0806142035	28,7	25,0	77	30,0	57,46
74,00	14,035	0,0775431862	29,0	25,8	72	30,1	56,02
76,00	13,995	0,0744721689	28,9	25,9	71	30,1	55,57
78,00	13,950	0,0710172745	29,1	25,6	70	30,2	53,52
80,00	13,910	0,0679462572	29,0	25,3	70	30,2	52,57
82,00	13,865	0,0644913628	28,8	24,9	70	30,0	51,92
84,00	13,820	0,0610364683	29,0	24,6	72	30,3	51,56
86,00	13,775	0,0575815739	28,8	24,3	70	30,0	50,09
88,00	13,735	0,0545105566	28,7	24,1	74	30,0	52,32
90,00	13,695	0,0514395393	28,6	23,7	77	29,9	53,45
92,00	13,655	0,0483685221	28,9	23,5	76	30,1	51,53
94,00	13,615	0,0452975048	28,8	23,9	70	30,2	48,34
96,00	13,575	0,0422264875	28,8	24,9	67	29,8	50,27
98,00	13,535	0,0391554702	28,6	25,6	61	29,7	47,99
100,00	13,495	0,0360844530	28,7	25,6	63	29,8	49,28
102,00	13,455	0,0330134357	28,9	25,2	61	30,0	46,06
104,00	13,420	0,0303262956	29,0	24,8	61	30,3	44,21
106,00	13,385	0,0276391555	28,8	24,6	64	30,0	46,63
108,00	13,350	0,0249520154	28,9	24,3	65	30,1	46,25
110,00	13,320	0,0226487524	29,2	24,1	64	30,3	44,48
112,00	13,290	0,0203454894	29,0	23,7	64	30,2	43,67
114,00	13,265	0,0184261036	28,9	23,5	64	29,8	44,15
116,00	13,240	0,0165067179	29,0	23,4	64	29,9	43,63
118,00	13,220	0,0149712092	29,2	23,4	68	30,1	45,83
120,00	13,205	0,0138195777	29,3	24,5	69	30,3	49,12
122,00	13,190	0,0126679463	29,4	25,6	68	30,0	52,59

124,00	13,180	0,0119001919	29,3	25,6	62	29,9	48,22
126,00	13,170	0,0111324376	29,5	25,4	63	30,0	48,14
128,00	13,160	0,0103646833	29,7	25,0	61	29,9	45,78
130,00	13,150	0,0095969290	29,7	24,6	62	29,9	45,43
132,00	13,145	0,0092130518	29,8	24,4	63	29,8	45,88
134,00	13,140	0,0088291747	29,8	23,9	62	29,9	43,56
136,00	13,135	0,0084452975	29,9	23,6	64	30,0	43,91
138,00	13,130	0,0080614203	29,8	23,3	62	30,0	41,77
140,00	13,125	0,0076775432	30,0	23,1	63	30,2	41,46
142,00	13,125	0,0076775432	29,9	23,6	69	30,0	47,34
144,00	13,120	0,0072936660	29,9	25,1	63	29,9	47,56
146,00	13,120	0,0072936660	30,0	25,5	67	30,1	51,21
148,00	13,115	0,0069097889	29,9	25,6	70	30,0	54,13
150,00	13,115	0,0069097889	30,0	25,3	70	30,2	50,32
152,00	13,115	0,0069097889	30,0	24,9	70	30,2	51,33
154,00	13,115	0,0069097889	29,9	24,5	72	29,9	52,44
178,00	13,110	0,0065259117	30,0	24,2	70	30,1	49,51

Tabela A.5 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$).

Tempo (h)	m (kg)	M (kg/kg) (b.s)	T_{amostra} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{ar_ext}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{UR}_{\text{ar_ext}}$ (%)	$T_{\text{ar_estufa}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{UR}_{\text{ar_estufa}}$ (%)
0,00	16,200	0,2000000000	24,3	26,4	74,0	35,0	45,26
0,17	16,190	0,1992592593	26,2	26,6	73,0	35,2	44,68
0,33	16,180	0,1985185185	27,7	26,6	74,0	35,3	45,04
0,50	16,175	0,1981481481	28,7	26,8	75,0	35,0	46,96
0,67	16,165	0,1974074074	29,3	26,9	74,0	35,3	45,84
0,83	16,160	0,1970370370	29,8	27,0	74,0	35,2	46,37
1,00	16,150	0,1962962963	30,5	27,1	75,0	34,8	48,33
1,33	16,135	0,1951851852	31,3	27,4	75,0	35,3	47,85
1,67	16,120	0,1940740741	31,6	27,5	75,0	35,2	48,40
2,00	16,105	0,1929629630	31,9	27,6	73,0	34,7	48,71
2,33	16,090	0,1918518519	32,1	27,7	72,0	35,3	46,75
2,67	16,075	0,1907407407	32,2	27,8	72,0	35,0	47,81
3,00	16,060	0,1896296296	32,3	27,9	71,0	34,9	47,68
3,50	16,040	0,1881481481	32,5	27,9	71,0	35,0	47,42
4,00	16,020	0,1866666667	32,5	27,9	70,0	35,0	46,75
4,50	16,000	0,1851851852	32,6	28,0	70,0	35,1	46,77
5,00	15,980	0,1837037037	32,7	27,8	69,0	35,0	45,82
5,50	15,960	0,1822222222	32,8	27,7	67,0	35,1	43,98
6,00	15,940	0,1807407407	32,9	27,5	65,0	35,1	42,18
7,00	15,900	0,1777777778	32,8	27,3	64,0	35,2	40,82
8,00	15,860	0,1748148148	32,9	27,2	69,0	35,0	44,23
9,00	15,825	0,1722222222	33,0	26,5	63,0	35,2	38,33
10,00	15,785	0,1692592593	32,9	26,4	66,0	35,0	40,37
11,00	15,745	0,1662962963	33,0	26,6	68,0	35,3	41,39
12,00	15,705	0,1633333333	32,9	26,2	62,0	35,0	37,47
13,00	15,660	0,1600000000	32,9	26,0	61,0	35,1	36,23
14,00	15,620	0,1570370370	32,7	25,7	60,0	35,0	35,21
15,00	15,575	0,1537037037	32,5	25,4	61,0	35,2	34,77
16,00	15,535	0,1507407407	32,7	25,4	58,0	34,8	33,80
17,00	15,495	0,1477777778	32,6	25,3	59,0	35,0	33,81
18,00	15,455	0,1448148148	32,5	25,2	58,0	34,8	33,40
20,00	15,375	0,1388888889	32,6	24,9	59,0	34,9	33,19
22,00	15,295	0,1329629630	32,8	26,0	72,0	35,2	42,53
24,00	15,215	0,1270370370	32,7	26,9	67,0	35,3	41,51
26,00	15,140	0,1214814815	32,9	27,7	62,0	35,2	40,48
28,00	15,070	0,1162962963	32,8	27,9	61,0	35,0	40,74
30,00	15,000	0,1111111111	33,0	27,5	62,0	35,3	39,79
32,00	14,935	0,1062962963	32,9	27,0	65,0	35,0	41,18
34,00	14,870	0,1014814815	32,8	26,6	67,0	35,0	41,46

