



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

**Secagem de Materiais Cerâmicos com Forma Complexa:
Um Estudo Teórico Via CFX**

AUTOR: João Paulo da Silva Santos

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande, PB, fevereiro de 2018



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

**Secagem de Materiais Cerâmicos com Forma Complexa: Um
Estudo Teórico Via CFX**

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

AUTOR: João Paulo da Silva Santos

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande – Paraíba
Fevereiro, 2018

S237s Santos, João Paulo da Silva.
Secagem de materiais cerâmicos com forma complexa : um estudo teórico via CFX / João Paulo da Silva Santos. – Campina Grande, 2018.
93 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
Referências.

1. Materiais Cerâmicos - Secagem. 2. Secagem – Metodologia Numérica. 3. Secagem – ANSYS CFX. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

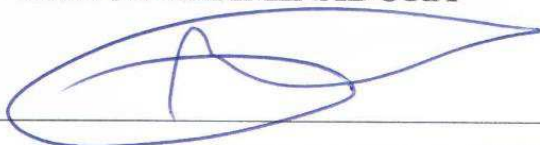
CDU 666.3.047(043)

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

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

Tese de Doutorado **aprovada** em 28 de fevereiro de 2018.

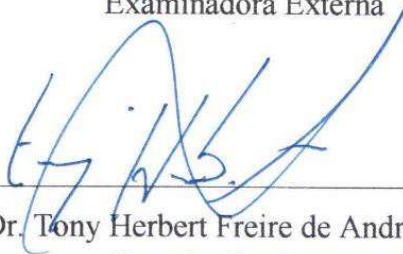
BANCA EXAMINADORA



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



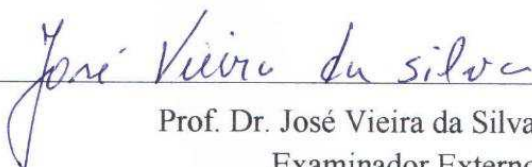
Prof.ª Dr.ª Wilma Sales Cavalcanti (UFCG)
Examinadora Externa



Prof. Dr. Tony Herbert Freire de Andrade (UFCG)
Examinador Externo



Prof.ª Dr.ª Ivonete Batista Santos (UEPB)
Examinadora Externa



Prof. Dr. José Vieira da Silva (UFCG)
Examinador Externo

Campina Grande, Fevereiro de 2018.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Djalma Teixeira dos Santos *in memoriam* pelos ensinamentos.

A minha mãe Francisca Maria pelo amor, carinho apoio e todos os ensinamentos.

A minha esposa Patrícia Carla pelo amor, compreensão, paciência, apoio e incentivo.

Ao meu irmão Cícero Manoel pelo apoio.

A toda minha família pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, a conclusão deste trabalho representa o cumprimento de mais uma etapa de vida. Não é simplesmente a realização de um trabalho acadêmico, mas todo um processo de crescimento pessoal.

Manifesto meus sinceros agradecimentos, em primeiro lugar a Deus e às seguintes pessoas e instituições:

Ao Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, meu orientador pela oportunidade, ajuda incondicional, orientação, paciência, ensinamento e amizade que possibilitaram a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Dr. Tony Hébert Freire de Andrade pela ajuda incondicional para a elaboração do trabalho, pois sem a mesma o trabalho não seria concluído.

À Universidade Federal de Campina Grande e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao CNPQ pelo apoio financeiro tornando possível minhas atividades na pós-graduação.

Aos membros da banca examinadora, os professores doutores Antônio Gilson Barbosa de Lima, Wilma Sales Cavalcanti, Tony Hébert Freire de Andrade, José Vieira da Silva e Ivonete Batista dos Santos pelos comentários e sugestões, sem os quais este trabalho não seria aperfeiçoado.

Aos colegas, Iran, José Vieira, Evaldo, Tony Hébert, Wanessa, Célia, Edna, Brasileiro, Valdeiza, Enivaldo, Rodrigo, Anderson, Aguinaldo Araújo, e Elder (Mano) pela amizade e colaboração para elaboração deste trabalho.

A todos os colegas de curso, pela amizade e convivência agradável.

A todos do PPGEP/CCT/UFCG, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

“Existe um tempo próprio para tudo, e há uma época para cada coisa debaixo do céu: um tempo para nascer e um tempo para morrer; um tempo para plantar e um tempo para colher o que se semeou; um tempo para matar, um tempo para curar as feridas; um tempo para destruir e outro para reconstruir; um tempo para chorar e um tempo para rir; um tempo para se lamentar e outro para dançar de alegria; um tempo para espalhar pedras, um tempo para juntá-las; um tempo para abraçar, um tempo para afastar quem se chega a nós; um tempo para andar à procura e outro para perder; um tempo para armazenar e um para distribuir; um tempo para rasgar e outro para coser; um tempo para estar calado e outro tempo para falar; um tempo para amar, um tempo para odiar; um tempo para a guerra, e um tempo para a paz”.

(Eclesiastes 3:1-8)

RESUMO

Santos, João Paulo da Silva, **Secagem de Materiais Cerâmicos com Forma Complexa: Um Estudo Teórico Via CFX**, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2017. Tese (Doutorado).

Diversos autores vêm dando ênfase ao fenômeno de transferência de calor e massa durante o processo de secagem. Numerosos modelos matemáticos têm sido propostos para descrever o aquecimento dos materiais cerâmicos e a perda de umidade durante a secagem. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo geral estudar a transferência de calor e massa em materiais cerâmicos com forma complexa, usando o CFX. Um modelo matemático tridimensional transiente foi apresentado para prever a transferência de calor e massa, simular a distribuição do teor de umidade e temperatura no interior de sólidos cerâmicos, considerando propriedades termofísicas constantes, utilizando-se o *software*, ANSYS CFX®. Para a validação da metodologia numérica foram utilizados dados experimentais da literatura da secagem de tubos cerâmicos nas temperaturas de secagem de 60, 70, 80, 90 e 100 °C. Resultados do teor de umidade e temperatura do material cerâmico durante a secagem são apresentados e comparados com os dados experimentais, e uma boa aproximação foi verificada. Desta comparação, estimou-se o coeficiente de difusão de massa para cada temperatura de secagem. Observou-se que, no processo de secagem, a perda de massa é mais lenta que o aquecimento, uma vez que a condutividade térmica do material é bem superior a difusividade de massa. Verifica-se que o coeficiente de difusão de massa tende a aumentar com a elevação da temperatura de secagem.

Palavras Chave: Secagem, numérico, simulação, materiais cerâmicos, CFX.

ABSTRACT

Santos, João Paulo da Silva, *Drying of Ceramic Materials with Complex Form: A Theoretical Study Via CFX*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2017, tese (Doutorado)

Several authors has studied the phenomenon of heat and mass transfer during the drying process. Numerous mathematical models have been proposed to describe the heating of Ceramic Materials and moisture loss during drying. In this sense, this work has as general objective to study the transfer of heat and mass in ceramic materials with complex form, using the CFX. A three-dimensional transient mathematical model is presented to predict the transfer of mass and heat and to simulate the distribution of moisture and temperature content within ceramic solids, considering constant thermophysical properties using ANSYS CFX® software. For the validation of the numerical methodology, experimental data from the literature on the drying of ceramic tubes at 60, 70, 80, 90 and 100 ° C drying temperatures were used. Results of the moisture content and temperature of the ceramic material during drying are presented and compared with the experimental data, and a good approximation was verified from this comparison, the mass diffusion coefficient was estimated for each drying temperature. It has been observed that in the drying process the mass loss is slower than heating, since the thermal conductivity of the material is much greater than mass diffusion. It is found that the coefficient of mass diffusion tends to increase with the increase of the drying temperature.

Keywords: Drying, numerical, simulation, ceramic materials, CFX.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1- Representação esquemática do processo de secagem.	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.2 - Taxa de evaporação versus tempo.	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.3 - Temperatura versus tempo.....	14
Figura 2. 4- Os principais produtores mundiais de revestimentos cerâmicos	17
Figura 3.1 - Amostra 1 cilindro vazado	31
Figura 3.2 - Cilindro vazado com barra transversal	31
Figura 3.1 - Definição de pontos e retas da malha do cilindro vazado.....	34
Figura 3.2 Blocação do vaso cilindro vazado.	35
Figura 3.3 (a) Geometria do problema físico	35
Figura 3.3 b) Malha numérica	36
Figura 3.4 - Definição de pontos e retas do cilindro com barra transversal	36
Figura 3.5 - Blocação do vaso cilindro.com barra transversal .	Erro! Indicador não definido.
Figura 3.6 (A) Geometria do problema físico	38
Figura 3.6 - (b) Malha numérica.....	38
Figura 3.6 - (C) Malha com vista superior	39
A Figura 4.1 Análise da qualidade da malha do tubo cerâmico vazado para a temperatura de ar de secagem de 60°C	41
Figura 4.2 Análise da qualidade da malha do tubo cerâmico com barra transversal para a temperatura de ar de secagem de 60°C	41
Figura 4.3 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, (T=60°C).....	42
Figura 4.4- Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo (T=70°C).....	43
Figura 4.5 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo (T=80°C).....	44
Figura 4.6 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo (T=90°C).....	44

Figura 4.7- Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo ($T=100^{\circ}\text{C}$).....	45
Figura 4.8 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cerâmico vazado durante a secagem a $T= 60^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 20\text{min}$, c) $t = 75\text{ min}$ e d) $t =150\text{min}$	46
Figura 4.9– Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cerâmico vazado durante a secagem a $T= 70^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 20\text{min}$, c) $t = 75\text{ min}$ e d) $t =150\text{min}$	47
Figura 4.10 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cerâmico vazado durante a secagem a $T= 80^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 20\text{min}$, c) $t = 75\text{ min}$ e d) $t =150\text{min}$	48
Figura 4.11 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cerâmico vazado durante a secagem a $T= 90^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 20\text{min}$, Erro! Indicador não definido.	
Figura 4.12 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cerâmico vazado durante a secagem a $T= 100^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 20\text{min}$, Erro! Indicador não definido.	
Figura 4.13 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, ($T=60^{\circ}\text{C}$).....	51
Figura 4.14 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, ($T= 70^{\circ}\text{C}$).....	52
Figura 4.15- Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, ($T= 80^{\circ}\text{C}$).....	53
Figura 4.16- Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, ($T=90^{\circ}\text{C}$).....	53
Figura4.17- Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, ($T= 100^{\circ}\text{C}$).....	54
Figura 4.18 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal durante a secagem a $T= 60^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 20\text{min}$,c) $t = 75\text{ min}$ e d) $t =150\text{min}$	56
Figura 4.19 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal durante a secagem a $T= 70^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 20\text{min}$,c) $t = 75\text{ min}$ e d) $t =150\text{min}$	57

Figura 4.20 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal durante a secagem a $T= 80^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 20\text{min}$, c) $t = 75\text{ min}$ e d) $t = 150\text{min}$	58
Figura 4.21 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal durante a secagem a $T=90^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 20\text{min}$, c) $t = 75\text{ min}$ e d) $t = 150\text{min}$	59
Figura 4.22 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal durante a secagem a $T= 100^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 20\text{min}$, c) $t = 75\text{ min}$ e d) $t = 150\text{min}$	60

NOMENCLATURA

Letras Latinas

C_p - Calor específico do produto	[J / kg / K]
D - Coeficiente de difusão	[m ² / s]
Fo - Número de Fourier	[-]
k - Condutividade térmica	[W / m /K]
M - Teor de umidade	[kg / kg]
\bar{M} - Teor de umidade médio	[kg / kg]
M* - Razão de umidade	[kg / kg]
t – Tempo	[s]
UR - Umidade relativa	[%]
Me - Teor de umidade de equilíbrio (base seca)	[kg kg ⁻¹]
M ₀ - Teor de umidade inicial (base seca)	[kg kg ⁻¹]
Ms - Massa seca	[kg]

Letras Gregas

T - Temperatura do produto	[K]
ρ - Densidade (massa específica)	[kg / m ³]
α - Difusividade térmica	[m ² / s]
∇ - Gradiente	[-]
$\nabla \cdot$ - Operador nabla	[-]
Γ^ϕ - Propriedade do material	[-]
λ - Propriedade do material	[-]

Siglas

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande.

LCTF - Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	3
1.2 Organograma do desenvolvimento da tese	6
REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1 - O Processo de secagem.....	7
2.1.1-Aspectos gerais da secagem.....	7
2.1.2 - Teores de umidade	10
2.1.3 Métodos de secagem	11
2.1.4- Curvas de secagem.....	12
2.2 Cerâmica	15
2.2.1 Fundamentos e aspectos históricos e metodológicos	15
2.2.2 Classificação geral do setor cerâmico	17
2.2.3. A Fabricação de uma peça cerâmica.....	18
2.2.4 Secagem de materiais cerâmicos	20
2.3.1 Métodos numéricos e suas principais características	24
2.3.2 Simulação.....	25
3. METODOLOGIA.....	27
3.1 Modelagem matemática e o problema físico	27
3.1.1 A equação de difusão	27
3.1.2 Modelagem de transferência de calor e massa.....	28
a) Modelagem da transferência de massa.....	29
b) Modelagem da transferência de calor	29
3.2 Aplicação a secagem de tubos cerâmicos	31
3.3. Solução Numérica.....	33
3.3.1 Geração da geometria e malha do problema	33
a) Geometria e malha do cilindro vazado.	34
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1 - Comentários iniciais	40
4.2 validação das malhas dos tubos cerâmicos	40
4.3 Aplicação à secagem de tubos cerâmicos	42
4.3.1 Tubo cilindro vazado.....	42

4.3.2 Tubo cilíndrico com barra transversal.....	51
4.3.3 Estimativa do coeficiente de difusão para os três vasos cerâmicos	62
4.3.4 Tubo cilindro vasado.....	62
4.3.5 coeficiente difusão do vaso cilíndrico com barra transversal	62
4.4 Calor	63
4.4.1 Tubo cilindro vazado	64
4.4.2 Tubo cilindro vazado com barra transversal.....	69
CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
5.1 Conclusões	77
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A secagem utiliza processos de transferência de calor condutivo e/ou convectivo para reduzir a concentração de componentes residuais voláteis, que sejam ricos em compostos não voláteis. Os princípios de secagem convectiva são semelhantes àqueles de outros processos térmicos, como evaporação. A secagem é um dos métodos mais comuns, onde o calor sensível é transferido para o material e o agente de secagem (ar pré-aquecido) passa sobre a superfície do material, evaporando a umidade e transportando-a do mesmo.

Assim a remoção da umidade se dá por dois processos fundamentais:

- a) Transferência de calor do ar para o produto devido ao efeito da diferença de temperatura;
- b) Transferência de massa para o ar decorrente de uma diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre a superfície do produto e o ar que o envolve.

Analisando de forma científica, a secagem com diferentes taxas, ou seja em vários períodos pode ser uma forma de melhorar a qualidade de produtos secos e, em alguns casos, serve também para melhorar a utilização de energia. É importante considerar que na secagem, a remoção de água do material biológico úmido seja realizada até um nível onde a deterioração provocada por micro-organismos possa ser minimizada (LIMA et al., 2004).

O processo de secagem deve acontecer de maneira controlada, para que ela possa ocorrer de maneira uniforme, evitando elevados gradientes de umidade e de temperatura no interior do material que podem provocar a perda da qualidade do produto. Sabendo-se que os efeitos da secagem alteram as propriedades físicas e químicas do produto e estas por sua vez afetam o processo de transferência de calor e massa, seja por condução, convecção ou difusão, ou seja, é fundamental conhecer os seus efeitos e o controle dos mesmos.

A difusão reflete-se em um possível fenômeno físico que pode ocorrer durante a secagem. Devido a isso várias teorias de migração de umidade em sólidos tem sido propostas entre elas, cita-se a difusão de líquido. O coeficiente de difusão é a difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos, podendo intervir sobre a migração da água e o seu valor é sempre obtido pelo ajuste a dados experimentais (MARTINAZZO et al., 2007).

Esta teoria tem sido aplicada para diversos materiais, considerando o coeficiente de difusão como sendo constante ou dependente da temperatura e/ou do teor de umidade. O modelo de difusão líquida apresenta bons resultados para a análise de secagem em grãos, frutos e cereais devido à peculiaridade destes produtos não apresentarem um período de taxa constante nas suas curvas características de secagem, permitindo que o processo seja totalmente controlado pelas condições internas do material. No entanto, a difusão líquida vista com o único mecanismo de movimento da umidade tem sido sujeito a severas críticas. As discrepâncias entre resultados experimentais e teóricos podem e devem ser sempre minimizadas. Pois, em geral, são oriundas da aplicação do modelo de difusão líquida considerando o coeficiente de difusão constante ao longo do processo de secagem, o que nem sempre é visto para alguns materiais.

O processo de secagem é bastante utilizado na indústria química e de materiais cerâmicos, onde esse processo consiste na separação parcial da parte líquida (geralmente a água) da sólida de um determinado material. Tal processo torna-se especialmente importante no caso de existirem poucas informações sobre o comportamento do material submetido às diferentes condições de secagem.

O processo de construção de uma peça cerâmica se dá com a argila ainda úmida e é preciso que a peça seque antes de ir ao forno, para evitar que a mesma estoure durante a queima

e também, para evitar danos às resistências elétricas, no caso de se usar fornos elétricos no processo de queima.

Comercialmente existem duas geometrias diferentes de tijolos: os tijolos maciços e os blocos cerâmicos ou tijolos furados. O ideal para a especificação de um tijolo é o atendimento às normas brasileiras para tijolos maciços: (NBR 6460/83, NBR 7170/83, NBR 8041/83) e blocos vazados (NBR 6461/83, NBR 8043/83, NBR 7171/92, NBR 8042/92) (Batista, 2009). Porém, em geral, não se encontram no mercado produtos de conformidade com as mesmas, pelo próprio caráter ainda artesanal do produto, o que evidencia a necessidade de estudos mais apurados nessa área. Além disso o que dizer de materiais de forma complexa, como por exemplo, jarros, panelas, entre outros.

Se por um lado existe o problema da falta de padronização dos produtos cerâmicos, por outro, na literatura, há escassez nas informações sobre as relações matemáticas entre difusividade de massa e densidade de materiais cerâmicos. Resultados de curvas de encolhimento linear “versus” teor de umidade para argila, podem ser encontradas na literatura, contudo, devido a grande variedade de peças cerâmicas, novos estudos precisam ser conduzidos para ampliar o entendimento do fenômeno e otimizar o processo de secagem de produtos cerâmicos.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar a transferência de calor e massa em materiais cerâmicos com forma complexa, usando o software CFX. De forma específica, o presente trabalho propõe atingir os seguintes objetivos:

- Modelar matematicamente e simular a secagem em materiais cerâmicos (transferência de calor e massa), usando o modelo de difusão e considerando a condição de contorno de Dirichlet na superfície do material;
- Simular as distribuições de temperatura e do teor de umidade no interior dos sólidos e suas cinéticas de secagem e aquecimento via software CFX;
- Aplicar toda a formulação a secagem de tubos cerâmicos argilosos;

- Comparar os resultados numéricos via CFX e experimentais do teor de umidade e temperatura em materiais cerâmicos, visando validar a modelagem matemática proposta;
- Estudar o efeito das considerações adotadas no modelo sobre os coeficientes difusivos;
- Estimar os coeficientes de difusão de massa em várias condições de secagem.

1.2 Organograma do desenvolvimento da tese

No Capítulo 1, inicialmente foi feita uma introdução sobre o conteúdo e a motivação desta pesquisa.

No Capítulo 2, apresentou-se a revisão bibliográfica dos temas abordados na tese, o processo e os mecanismos de secagem de vasos cerâmicos, bem como os métodos de secagem. Além de tópicos e características do *software* CFX, ferramenta indispensável nas atividades envolvidas ao longo da pesquisa.

No Capítulo 3 apresentou-se a modelagem matemática, a metodologia teórica, às considerações adotadas para o modelo matemático da transferência de calor e massa que ocorre no processo de secagem, bem como as condições iniciais e de contorno, e coeficiente de difusão mássica.

No tocante, alguns resultados obtidos foram apresentados e discutidos no Capítulo 4, tais como: a verificação das formas e dimensões geométricas do tubos cerâmicos, os ajuste de curvas entre as cinéticas de secagem preditas e experimentais, os erros mínimos quadráticos, curvas de temperaturas e os tempos encontrados para a secagem dos respectivos vasos.

Por fim no Capítulo 5 listou-se as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - O Processo de secagem

2.1.1-Aspectos gerais da secagem

A secagem é um processo essencial na preservação das culturas agrícolas e nas indústrias, como por exemplo, de produção têxtil, processamento de alimentos, farmacêuticas, químicas, produção de cimento, produção de tijolos e telhas processamento de madeira, tratamento de águas residuais e tratamento de biomassa (PIRASTEH et al., 2014; LOULOU et al., 2006).

Conforme Defraeye (2014), a secagem (ou também desidratação) implica na remoção da umidade de materiais naturais ou industriais, até um teor de umidade específico, assegurando ao mesmo, elevado tempo de rendimento e custos operacionais mínimos a qualidade do produto.

A secagem é um complicado processo que envolve fenômenos de transferências simultânea de calor, momentum e massa. É considerado um dos métodos mais antigos utilizados para preservação e armazenamento de produtos após a colheita. Contudo, dentre os

processos que se aplicam para o trato pós-colheita, conservação e armazenagem adequada de grãos, a secagem é o de maior consumo energético (SANTOS, 2013).

Do ponto de vista técnico científico, o processo de secagem envolve calor e vários mecanismos de transferência de massa. No entanto, o movimento de água no interior do produto é geralmente considerado o fator de controle, muitas vezes descrito por um mecanismo de difusão com base na segunda lei de Fick (PUYATE e LAWRENCE, 2006; ARRIECHE et al., 2009). Tal mecanismo de difusão vem ganhando a preferência de diversos pesquisadores na área de secagem (LIMA, 1999; CADÊ et al., 2005; HOLANDA, 2007; MELLADO, 2007; HACIHAFIZOĞLU et al., 2008; SILVA et al., 2008a; FARIAS et al., 2009a; FARIAS et al., 2010a)

O processo de secagem envolve vários mecanismos de controle e baseia-se na propriedade pela qual o aumento da temperatura do ar diminui a sua umidade e o torna capaz de absorver a umidade disponível em outros corpos. MISHA et al. (2012) reportam que o processo de secagem envolve, simultaneamente, a transferência de calor e de massa com o objetivo de remover grande parte da água presente no material poroso por meio de seu transporte e evaporação em um meio gasoso insaturado que envolve o material. Normalmente, numa corrente de ar quente é aplicada para secar um produto; o solvente removido quase invariavelmente é água. O processo de secagem demanda gasto de energia térmica para a evaporação da água e esta, ao evaporar, esfria o ar de secagem pela perda de calor sensível, contudo o ar recupera a energia perdida, na forma de vapor de água (calor latente). A Figura 2.1 mostra de forma simplificada o processo de secagem, na qual o ar quente com baixa umidade relativa chega até a superfície do material, e provoca a retirada de uma parcela de umidade deste produto. Este processo diminui a temperatura do ar e aumenta sua umidade relativa (MÖHLER, 2010).

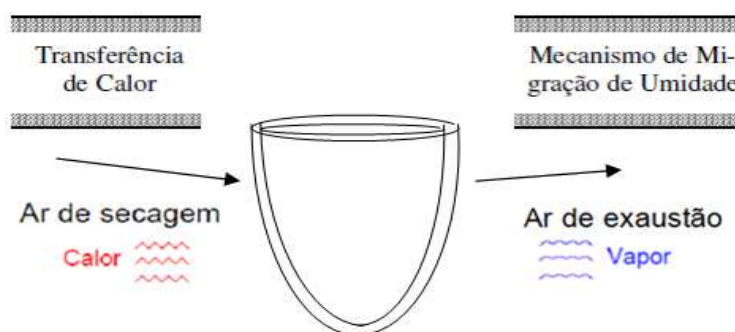


Figura 1.1- Representação esquemática do processo de secagem.

Na primeira etapa da secagem, o ar aquecido atravessa a camada do produto úmido que sofre um processo de resfriamento e de umidificação a entalpia constante. Neste processo existe transferência de calor para o produto e a transferência de massa de vapor d'água. Já a segunda fase envolve a velocidade do ar de secagem e o seu processo está relacionado com as propriedades do material a ser seco (El-SEBAII e SHALABY, 2012).

Koshimizu (2008) comenta que é fundamental o controle da velocidade ou a taxa de secagem, uma vez que diferentes características são atribuídas aos produtos em função de um processo rápido ou lento de secagem. Um dos fatores que constitui um problema nos processos de secagem é a uniformidade do material resultante. Portanto, no caso de materiais cerâmicos, a secagem não uniforme de uma peça pode ocasionar a retração linear, além de diferentes tensões no seu interior, que poderão ser as causas de bolhas, trincas e rachaduras no produto, defeitos que depreciam a qualidade do produto.

Entretanto, diversas teorias podem ser encontradas na literatura com o objetivo de explicar o transporte de água no interior do sólido, dentre as quais se destacam, a difusão líquida, movimento de líquido devido às forças capilares, movimento do líquido devido à força gravitacional, movimento de vapor devido à diferença de concentração de vapor (difusão de vapor). Tais teorias são utilizadas com maior frequência entre os pesquisadores (BROOKER et al., 1992; LIMA, 1999; UKRAINCZYK, 2009; FARIAS, 2011; SANTOS et al., 2010; SANTOS, 2013).

A presença da água no produto pode ser medida a partir de diferentes teorias, mas nem todas indicam a disponibilidade da água para produção de microrganismos, uma vez que nem toda a água do material está igualmente disponível. O fenômeno de redução do teor de umidade envolve o movimento hidráulico do interior para a superfície do material através de mecanismos distintos de transferência de calor e massa, que podem alterar de forma substancial a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem (GONELLI et al., 2007).

O mecanismo pelo qual ocorre a difusão da água nos materiais ou produtos de um modo geral é muito complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física dos produtos. Na literatura sobre secagem envolvendo o fenômeno da difusão de água, são

encontradas grandes variações nos valores da difusividade de massa, não só devido à complexidade dos produtos, como também em função dos diferentes métodos de predição, tipo de material, teor de água, processo de secagem e a metodologia utilizada para sua obtenção.

2.1.2 - Teores de umidade

O teor de umidade de um material pode ser definido de duas formas: tanto em base úmida como em base seca. O teor de umidade em base úmida é a relação entre a massa de água contida no produto e a sua massa total, como descrito pela Equação (2.1).

$$M_{bu} = m_a/m_t \quad (2.1)$$

onde M_{bu} é o teor de umidade em base úmida; m_a é a massa de água contida no produto e m_t é a massa total do produto, ou seja, massa do produto seco mais massa de água.

O teor de umidade em base seca é a relação entre a massa de água contida no produto e a massa de matéria seca, deste produto e pode ser obtido Equação (2.2), como segue:

$$M_{bs} = m_a/m_{ms} \quad (2.2)$$

sendo, M_{bs} é o teor de umidade em base seca; m_a é a massa de água contida no produto e m_{ms} é a massa do produto seco.

Considerando-se que o ar empregado é o ambiente, sendo não movimentado artificialmente, a secagem pode ser classificada em natural e artificial. Oliveira et al. (2010) informam que, na secagem artificial de grãos os processos podem ser realizados em silos secadores, secagem intermitente, secagem contínua e seca-aeração. Na secagem artificial o excesso de água do grão é removido rapidamente até o limite conveniente, minimizando alterações metabólicas e danos pela ação de fungos e insetos.

2.1.3 Métodos de secagem

De forma mais completa, os métodos de secagem são classificados quanto ao uso de equipamentos (natural ou artificial), à periodicidade no fornecimento de calor (contínuo ou intermitente) e à movimentação da massa do produto a ser secado (estacionário ou contínuo).

Secagem Natural: Consiste na exposição do material a ser seco ao sol ou a sombra em um ambiente relativamente seco a fim de que a água seja removida por evaporação. O produto pode ser disposto em terreiros de cimento, como a secagem de café em terreiro, ou sobre tabuleiros, sendo o produto revolvido constantemente. Portanto, é uma das alternativas, que reduz significativamente o consumo de energia e proporciona uma melhor eficiência energética, sem causar poluição para prejudicar os ecossistemas e a saúde (COLINART et al., 2012).

Secagem artificial: é a alternativa para a secagem natural, pois pode ser executada em baixas e/ou altas temperaturas. É o tipo de secagem mais frequente e adapta-se bem aos esquemas de produção de sementes e materiais cerâmicos, sendo a secagem rápida e capaz de remover elevadas quantidades de água. Esse tipo de secagem é um método alternativo, que é amplamente utilizado a nível industrial, devido às suas condições mais controláveis e menos dependências das condições climáticas. Este método remove a água dos produtos por aquecimento com ar convectivo (LERTWORASIRIKU e TIPSUWAN, 2008). Permite manter a qualidade do material, quando empregado com critérios técnicos, como, por exemplo, a não exposição prolongada a elevadas temperaturas e a elevação da temperatura das sementes até determinados limites (BERTI et al., 2005). Os métodos artificiais podem ser classificados em contínuo, estacionário e intermitente.

- ***Secagem estacionária ou leito fixo:*** Consiste basicamente em se forçar um fluxo de ar através da massa de grãos que permanece em repouso. A secagem estacionária se processa da base para o topo da camada de todo material, em um secador de fundo falso perfurado, e do centro para a periferia, em secador de tubo central perfurado. Ocorre por camadas, em virtude da formação da zona de secagem, correspondente a região onde se efetiva o intercâmbio de água do material para o ar. Anteriormente a zona de secagem tem-se grãos secos a alta temperatura e, posteriormente, grãos úmidos a baixa temperatura (BIAGI, 2017).

- *Secagem contínua:* A secagem em fluxo contínuo implica manter o produto em constante movimento no interior do secador. Na secagem contínua, o produto passa através do secador apenas uma vez, ficando exposto um determinado período ao ar aquecido e outro na câmara de resfriamento. Isso vale dizer que o produto entra úmido na câmara de secagem e são descarregados resfriados e com a umidade desejada. Nessas condições, o material atinge temperaturas elevadas, ficando expostos aos danos térmicos, que podem causar redução na viabilidade e no vigor (CAMACHO, 2004).

- *Secagem intermitente:* É caracterizada por um fluxo de calor que é fornecido intermitentemente ao contrário de continuamente. Isto pode ser feito por meio da interrupção do fluxo de ar para fornecer o material um período de "descanso" ou "têmpera", por um fluxo contínuo de ar periodicamente aquecido, ou por variação periódica do fluxo de ar, ou ambos (CHUA et al.; 2003). Nesse processo, o produto permanece recirculando no interior do secador durante toda a operação e o seu contato com o ar se realiza de modo descontínuo e repetitivo (SIMIONE et al., 2008). O ar de secagem, ao mesmo tempo em que fornece calor ao sistema, absorve água do produto na forma de vapor. Na secagem intermitente, o consumo de energia para aquecimento do ar e a movimentação do ar e do produto é alta, comparativamente à secagem estacionária, em silos secadores armazenadores, porém a operação é mais rápida e o risco de deterioração do produto é menor (BARBOSA, 2011).

2.1.4- Curvas de secagem

A melhor forma de apresentar os dados coletados de umidade a partir de experimentos e simulações é através de curvas de secagem podendo estas serem apresentadas de três formas diferentes:

- taxa de evaporação “versus” teor de umidade médio;
- teor de umidade médio “versus” tempo;
- taxa de evaporação “versus” tempo.

Durante a secagem, é na superfície do material que ocorre a evaporação da água livre, a qual foi transportada do interior do sólido. A energia envolvida neste processo de secagem é

proveniente de uma diferença de pressão parcial do vapor de água, existente entre o ar e a superfície do produto, permitindo que a água migre sob a forma de vapor do interior do produto até à superfície, e desta para o meio envolvente (PARK et al., 2007). Assim a transferência de calor e massa entre o ar de secagem e o produto é um fenômeno comum em diversas condições de secagem.

As Figuras 2.2 a 2.5 ilustram as diferentes tipos de curvas de secagem e aquecimento na forma esquemática, que tem sido utilizada para análise do processo.

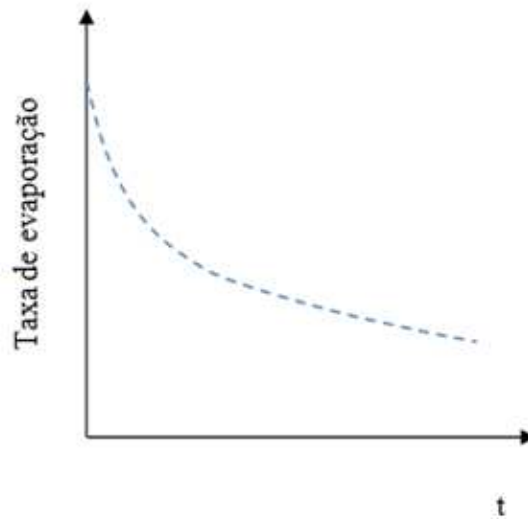


Figura 2.2 - Taxa de evaporação versus tempo

Fonte: O autor

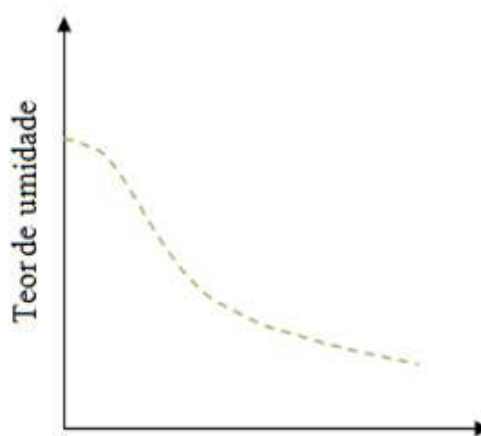


Figura 2.3- Teor de umidade versus tempo.

Fonte: O autor

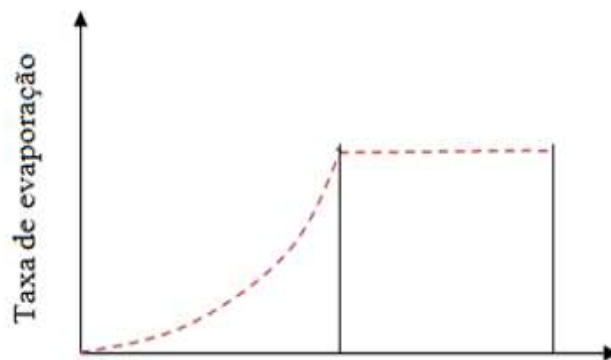


Figura 2.4 - Taxa de evaporação versus teor de umidade.

Fonte: O autor

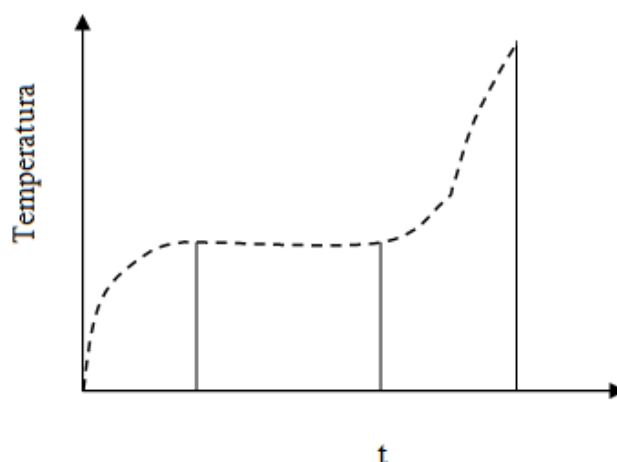


Figura 2.5 - Temperatura versus tempo.

Fonte: O autor

Na Figura 2.3 tem-se a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, em relação ao tempo t , numa determinada condição de secagem, onde a curva é obtida através da pesagem do produto em intervalos de tempos distintos. A Figura 2.4 representa a variação do teor de umidade do produto por tempo t , já na Figura 2.5 tem-se a taxa de evaporação em função do teor de umidade. Finalmente na Figura 2.6. A variação da temperatura do produto durante a secagem evoluindo com o tempo. Ela pode ser obtida medindo-se a temperatura do produto durante a secagem, em determinados intervalos de tempo.

2.2 Cerâmica

2.2.1 Fundamentos e aspectos históricos e metodológicos

O termo “cerâmica” vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria-prima queimada”. Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (Abceram), cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas.

A cerâmica está entre as mais antigas e importantes inovações tecnológicas na história da humanidade e foi um dos primeiros materiais verdadeiramente sintéticos (CANO et al., 2014).

Desde a pré-história o homem sentiu a necessidade de se defender dos predadores e até mesmo das condições da natureza. Era preciso adaptar-se ao habitat e utilizar-se de recursos naturais para sobreviver nele. Abrigar-se, era também um motivo de segurança. Ao longo da história o homem aperfeiçoou suas técnicas e descobriu novos materiais, entre eles a argila, o que posteriormente lhe permitiu a construção dos mais diversos objetos e templos.

Numa forma mais científica, cerâmica é o nome genérico que se dá a materiais preparados, sob altas temperaturas, a partir de compostos inorgânicos como silicatos e óxidos metálicos. Nesse conceito, materiais como argila e cimento podem ser incluídos, mas às vezes são considerados grupos à parte pela sua importância prática. O que se sabe, com total rigor histórico, é que, a partir do período neolítico, aparecem fragmentos de cerâmica a demonstrar, de forma inequívoca, a presença humana. Poder-se-á dizer, por isso, que o homem começou a “escrever”, no barro, a sua própria História (COSTA, 2000).

Segundo Dantas (2006), a indústria de cerâmica é uma das mais antigas do mundo. Em 1666, um grande incêndio na cidade de Londres destruiu centenas de casas de madeira, esse fato alertou os ingleses a reconstruir as casas usando tijolos cerâmicos em vista da facilidade de fabricação e abundância de matéria-prima. Mas, somente no século XVII foi que ela teve sua importância relevada.

A existência de pré-ceramistas no Amazonas foi durante o período de 7510-2550 A. C. Depois de um intervalo de tempo relativamente longo, há cerca de 300 anos, houve surgimento de quatro ocupações de ceramistas associados com a tradição amazônica. A fase Açutuba, a fase tradição Manacapuru, a Paredão que foi relacionada com a construção de estruturas artificiais e finalmente a fase Guarita (NEVES, 2008).

Bellingieri (2003) relata que a atividade de fabricação da cerâmica no Brasil existe desde antes da chegada dos colonizadores portugueses, em 1500. Pode-se dizer que o primeiro impulso à industrialização do setor cerâmico brasileiro ocorreu no final do século XIX, com a instalação da Olaria dos Falchi, que contava com um motor de 40 Cv de potência, dois amassadores de argila e equipamento capaz de produzir telhas.

Atualmente, a cerâmica de construção brasileira ocupa um lugar de destaque na economia do país. Durante um grande período de produção de tijolos não ocorreram mudanças tecnológicas importantes. Somente nas últimas décadas é que a tecnologia de fabricação de tijolos passou por um processo de desenvolvimento associado a inovações. Mesmo assim, é natural que ainda ocorra outros progressos e inovações (OLIVEIRA et al., 2005).

Bellingieri (2005) comenta que diversos objetos cerâmicos, tais como vasos, potes, telhas e tijolos, já eram produzidos no Brasil pelos indígenas e pelos colonizadores europeus, durante o período colonial e imperial. Tratava-se, portanto, de uma produção artesanal. Foi a partir do final do século XIX que a cerâmica se organizou como “indústria”, em São Paulo, com o surgimento de olarias e fábricas de louças de barro, que produziam, em série, telhas, tijolos, ladrilhos, vasos, potes, manilhas, etc. Na década de 1910, surgiram as primeiras empresas de louças e porcelanas. E, a partir daí, a cerâmica diversificou-se e cresceu em importância dentro da economia paulista.

Segundo Prado e Bressiani (2013), nos últimos anos o setor cerâmico tem experimentado um crescimento ultrapassando produtores tradicionais como a Itália e a Espanha como mostrado na Figura 2.7.

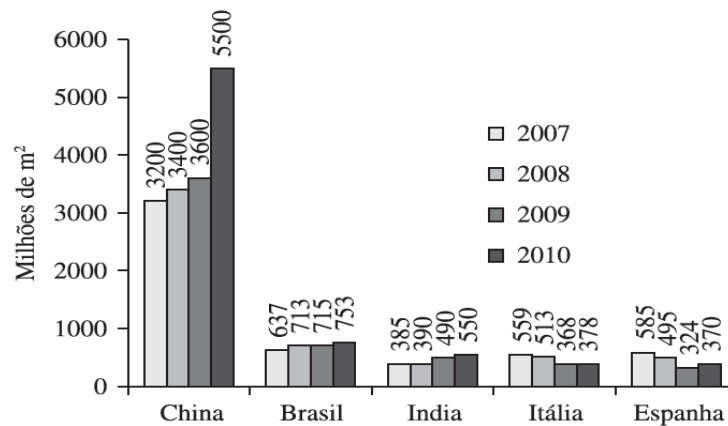


Figura 2.7 - Os principais produtores mundiais de revestimentos cerâmicos

Fonte: Prado e Bressiani (2013).

No Brasil, a fabricação de tijolos e outros produtos afins ocorreram no início do século passado. Entretanto, somente na década de 1930 é que foram fabricados os primeiros tijolos furados através de processos mecanizados. Atualmente, a cerâmica de construção brasileira ocupa um lugar de destaque na economia do país (BATISTA, 2009).

2.2.2 Classificação geral do setor cerâmico

O setor cerâmico é extremamente heterogêneo e pode ser classificado, segundo Associação brasileira de cerâmica - ABC (2004) em nove segmentos diferentes, tais como função das matérias-primas, propriedades, áreas de aplicação e etc.

a) Cerâmica vermelha

A cerâmica vermelha compreende vários materiais com coloração avermelhada, empregados na construção civil, tais como vasos cerâmicos tijolos, blocos, telhas, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas, e utensílios de uso doméstico e decorativos (OLIVEIRA, 2011).

b) Materiais de revestimento (Placas cerâmicas)

Os materiais de revestimento são bastante, usados na construção civil para revestimento de pisos, paredes, bancadas e piscinas, tanto em ambientes internos como em externos: azulejo, pastilha, lajota, piso, grês porcelanato etc.

c) Cerâmica branca

Conforme a Associação brasileira de cerâmica - ABC (2004) este tipo de cerâmica compreende os materiais constituídos por um corpo branco recoberto por camada vítrea transparente e incolor. Foram assim agrupados por causa da cor branca da massa, necessária por razões estéticas e/ou técnicas. São as louças sanitárias, as de mesa, os isoladores elétricos e as cerâmicas artísticas, bem como as de finalidade química, elétrica, térmica e mecânica.

d) Materiais refratários

Esse tipo de material possui a capacidade de suportar ciclos repetidos de aquecimento e resfriamento à temperaturas elevadas, o que envolve esforços mecânicos, ataques químicos e outras solicitações. Para suportá-las, vários tipos diferentes de refratários foram desenvolvidos, a partir de diversas matérias-primas ou associações entre elas. Dessa forma, podem ser categorizados quanto à matéria-prima ou ao componente químico principal: silicosos, aluminosos, cromítico-magnesianos, zircônicos, dentre outros.

e) Isolantes térmicos

Os isolantes podem ser classificados em: (a) isolantes térmicos não-refratários; e (b) fibras ou lãs cerâmicas, com características físicas que os permitem suportar temperaturas de utilização acima de 2000°C.

2.2.3. A Fabricação de uma peça cerâmica

O processo de fabricação de uma peça ou produtos cerâmicos compreende diversas fases: tratamento prévio das matérias primas, a exploração das jazidas, conformação, secagem e por fim a queima (BATISTA et. al., 2008, CALLISTER, JR, 2007; SRIKIATDEN e ROBERTS, 2007). Entretanto, após o beneficiamento, para se obter uma peça cerâmica, antes

da conformação, diversos diluentes são adicionados ao pó cerâmico para homogeneizar as partículas e gerar um meio viscoso, aumentando assim sua consistência e permitindo moldar a peça na forma desejada. A fabricação de uma peça cerâmica segue as seguintes etapas:

a) **Extração da argila**

Nesta etapa inicial, cada tipo de cerâmica requer um tipo apropriado de argila deve ser analisada a composição granulométrica, o teor de argila, a umidade e a pureza, entre outras.

b) **Preparo da argila úmida**

Inicialmente extraí-se a argila, logo em seguida segue-se o que se chama de “apodrecimento” da argila. Ela é depositada ao ar livre, revolvida e passa por um período de descanso. Esta etapa tem por finalidade fermentar ao ar as partículas orgânicas existentes no barro tornando-as coloidais e aumentando a plasticidade da massa. A etapa seguinte é a de maceração (desagregar torrões), correção e amassamento. A fase final é do amassamento, que serve para se obter a uniformidade entre os componentes. A argila então é preparada para a moldagem.

c) **Moldagem**

A moldagem pode ser feita a seco ou semi-seco, o que demanda uma grande pressão e consequentemente grande energia. Este processo também leva o nome de prensagem. Os produtos são de excelente qualidade, mais uniformes e sem bolhas, tendo superfícies lisas e impermeáveis. Pode ser dividida como segue:

▪ **Moldagem com pasta plástica consistente**

Nestes casos a pasta é forçada a passar sob pressão por um bocal apropriado, formando uma fita contínua e uniforme. Depois esta fita é cortada em segmentos desejados. Este processo não pode ter massa com muita água devido à porosidade no cozimento assim como deformação excessiva. O ar também é prejudicial, pois além de dilatar a peça na cozedura pode também causar o fendilhamento e a desagregação.

- **Moldagem com pasta plástica mole**

É o processo mais antigo, pois é feito até sem equipamentos. A massa é moldada à mão, em tornos ou moldes de madeira. É o processo usado em vasos, tijolos brutos, estatuetas pratos e xícaras de barro e eventualmente em telhas rústicas coloniais.

- **Moldagem da pasta fluida**

Neste caso a pasta tem grande adição de água, formando um líquido semelhante ao xarope. A moldagem é feita com contra molde de metal, molde de gesso e a pasta é vertida em camadas até atingir a espessura desejada. Neste momento o gesso absorve a água da pasta, ficando só a camada de argila. Normalmente para o disforme, o molde precisa ser partido, o que encarece a fabricação. É usado em peças de espessura pequena como louças domésticas, louças sanitárias e peças de alta precisão.

2.2.4 Secagem de materiais cerâmicos

Conforme Barros (2003), as duas principais características que diferenciam os materiais cerâmicos, de um modo geral das outras classes de materiais, é sua alta temperatura de fusão e sua elevada dureza.

A secagem de materiais cerâmicos é uma das etapas fundamentais do processo produtivo referente na fabricação do mesmo. É um processo eminentemente difusivo. A difusão é um dos mecanismos de transporte onde a transferência de matéria ou energia ocorre pelo movimento molecular devido à existência de um gradiente de concentração de uma substância ou de temperatura, enquanto o meio permanece estacionário (FARIAS, 2011). Neste contexto é possível encontrar na literatura diversas pesquisas sobre materiais cerâmicos e, dentre os quais, podem ser citados:

Silva (2007) apresentou resultados da cinética de secagem de peças cerâmicas em forma de tubos cilíndricos. O estudo ofereceu uma equação de difusão em regime transiente escrita em coordenadas generalizadas e um pacote computacional desenvolvido que foi aplicado na simulação da cinética de secagem de membranas cerâmicas na forma de tubos cilíndricos,

usados em processos de filtragem, nas seguintes condições experimentais: temperatura de 45 a 105 °C, teor de umidade inicial de 25 a 30% (bs) e umidade relativa do ar de 58%. Os resultados numéricos foram comparados com os resultados experimentais obtidos nestas mesmas condições. Tal comparação possibilitou determinar uma expressão para o coeficiente de difusão em função da razão de umidade e da temperatura do ar de secagem.

Musielak e Mierzwa (2009) fizeram a secagem de uma peça cerâmica utilizando ar quente e constataram que o modelo que descreve o fraturamento é usado para examinar a qualidade da taxa de secagem no mesmo. Os autores mostraram que secagem lenta não envolve quaisquer rachaduras. Entretanto, a secagem mais rápida gera maior risco de fratura, e o padrão de fratura final é muito mais complicado.

Silva et al. (2009) apresentaram uma solução analítica para o problema de difusão de massa transiente em sólidos cerâmicos com geometria arbitrária, via método integral baseado em Galerkin (método GBI). Os autores consideraram propriedades termo-físicas constantes e condição de contorno de equilíbrio na superfície (condição de Dirichlet). Concluíram que a modelagem matemática utilizada para a obtenção da solução analítica foi adequada, podendo ser aplicada em processos transientes de secagem, e que os gradientes de umidade e temperatura são maiores nos planos superficiais e nos vértices do sólido, que está em contato direto com o ar de secagem.

Hemanthakumariw et al. (2008) reportaram que a secagem convencional dos materiais cerâmicos é um processo demorado e envolve uma combinação de secagem natural. Nesse método o tempo necessário para remover a umidade é de 5 a 7 dias devido o peso do material a ser seco. Os autores concluíram que a secagem rápida pelo método convencional não é de boa concordância uma vez que são gerados defeitos resultantes da remoção rápida da água na superfície do material.

Khalili et al. (2014) estudaram o processo de secagem de um tijolo de argila e analisaram as tensões que ocorreram durante a secagem do material cerâmico. Os autores consideraram as variações do módulo de Young em intensidade de tensão durante o processo de secagem e analisaram o processo usando o método de Elementos Finitos.

Kowalski (2011) analisaram as vantagens da secagem convectiva não-estacionário (intermitente) e a possibilidade de sua aplicação em materiais susceptíveis à fendilhação (madeira e cerâmica). O tempo de secagem, o consumo de energia, e a qualidade das amostras secas foram examinados em diferentes horários de secagem intermitente. Os testes foram realizados em amostras de materiais cerâmicos em madeira de forma cilíndrica e de caulino. Os autores concluíram que os resultados dos estudos de secagem apresentados no trabalho permitiu afirmar que a secagem intermitente influencia positivamente na qualidade dos materiais secos, sem aumento significativo do tempo de secagem.