36,00	14,800	0,0962962963	32,7	26,3	70,0	34,9	42,80
38,00	14,730	0,0911111111	32,8	25,7	69,0	35,3	39,82
40,00	14,660	0,0859259259	33,0	25,3	74,0	35,1	42,17
42,00	14,590	0,0807407407	33,1	25,2	73,0	35,0	41,58
44,00	14,525	0,0759259259	32,6	24,9	66,0	35,4	36,12
46,00	14,465	0,0714814815	32,7	26,2	68,0	34,9	41,33
48,00	14,405	0,0670370370	32,8	27,2	63,0	35,0	40,39
50,00	14,340	0,0622222222	33,0	27,4	61,0	35,1	39,35
52,00	14,280	0,0577777778	32,9	27,2	64,0	35,0	41,03
54,00	14,220	0,0533333333	32,8	26,8	62,0	34,7	39,47
56,00	14,155	0,0485185185	32,7	26,4	60,0	35,3	36,09
58,00	14,090	0,0437037037	32,9	25,5	65,0	34,9	37,90
60,00	14,030	0,0392592593	33,1	25,2	73,0	35,3	40,90
62,00	13,975	0,0351851852	32,9	24,9	76,0	35,0	42,52
64,00	13,925	0,0314814815	32,7	24,6	75,0	34,7	41,91
66,00	13,880	0,0281481481	32,8	24,6	79,0	35,0	43,41
68,00	13,835	0,0248148148	33,0	25,3	75,0	35,3	42,27
70,00	13,795	0,0218518519	33,0	26,0	69,0	35,0	41,21
72,00	13,755	0,0188888889	33,1	26,7	62,0	35,3	37,96
74,00	13,715	0,0159259259	33,0	27,3	60,0	35,3	38,05
76,00	13,685	0,0137037037	33,4	27,0	58,0	35,0	36,75
78,00	13,665	0,0122222222	33,5	26,8	59,0	35,1	36,74
80,00	13,645	0,0107407407	33,8	26,4	62,0	35,3	37,30
82,00	13,630	0,0096296296	34,3	26,0	66,0	35,2	38,99
84,00	13,620	0,0088888889	34,5	25,4	58,0	35,1	33,25
86,00	13,615	0,0085185185	34,7	25,4	66,0	35,3	37,42
88,00	13,610	0,0081481481	34,8	25,2	65,0	35,3	36,41
90,00	13,605	0,0077777778	34,7	25,1	64,0	34,9	36,44
92,00	13,600	0,0074074074	34,7	25,8	66,0	34,8	39,39
94,00	13,600	0,0074074074	34,8	26,0	67,0	35,2	39,58
96,00	13,595	0,0070370370	34,8	25,9	66,0	35,3	38,54
98,00	13,590	0,0066666667	34,8	25,8	65,0	34,8	38,79
100,00	13,590	0,0066666667	34,9	25,6	66,0	35,3	37,86
102,00	13,585	0,0062962963	34,9	25,7	65,0	35,0	38,14
104,00	13,585	0,0062962963	34,9	25,4	66,0	35,0	38,04
106,00	13,585	0,0062962963	34,8	25,0	65,0	34,9	36,79
108,00	13,585	0,0062962963	35,0	24,9	67,0	35,2	37,07
132,00	13,580	0,0059259259	35,0	25,2	70,0	35,1	39,65

Tabela A.6 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$).

Tempo (h)	m (kg)	M (kg/kg) (b.s)	T_{amostra} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{ar_ext}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{UR}_{\text{ar_ext}}$ (%)	$T_{\text{ar_estufa}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{UR}_{\text{ar_estufa}}$ (%)
0,00	15,980	0,2193819153	25,1	24,9	70,0	40,2	29,53
0,17	15,970	0,2186188478	27,8	25,1	69,0	39,9	29,93
0,33	15,960	0,2178557802	29,1	25,6	67,0	40,0	29,78
0,50	15,950	0,2170927127	29,9	25,5	70,0	39,9	31,09
0,67	15,940	0,2163296452	30,8	26,0	73,0	39,6	33,94
0,83	15,930	0,2155665776	31,6	26,2	74,0	40,0	34,08
1,00	15,920	0,2148035101	32,5	26,2	73,0	39,8	33,98
1,33	15,900	0,2132773750	33,6	26,2	73,0	39,7	34,16
1,67	15,880	0,2117512400	34,5	26,0	73,0	40,1	33,05
2,00	15,860	0,2102251049	34,7	26,5	72,0	40,3	33,22
2,33	15,840	0,2086989699	34,8	26,0	74,0	39,9	33,86
2,67	15,820	0,2071728348	35,2	26,4	75,0	39,8	35,33
3,00	15,800	0,2056466997	35,5	26,5	75,0	40,2	34,79
3,50	15,770	0,2033574971	35,4	26,3	74,0	40,0	34,28
4,00	15,740	0,2010682945	35,8	26,2	73,0	39,8	33,98
4,50	15,705	0,1983975582	35,9	26,2	72,0	39,7	33,70
5,00	15,675	0,1961083556	35,8	26,1	72,0	39,6	33,68
5,50	15,645	0,1938191530	35,7	26,5	73,0	39,7	34,77
6,00	15,615	0,1915299504	35,7	25,9	72,0	39,6	33,28
7,00	15,560	0,1873330790	36,0	25,7	72,0	39,9	32,36
8,00	15,505	0,1831362076	36,1	25,7	72,0	39,9	32,36
9,00	15,450	0,1789393361	36,2	25,6	73,0	39,7	32,97
10,00	15,395	0,1747424647	36,3	25,7	77,0	40,0	34,43
11,00	15,335	0,1701640595	36,5	25,5	78,0	39,8	34,83
12,00	15,275	0,1655856543	36,4	25,3	78,0	39,9	34,24
13,00	15,220	0,1613887829	36,2	25,2	77,0	39,7	33,96
14,00	15,165	0,1571919115	36,0	25,2	76,0	39,9	33,16
15,00	15,110	0,1529950401	36,1	25,1	77,0	39,8	33,58
16,00	15,050	0,1484166349	35,9	24,9	77,0	40,1	32,65
17,00	14,995	0,1442197634	36,0	24,8	77,0	39,9	32,81
18,00	14,940	0,1400228920	35,7	24,7	77,0	39,7	32,96
20,00	14,830	0,1316291492	35,9	24,4	78,0	39,9	32,45
22,00	14,725	0,1236169401	35,8	25,3	78,0	39,8	34,42
24,00	14,620	0,1156047310	35,7	25,9	75,0	39,7	34,48
26,00	14,520	0,1079740557	36,1	26,7	69,0	40,2	32,38
28,00	14,420	0,1003433804	36,2	26,5	68,0	40,1	31,71
30,00	14,320	0,0927127051	36,1	26,1	69,0	39,8	31,93
32,00	14,220	0,0850820298	36,2	25,8	74,0	40,0	33,28
34,00	14,125	0,0778328882	36,4	25,6	76,0	39,9	33,96

36,00	14,035	0,0709652804	36,5	25,5	77,0	40,0	34,02
38,00	13,945	0,0640976726	36,5	25,3	76,0	39,9	33,36
40,00	13,860	0,0576115986	36,3	25,1	80,0	40,1	34,33
42,00	13,775	0,0511255246	36,4	24,9	83,0	40,2	35,01
44,00	13,690	0,0446394506	36,3	24,8	83,0	40,2	34,80
46,00	13,610	0,0385349103	36,6	25,2	83,0	40,1	35,83
48,00	13,540	0,0331934376	37,0	26,2	77,0	39,9	35,65
50,00	13,480	0,0286150324	37,3	26,9	78,0	40,3	36,84
52,00	13,420	0,0240366272	37,5	27,0	77,0	40,0	37,17
54,00	13,370	0,0202212896	37,9	26,9	79,0	40,0	37,92
56,00	13,325	0,0167874857	38,1	26,6	81,0	39,9	38,40
58,00	13,280	0,0133536818	38,6	26,3	84,0	39,9	39,12
60,00	13,245	0,0106829454	39,0	26,3	83,0	40,2	38,04
62,00	13,220	0,0087752766	39,3	26,2	82,0	40,2	37,36
64,00	13,200	0,0072491415	39,4	26,1	84,0	39,8	38,87
66,00	13,190	0,0064860740	39,6	25,8	85,0	40,3	37,62
68,00	13,185	0,0061045403	39,6	25,7	85,0	40,3	37,40
70,00	13,180	0,0057230065	39,5	25,8	84,0	39,9	37,98
72,00	13,175	0,0053414727	39,7	26,2	77,0	40,2	35,09
74,00	13,175	0,0053414727	39,7	26,8	81,0	40,2	38,24
76,00	13,170	0,0049599390	39,6	26,9	81,0	39,9	39,08
78,00	13,170	0,0049599390	39,5	26,1	80,0	39,9	36,82
80,00	13,170	0,0049599390	39,7	25,7	79,0	40,1	35,13
82,00	13,170	0,0049599390	39,7	25,5	82,0	40,0	36,23
106,00	13,165	0,0045784052	39,8	25,6	81,0	39,9	36,19

Tabela A.7 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem da bacia sanitária para o Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 63\%$).