Almeida et al. (2013) apresentaram um modelo matemático e uma solução numérica para descrever a secagem de tijolos ocios de cerâmica em um secador de túnel do tipo de fluxo cruzado em escala industrial. O modelo baseia-se balanços de massa e energia escritas para um volume diferencial situada numa posição arbitrária do material sólido e incluem a condensação de água. Para validar a metodologia, os resultados numéricos e experimentais para o teor de umidade e temperatura do tijolo durante a secagem em escala industrial são comparados e uma boa correlação foi obtida. Os autores concluíram que durante o processo de secagem, os baixos gradientes de temperatura e teor de umidade no interior do leito, foram obtidos. Isso deve-se ao fato de que a temperatura do ar de secagem foi aumentada gradualmente e, conseqüentemente, a sua umidade relativa também aumentou gradualmente em direção ao fim do processo, o que resulta em uma secagem mais uniforme e um produto de melhor qualidade.

Silva et al. (2013) apresentaram a secagem convectiva de placas de argila e uma Solução numérica da equação de difusão bidimensional com uma condição de contorno do terceiro tipo para descrever o processo. Para determinar o valor da difusividade efetiva de massa, dois modelos foram adotados, o modelo 1 que considerou propriedades constantes e o modelo 2 que considerou propriedades variáveis. Os autores concluíram que as análises dos resultados indicaram boa concordância para o modelo 2 entre cada conjunto de dados experimentais e simulados.

Silva et al. (2013) estudaram a secagem convectiva de placas de argila com teor de umidade inicial de 0,23 (db) foram realizadas em 50, 60, 70, 80 e 90° C. A secagem ocorreu em dois períodos distintos: de taxa constante e decrescente. No primeiro período, o processo foi descrito por uma equação empírica e, no segundo caso, pela equação de difusão com a

condição de contorno do terceiro tipo. A utilização de uma aproximação numérica tridimensional para a equação de difusão permite evitar algumas simplificações comuns na literatura, tais como a consideração dos parâmetros do processo com um valor constante e a representação unidimensional da geometria. Assim, o período de taxa decrescente pode ser descrito de forma precisa para todas as temperaturas do ar de secagem. Uma equação de Arrhenius foi utilizada com sucesso para relacionar a difusividade de massa efetiva com o teor de umidade local e a temperatura do ar de secagem. Os autores concluíram que a simulação de 80°C permitiu verificar que os resultados obtidos estão muito próximos dos dados experimentais para esta temperatura.

Bellegem et al. (2014), estudaram um modelo de transferência de calor e massa em 3D. Este transporte foi governado pela equação de difusão e o modelo foi validado por comparação com uma experiência de secagem por convecção a partir da literatura, em que uma amostra de tijolos cerâmicos saturado foi seca ao longo de um lado da superfície da amostra. Os autores observaram uma boa concordância geral entre o modelo matemático utilizado e os dados experimentais, no entanto, o modelo previu o período de taxa de secagem constante melhor do que o período de taxa decrescente. Este foi melhorado ajustando as propriedades do material.

Silva (2016) desenvolveu um modelo matemático para descrever as trocas de calor e massa durante o processo de secagem, utilizando o método da capacitância global em corpos vazados. A solução analítica das equações governantes foi feita usando o método de separação de variáveis. Foram realizados experimentos de caracterização química e termo-hídrica da argila, e secagem de materiais cerâmicos argilosos vazados e com formas não-convencionais, em diferentes temperaturas (60, 70, 80, 90 e 100°C). Resultados da composição química e granulometria da argila, e cinéticos de perda de massa e aquecimento das peças cerâmicas foram apresentados e analisados. O autor concluiu que o processo de perda de umidade ocorre a uma velocidade mais baixa do que o aquecimento do material cerâmico, que a temperatura e forma do corpo afetam fortemente os fenômenos de transporte de calor e massa, que a secagem abaixa temperatura favorece a redução de problemas no material pós-secagem e melhoramento na qualidade final, e que os números de Biot de transferência de calor e de massa influenciam diretamente no tempo que o produto atinge sua condição de equilíbrio.

2.3 Computação numérica

2.3.1 Métodos numéricos e suas principais características

Diversos fenômenos físicos envolvendo transferência de calor e massa são apresentados. Geralmente são modelados através das equações que podem ser escritas, por exemplo, na forma diferencial. Dependendo da situação específica, pode-se adotar hipóteses simplificadoras como, propriedades constantes e material isotrópico. Tais hipóteses simplificadoras geralmente acabam trazendo as equações diferenciais parciais para equações diferenciais simples. Concernentemente, a maior parte das situações práticas, não aceita hipóteses simplificadoras e geralmente envolvem fatores agravantes como geometrias complexas, combinação de diferentes condições de contorno, variação das propriedades termo-físicas no tempo (transiente), entre outros parâmetros. Para esta grande parte dos casos, as equações diferenciais parciais não podem ser simplificadas e tampouco tem solução analítica. Desta forma, a melhor maneira de analisar estes casos é utilizando métodos numéricos.

Os métodos numéricos constitui uma grande ferramentas de resolução de equações diferenciais e, conseqüentemente, tem aplicações em diversas áreas como transferência de calor, mecânica dos fluidos, geologia entre outras ciências.

Os métodos mais difundidos são os dos Elementos Finitos (MEF), das Diferenças Finitas (MDF) e dos Volumes Finitos (MVF). Estes métodos, basicamente consistem em discretizar o domínio contínuo do sistema em questão em domínios menores, discretos. O método dos elementos finitos e das diferenças finitas foram os primeiros a ganhar destaque. Desde então, muitas discussões foram travadas acerca da eficiência de cada um destes métodos em relação ao outro, embora tenham, historicamente, sido usados em aplicações distintas devido à natureza distinta dos problemas de mecânica estrutural e mecânica dos fluidos.

Conforme Maliska (2004), o método dos elementos finitos (MEF), teve seu desenvolvimento na área da elasticidade, usando malhas triangulares não estruturadas, que eram capazes de representar fielmente geometrias complexas. Assim, até meados de 1970, tinha-se o MDF, muito usado na área dos fluidos mas, incapaz de tratar geometrias complexas e o MEF hábil em relação a geometrias complexas e sem a capacidade de tratar termos advectivos, presentes em equações de movimentos. Somente anos mais tarde, o MEF passaram a tratar

problemas advectivos. Nesse contexto embora apresentassem resultados satisfatórios, havia sob certas circunstâncias, problemas de instabilidade numérica entre outros problemas, que acabou levando ao desenvolvimento do método dos volumes finitos, MVF, que se baseado em malhas faz uso da conservação das propriedades físicas em geral, ao longo de cada elemento da malha, ao contrário dos MEF e MDF que são não conservativos e tem seus cálculos aplicados em pontos nodais dos elementos das malhas.

2.3.2 Simulação

A simulação são modelos, ou seja, conjuntos de suposições, geralmente na forma de relações lógicas ou matemáticas, utilizadas para descrever como um sistema se comporta. Já secagem é realizada com o objetivo de preparar um produto para ser comercializado.

Para tanto, a simulação é utilizada pelos Engenheiros e Cientistas para prever o comportamento de um produto, de um equipamento ou de um processo sobre determinadas condições. Por meio da simulação, a avaliação do modelo pode ser realizada de maneira mais rápida e eficiente, gerando resultados que possibilitam estimar as características reais do processo. Porém, a credibilidade de dessas simulações somente são alcançadas através das validações das mesmas, ou seja, se o modelo avaliado representa realmente um fenômeno físico real.

Segundo Maliska (2004), a utilização de um simulador ou de um método numérico torna-se importante, quando não é possível a obtenção da solução analítica das equações diferenciais que formam o modelo matemático.

Desta forma, a simulação numérica quando utilizada para resolver problemas em domínios complexos geralmente gera resultados com tempo de processamento aceitável. No entanto, visando aplicações em diversas áreas da engenharia, foram desenvolvidos vários pacotes computacionais voltados para pesquisadores e engenheiros, e dentre eles pode-se citar o ANSYS CFX[®]. Mirade et al. (2004), enfatiza que o ANSYS CFX[®] é um desses diversos programas de CFD disponíveis no mercado, sendo bastante utilizado tanto na pesquisa do meio acadêmico, quanto em empresas que trabalham com alta tecnologia. Suas aplicações incluem desde problemas que envolve mecânica dos fluidos, transferência de calor e massa, até problemas mais complexos, como aqueles que envolve combustão

O *ANSYS CFX*[®] é um programa já consolidado em aplicações de engenharia que, resolve as equações de conservação discretizadas usando o método dos volumes finitos. A sua versatilidade para importação de malhas e sua capacidade em simular diferentes problemas são exemplos que o faz ser amplamente utilizado em diversas frentes como em transferência de calor.

O *software* ANSYS CFX[®] tem a versatilidade de aceitar inúmeras condições de contorno e iniciais, permitindo a atualização do modelo computacional para diversas situações diferentes. O programa computacional ANSYS CFX[®] resolve a equação padrão de transporte e de energia em meios porosos somente com modificações para o fluxo de condução e o termo transiente (ANSYS, 2015).

Ferramentas de CFD atualmente começam a ser integradas com outras ferramentas numéricas, criando um ambiente de trabalho interativo, em que se chega praticamente ao projeto final do equipamento através de computadores, limitando as experiências finais de ajuste e teste do equipamento em protótipos. Uma vantagem significativa no uso de um determinado *software* é a obtenção da solução em forma fechada, requerendo reduzido tempo de computacional.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

3.1 Modelagem matemática e o problema físico

Um modelo matemático é um conjunto consistente de equações ou estruturas matemáticas, elaborado para corresponder a algum fenômeno que pode ser físico, biológico, social, psicológico, conceitual ou outro modelo matemático (BASSANEZI, 2004).

No presente trabalho, adotou-se o modelo de difusão transiente para análise de transferência de massa e de calor no interior de materiais cerâmico durante o processo de secagem, para diferentes temperaturas de ar de secagem.

3.1.1 A equação de difusão

O modelo matemático consiste da equação de difusão em três dimensões. A equação geral de difusão utilizada pelo *software* ANSYS CFX[®] aplicada para um potencial genérico Φ que na forma infinitesimal para um volume elementar a equação pode ser escrita do seguinte modo (MALISKA, 2004; SILVA, 2007; SILVA, 2009):

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \vec{v}\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (3.1)$$

Anulando-se o termo convectivo e o termo de geração da grandeza Φ , obtém-se apenas a variação da grandeza dentro do volume de controle que ocorre unicamente por difusão. Sendo assim a equação passa a ser chamada de equação de difusão e é expressa por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^{\Phi} \nabla \Phi) \quad (3.2)$$

Na Equação (3.2), o primeiro termo refere-se a variação temporal da grandeza sob estudo em um volume infinitesimal, sendo conhecido como termo transiente, e o segundo termo, indica a variação da grandeza na unidade de tempo por difusão (termo difusivo).

3.1.2 Modelagem de transferência de calor e massa

Um considerável número de pesquisas em transferência de calor e massa tem sido realizada por vários pesquisadores, devido a sua grande aplicação em processos industriais. Do estudo da literatura, é aparente que somente considerações geométricas limitadas a placas, cilindros e esferas tenham sido usadas para resolver problemas de difusão, existindo, portanto, poucos estudos científicos aplicados a geometrias arbitrárias. É por este motivo que este trabalho se propõe a descrever o processo de secagem de materiais cerâmicos com forma complexa, direcionando o estudo para tubos cerâmicos.

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

- (a) São homogêneos e isotrópicos;
- (b) A distribuição de umidade e temperatura no interior dos materiais são uniformes no início do processo;
- (c) As propriedades termofísicas são constantes durante todo o processo;
- (d) São constituídos de matéria seca e água na fase líquida;
- (e) O fenômeno de secagem ocorre por difusão de água no interior dos materiais.

a) Modelagem da transferência de massa

Baseando-se na teoria da difusão líquida, que enuncia que a movimentação de líquido dentro de um sólido poroso tem como principal agente a existência de um gradiente de concentração de umidade, a segunda Lei de Fick, Equação (3.3), vem sendo utilizada como modelo matemático na descrição de tal fenômeno (BROOKER et al., 1992).

Para descrever o transporte de massa no interior de sólidos com geometria arbitrária, considera-se na Equação (3.1), $\lambda = 1$, $\Gamma^\Phi = D$ e $\Phi = M$, e obtém-se a equação da difusão de massa no regime transiente, sem geração de energia (Lei de Fick) como segue:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (3.3)$$

onde M é o teor de umidade no volume de controle, num instante t e D é a difusividade de massa.

Deve-se observar que o termo entre parênteses no segundo membro da Equação (3.3), possibilita definir a taxa de difusão de água por unidade de área (fluxo de água em relação a um determinado referencial), o que é conhecido como primeira lei de Fick (INCROPERA e DEWITT, 1992):

$$\vec{J} = -\rho D \nabla M \quad (3.4)$$

onde ρ é a densidade do corpo e \vec{J} é o fluxo de água dado em $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

Sendo assim, o valor médio do teor de umidade do sólido é dado por:

$$\bar{M} = \frac{1}{V} \int_V M dV \quad (3.5)$$

onde V é o volume do sólido em estudo.

b) Modelagem da transferência de calor

O transporte de calor no interior de sólidos com geometria arbitrária será descrito, considerado-se na Equação (3.1), $\lambda = \rho c_p$, $\Gamma^\Phi = k$ e $\Phi = T$. Dessa forma, obtém-se a equação da difusão de calor no regime transiente, sem geração de energia (Lei de Fourier) como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.6)$$

onde T é a temperatura; ρ é a densidade do meio, c_p é o calor específico à pressão constante, e k é a condutividade térmica do meio.

Na Equação (3.6), a variável dependente é a temperatura, enquanto que a grandeza transportada (caracterizada pela variável dependente) é a energia interna no volume de controle. O termo entre parênteses no segundo membro da Equação (3.6) é a taxa de transferência de calor por unidade de área perpendicular à direção de transferência (fluxo de calor) (KEEY, 1992; INCROPERA e DEWITT, 1992):

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (3.7)$$

dado, no sistema internacional de unidades, em $J/(s \cdot m^2)$ ou W/m^2 .

Considerando ρ e c_p constantes, a Equação (3.6) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) \quad (3.8)$$

onde $\alpha = k/(\rho c_p)$ é denominado difusividade térmica.

Para o modelo em estudo as seguintes condições inicial e de contorno foram usadas:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi = \Phi_e, \text{ para a superfície dos sólidos, } t \geq 0. \\ \Phi = \Phi_i, \text{ para o interior do sólido, } t = 0. \end{array} \right.$$

De acordo com a Equação (3.6), o valor médio da temperatura no interior do sólido será dado por:

$$\bar{T} = \frac{1}{V} \int_V T dv \quad (3.9)$$

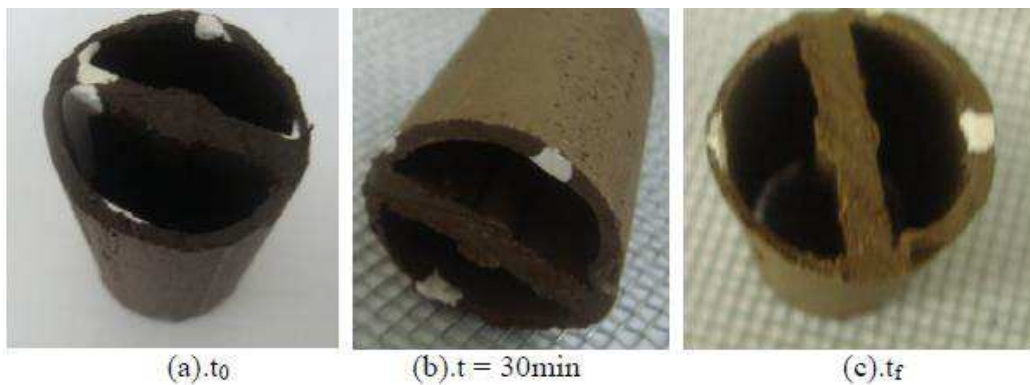
3.2 Aplicação a secagem de tubos cerâmicos

Toda a metodologia foi aplicada para descrever a secagem em estufa de tubos cerâmicos vazados conforme reportado por (SILVA, 2016). As Figuras 3.1 e 3.2, ilustram as geometrias a serem estudadas.



Fonte: Silva (2016)

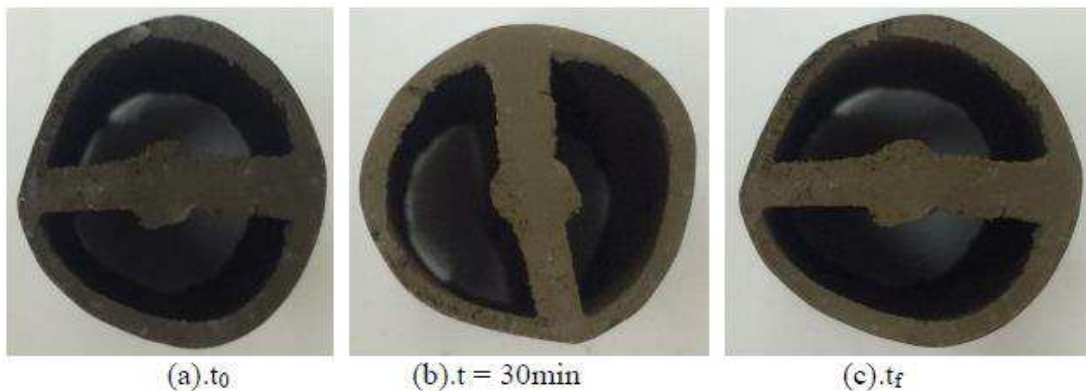
Figura 3.1 - Amostra 1 tubo cilindro vazado



(a).t₀

(b).t = 30min

(c).t_f



(a).t₀

(b).t = 30min

(c).t_f

Figura 3.2 – Tubo cilindro vazado com barra transversal

Fonte: Silva (2016)

Silva (2016) realizou experimentos de secagem em estufa de tubos vazados em diferentes condições operacionais. A tabela 3.1 resume os dados geométricos dos tubos cerâmicos argilosos estudados. A tabela 3.3 resume as informações de umidade e temperatura do ar dos sólidos estudados.

Tabela 3.1 – Parâmetros geométricos dos tubos vazados para cada teste de secagem

Parâmetros geométricos					
T (°C)	D _{int} (mm)	S ₀ (mm ²)	V ₀ (mm ³)	S _f (mm ²)	V _f (mm ³)
60	44,36	830832,25	51701,86	757496,1	43982,94
70	42,83	753133,42	50747,31	708038,88	46277,38
80	43,84	815189,58	54990,21	758499,73	53130,01
90	44,08	831953,68	53134,29	724153,16	46211,39
100	43,73	832330,77	54193,14	749975,4	35991,06

Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados para a secagem e temperatura dos tubos vazados

AR		Parâmetros				
T (°C)	UR (%)	D _{ext} (mm)	H (mm)	M ₀ (Kg/Kg, b.s.)	M _e (Kg/Kg, b.s.)	Θ ₀ (°C)
60	11,58	57,24	50,33	0,219199	0,005043	30,6
70	6,94	56,51	47,57	0,145554	0,012719	27,2
80	4,24	57,86	49,13	0,204283	0,008573	27,1
90	2,38	57,28	50,59	0,184355	0,006581	28,1
100	1,86	57,13	51,08	0,227253	0,002662	25,8

O valor da difusividade de massa inicialmente utilizada na Equação (3.3), para as simulações no software ANSYS CFX[®], para cada temperatura de ar de secagem 60, 70, 80, 90

e 100°C), foi obtido pelo método de tentativa e erro minimizando o erro dos quadrados mínimos entre dados experimentais e numéricos do teor de umidade médio utilizando ANSYS CFX®.

Para determinação do coeficiente de difusão de massa utilizou-se a seguinte equação matemática proposta por (GAUSS, 1855)

$$E = \sum (Y - y_i)^2$$

3.3. Solução Numérica

Para se resolver o problema usando um software computacional (CFD), certas etapas foram cumpridas: A primeira, foi a obtenção de um modelo geométrico que fosse compatível com o fenômeno físico real a ser simulado. Após a elaboração da geometria do problema, desenvolveu-se a geração da malha, a partir da geometria elaborada.

A segunda etapa, foi justamente, fazer a seleção dos fenômenos físicos que foram adotados para serem modelados, a definição das propriedades do fluido, bem como a especificação das condições inicial e de contorno e os parâmetros para se obter a solução numérica do problema. Em seguida, realizou-se a solução numérica do problema por meio da resolução das equações de conservação de massa e energia.

Por fim, realizou-se a análise, visualização e apresentação dos resultados obtidos nas simulações.

3.3.1 Geração da geometria e malha do problema

Para a geração da geometria utilizada para se fazer a malha do material cerâmico, utilizou-se o software Inventor Autodesk® (2012).

a) Geometria e malha do tubo cilindro vazado.

Neste trabalho, para gerar a malha representativa do tubo cilindro vazado inicialmente foi necessário criar a geometria definindo-se pontos e retas de referência de acordo com o método adotado que definem as fronteiras ou paredes do tubo como mostrado na Figura 3.3.

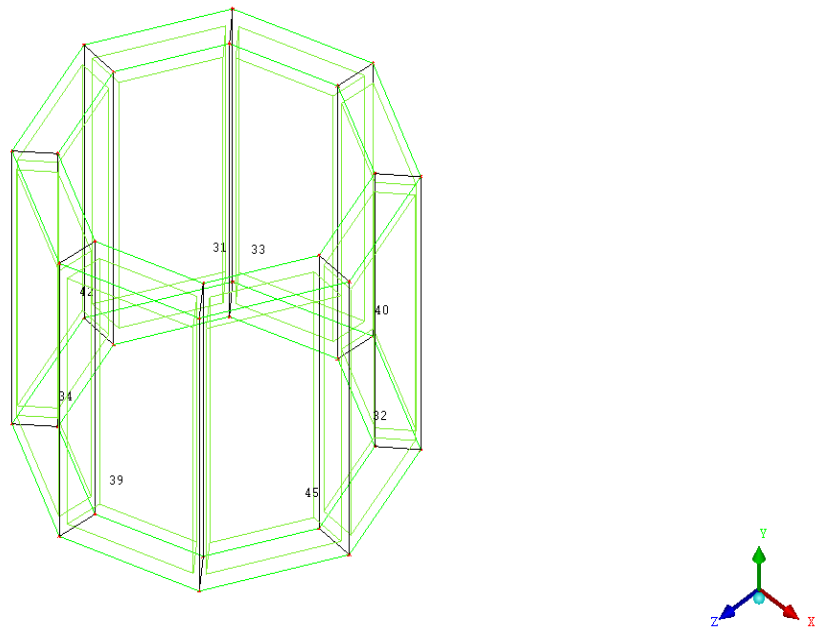


Figura 3.3 - Definição de pontos e retas da malha do tubo cilindro vazado.

De posse da geometria foi definido uma estratégia de blocagem, que assegura o refinamento ou distribuições dos elementos nas proximidades das paredes do tubo. As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam a blocagem e a geometria do problema, respectivamente, enquanto que a Figura 3.6 ilustra a malha numérica obtida a partir da geometria

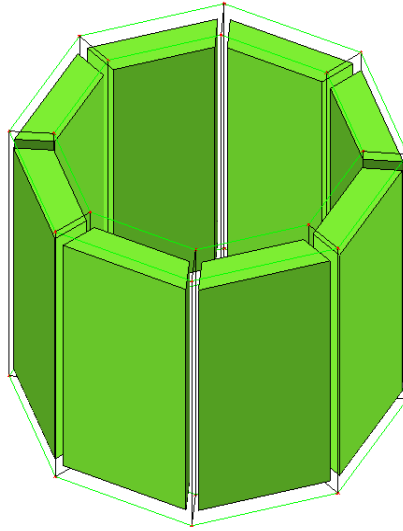


Figura 3.4 Blocação do tubo cilindro vazado.

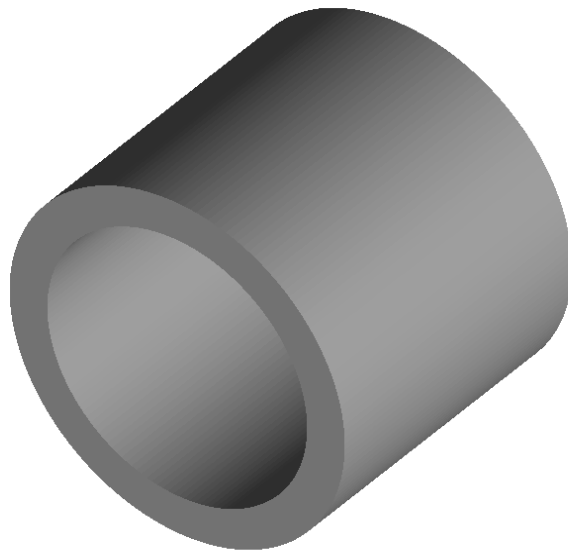


Figura 3.5 (A) Geometria do problema físico



Figura 3.6 (B) Malha numérica

b) Geometria e malha do tubo cilindro com barra transversal.

Para o tubo cilindro com barra transversal adotou-se critérios de definição de pontos e retas da malha do tubo para construir - se a geometria. A Figura 3.7 ilustra os pontos e retas definidos na geometria

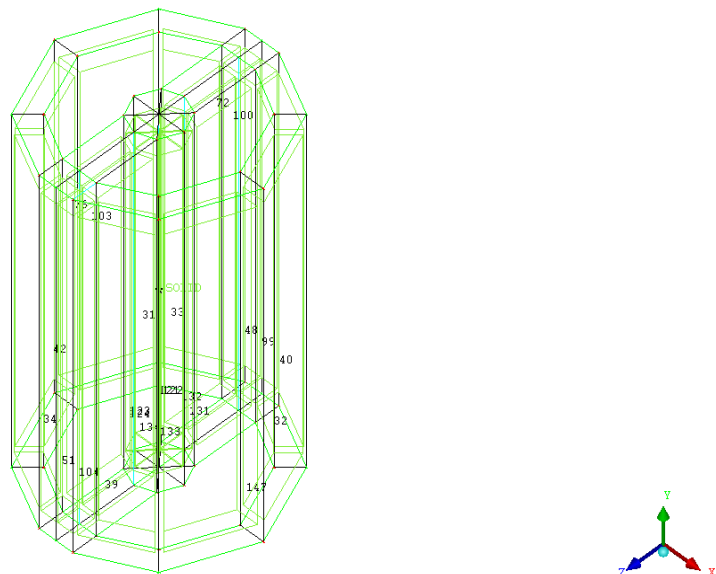


Figura 3.7 - Definição de pontos e retas do tubo cilindro com barra transversal

A Figura 3.8 ilustra a blocagem do tubo cilindro com barra transversal envolvendo a geometria definida. Após a definição dos pontos e retas da geometria foi definido uma estratégia de blocagem, que assegura o refinamento ou distribuições dos elementos nas proximidades das paredes do tubo cilindro com barra transversal.

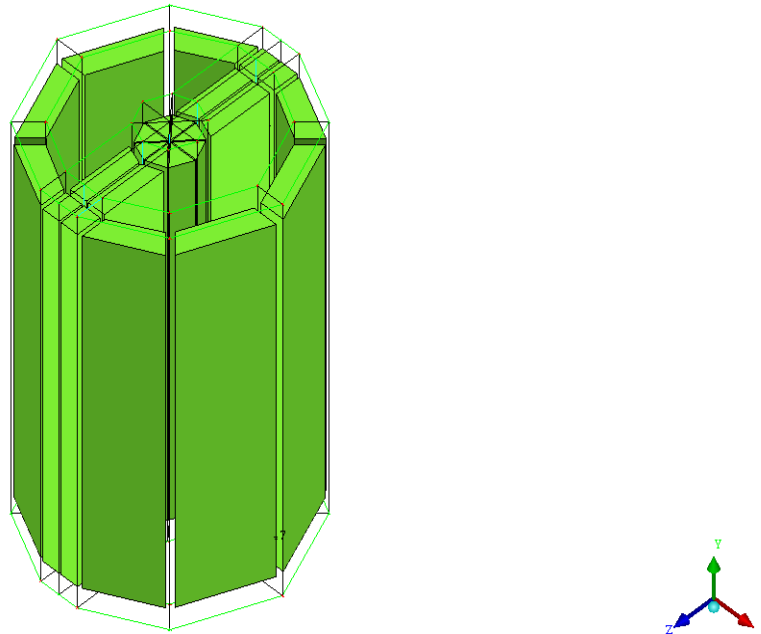


Figura 3.8 - Blocagem do tubo cilindro com barra transversal

A malha numérica, Figura 3.9, foi criada no módulo ANSYS ICEM CFD® realese 15.0, a partir da geometria elaborada no software Inventor Autodesk®. A malha gerada no software ICEM CFD, a partir da geometria do tubo cilindro com barra transversal, têm 28.500 elementos. A Figura 3.6 mostra os detalhes da malha do tubo cilindro com barra transversal usada na simulação numérica (A) Geometria do problema físico, (B) Malha numérica e (C) Malha com vista superior.



Figura 3.9 (A) Geometria do problema físico

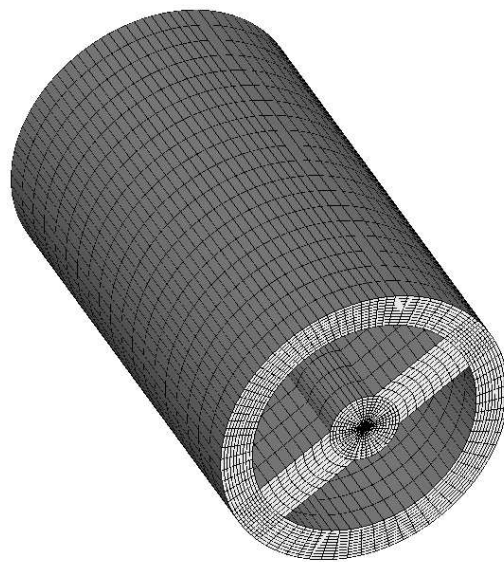


Figura 3.9 - (B) Malha numérica

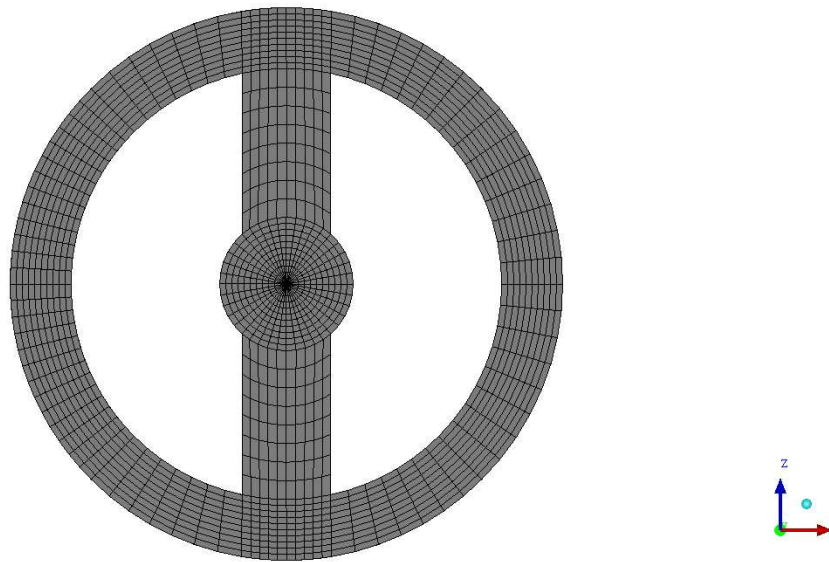


Figura 3.9 - (C) Malha com vista superior

A solução da equação geral de difusão transiente para transferência de massa e para transferência de calor possibilitou a obtenção da distribuição de umidade e temperatura no interior do material cerâmico, respectivamente.

Por causa da forma complexa do material, uma solução numérica para o processo foi admitido como mais apropriada, devido à complexidade para a obtenção da solução analítica das equações governantes que descrevem o fenômeno físico.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

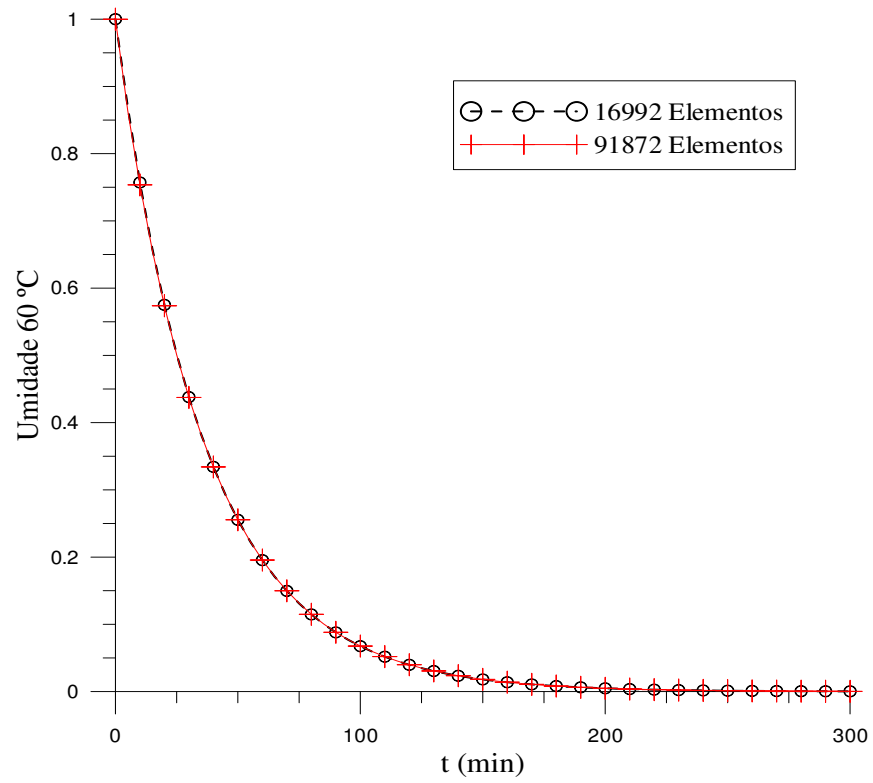
4.1 - Comentários iniciais

Neste capítulo apresentam-se alguns resultados da validação das malhas, cinéticas de secagens, distribuições de temperatura e teor de umidade no interior dos tubos cerâmicos obtidos através da solução numérica das equações diferenciais que descrevem o problema físico de secagem. De maneira a validar a metodologia, alguns resultados foram comparados com dados experimentais reportados na literatura.

4.2 validação das malhas dos tubos cerâmicos

As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram as análises da qualidade das malhas dos tubos cerâmicos vazados usando, os dados de teor de umidade em função do tempo de secagem, para a temperatura de ar de secagem de 60°C, foram utilizadas uma malha com 16.992 elementos, e outra, com 91.872 elementos, para o tubo cilíndrico vazado e uma malha com 53.360 elementos, e outra, com 28.500 elementos, para o tubo cilíndrico com barra transversal.

Baseando-se nas Figuras 4.1 e 4.2 observa-se que, os resultados foram muito próximos independentes da malha utilizada. Desta forma, devido a redução do esforço computacional optou-se trabalhar com uma malha de 16, 992 elementos para o tubo cilíndrico e com a malha de 28, 500 elementos para o tubo cilíndrico com barra transversal.



A Figura 4.1 Análise da qualidade da malha do tubo cerâmico vazado para a temperatura de ar de secagem de 60°C

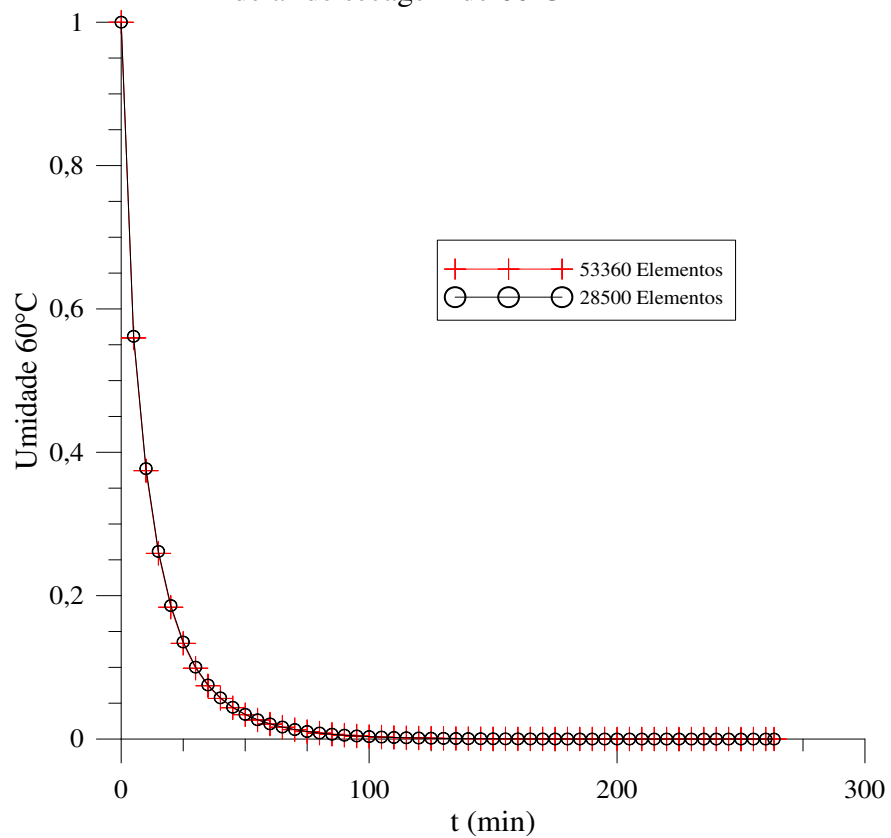


Figura 4.2 Análise da qualidade da malha do tubo cerâmico com barra transversal para a temperatura de ar de secagem de 60°C

Para validação da solução numérica utilizaram-se os dados experimentais do teor de umidade e temperatura dos tubos cilíndrico vazados e do tubo cilíndrico com barra transversal fornecidos por SILVA et al. (2016).

4.3 Aplicação à secagem de tubos cerâmicos

Após verificação das validações das malhas nos respectivos sólidos cilíndricos realizou-se procedimentos para prever a secagem desses materiais. A fim de explicar o comportamento do teor de umidade e temperatura desses tubos em função do tempo, dividiram-se os resultados em dois grupos: o primeiro relativo à cinética de secagem e aquecimento dos sólidos e o segundo referente aos perfis do teor umidade e temperatura no interior dos mesmos em vários instantes da secagem.

4.3.1 Tubo cilindro vazado

As Figuras 4.3 - 4.4 ilustram, respectivamente, as cinéticas de secagem do tubo vazado para as temperaturas de ar de secagem de 60 e 70°C.

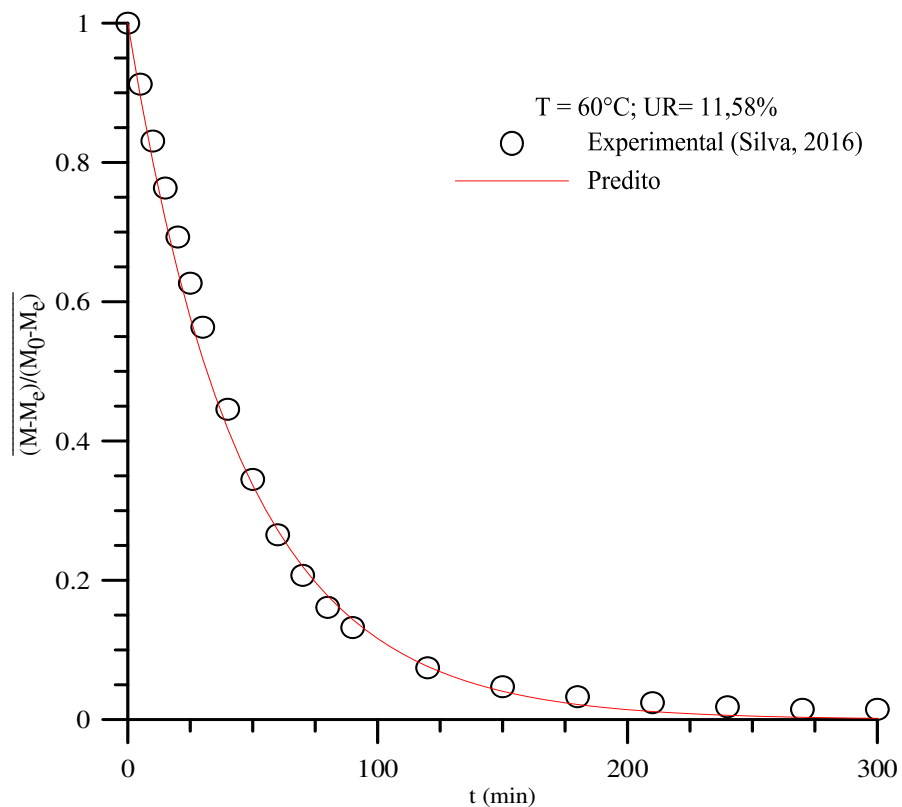


Figura 4.3 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, (T=60°C).

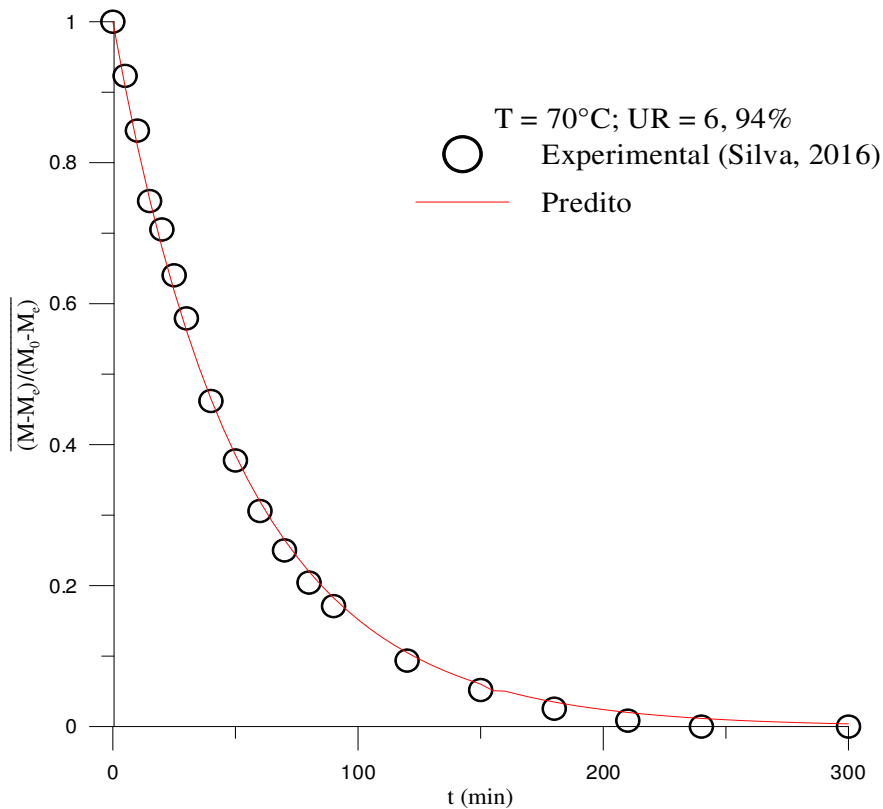


Figura 4.4 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo ($T=70^\circ\text{C}$).

Ao analisar as Figuras 4.3 e 4.4 que representam as cinéticas de secagem numéricas obtidas através do Ansys CFX[®] e experimentais, percebeu-se que os resultados numéricos do teor de umidade no vazo vazado apresentaram excelente concordância com os valores experimentais reportado por Silva (2016). Observa-se que, no início do processo, há uma grande perda de umidade, principalmente, para as temperaturas de ar de secagem mais elevadas. É importante também salientar a importância do coeficiente de difusão em relação as condições do ar de secagem no processo, uma vez que quanto maior a temperatura, maior será o potencial de secagem, isto em um problema puramente difusivo e para situações onde a umidade relativa é menor que 100% (condição de saturação).

Pode-se perceber através das Figuras 4.3 e 4.4 que ao diminuir-se o coeficiente de difusão de transferência de massa, o processo de secagem tornou-se mais lento. Uma outra observação verificada é quanto ao erro obtido na comparação. Verifica-se que há certa discrepância entre os resultados, possivelmente devido a consideração do coeficiente de difusão constante adotado nesta pesquisa. Na prática, este parâmetro varia com a temperatura e teor de umidade do tubo.

As Figuras 4.5 - 4.6 ilustram, respectivamente, as cinéticas de secagem do tubo vazado para as temperaturas de ar de secagem de 80 e 90°C.

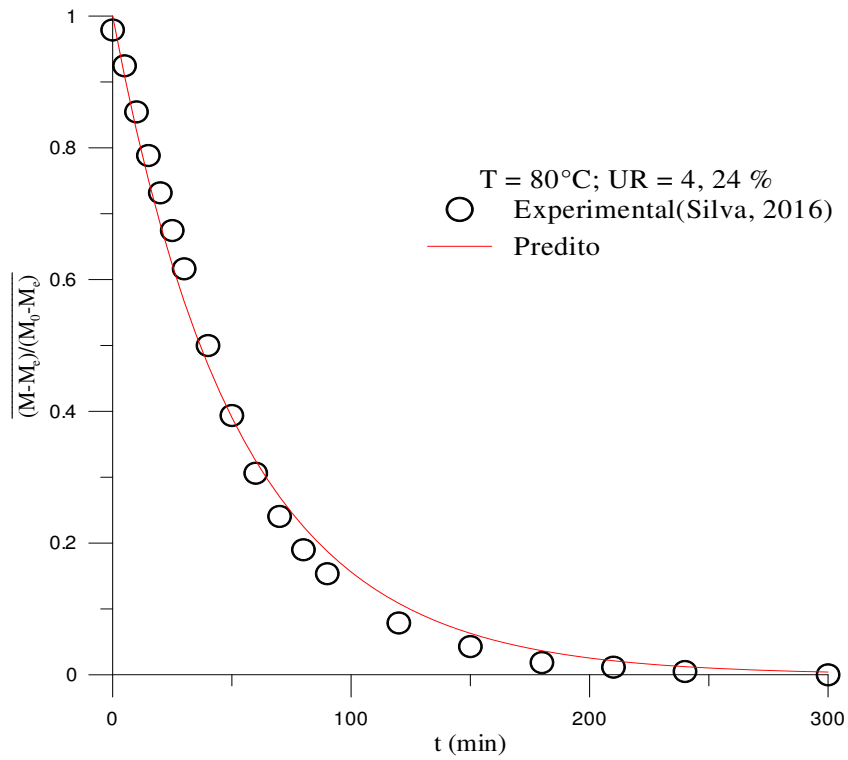


Figura 4.5 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo ($T=80^{\circ}\text{C}$).

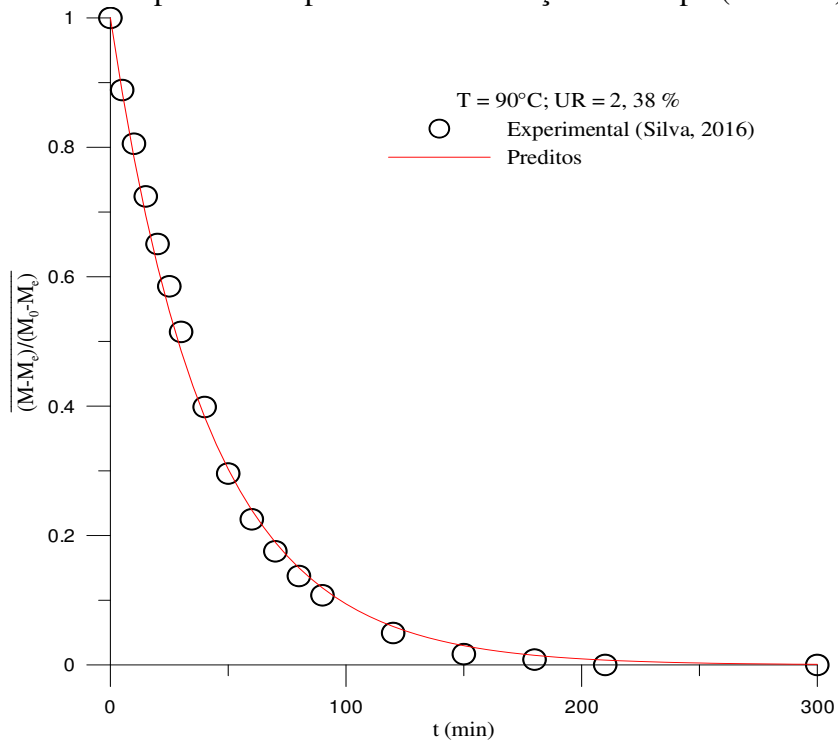


Figura 4.6 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo ($T=90^{\circ}\text{C}$).

Baseado nas Figuras 4.5 a 4.6 que representam as cinéticas de secagem numéricas obtidas através do Ansys CFX® e experimentais, foi possível analisar que o coeficiente de difusão encontrado por Silva 2016, não foi satisfatório em relação ao detectado neste trabalho, isso devido ao modelo utilizado por Silva ter sido um modelo concentrado que é de fato simplificado entretanto, a abordagem feita nesta pesquisa foi de fato um modelo generalizado ocasionando assim um coeficiente de difusão com características muito mais próximas da realidade.

A Figura 4.7 ilustra, a cinética de secagem do tubo vazado para a temperatura do ar de secagem de 100°C.