Tempo (h)	m (kg)	M (kg/kg) (b.s)	T_{amostra} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{ar_ext}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{UR}_{\text{ar_ext}}$ (%)	$T_{\text{ar_estufa}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{UR}_{\text{ar_estufa}}$ (%)
0,00	16,515	0,2206208426	24,0	25,6	67,0	35,2	65,00
0,17	16,510	0,2202512934	24,3	25,7	66,0	34,8	68,00
0,33	16,510	0,2202512934	24,6	25,8	66,0	36,3	70,00
0,50	16,505	0,2198817443	26,1	25,9	65,0	34,2	68,00
0,67	16,500	0,2195121951	26,5	25,9	66,0	35,1	67,00
0,83	16,500	0,2195121951	26,9	26,1	65,0	35,5	69,00
1,00	16,495	0,2191426460	27,4	26,1	64,0	34,2	68,00
1,33	16,490	0,2187730968	28,0	26,1	62,0	35,5	70,00
1,67	16,480	0,2180339985	28,4	26,1	65,0	35,9	68,00
2,00	16,475	0,2176644494	28,8	26,2	65,0	34,0	69,00
2,33	16,470	0,2172949002	29,2	26,4	64,0	35,5	70,00
2,67	16,460	0,2165558019	29,5	26,1	64,0	35,9	67,00
3,00	16,455	0,2161862528	29,6	26,3	64,0	34,0	70,00
3,50	16,450	0,2158167036	29,9	26,3	64,0	34,1	67,00
4,00	16,445	0,2154471545	30,2	26,3	64,0	34,2	68,00
4,50	16,435	0,2147080562	30,3	26,2	63,0	34,1	70,00
5,00	16,425	0,2139689579	30,5	26,2	59,0	34,5	67,00
5,50	16,415	0,2132298596	30,8	26,0	58,0	34,4	68,00
6,00	16,410	0,2128603104	30,7	25,9	57,0	34,7	68,00
7,00	16,400	0,2121212121	30,7	25,7	55,0	34,4	67,00
8,00	16,380	0,2106430155	30,9	25,6	57,0	34,5	68,00
9,00	16,365	0,2095343681	31,0	25,4	58,0	35,0	68,00
10,00	16,355	0,2087952698	31,2	25,2	56,0	34,6	64,00
11,00	16,335	0,2073170732	31,2	25,1	58,0	34,5	68,00
12,00	16,330	0,2069475240	31,3	25,0	58,0	34,9	70,00
13,00	16,310	0,2054693274	31,4	24,9	57,0	34,5	64,00
14,00	16,295	0,2043606800	31,2	24,7	54,0	34,7	68,00
15,00	16,280	0,2032520325	31,4	24,5	56,0	35,7	68,00
16,00	16,275	0,2028824834	31,5	24,3	59,0	35,3	67,00
17,00	16,260	0,2017738359	31,6	24,1	60,0	35,0	65,00
18,00	16,250	0,2010347376	31,5	24,0	58,0	34,7	68,00
20,00	16,220	0,1988174427	31,7	24,0	58,0	35,8	68,00
22,00	16,200	0,1973392461	31,8	24,3	62,0	36,0	68,00
24,00	16,160	0,1943828529	31,7	24,7	64,0	36,3	66,00
26,00	16,140	0,1929046563	31,5	24,9	65,0	36,1	67,00
28,00	16,100	0,1899482631	31,6	24,9	65,0	35,8	67,00
30,00	16,075	0,1881005174	31,5	24,8	62,0	35,5	66,00
32,00	16,040	0,1855136733	31,4	24,5	60,0	34,5	66,00
34,00	16,015	0,1836659276	31,6	24,3	64,0	34,6	65,00

36,00	15,980	0,1810790835	31,5	24,0	62,0	34,5	66,00
38,00	15,955	0,1792313378	31,8	23,8	64,0	34,5	66,00
40,00	15,920	0,1766444937	31,4	23,6	67,0	35,8	67,00
42,00	15,895	0,1747967480	31,7	23,4	68,0	34,5	68,00
44,00	15,855	0,1718403548	31,5	23,7	69,0	34,9	69,00
46,00	15,830	0,1699926090	31,7	24,7	70,0	35,9	70,00
48,00	15,805	0,1681448633	31,9	25,9	72,0	35,8	70,00
50,00	15,770	0,1655580192	32,0	26,2	70,0	35,1	70,00
52,00	15,740	0,1633407243	31,8	26,7	65,0	34,7	68,00
54,00	15,710	0,1611234294	31,9	26,2	62,0	36,0	67,00
56,00	15,685	0,1592756837	32,0	25,6	60,0	36,2	65,00
58,00	15,650	0,1566888396	32,0	25,3	60,0	35,9	66,00
60,00	15,620	0,1544715447	31,9	25,1	61,0	35,8	66,00
62,00	15,590	0,1522542498	32,0	24,9	62,0	34,0	67,00
64,00	15,555	0,1496674058	31,9	24,4	59,0	35,5	64,00
66,00	15,525	0,1474501109	31,8	24,2	56,0	34,1	68,00
68,00	15,500	0,1456023651	31,5	24,4	64,0	34,8	67,00
70,00	15,470	0,1433850702	31,8	24,7	62,0	35,9	65,00
72,00	15,445	0,1415373245	31,8	25,3	58,0	34,2	64,00
74,00	15,410	0,1389504804	31,9	25,7	61,0	35,1	68,00
76,00	15,380	0,1367331855	31,7	26,0	60,0	35,0	68,00
78,00	15,355	0,1348854398	31,9	25,9	64,0	34,9	69,00
80,00	15,320	0,1322985957	32,0	25,6	61,0	35,1	68,00
82,00	15,285	0,1297117517	31,8	25,4	62,0	34,5	67,00
84,00	15,260	0,1278640059	31,7	25,1	70,0	35,0	70,00
86,00	15,235	0,1260162602	31,8	24,5	78,0	34,8	70,00
88,00	15,215	0,1245380636	31,7	24,2	77,0	35,5	70,00
90,00	15,185	0,1223207687	32,0	24,0	78,0	34,8	70,00
92,00	15,160	0,1204730229	31,8	24,1	74,0	34,9	68,00
94,00	15,140	0,1189948263	31,7	25,2	70,0	35,9	68,00
96,00	15,110	0,1167775314	32,0	26,2	65,0	35,6	69,00
98,00	15,085	0,1149297857	32,1	27,1	60,0	35,2	70,00
100,00	15,060	0,1130820399	31,9	26,7	60,0	34,6	69,00
102,00	15,035	0,1112342942	32,0	26,3	61,0	35,9	68,00
104,00	15,015	0,1097560976	32,0	25,9	63,0	34,0	69,00
106,00	14,985	0,1075388027	31,9	25,6	60,0	36,1	70,00
108,00	14,960	0,1056910569	31,8	25,1	68,0	36,3	69,00
110,00	14,935	0,1038433112	31,7	24,4	64,0	36,0	70,00
112,00	14,910	0,1019955654	31,7	23,9	65,0	34,2	68,00
114,00	14,895	0,1008869180	31,6	23,6	67,0	34,2	67,00
116,00	14,865	0,0986696231	31,5	23,9	70,0	36,1	68,00
118,00	14,835	0,0964523282	31,6	24,7	63,0	34,4	70,00
120,00	14,810	0,0946045824	31,7	25,1	65,0	34,4	70,00
122,00	14,780	0,0923872875	32,1	27,3	64,0	36,0	68,00

124,00	14,760	0,0909090909	32,0	26,9	63,0	34,1	69,00
126,00	14,735	0,0890613452	32,1	26,5	65,0	34,8	68,00
128,00	14,710	0,0872135994	32,1	25,6	62,0	36,2	70,00
130,00	14,680	0,0849963045	32,0	25,3	65,0	35,9	66,00
132,00	14,660	0,0835181079	32,1	25,1	63,0	35,8	70,00
134,00	14,635	0,0816703622	32,0	24,9	62,0	34,0	70,00
136,00	14,610	0,0798226164	32,0	24,4	60,0	35,5	66,00
138,00	14,585	0,0779748707	31,8	24,2	58,0	35,1	70,00
140,00	14,560	0,0761271249	32,0	24,4	66,0	34,8	67,00
142,00	14,530	0,0739098300	31,7	24,7	62,0	35,9	65,00
144,00	14,510	0,0724316334	31,9	25,3	59,0	35,2	69,00
146,00	14,485	0,0705838877	32,0	25,7	63,0	35,1	68,00
148,00	14,465	0,0691056911	31,8	26,0	65,0	35,0	66,00
150,00	14,450	0,0679970436	32,0	25,9	68,0	34,9	64,00
152,00	14,430	0,0665188470	32,0	25,6	64,0	35,1	67,00
154,00	14,415	0,0654101996	31,7	25,4	66,0	34,5	68,00
156,00	14,395	0,0639320030	32,0	25,1	70,0	35,0	67,00
158,00	14,370	0,0620842572	31,9	24,5	75,0	35,1	68,00
160,00	14,350	0,0606060606	32,0	24,2	76,0	35,5	66,00
162,00	14,330	0,0591278640	32,0	24,0	76,0	34,7	70,00
164,00	14,315	0,0580192166	31,8	24,1	73,0	34,9	70,00
166,00	14,290	0,0561714708	31,7	25,2	70,0	35,9	70,00
168,00	14,270	0,0546932742	32,1	25,7	71,0	35,4	69,00
170,00	14,250	0,0532150776	31,7	26,2	62,0	36,1	68,00
172,00	14,235	0,0521064302	31,9	25,9	65,0	35,2	68,00
174,00	14,210	0,0502586844	31,7	25,7	67,0	34,9	68,00
176,00	14,190	0,0487804878	32,0	25,5	63,0	34,8	69,00
178,00	14,175	0,0476718404	32,1	25,3	70,0	35,4	69,00
180,00	14,165	0,0469327421	31,9	25,0	74,0	35,5	70,00
182,00	14,145	0,0454545455	31,8	24,9	73,0	35,6	70,00
184,00	14,130	0,0443458980	31,6	24,6	74,0	34,0	69,00
186,00	14,115	0,0432372506	31,7	24,3	73,0	34,2	70,00
188,00	14,105	0,0424981523	31,7	24,6	75,0	35,9	70,00
190,00	14,090	0,0413895048	31,8	25,3	72,0	36,1	69,00
192,00	14,070	0,0399113082	31,7	26,2	67,0	34,1	70,00
194,00	14,055	0,0388026608	31,8	26,8	65,0	34,4	69,00
196,00	14,045	0,0380635625	31,7	27,1	66,0	34,9	70,00
198,00	14,025	0,0365853659	31,9	26,5	65,0	36,0	70,00
200,00	14,010	0,0354767184	31,8	25,9	63,0	34,4	69,00
202,00	14,000	0,0347376201	31,7	25,8	64,0	34,2	68,00
204,00	13,995	0,0343680710	32,0	25,7	66,0	35,4	69,00
206,00	13,980	0,0332594235	32,1	25,5	69,0	34,2	70,00
208,00	13,970	0,0325203252	31,9	25,3	72,0	36,1	69,00
210,00	13,960	0,0317812269	32,0	25,0	70,0	34,1	70,00

212,00	13,950	0,0310421286	31,8	24,9	73,0	35,1	68,00
214,00	13,935	0,0299334812	31,7	25,3	70,0	35,7	69,00
216,00	13,925	0,0291943829	31,6	25,7	70,0	35,9	68,00
218,00	13,920	0,0288248337	32,0	26,2	72,0	35,1	69,00
220,00	13,910	0,0280857354	31,9	26,1	74,0	34,7	68,00
222,00	13,900	0,0273466371	32,2	25,8	73,0	35,8	69,00
224,00	13,890	0,0266075388	32,1	25,3	76,0	36,0	69,00
226,00	13,875	0,0254988914	32,0	24,9	78,0	35,9	68,00
228,00	13,870	0,0251293422	32,3	24,7	81,0	34,4	69,00
230,00	13,860	0,0243902439	32,4	24,4	80,0	34,0	68,00
232,00	13,850	0,0236511456	32,5	24,0	82,0	35,8	66,00
234,00	13,840	0,0229120473	32,4	24,4	81,0	36,0	67,00
236,00	13,835	0,0225424982	32,6	24,9	82,0	35,3	65,00
238,00	13,825	0,0218033999	32,9	25,1	80,0	36,0	67,00
240,00	13,810	0,0206947524	33,1	25,7	72,0	35,8	66,00
242,00	13,805	0,0203252033	33,4	26,0	70,0	34,1	64,00
244,00	13,790	0,0192165558	33,7	25,5	65,0	34,7	65,00
246,00	13,780	0,0184774575	33,9	26,0	62,0	36,0	64,00
248,00	13,770	0,0177383592	34,1	25,5	60,0	36,2	62,00
250,00	13,765	0,0173688101	34,3	25,3	60,0	35,9	60,00
252,00	13,760	0,0169992609	34,5	25,2	61,0	35,8	61,00
254,00	13,755	0,0166297118	34,6	24,9	62,0	34,0	58,00
256,00	13,750	0,0162601626	34,4	24,6	65,0	35,5	56,00
258,00	13,745	0,0158906135	34,6	24,3	66,0	35,1	53,00
260,00	13,745	0,0158906135	34,5	24,5	64,0	34,8	52,00
262,00	13,740	0,0155210643	35,0	24,8	66,0	35,9	48,00
264,00	13,730	0,0147819660	34,8	25,3	61,0	35,2	48,00
266,00	13,725	0,0144124169	34,0	25,6	64,0	35,1	47,00
268,00	13,720	0,0140428677	34,7	26,1	60,0	35,0	46,00
270,00	13,710	0,0133037694	34,5	25,9	64,0	34,9	46,00
272,00	13,710	0,0133037694	34,8	25,7	61,0	35,1	45,00
274,00	13,705	0,0129342203	34,2	25,3	62,0	34,5	44,00
276,00	13,700	0,0125646711	34,7	24,8	70,0	35,0	45,00
278,00	13,700	0,0125646711	34,6	24,4	78,0	34,8	46,00
280,00	13,695	0,0121951220	34,9	24,1	77,0	35,5	45,00
282,00	13,695	0,0121951220	34,5	24,0	78,0	34,8	45,00
284,00	13,690	0,0118255728	34,6	24,1	75,0	34,9	46,00
286,00	13,690	0,0118255728	35,0	25,4	77,0	35,9	44,00
288,00	13,685	0,0114560237	34,9	26,0	76,0	35,6	46,00
290,00	13,685	0,0114560237	34,7	26,8	77,0	35,2	45,00
292,00	13,680	0,0110864745	34,6	26,7	75,0	34,6	47,00
294,00	13,680	0,0110864745	34,8	26,3	76,0	35,9	49,00
296,00	13,680	0,0110864745	34,8	25,9	74,0	36,0	48,00
298,00	13,675	0,0107169254	34,9	25,5	67,0	36,1	51,00

300,00	13,675	0,0107169254	35,0	25,0	72,0	36,3	50,00
302,00	13,675	0,0107169254	34,8	24,6	69,0	36,0	51,00
304,00	13,670	0,0103473762	34,7	24,0	70,0	35,0	52,00
306,00	13,670	0,0103473762	34,7	23,8	76,0	35,1	49,00
308,00	13,665	0,0099778271	35,0	24,1	70,0	36,1	48,00
310,00	13,665	0,0099778271	34,4	24,5	74,0	34,4	45,00
312,00	13,660	0,0096082779	34,5	25,0	72,0	34,4	46,00
314,00	13,660	0,0096082779	35,0	25,8	69,0	36,0	45,00
316,00	13,660	0,0096082779	34,6	26,1	70,0	34,1	45,00
318,00	13,660	0,0096082779	35,0	26,3	72,0	35,9	46,00
342,00	13,655	0,0092387288	35,0	24,2	70,0	35,1	43,00

APÊNDICE B

Nas Figuras B.1–B.7 são apresentados os termogramas obtidos em dois momentos para cada um dos casos analisados. O primeiro instante de tempo foi no patamar de temperatura intermediária ($t = 36$ h), e o segundo instante de tempo foi na condição de equilíbrio ($t = t_{eq}$). Nos termogramas é possível identificar os gradientes de temperatura nas peças e nota-se que as temperaturas obtidas estão um pouco abaixo dos valores apresentados anteriormente para temperatura superficial. Isso ocorreu porque as medições realizadas para elaboração dos gráficos de temperatura superficial versus tempo foram feitas utilizando termômetro infravermelho digital com a amostra ainda no interior da estufa, enquanto que as imagens apresentadas no Apêndice B foram obtidas usando uma câmera termográfica com a bacia sanitária na balança, para pesagem. Durante o intervalo de tempo entre retirar a bacia da estufa, colocá-la na balança, fechar a porta da estufa e anotar massa antes de finalmente tirar a foto, a amostra perde calor para o ambiente e reduz sua temperatura.