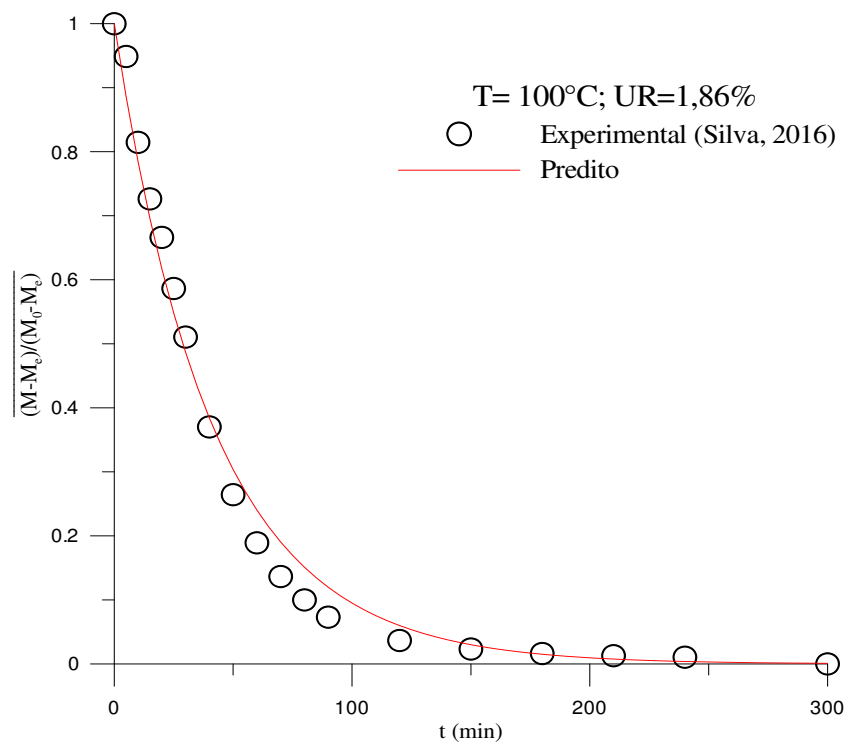


Figura 4.7 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo ($T=100^\circ\text{C}$).

Conforme a Figura 4.7 constata-se que não são recomendados altos gradientes térmicos ao longo do material, uma vez que isto produz uma secagem não uniforme e grandes tensões térmicas, hídricas e mecânica dentro do mesmo ocasionando trincas e deformação no produto comprometendo sua qualidade final no processo

Tendo em vista que os resultados obtidos para a cinética de secagem nas condições estabelecidas apresentaram-se coerentes com os dados experimentais, pode-se utilizar os

mesmos para obter a distribuição do teor de umidade no intuito de verificar a evolução do processo de secagem.

As Figuras 4.8 e 4.9 representam a distribuição do teor de umidade em diferentes planos transversais para quatro tempos distintos (5 s, 20 s, 75 s e 150 s), nas temperaturas do ar de secagem de 60 e 70°C. Como o processo de secagem para transferência de massa ocorre muito mais lento em relação à transferência de calor, o tempo para o tubo atingir o equilíbrio torna-se bem mais elevado.

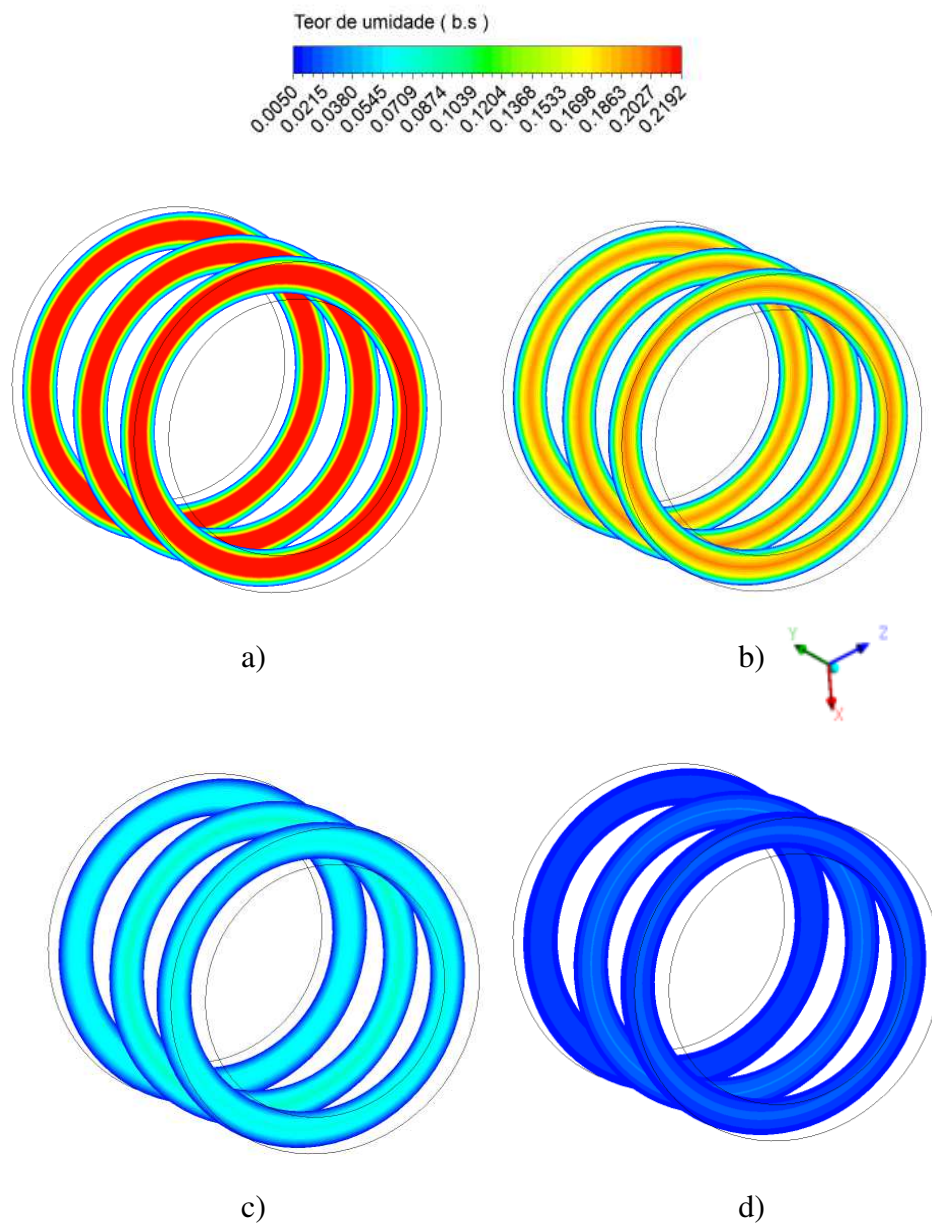


Figura 4.8– Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cerâmico vazado durante a secagem a $T= 60^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 20$ min, c) $t = 75$ min e d) $t = 150$ min

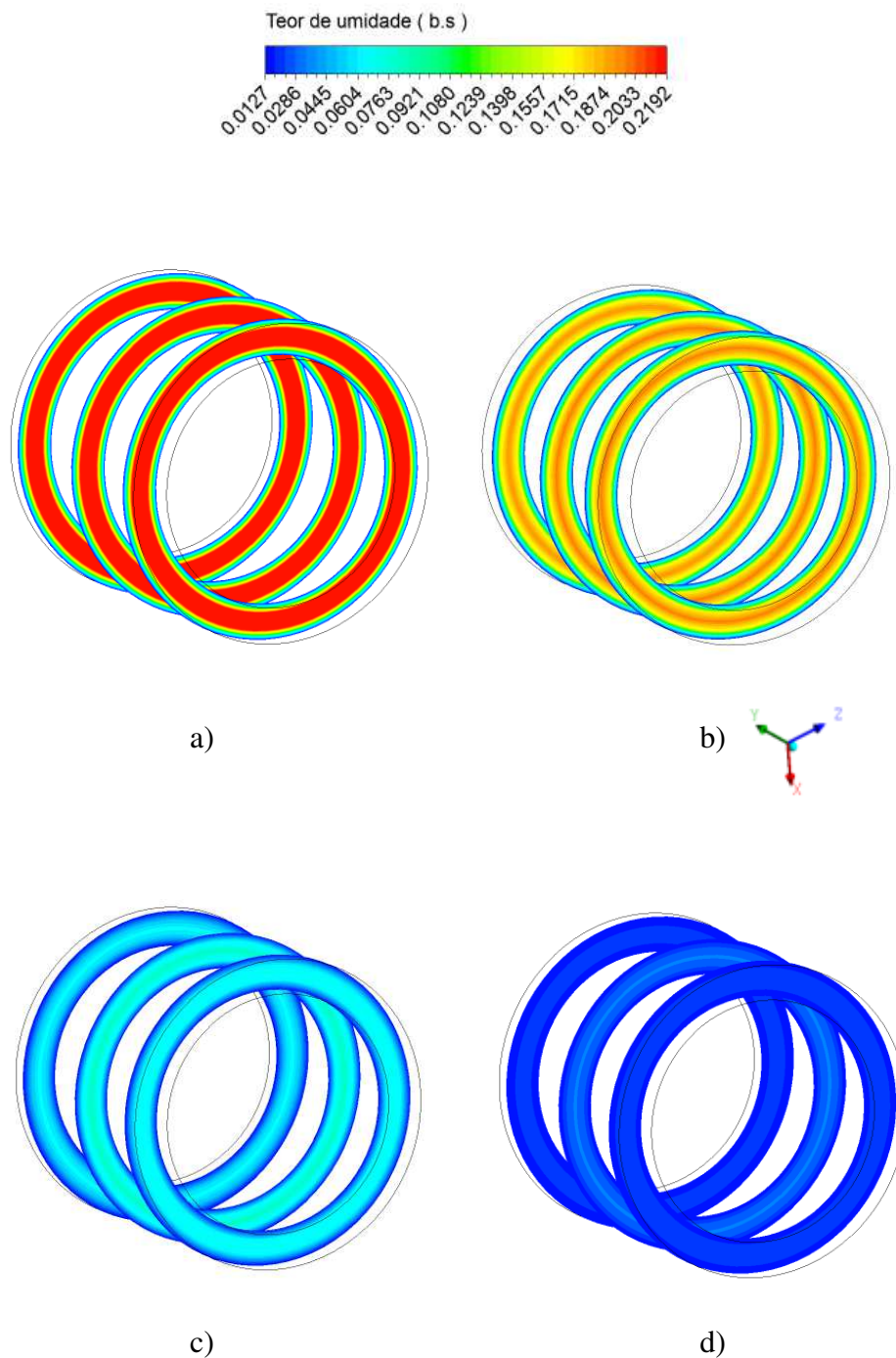


Figura 4.9 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cerâmico vazado durante a secagem a $T= 70^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 20$ min, c) $t = 75$ min e d) $t = 150$ min

Analisando os planos transversais do teor de umidade dentro do tubo vazado nas Figuras 4.8 e 4.9, observa-se que a secagem, nos tempos (5, 20, 75 e 150 min) ocorreu de forma não-homogênea. De forma específica com relação ao tempo de 150 s, nota-se que o teor de umidade

do sólido está próximo de atingir a condição de equilíbrio, isto é, a secagem do mesmo encontra-se quase completa. Quanto maior for o tempo de secagem, menor será a presença de gradientes de umidade no material e desta forma tem-se uma taxa de secagem mais lenta, tendendo para zero.

As Figuras 4.10 a 4.11 representam a distribuição do teor de umidade em diferentes planos transversais para quatro tempos distintos (5 s, 20 s, 75 s e 150 s), nas temperaturas do ar de secagem de 80 e 90°C

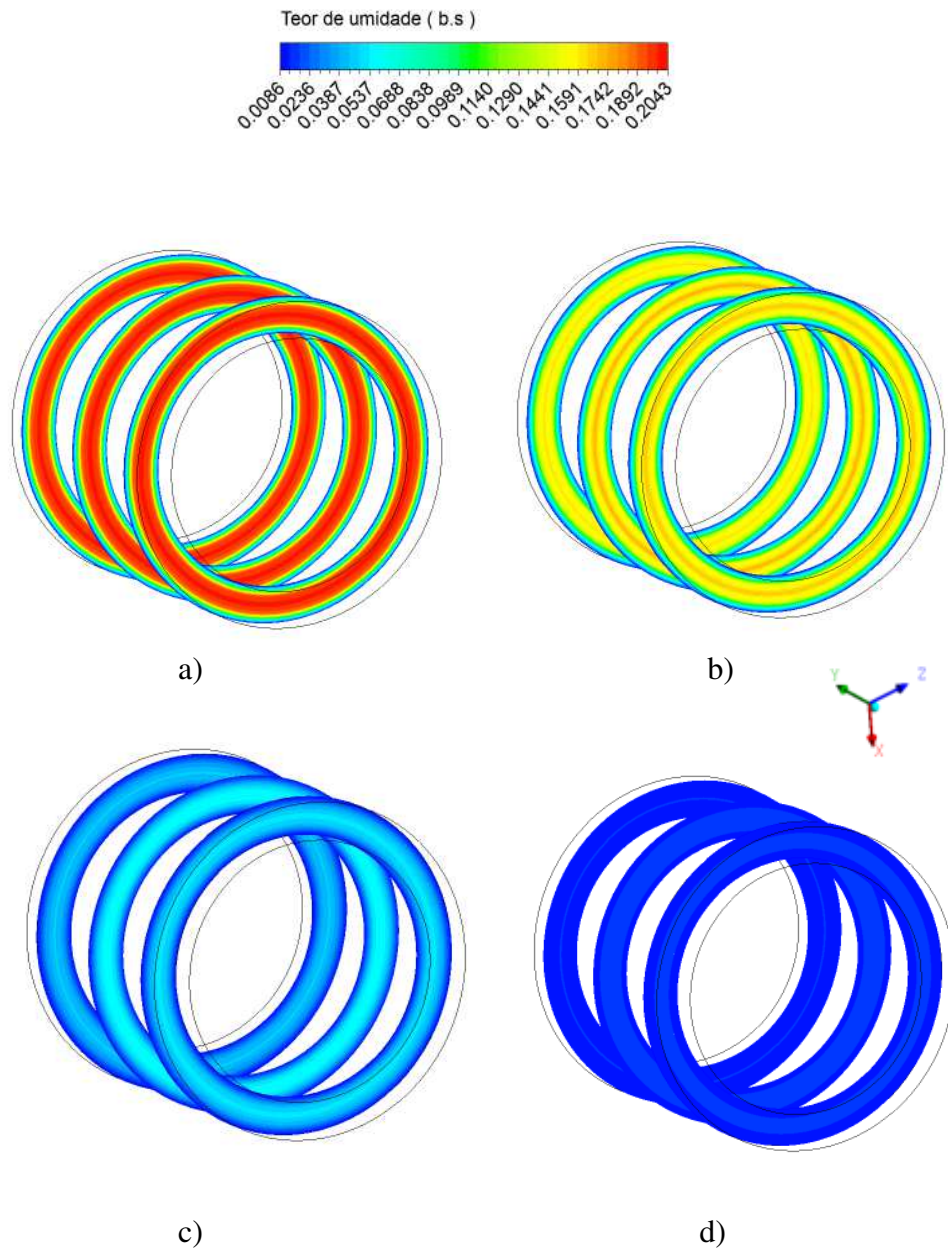


Figura 4.10 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cerâmico vazado durante a secagem a $T= 80^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 20$ min, c) $t = 75$ min e d) $t = 150$ min

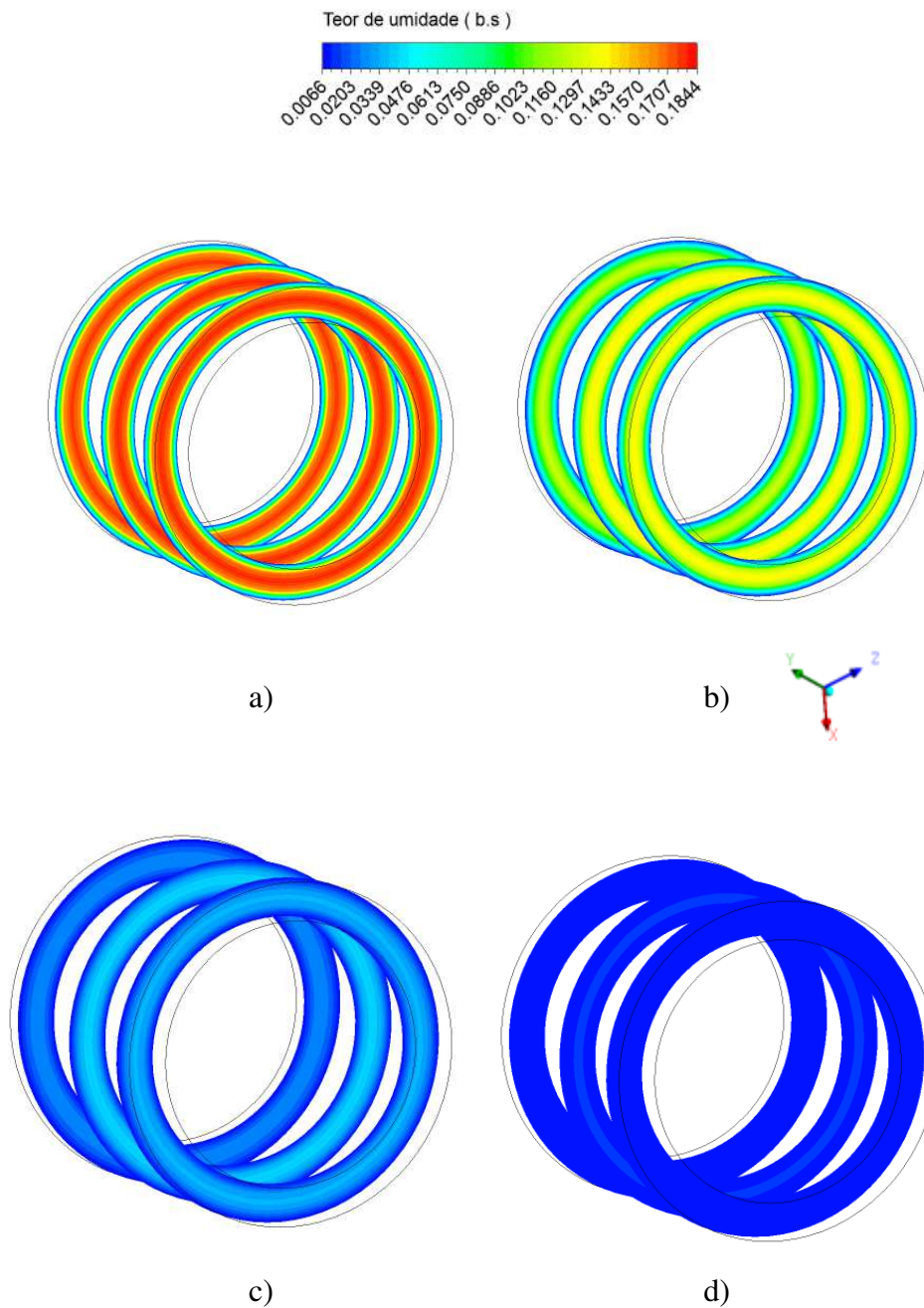


Figura 4.11 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cerâmico vazado durante a secagem a $T= 90^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 20$ min, c) $t = 75$ min e d) $t = 150$ min

Evidencia-se que a movimentação de líquido se processa de dentro para fora do tubo cilindro vazado, ou seja, o fluxo de umidade durante o processo de secagem ocorre do centro do material para a superfície do mesmo (Figuras 4.10 e 4.11).

Figura 4.12 que representa a distribuição do teor de umidade em diferentes planos transversais para quatro tempos distintos (5 s, 20 s, 75 s e 150 s), na temperatura do ar de secagem de 100°C

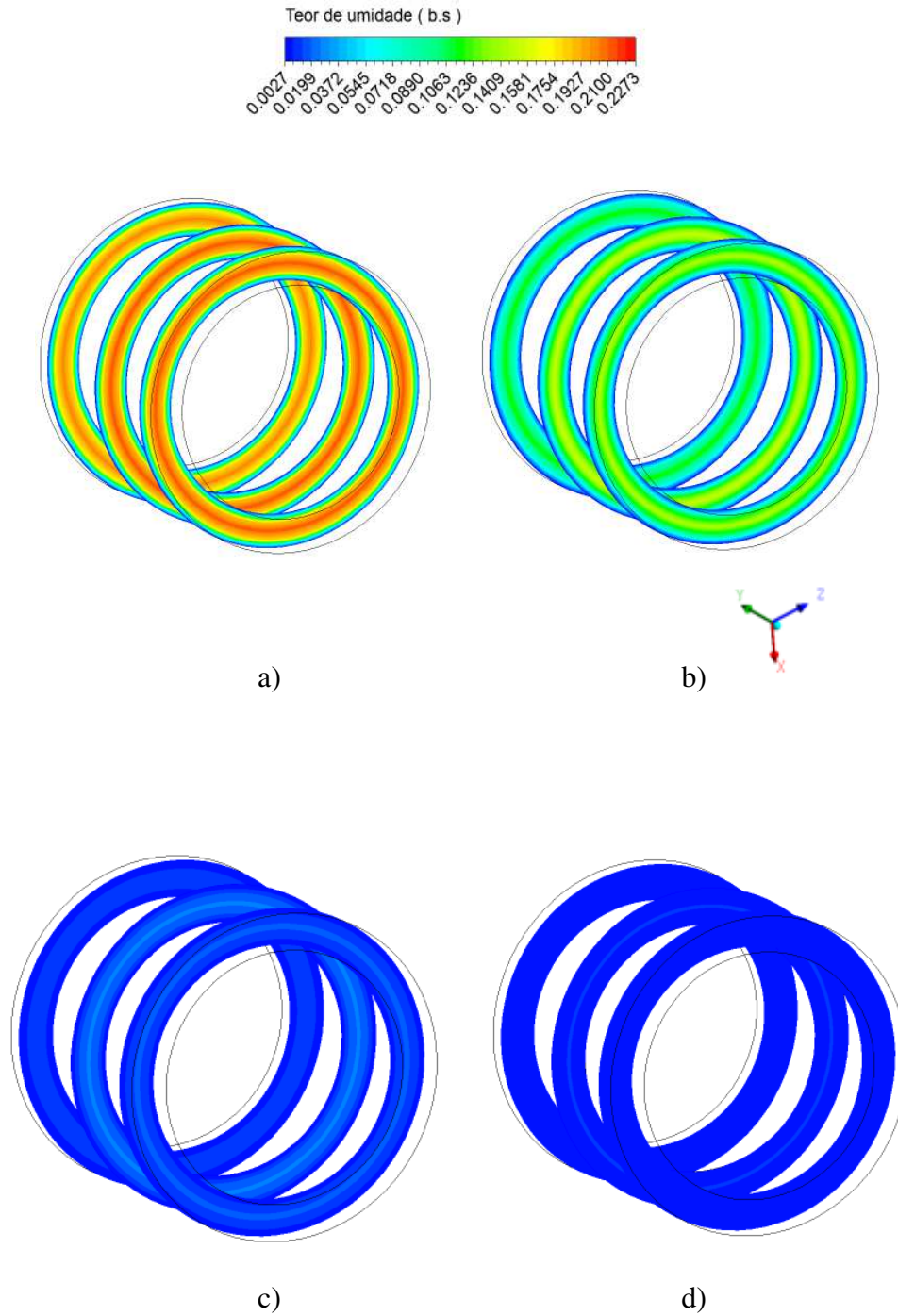


Figura 4.12– Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cerâmico vazado durante a secagem a $T= 100^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 20$ min, c) $t = 75$ min e d) $t = 150$ min

Analisando as Figuras (4.11 e 4.12) observa-se que o teor de umidade reduz-se mais rapidamente nas sólido extremidades do tubo, sendo essa região a mais propícia ao efeito de empenamentos do produto, devido aos elevados gradientes de umidade nesse local e à resistência ao movimento de líquido por difusão ser inferior nessas regiões. Porém, no centro do tubo (barra transversal), os teores de umidade reduzem-se lentamente.

Por conta de ter-se trabalhado com teores diferentes de umidade inicial para os experimentos de secagem dos tubos cerâmicos, não se observou na íntegra que com a elevação da temperatura do ar de secagem diminuir-se-ia o tempo para se atingir o teor de umidade comercial.

4.3.2 Tubo cilíndrico com barra transversal

As Figuras 4.13 a 4.14 ilustram, respectivamente, as cinéticas de secagem do tubo vazado com barra transversal para as temperaturas de ar de secagem de 60, 70°C

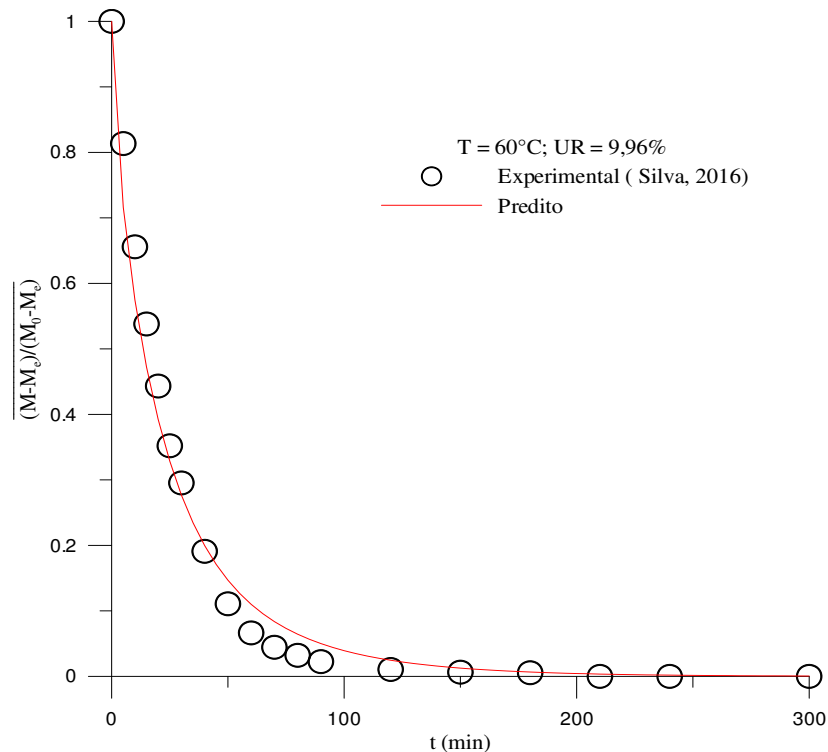


Figura 4.13 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, (T=60°C).