Figura B.1 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 1 ($T = 30,1^\circ\text{C}$ e $UR = 23\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36$ h (b) $t = t_{eq} = 166$ h.

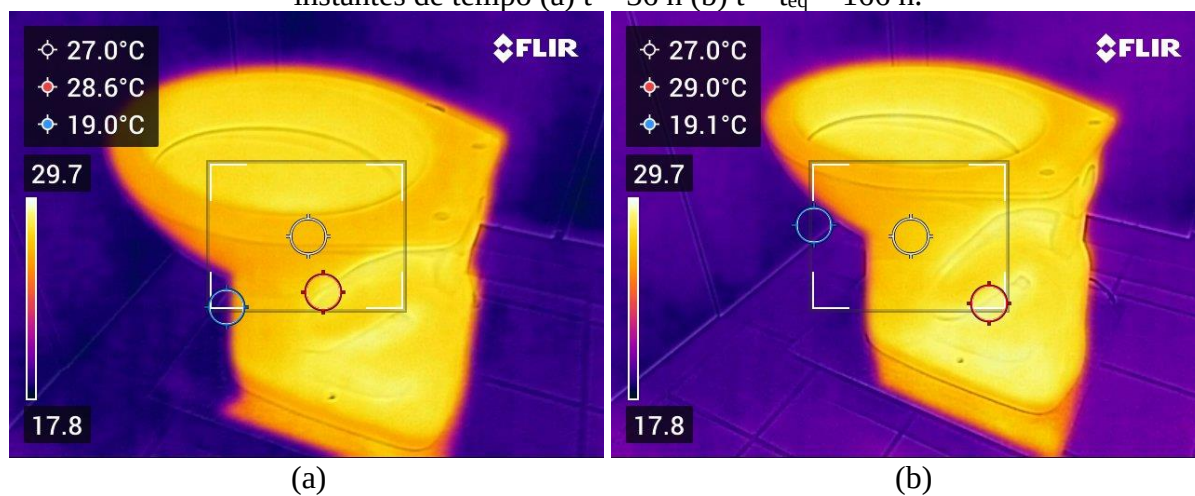


Figura B.2 - Termograma da amostra utilizada no Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 20\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{ h}$ e (b) $t = t_{eq} = 120\text{ h}$.

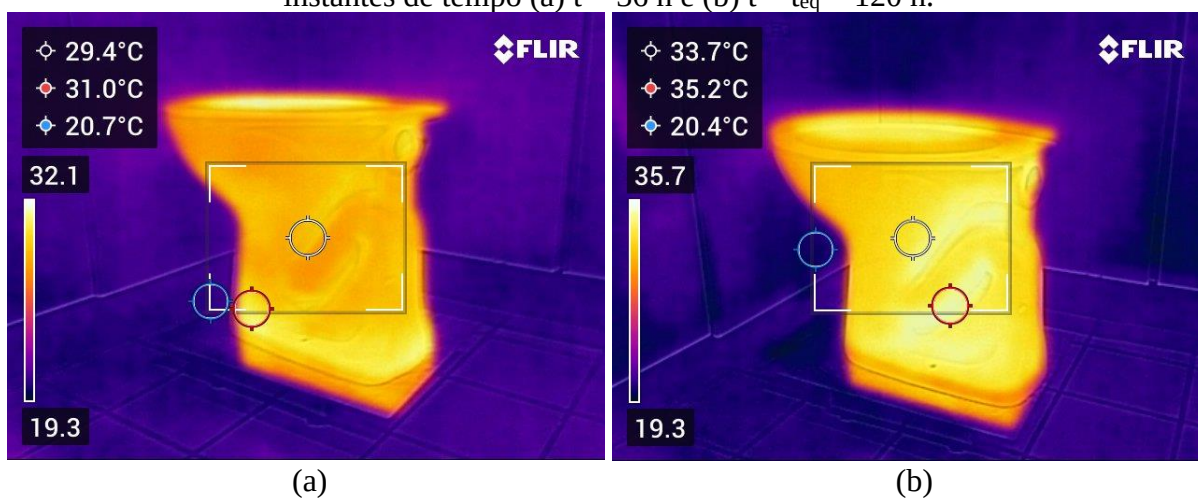


Figura B.3 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 14\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{ h}$ e (b) $t = t_{eq} = 102\text{ h}$.

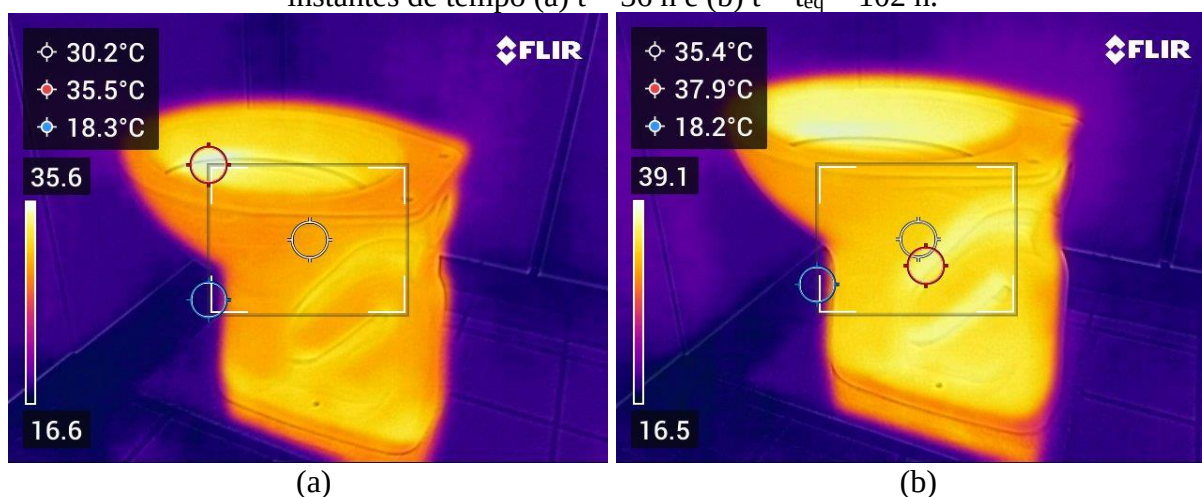


Figura B.4 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 51\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{ h}$ e (b) $t = t_{eq} = 178\text{ h}$.