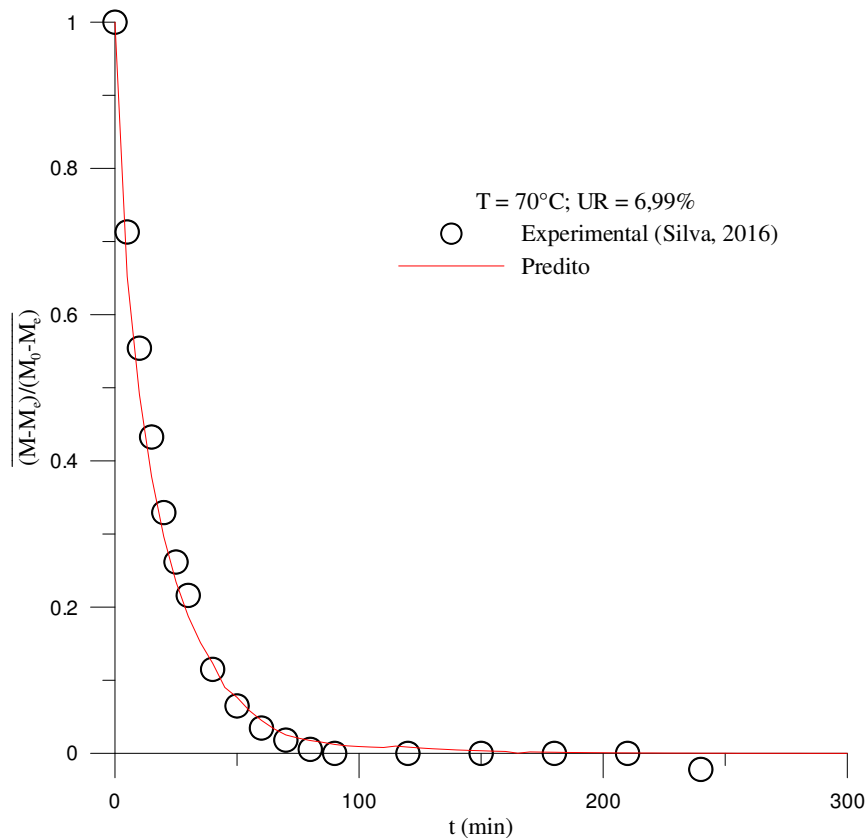


Figura 4.14 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, ($T = 70^\circ\text{C}$).

Baseado nas Figuras 4.13 a 4.14, das comparações das cinéticas de secagem numéricas obtidas através do Ansys CFX®, baseado na abordagem feita para o referente trabalho, ao observar o gráfico de cinética de secagem, torna-se perceptível que, os resultados numéricos do teor de umidade no vaso cilíndrico com barra transversal também apresentaram excelente concordância com os valores experimentais reportado por Silva (2016).

Comparando as validações, foi possível perceber que para o tubo cilindro vazado os ajustes de curva demonstraram uma resposta um pouco mais satisfatória em relação, as cinéticas de secagem do tubo cilindro com barra transversal, tal fato, justifica-se devido a geometria existir uma maior complexidade que é justamente a barra transversal

As Figuras 4.15 a 4.16 ilustram, respectivamente, as cinéticas de secagem do tubo vazado com barra transversal para as temperaturas de ar de secagem de $80, 90^\circ\text{C}$

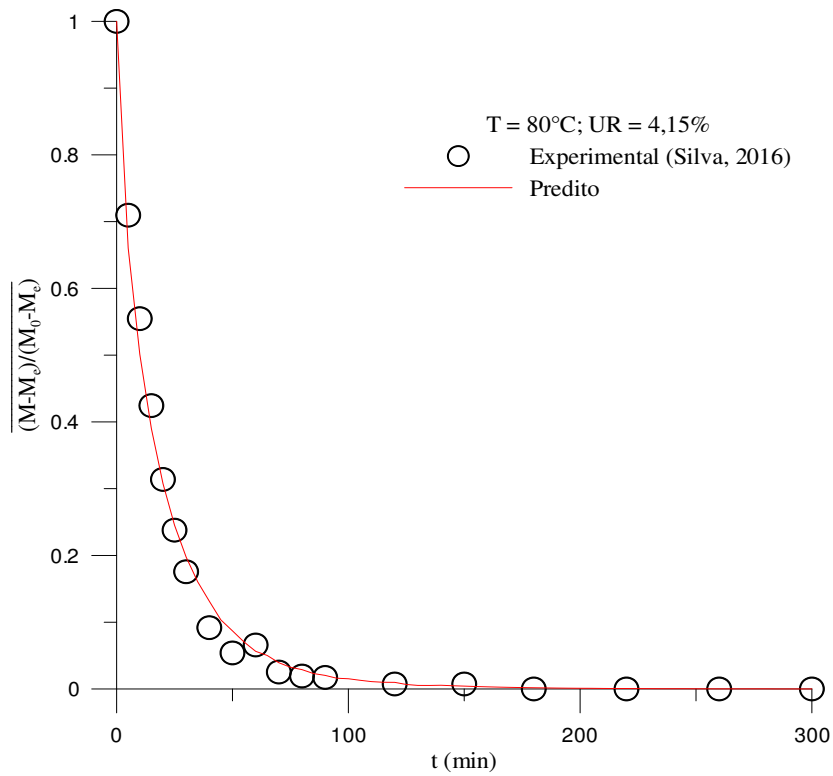


Figura 4.15 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, (T= 80°C).

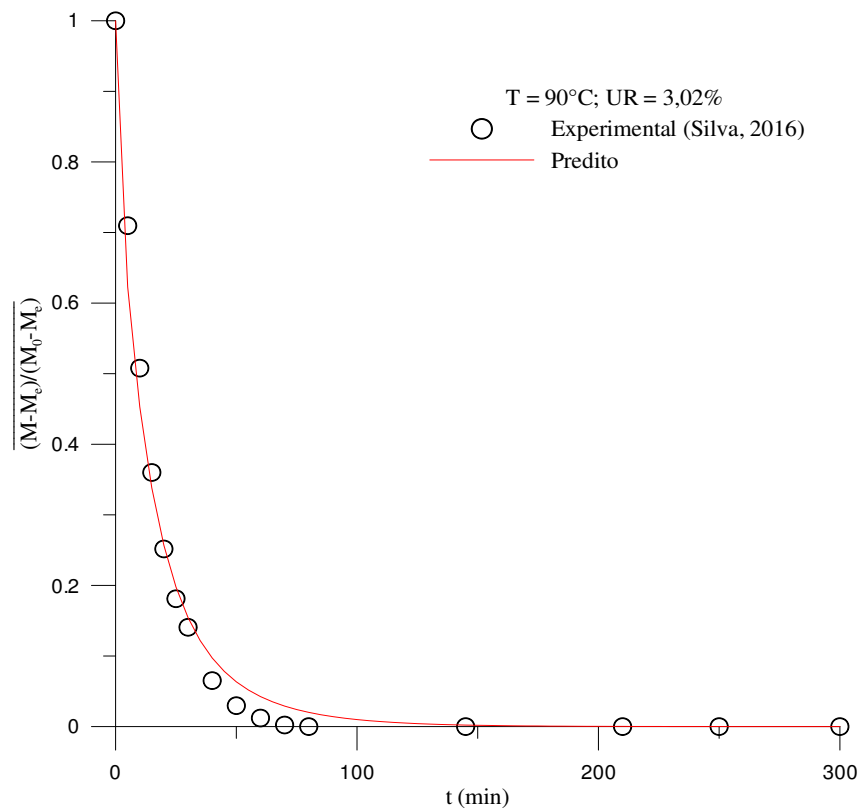


Figura 4.16 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, (T=90°C).

Conforme as Figuras 4.15 a 4.16 que representam as cinéticas de secagem numéricas obtidas através do ANSYS CFX® e experimentais, foi possível perceber que tanto para o tubo cilindro vazado quanto para o com barra os coeficientes de difusão mássica de Silva (2016) não foram satisfatório quando comparado com o deste trabalho, uma vez que o mesmo abordou um modelo generalizado ocasionando assim um coeficiente de difusão com características muito mais próximo da realidade.

Pode-se observar que a cinética de secagem é mais lenta para temperaturas menores do ar de secagem, o que possibilita alteração no teor de umidade de forma a atingir o teor de umidade comercial num maior tempo de secagem, não otimizando o processo de secagem do tubo vazado com barra transversal. Contudo vale salientar que temperaturas elevadas podem gerar danos ao produto afetando sua qualidade final (Figuras 4.15 a 4.16).

A Figura 4.17 ilustra, a cinética de secagem do tubo vazado com barra transversal para a temperatura do ar de secagem de 100°C

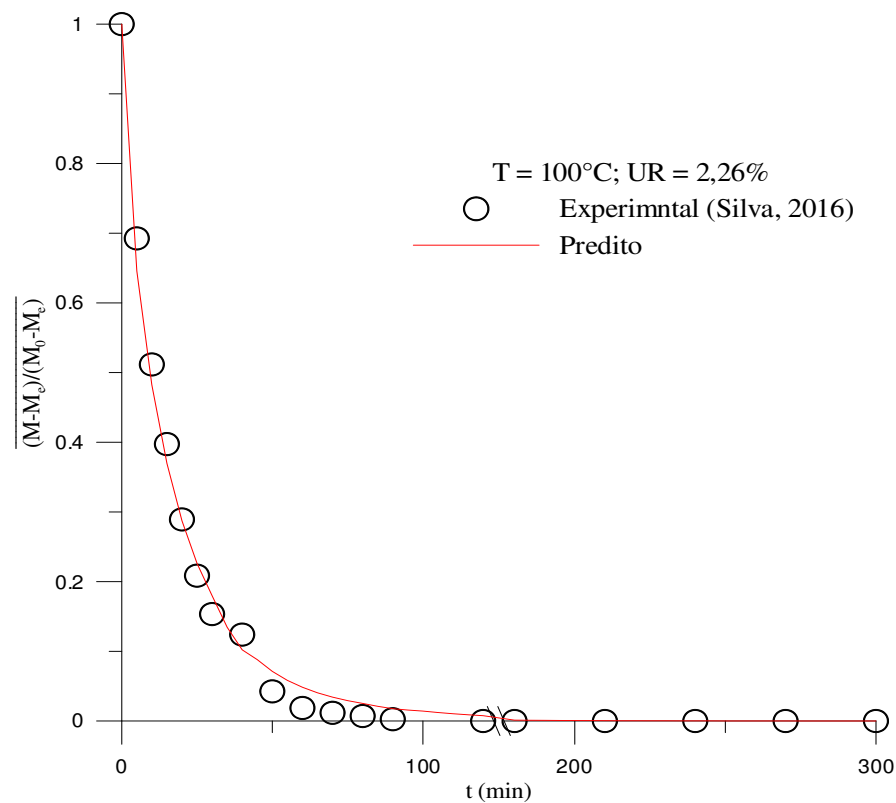


Figura 4.17 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional predito e experimental em função do tempo, (T= 100°C).

Analisando a figura 4.17, percebe-se que a forma geométrica teve grande influência na cinética de secagem. Sendo ela com barra transversal, certas dificuldades na circulação do ar de secagem em seu interior e a migração do teor de umidade do interior para a superfície será mais lenta. No entanto, o tempo de secagem foi baixo quando comparado aos tubos cilindros vazados, pois este tipo de geometria apresenta um menor número de massa conseqüentemente um volume inferior presente na composição da amostra.

Após a análise da Figura 4,17 constata-se que a influência da temperatura sobre a taxa de variação de umidade mantém uma relação diretamente proporcional, ou seja, a variação de umidade é diretamente proporcional com a variação de temperatura e inversamente proporcional com o tempo até os tubos cerâmicos argilosos atingirem a condição de umidade de equilíbrio durante o processo de secagem.

Segundo CARMO (2004) e OLIVEIRA (2006), o modelo que considera o fluxo de calor e massa acoplados resultam em um aquecimento mais lento para o sólido. Tais modelos podem ser usados para determinar o efeito da mudança de certos parâmetros na eficiência da secagem ou para minimizar os custos de operação do sistema.

Nestas circunstâncias, se o modelo considerar a difusividade de massa dependente da temperatura do sólido, o acoplamento entre calor e massa também apresentará considerada influência nos resultados da cinética de secagem. Assim, todos os trabalhos citados que usam os modelos concentrados supõem que o material é homogêneo, o que é irreal. No entanto, argumenta-se que não existe uma teoria satisfatória que permita prever com boa exatidão a resistência térmica de contato, nem estudos que forneçam correlações empíricas perfeitamente confiáveis.

De acordo com BROOKER et al. (1992) e PARK et al. (2007), o modelo que considera apenas a difusão líquida é uma simplificação para o movimento migratório da água no interior do material. Esse modelo, apesar de algumas críticas, vem ganhando a preferência de um grande número de pesquisadores na área de secagem de diferentes tipos de materiais.

As Figuras 4.18 a 4.19 ilustram os campos do teor de umidade em planos transversais da geometria do tubo cilíndrico vazado com barra transversal para diferentes tempos de

secagem nas temperaturas do ar de secagem de 60 e 70°C. Os planos expostos, mostram a diferença da distribuição do teor de umidade no interior do tubo em tempos distintos.

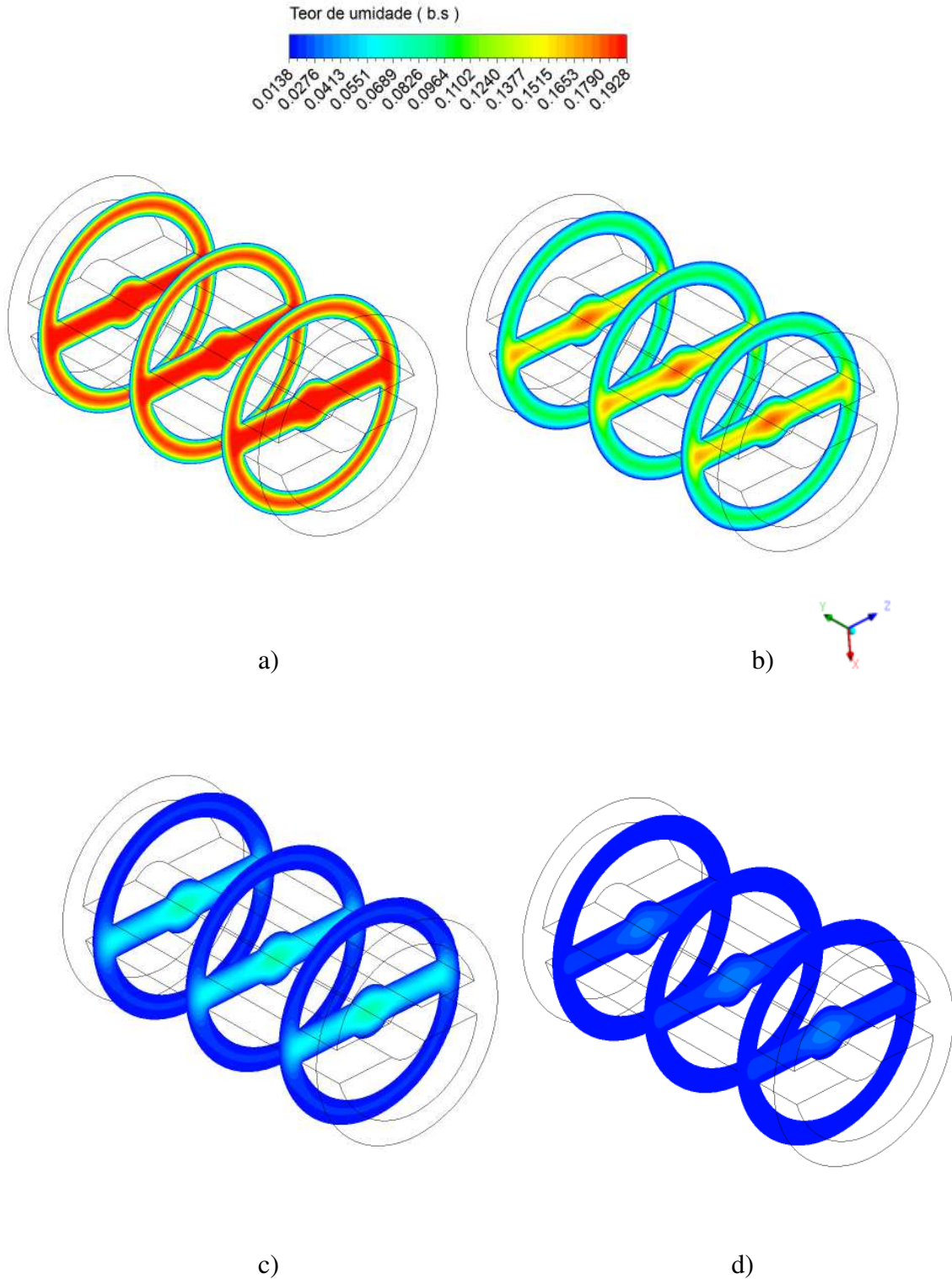


Figura 4.18 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal durante a secagem a $T= 60^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 20$ min, c) $t = 75$ min e d) $t = 150$ min.

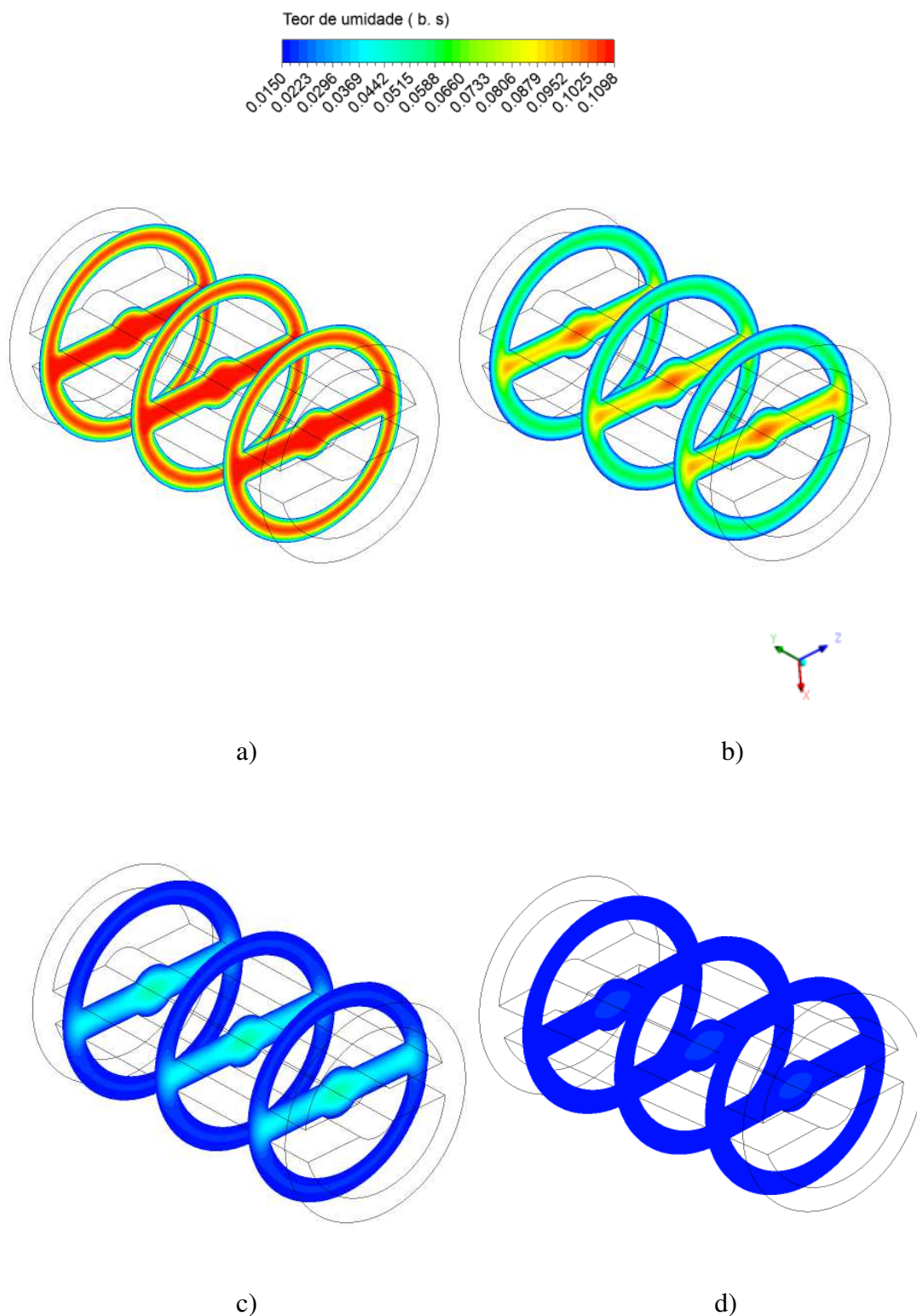


Figura 4.19 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal durante a secagem a $T = 70^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 20$ min, c) $t = 75$ min e d) $t = 150$ min.

Analisando as Figuras 4.18 e 4.19 percebe-se especificamente que as temperaturas do ar de secagem de 60 e 70°C , no núcleo do tubo cilindro com barra apresentam-se com maior

concentração de umidade fazendo com que o processo de secagem se torne mais lento. Isso implica dizer que, a temperatura do ar de secagem tem grande influência no resultado final do processo fazendo com que o tubo cilíndrico vazado com barra atinja o equilíbrio com mais rapidez.

As Figuras 4.20 e 4.21 ilustram os campos do teor de umidade em planos transversais da geometria do tubo cilíndrico vazado com barra transversal para quatro tempos distintos (5 s, 20 s, 75 s e 150 s), nas temperaturas do ar de secagem de 80 e 90°C

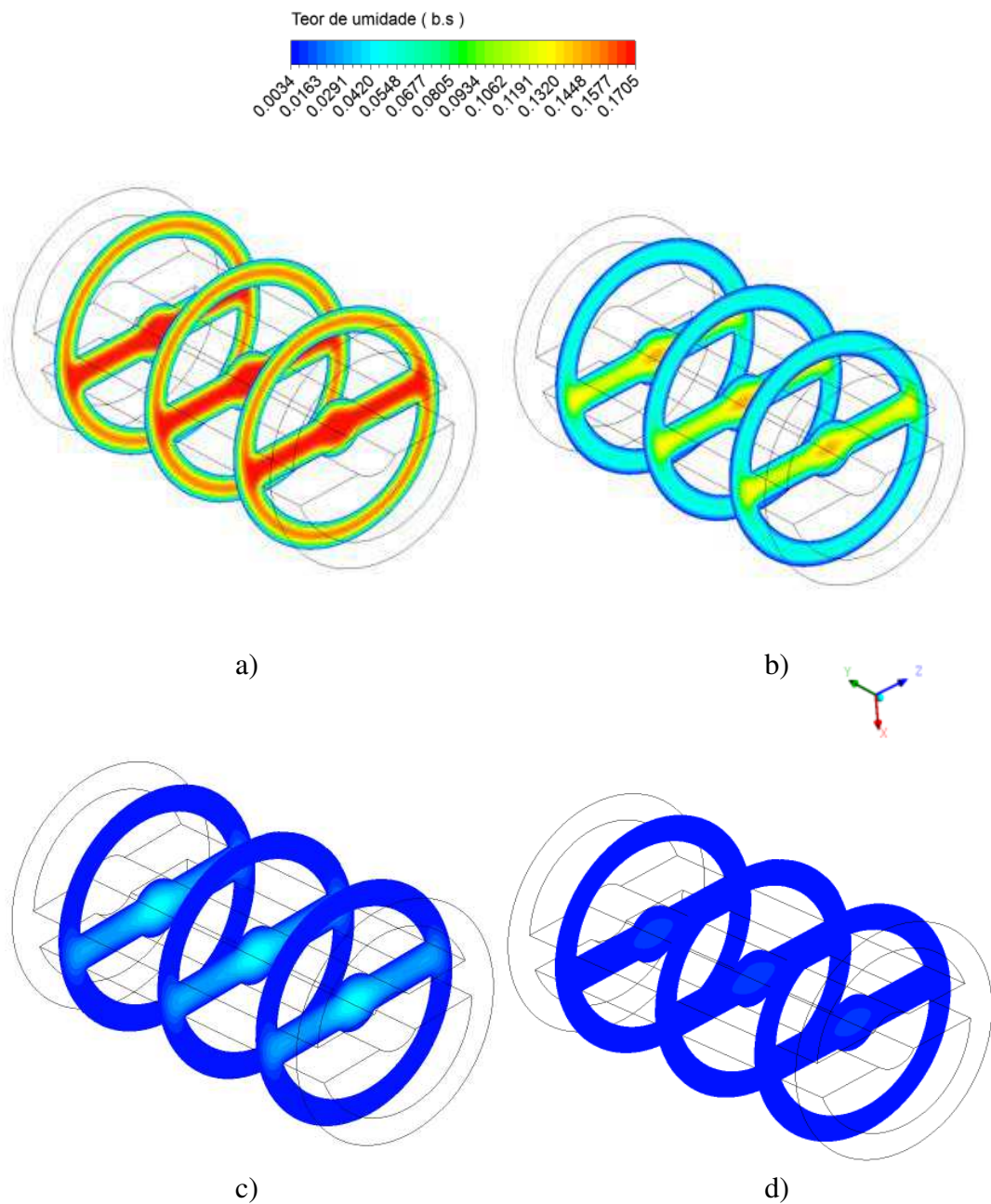


Figura 4.20 – Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal durante a secagem a $T = 80^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 20$ min, c) $t = 75$ min e d) $t = 150$ min.

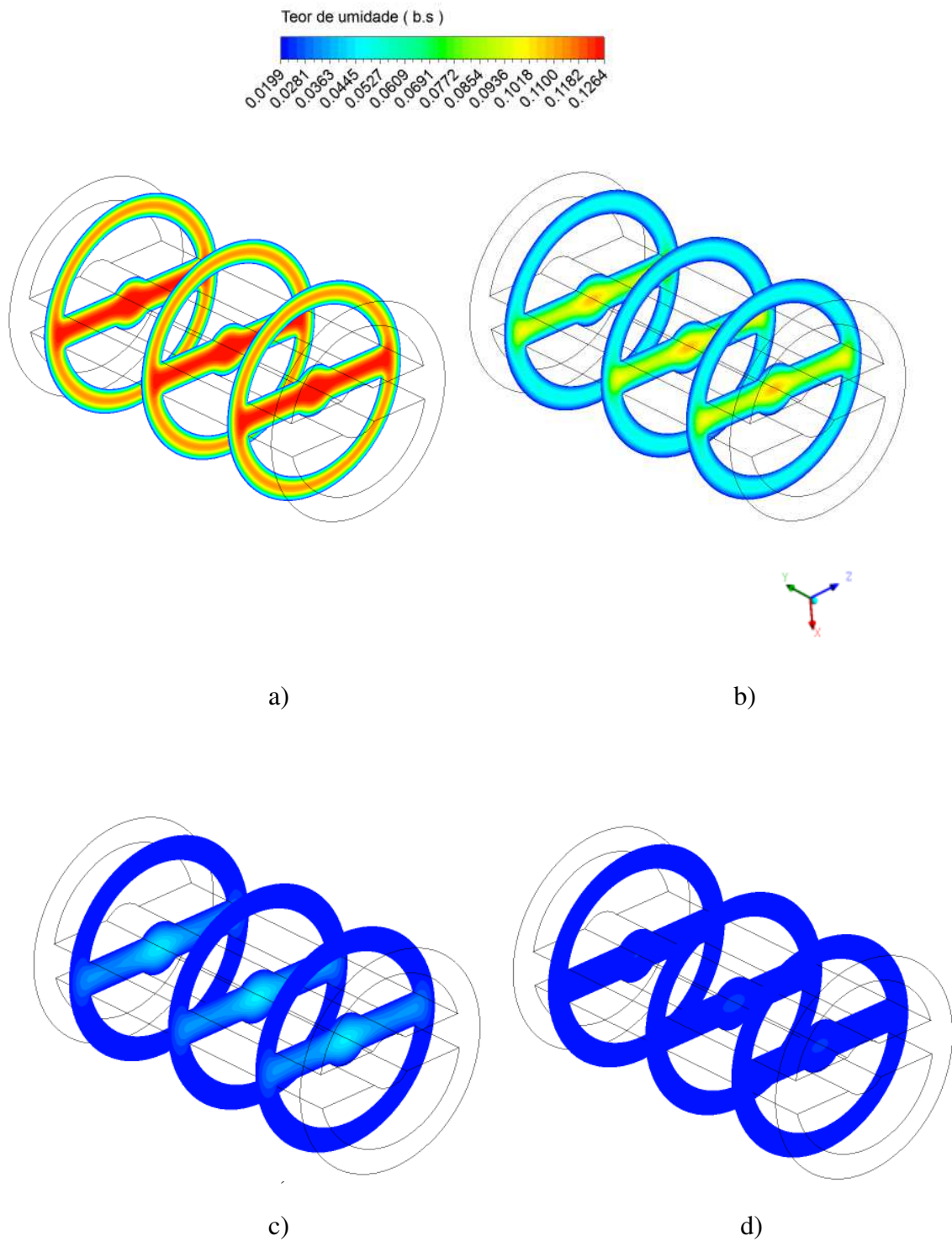


Figura 4.21– Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal durante a secagem a $T=90^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 20$ min, c) $t = 75$ min e d) $t = 150$ min.

Para o tempo 75 min (Figuras 4.20 - 4.21), pode-se notar que a secagem foi menos acentuada, mesmo apresentando um teor de umidade inicial diferente, este fato se explica devido ao tempo de secagem ser menor em relação ao tempo de 150 minutos onde o produto

encontra-se praticamente nas condição de umidade de equilíbrio durante o processo de secagem.

A Figura 4.22 ilustra os campos do teor de umidade em planos transversais da geometria do tubo cilíndrico vazado com barra transversal para quatro tempos distintos (5 s, 20 s, 75 s e 150 s), na temperatura do ar de secagem 100°C

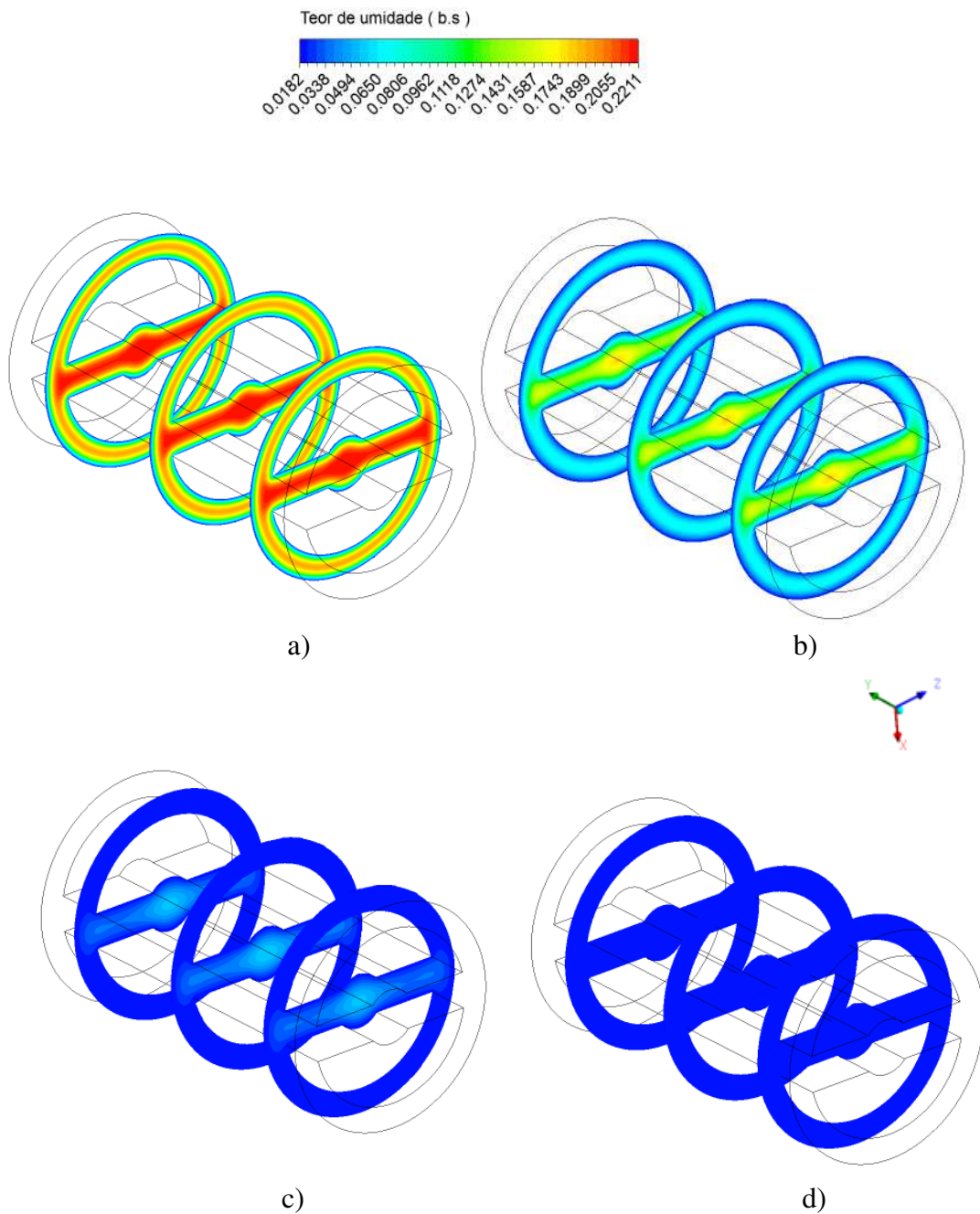


Figura 4.22– Distribuição do teor de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal durante a secagem a $T= 100^{\circ}\text{C}$, em quatro tempos diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 20$ min, c) $t = 75$ min e d) $t = 150$ min.

Pode ser observado na Figura 4.22 que, o teor de umidade decresce do centro para a superfície do tubo cilindro vazado com barra transversal e com o aumento do tempo de processo de secagem. Verifica-se ainda, que a secagem é mais rápida na área próxima da extremidade e que os maiores gradientes de umidade ocorrem nas proximidades da superfície do tubo, diminuindo com o aumento do tempo de secagem.

A partir das figuras do campo de teor de umidade no interior do tubo com barra transversal pode-se observar que no início da secagem ($t = 5$ min), os teores de umidade médios ainda relativamente alto para as temperaturas do ar de secagem de 60, 70, 80, 90 e 100°C. Já em $t = 150$ min, os teores de umidade médios foram se aproximando da umidade de equilíbrio.

❖ Fases de representação da secagem nos planos transversais

- i) Na primeira fase, observa-se que no início do processo de secagem ocorrem à adaptação do sólido às condições ambientais (temperatura e pressão), nas quais foram efetuadas a secagem
- ii) Na segunda fase do processo, inicia-se a evaporação da água livre mais próxima da superfície do material. Nesse momento, dependendo da temperatura e do tipo do material podem ocorrer variações sensíveis das dimensões do produto devido à sua microestrutura. Ainda nesta fase a água constantemente migra até a superfície do vaso, formando constantemente pequenas bolhas úmidas saturadas que então se evapora, tornando assim a velocidade de evaporação aproximadamente constante.
- iii) Na terceira fase ocorre o desaparecimento das bolhas de água na superfície do produto, que mudam de cor de fora para dentro do mesmo. Esta diminuição da quantidade de água que se desloca por capilaridade, ou difusão, acaba por formar vazios no interior e a quantidade de água evaporada decresce gradativamente, havendo uma conseqüente redução da velocidade de evaporação e de secagem devido à diminuição do gradiente hídrico.
- iv) Na última fase da secagem, acontece equilíbrio mássico. Ela informa qual é o limite do teor de umidade do nos vasos que pode ser obtido em função das condições da atmosfera secante (temperatura e umidade relativa do ar). Com elas, pode-se

estimar o tempo de secagem de certo produto, o que é de fundamental importância para o planejamento de produção.

4.3.3 Estimativa do coeficiente de difusão para os dois tubos cerâmicos

Os processos físicos de difusão de massa no interior dos tubos cerâmicos obedeceram às leis da conservação de massa. Modelos matemáticos são usados para descrever as características das cinéticas do processo de secagem, visando melhorar, projetar e controlar os sistemas de secagem. Nesta pesquisa, modelos baseados na análise distribuída foram usados para prever as secagens dos vasos estudados

4.3.4 Coeficientes de difusão do tubo cilindro vazado

Dentre os vários modelos foi considerado satisfatório para estimar as curvas de cinética de secagem em todas as temperaturas, apresentando os menores valores do erro mínimo quadrático.

A tabela 4.1 resume os parâmetros numéricos de secagem dos vaso cilindro vasado

Temperatura (°C)	Coeficiente de difusão D (10^{-9} m ² /s)	Erro mínimo quadrático
60°C	1,51	0,0001732
70°C	1,32	0,011206
80°C	1,305	0,0001278
90°C	1,66	0,00375664
100°C	1,655	0,00305

De acordo com a tabela 4.1 percebe-se que à medida que a temperatura do ar de secagem aumenta, o coeficiente de difusão diminui. Baseando-se ainda na Tabela 4.1 foi possível perceber que especificamente para as temperaturas de 70 e 80 °C esse fato não ocorreu, uma vez que, tal fato justifica-se porque os teores de umidades iniciais foram diferentes em todas as temperaturas.

4.3.5 coeficiente difusão do tubo cilindro com barra transversal

Já para o cilíndrico com barra transversal foi considerado satisfatório os menores valores do erro mínimo quadrático.

A tabela 4.2 resume os parâmetros numéricos de secagem dos vaso cilindro vasado com barra transversal

Temperatura (°C)	Coeficiente de difusão D (10^{-9} m ² /s)	Erro mínimo quadrático
60°C	0,90	0,01508
70°C	1,26	0,001134
80°C	1,212	$4,45 \times 10^{-6}$
90°C	1,44	0,003059
100°C	1,3	0,006405

Baseando-se na Tabela 3.3 foi possível perceber que à medida que o coeficiente de difusão diminui a temperatura do ar de secagem elevou-se, ou seja, o tubo vazado com barra transversal apresentou características idênticas em relação ao tubo vazado a diferença foi apenas nas temperaturas de 80 e 100°C.

4.4 Transferências de calor nos tubos argilosos

Em termos de aplicação da metodologia para a geometria arbitrária, utilizou-se dados específicos de cerâmica para verificar a transferência de calor nos sólidos com a condição de contorno de primeira espécie na superfície de separação entre o produto e o ar de secagem. De posse dos valores para as propriedades do tubos e do ar de secagem, foi possível então realizar a simulação. Foram obtidos os resultados necessários para a construção dos gráficos de cinética de aquecimento e distribuição de temperatura para quatro tempos distintos.

Desta forma a mesma análise pode ser feita para os coeficientes de transporte. Quando o tubo entra em equilíbrio térmico com o ar de secagem, o processo de transferência de massa no interior do tubo vazado continua a ocorrer, porém de forma isotérmica. Diversos pesquisadores estudaram o comportamento dessa propriedade térmica com a variação do teor de umidade de

vários materiais e observaram existir uma relação em que o aumento do teor de umidade provoca elevação dos valores de calor específico (ANDRADE et al. 2004).

4.4.1 Tubo cilindro vazado

A Figura 4.23 ilustra o valor da temperatura média no tubo cilindro vazado versus tempo para (60, 70, 80, 90 e 100°C) temperaturas do ar de secagem.

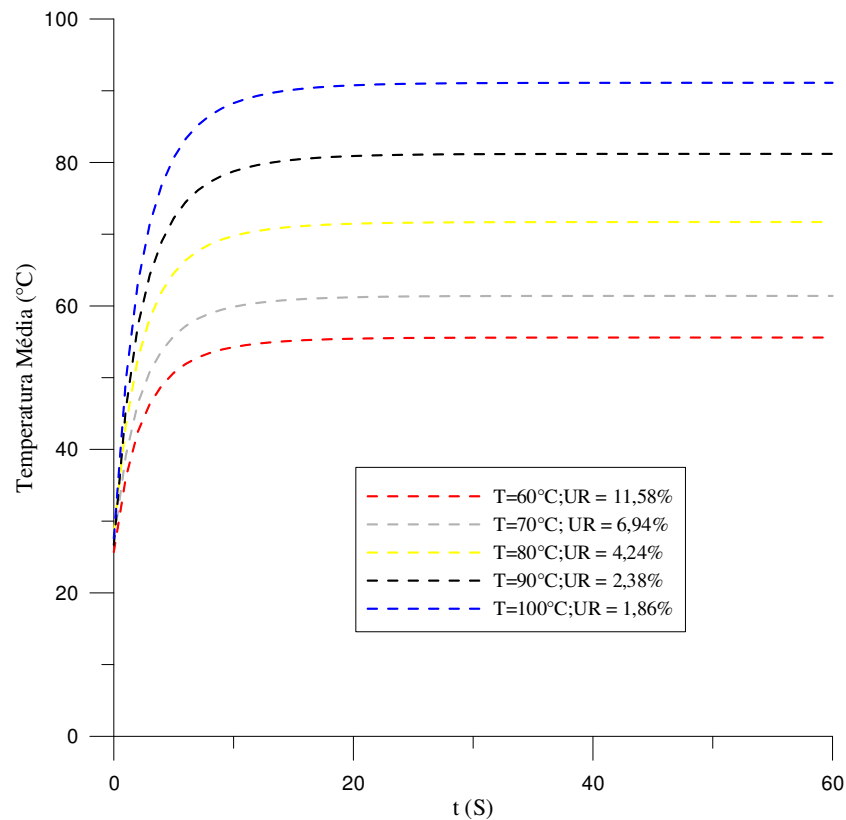


Figura 4.23 - Temperatura média do tubo vazado versus tempo para cinco temperaturas de ar de secagem.

Baseado na Figura 4.23, foi possível observar que a temperatura no tubo vazado aumentou rapidamente, isto é, aconteceu em um curto período de tempo até atingir o equilíbrio térmico no tempo decorrido de aproximadamente 20 segundos, para todas as condições de secagem.

A partir da análise da Figura 4.23, constata-se que o tubo atinge o equilíbrio térmico mais rapidamente para a temperatura do ar de secagem mais próximo da temperatura inicial no tubo vazado, que no nosso caso foi a temperatura do ar de secagem de 60°C.

As Figuras 4.24 e 4.25 representam a distribuição de temperatura no interior do tubo vazado para quatro instantes de secagem ($T = 60$ e 70°C).

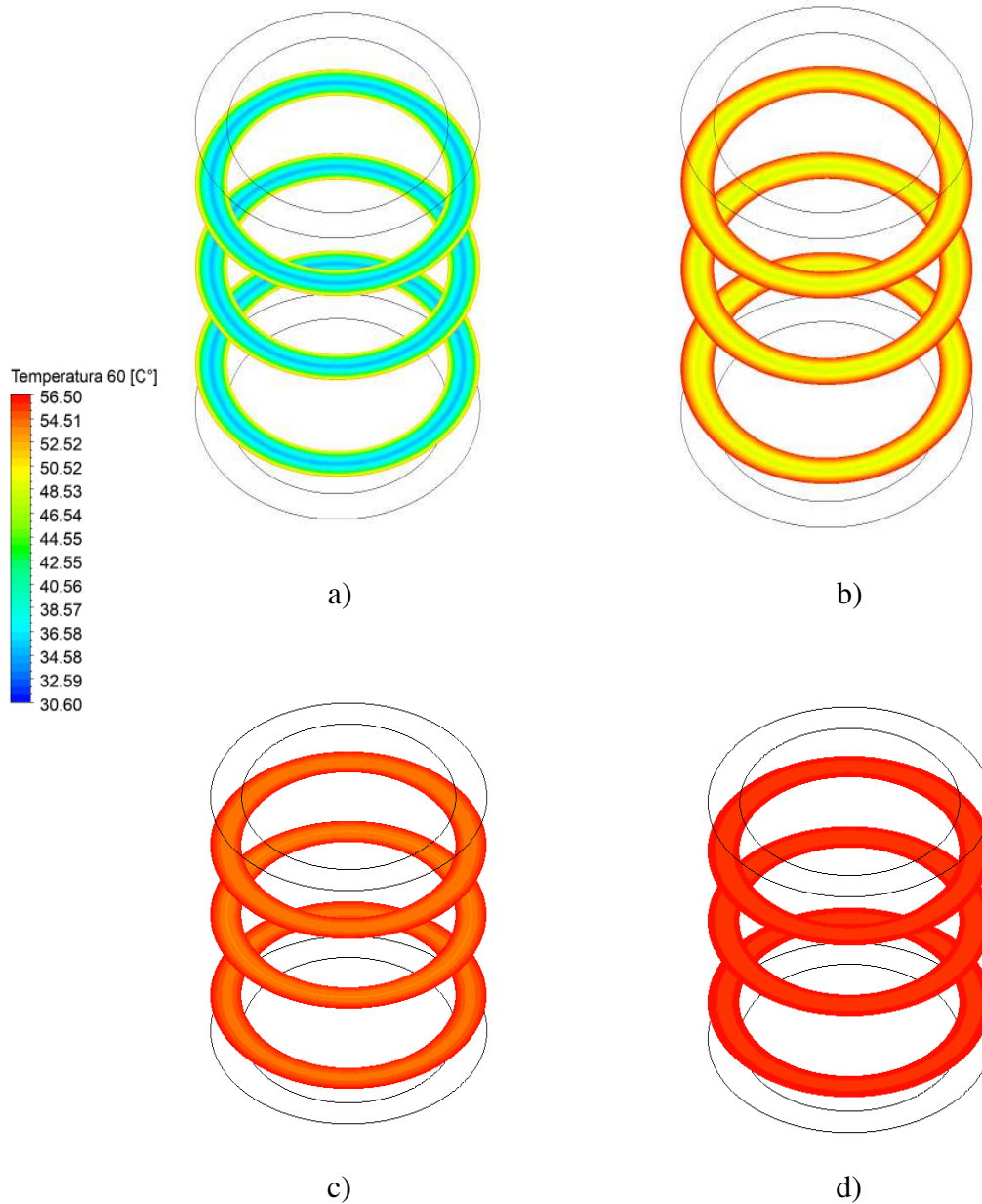


Figura 4.24 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do tubo vazado em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 15$ min, c) $t = 25$ min e d) $t = 35$ min.

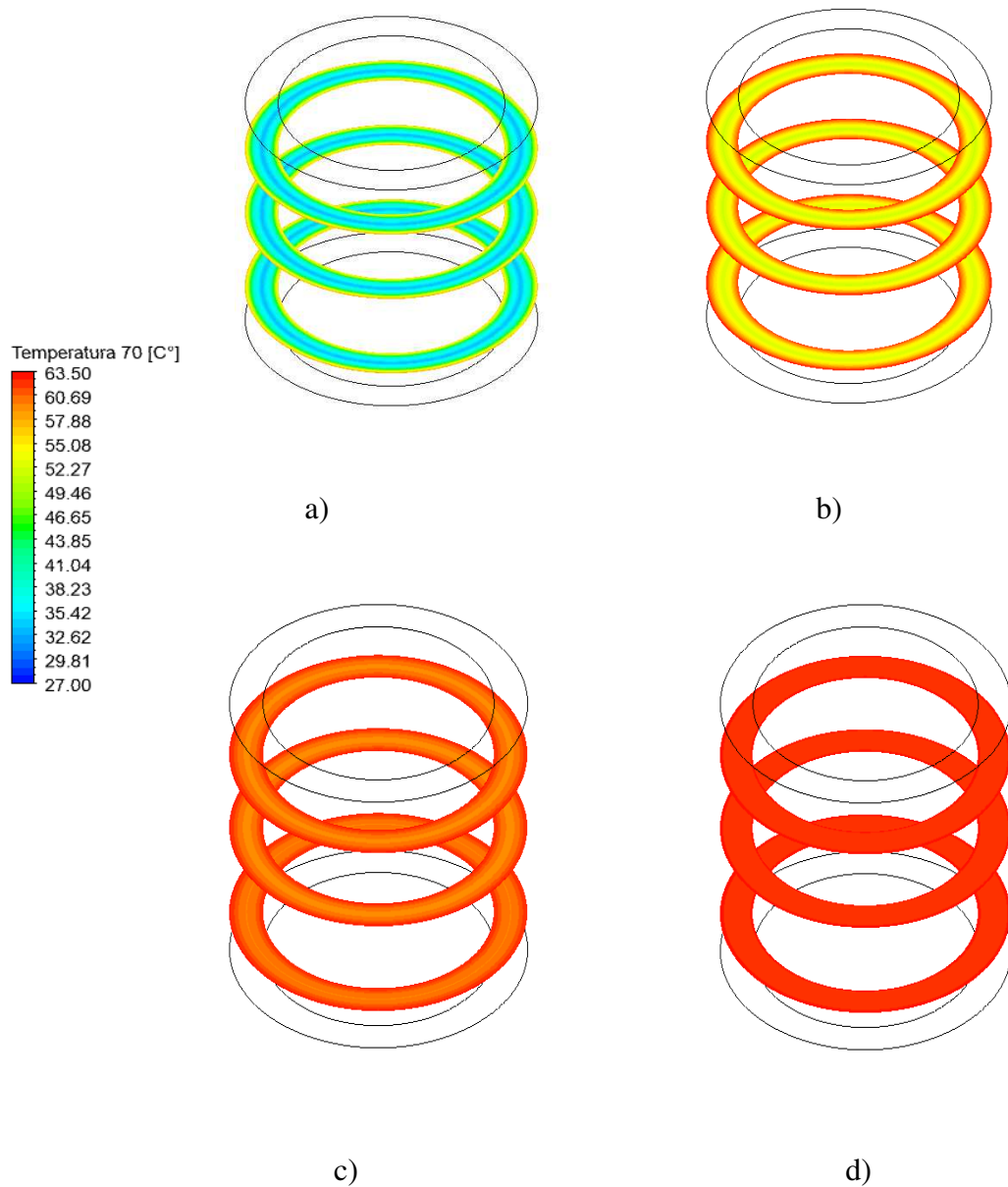


Figura 4.25 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do tubo vazado em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 15\text{min}$, c) $t = 25\text{ min}$ e d) $t = 35\text{ min}$.