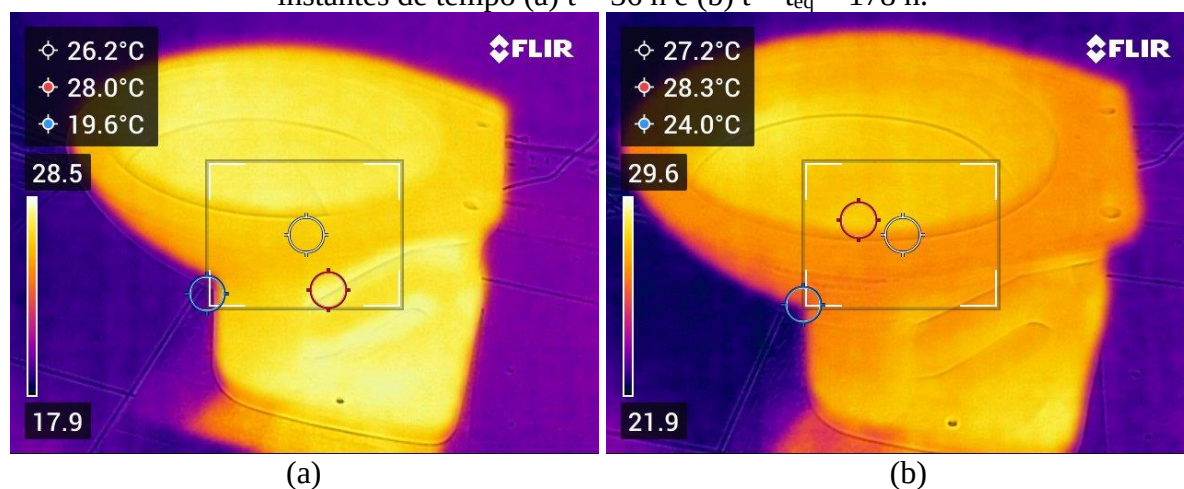


Figura B.5 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 41\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{ h}$ e (b) $t = t_{\text{eq}} = 132\text{ h}$.

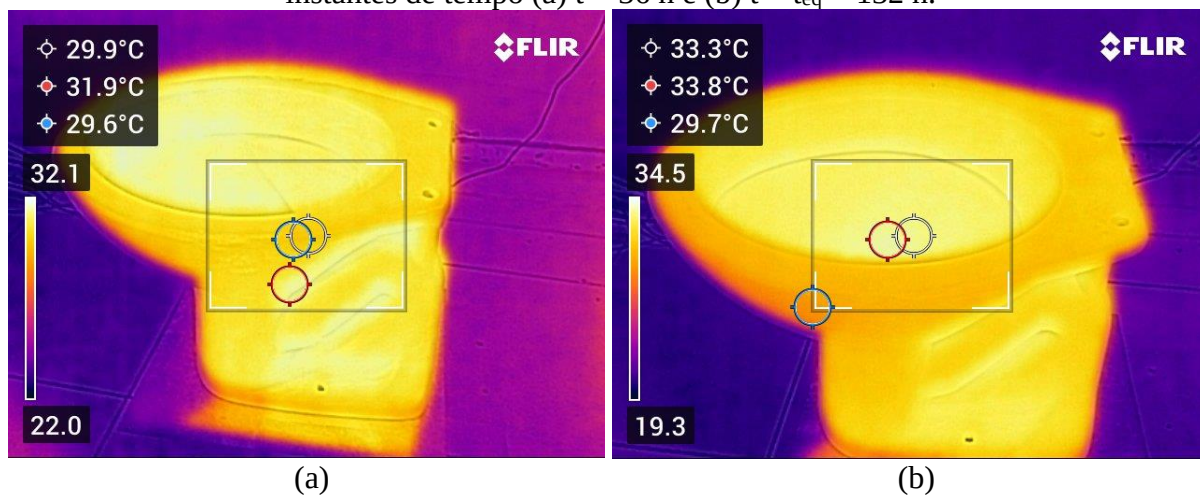


Figura B.6 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 35\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{ h}$ e (b) $t = t_{\text{eq}} = 106\text{ h}$.

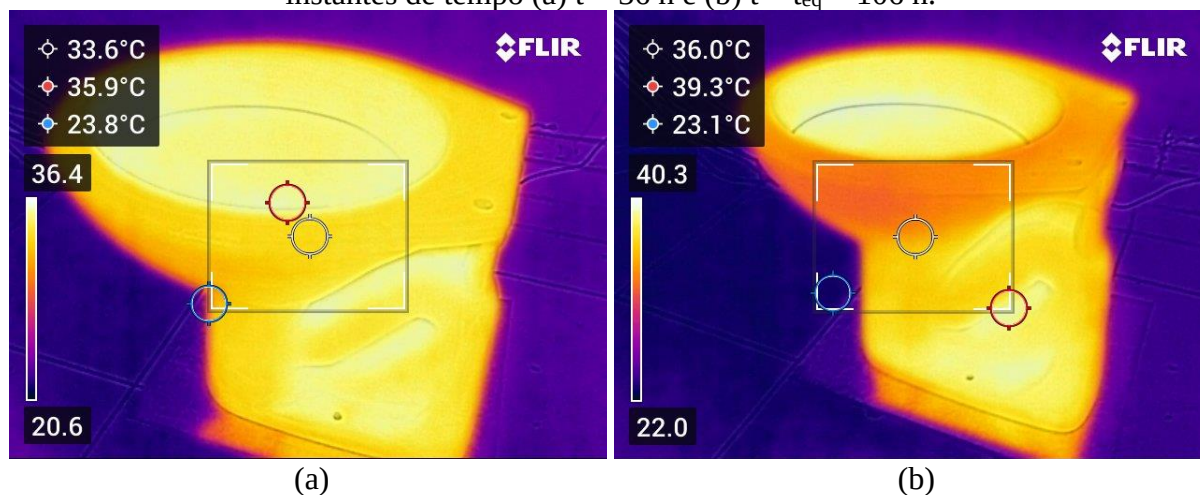
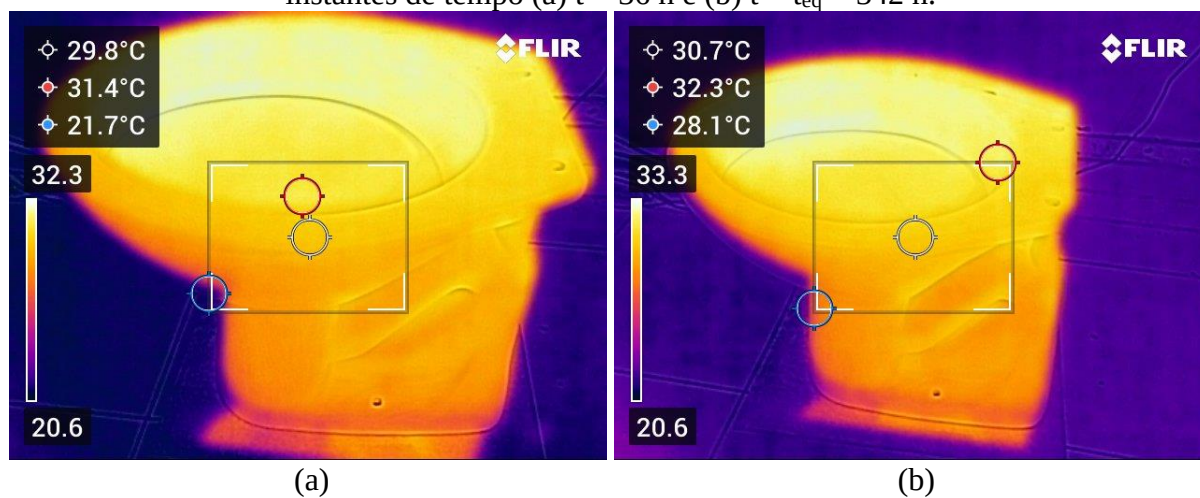


Figura B.7 - Termogramas da amostra utilizada no Caso 7 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR} = 63\%$) para os instantes de tempo (a) $t = 36\text{ h}$ e (b) $t = t_{\text{eq}} = 342\text{ h}$.



APÊNDICE C

Figura C.1 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 1 ($T = 30,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 23\%$).

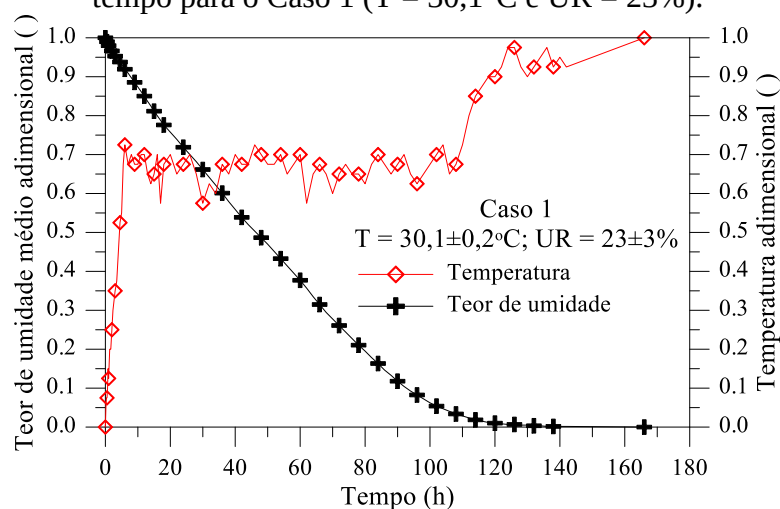


Figura C.2 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 2 ($T = 35,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 20\%$).

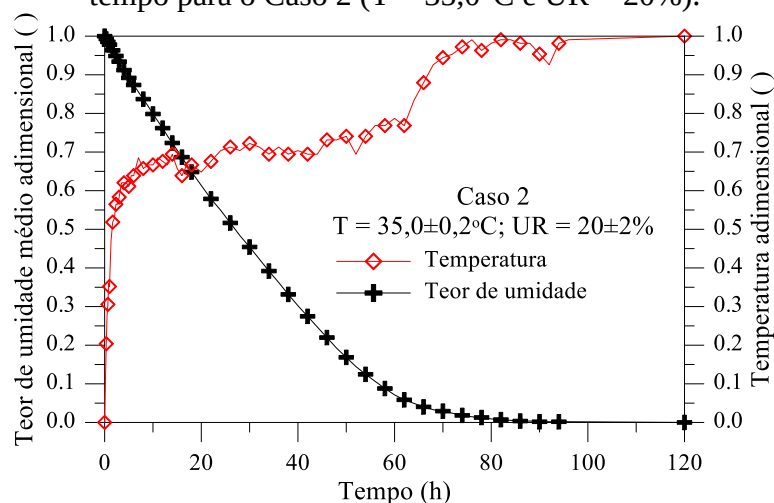


Figura C.3 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 3 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 14\%$).

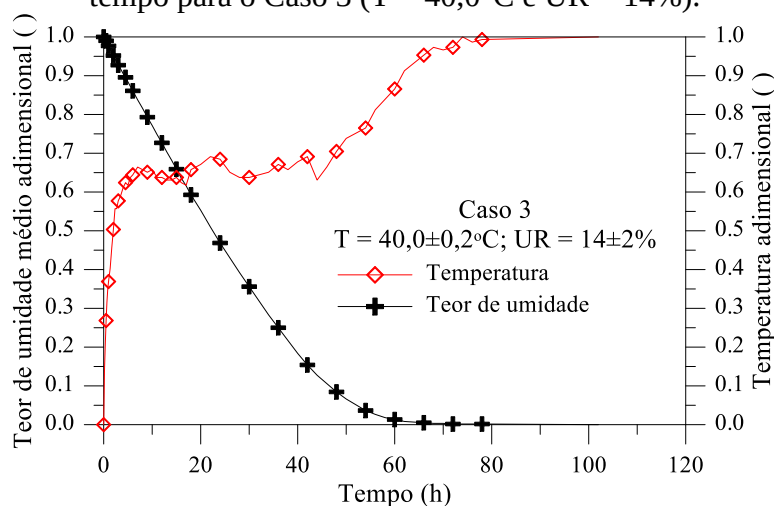


Figura C.4 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 4 ($T = 30,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 51\%$).

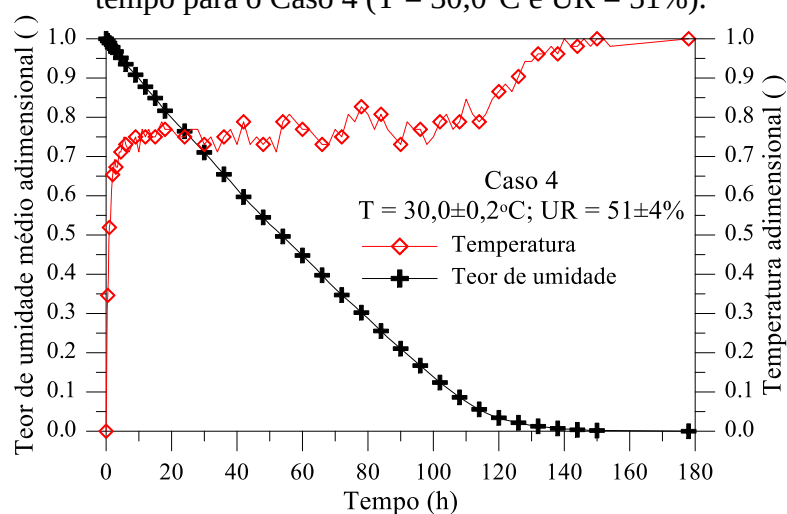


Figura C.5 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 5 ($T = 35,1^{\circ}\text{C}$ e $UR = 41\%$).

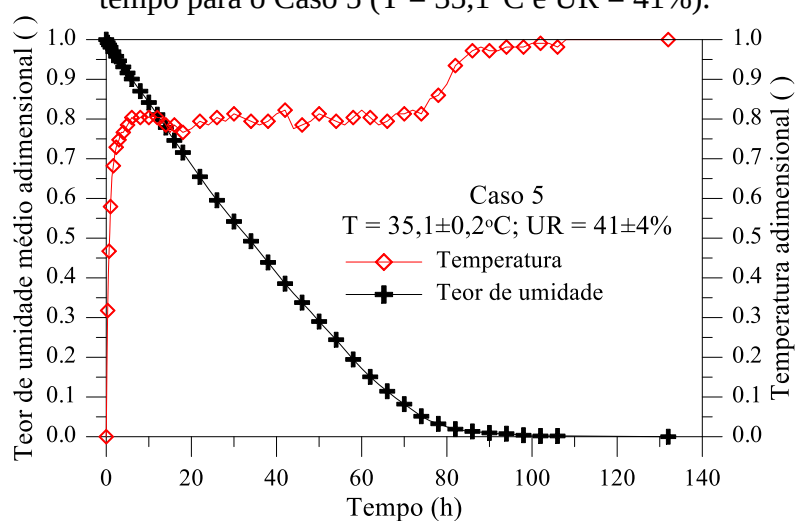


Figura C.6 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 6 ($T = 40,0^{\circ}\text{C}$ e $UR = 35\%$).

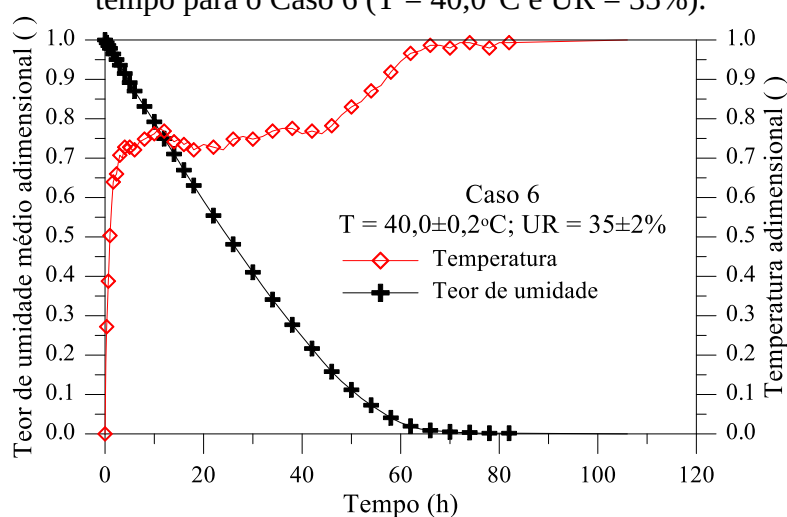
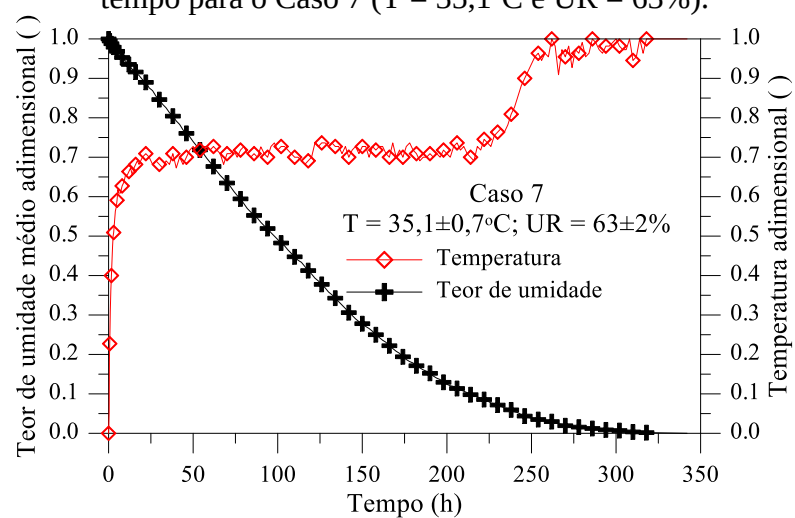


Figura C.7 - Teor de umidade médio adimensional e temperatura adimensional em função do tempo para o Caso 7 ($T = 35,1^\circ\text{C}$ e $UR = 63\%$).



APÊNDICE D

Tabela D.1 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 1 (T = 30,1°C e UR = 23%).

Tempo (h)	Altura (mm)	Parte Sup. Comprimento (mm)	Parte Sup. Largura (mm)	Parte Inf. Comprimento (mm)	Parte Inf. Largura (mm)	Retração linear (%)
0	430	513	412	426	221	0,000000
1	430	513	412	426	221	0,000000
3	430	512	411	425	220	0,224976
6	429	512	410	425	219	0,410529
12	428	511	408	424	220	0,549565
24	427	510	406	422	219	0,916545
36	426	508	405	421	219	1,136521
48	424	506	403	420	218	1,542051
60	423	504	401	419	218	1,810571
72	421	502	400	418	217	2,167557
84	419	501	400	417	216	2,437012
96	418	499	399	416	215	2,747486
108	417	498	399	415	215	2,879933
120	416	498	399	415	215	2,926444
132	417	498	399	416	215	2,832984
142	417	498	399	415	215	2,879933
166	417	498	399	415	215	2,879933

Tabela D.2 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 2 (T = 35,0°C e UR = 20%).

Tempo (h)	Altura (mm)	Parte Sup. Comprimento (mm)	Parte Sup. Largura (mm)	Parte Inf. Comprimento (mm)	Parte Inf. Largura (mm)	Retração linear (%)
0	420	510	415	423	218	0,000000
1	420	510	415	423	218	0,000000
3	419	509	414	423	218	0,135028
6	418	508	413	422	217	0,409079
12	416	506	410	421	216	0,866352
24	413	504	407	419	215	1,418524
36	410	502	405	417	215	1,830761
48	408	500	404	416	214	2,191648
60	408	498	403	415	214	2,365553
72	409	496	403	414	213	2,535390
84	408	497	403	415	213	2,496512
96	408	496	403	414	213	2,583009
120	408	496	403	414	213	2,583009

Tabela D.3 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 3 (T = 40,0°C e UR = 14%).

Tempo (h)	Altura (mm)	Parte Sup. Comprimento (mm)	Parte Sup. Largura (mm)	Parte Inf. Comprimento (mm)	Parte Inf. Largura (mm)	Retração linear (%)
0	438	515	418	429	222	0,000000
1	438	515	418	429	222	0,000000
3	437	514	417	428	222	0,178964
6	436	512	415	428	221	0,488080
12	434	510	413	426	220	0,936098
24	431	507	411	424	219	1,468613
36	428	504	408	422	218	2,048975
48	426	501	406	420	217	2,535828
60	425	499	405	419	217	2,753627
72	424	500	405	419	218	2,670364
78	424	499	405	420	217	2,752669
102	424	499	405	419	217	2,799289

Tabela D.4 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 4 (T = 30,0°C e UR = 51%).

Tempo (h)	Altura (mm)	Parte Sup. Comprim. (mm)	Parte Sup. Largura (mm)	Parte Inf. Comprimento (mm)	Parte Inf. Largura (mm)	Retração linear (%)
0	428	508	413	423	219	0,000000
1	428	508	413	423	219	0,000000
3	427	507	413	423	219	0,086099
6	427	506	412	422	219	0,221177
12	426	505	412	422	218	0,398600
24	425	503	411	421	218	0,619776
36	423	502	410	420	218	0,848312
48	421	500	409	418	217	1,254823
60	421	498	407	417	217	1,477697
72	420	498	406	416	216	1,711457
84	419	496	405	415	216	1,932634
96	418	495	404	415	215	2,158483
108	417	494	403	414	214	2,431614
120	416	493	402	413	214	2,613421
132	416	494	402	413	215	2,482726
144	416	493	402	414	215	2,474815
154	416	493	402	413	214	2,613421
178	416	493	402	413	214	2,613421

Tabela D.5 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 5 (T = 35,1°C e UR = 41%).

Tempo (h)	Altura (mm)	Parte Sup. Comprimento (mm)	Parte Sup. Largura (mm)	Parte Inf. Comprimento (mm)	Parte Inf. Largura (mm)	Retração linear (%)
0	432	510	410	426	220	0,000000
1	432	510	410	426	220	0,000000
3	431	508	410	426	220	0,124728
6	431	507	409	425	220	0,259672
12	429	505	407	424	219	0,666115
24	427	502	406	423	218	1,062992
36	425	500	404	421	217	1,516383
48	423	498	402	420	217	1,831916
60	421	497	400	419	216	2,199143
72	420	496	399	417	215	2,518241
84	420	495	399	418	215	2,510509
96	419	496	399	417	214	2,655447
108	420	496	399	417	215	2,518241
132	420	496	399	417	215	2,518241

Tabela D.6 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 6 (T = 40,0°C e UR = 35%).

Tempo (h)	Altura (mm)	Parte Sup. Comprimento (mm)	Parte Sup. Largura (mm)	Parte Inf. Comprimento (mm)	Parte Inf. Largura (mm)	Retração linear (%)
0	430	510	410	426	219	0,000000
1	430	509	410	426	219	0,039216
3	429	508	409	426	219	0,173723
6	429	506	408	425	219	0,347884
12	427	504	406	424	218	0,755172
24	425	500	402	423	217	1,338452
36	422	497	401	420	217	1,785260
48	419	496	400	418	215	2,289336
60	418	495	400	416	214	2,560284
72	419	495	399	415	214	2,609501
82	418	495	399	416	214	2,609065
106	418	495	399	416	214	2,609065

Tabela D.7 - Dados das variações dimensionais da bacia sanitária durante a secagem para o Caso 7 (T = 35,1°C e UR = 63%).

Tempo (h)	Altura (mm)	Parte Sup. Comprimento (mm)	Parte Sup. Largura (mm)	Parte Inf. Comprimento (mm)	Parte Inf. Largura (mm)	Retração linear (%)
0	432	512	412	428	222	0,000000
1	432	512	412	428	222	0,000000
3	432	512	412	428	222	0,000000
6	432	511	411	428	222	0,087606
12	431	510	410	427	222	0,268238
24	430	509	409	426	221	0,538959
36	429	508	408	426	221	0,672862
48	428	508	407	425	221	0,814431
60	427	507	406	425	220	1,038423
72	426	506	405	424	220	1,219055
84	425	505	405	424	220	1,304413
96	424	504	404	423	219	1,575135
108	423	503	404	423	220	1,570404
120	423	502	403	421	219	1,841558
132	422	501	403	422	219	1,880188
144	421	500	402	421	218	2,150909
156	422	500	402	420	219	2,061252
168	421	499	402	420	218	2,236701
180	421	498	401	419	218	2,371036
192	421	498	402	419	217	2,412582
204	421	497	401	418	217	2,546918
216	420	498	401	419	218	2,417332
228	420	498	400	418	218	2,512605
240	420	498	400	418	217	2,602695
252	420	497	399	418	217	2,690301
264	420	497	399	418	217	2,690301
276	419	498	400	417	217	2,695720
288	419	497	400	417	217	2,734783
300	420	498	400	418	217	2,602695
312	420	497	400	418	217	2,641757
318	420	497	400	418	217	2,641757
342	420	497	400	418	217	2,641757