Percebe-se que a temperatura decresce da superfície para o centro do tubo à medida que o tempo se eleva durante o processo de secagem. Verifica-se ainda que os maiores gradientes ocorram nas proximidades da superfície do tubo, tendendo a uma temperatura de equilíbrio com o aumento do tempo de secagem (Figuras 4.24 e 4.25).

As Figuras 4.26 e 4.27 representam a distribuição de temperatura no interior do tubo vazado para quatro instantes de secagem ($T = 80$ e 90°C).

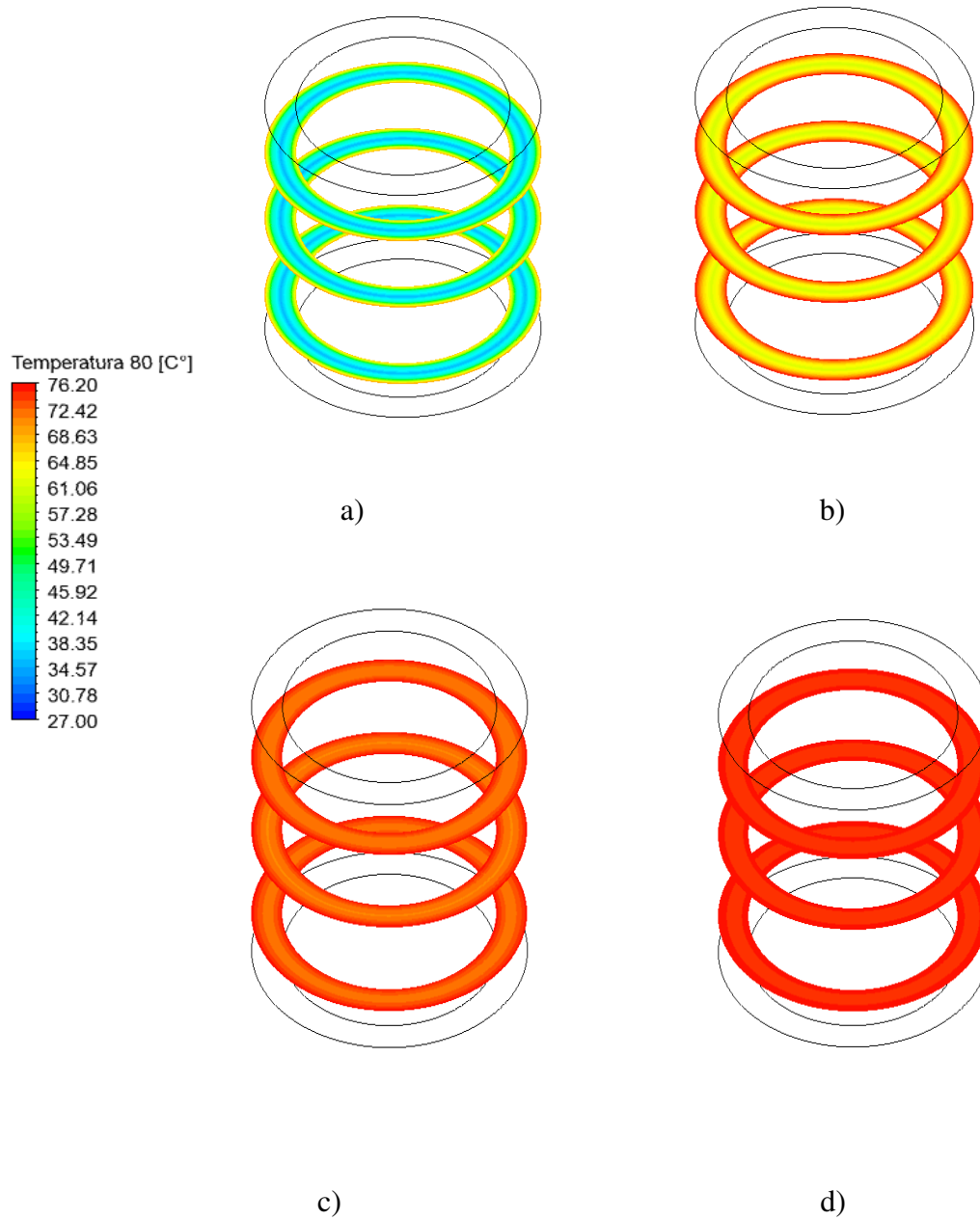


Figura 4.26 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do tubo vazado em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 15$ min, c) $t = 25$ min e d) $t = 35$ min.

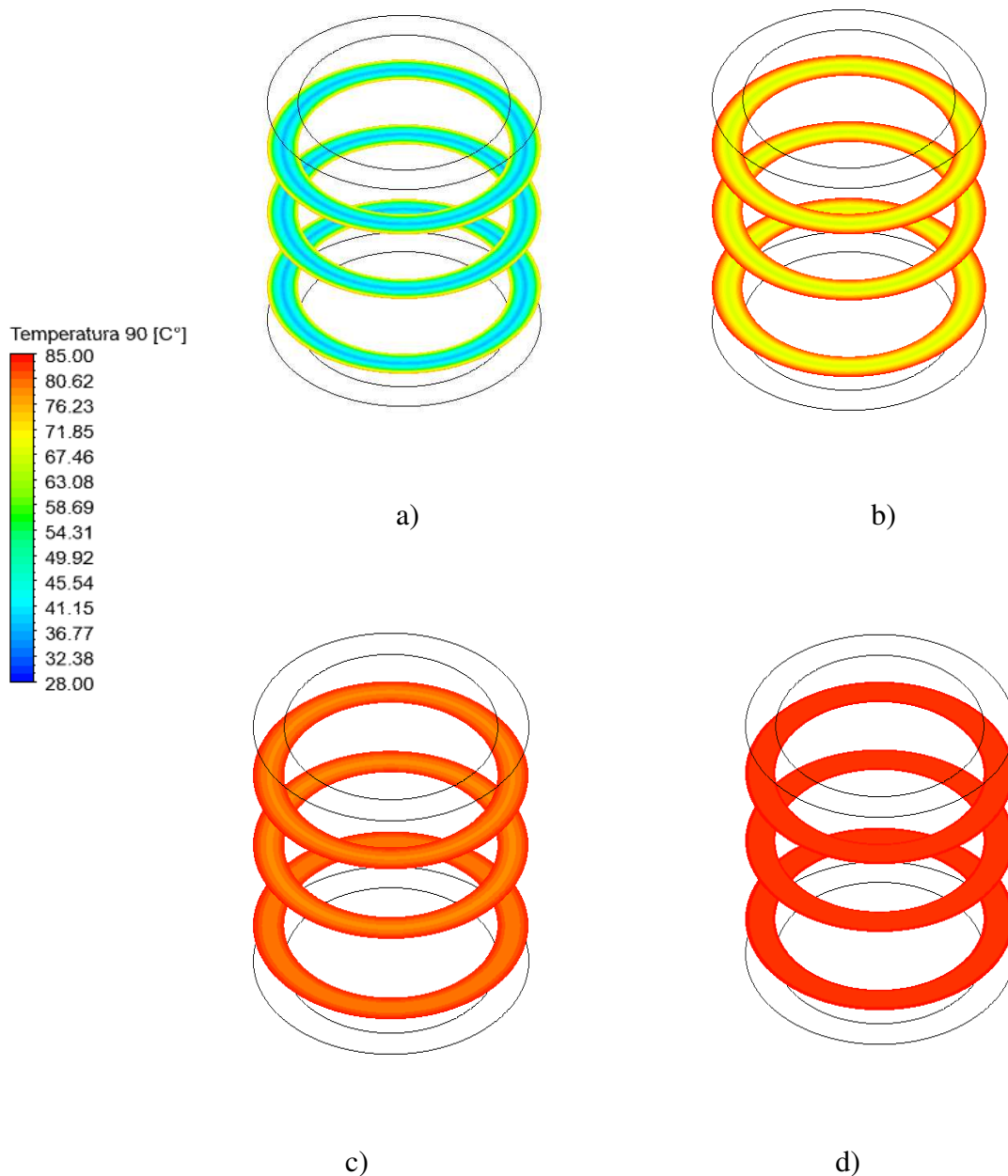


Figura 4.27 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do tubo vazado em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 15\text{min}$, c) $t = 25\text{ min}$ e d) $t = 35\text{ min}$.

Analisando as Figuras 4.26 e 4.27 pode-se deduzir que, após 15 minutos, a secagem ainda não ocorreu em todo tubo vazado. Contudo, o centro do tubo ainda não atingiu a temperatura de equilíbrio. Considerando as camadas mais próximas da superfície do tubo, percebe-se que existem diferentes camadas com temperaturas diferentes no interior do mesmo.

A Figura 4.28 representa a distribuição de temperatura no interior do tubo vazado para quatro instantes de secagem ($T = 100^{\circ}\text{C}$).

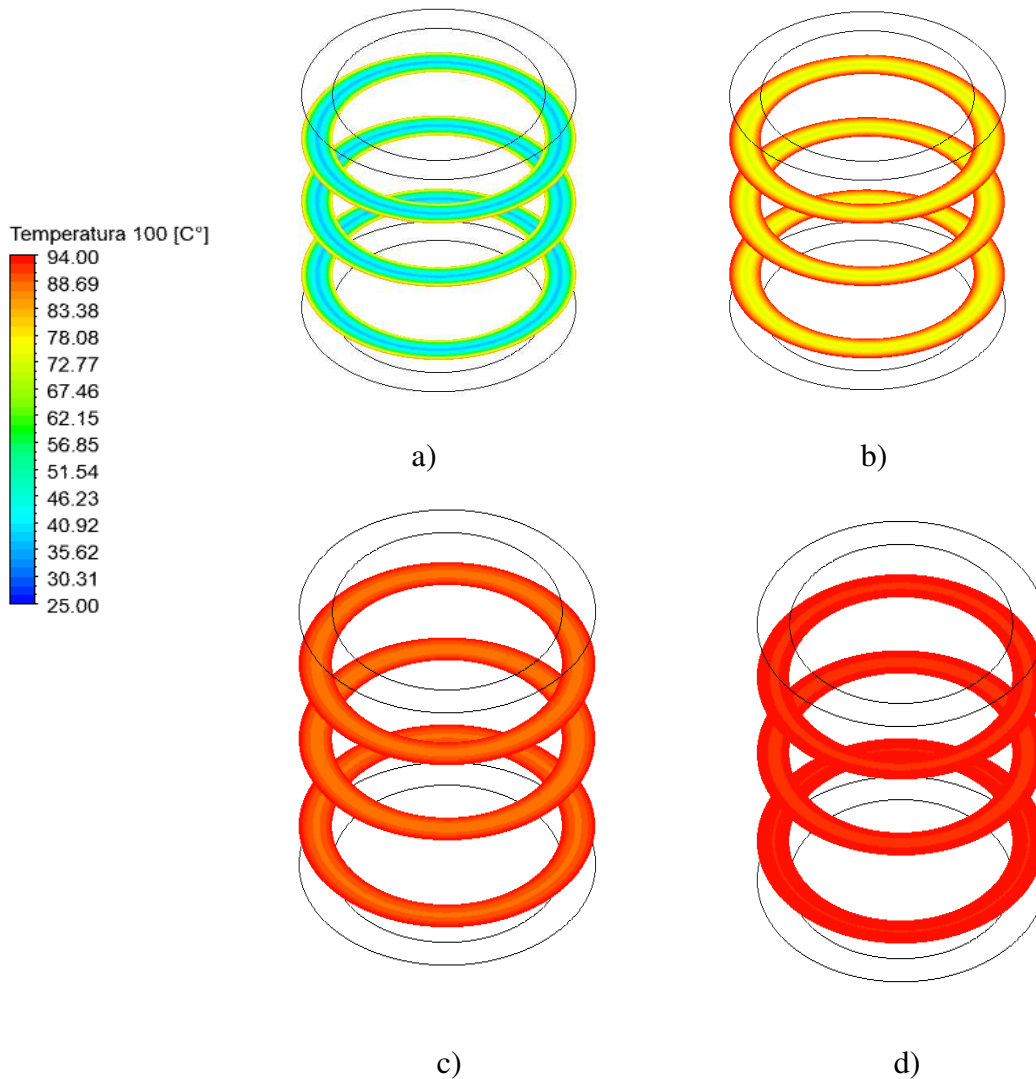


Figura 4.28 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do tubo vazado em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 15\text{min}$, c) $t = 25\text{min}$ e d) $t = 35\text{min}$.

Constata-se na Figura 4.29, que após 25 minutos, o tubo está próximo de atingir o equilíbrio térmico, equilíbrio este mostrado por um plano transversal. Conforme a representação gráfica pode-se perceber que esse intervalo de tempo não foi suficiente para secar completamente o produto, pelo contrário a secagem ainda está acontecendo de fato.

4.4.2 Tubo cilindro vazado com barra transversal

Figura 4.29 ilustra o valor da temperatura média no tubo cilindro com barra transversal versus tempo para (60, 70, 80, 90 e 100°C) temperaturas do ar de secagem.

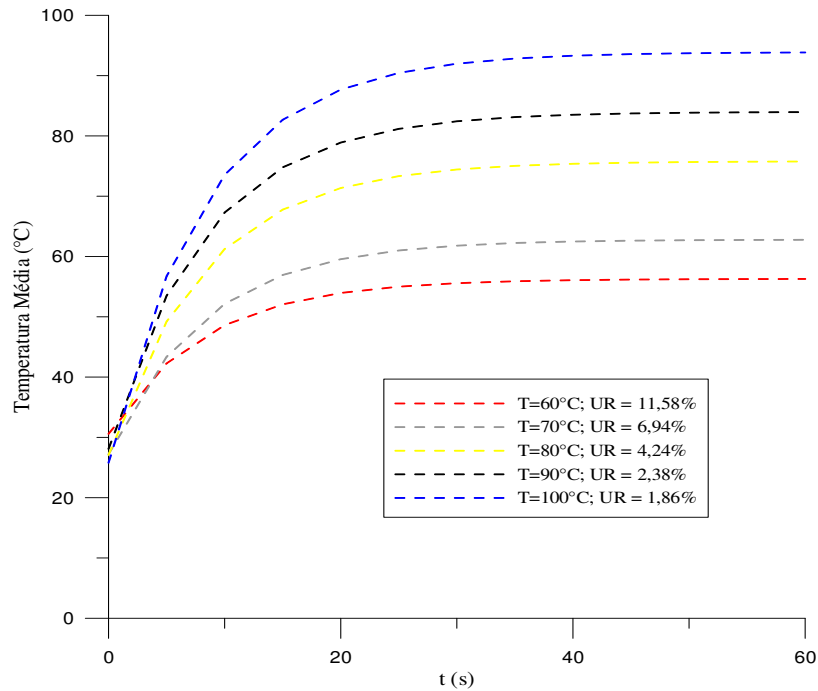


Figura 4.29 - Temperatura média do tubo vazado com barra transversal versus tempo para cinco temperaturas de ar de secagem.

Conforme a Figura 4.29 foi possível observar que a temperatura no tubo com barra transversal não aumentou rapidamente, isto é, aconteceu um período de tempo maior até atingir o equilíbrio térmico no tempo decorrido de aproximadamente 40 segundos, para todas as condições de secagem, tal fato se deve justamente a relação área / volume do tubo cilindro com barra ser maior quando comparado ao tubo vazado.

Com base nas cinéticas de aquecimento representadas na Figura 4.29, nota-se, que a transferência de calor acontece mais rapidamente se comparada à transferência de massa, elevando a temperatura do tubo num menor tempo. Tal comportamento se deve ao fato de que a difusividade térmica dos tubos é muito maior do que a difusividade de massa, α/D , sendo $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$.

Os processos físicos de transferência de calor no interior dos tubos cerâmicos argilosos obedeceram à lei de Fourier para os modelos matemático e as seguintes condições do ar de secagem e temperatura nos tubos foram utilizadas, conforme a tabela 4.3

Tabela 4.3 Parâmetros termofísicos usado nas simulações nos tubos cerâmicos argilosos

Temperatura do ar	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg.K)	K (W/m. K)	α (m ² /s)10 ⁻⁷
60°C	2100	1064000	1,13	5,05729
70°C	2100	1064000	1,13	5,05729
80°C	2100	1064000	1,13	5,05729
90°C	2100	1064000	1,13	5,05729
100°C	2100	1064000	1,13	5,05729

As figuras 4.30 e 4.31 representam a distribuição de temperatura no interior do tubo cilindro com barra transversal para quatro instantes de secagem (T = 60 e 70°C).

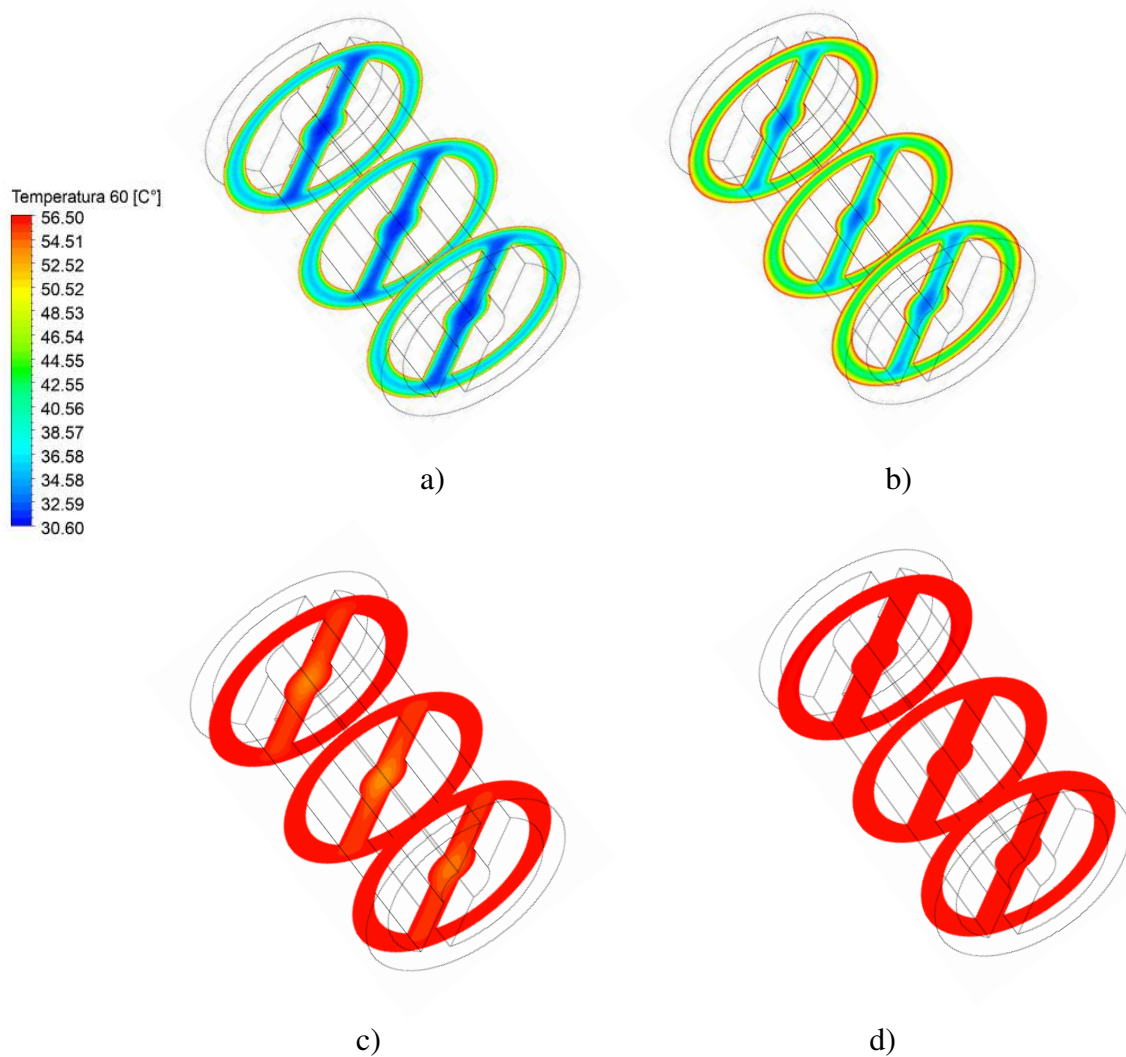


Figura 4.30 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do tubo cilindro com barra transversal em quatro instantes de tempo diferentes: a) t = 5min, b) t = 15min, c) t = 25 min e d) t = 35 min.

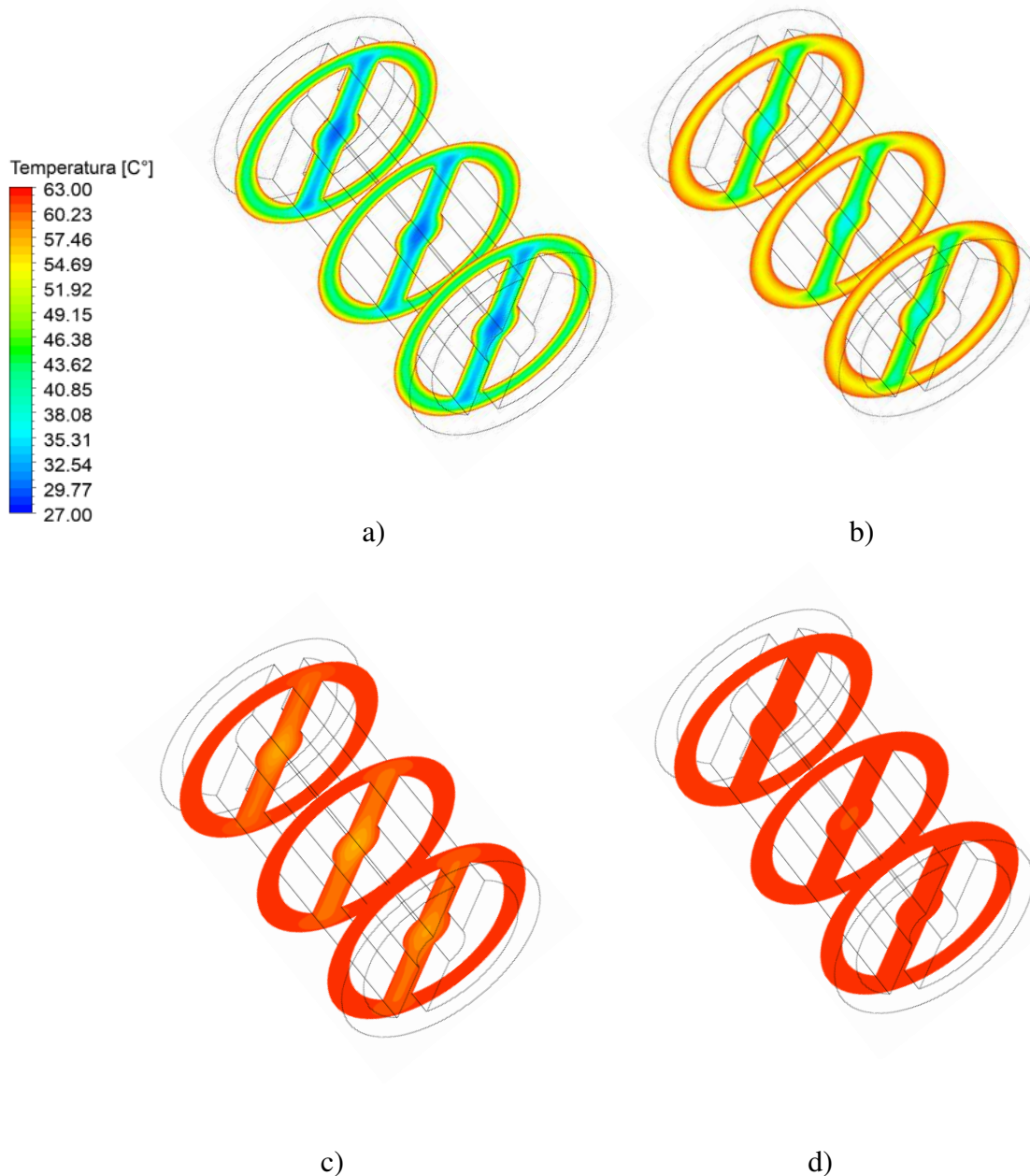


Figura 4.31 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do tubo cilindro com barra transversal em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 15\text{min}$, c) $t = 25\text{min}$ e d) $t = 35\text{min}$.

Percebe-se que a temperatura decresce da superfície para o centro da barra do tubo cilindro com barra à medida que o tempo se eleva durante o processo de secagem. Verifica-se ainda que os maiores gradientes ocorram nas proximidades da superfície do tubo com barra, tendendo a uma temperatura de equilíbrio com o aumento do tempo de secagem (Figuras 4.30 e 4.31).

As Figuras 4.32 e 4.33 representam a distribuição de temperatura no interior do tubo cilindro com barra transversal para quatro instantes de secagem ($T = 80$ e 90°C).

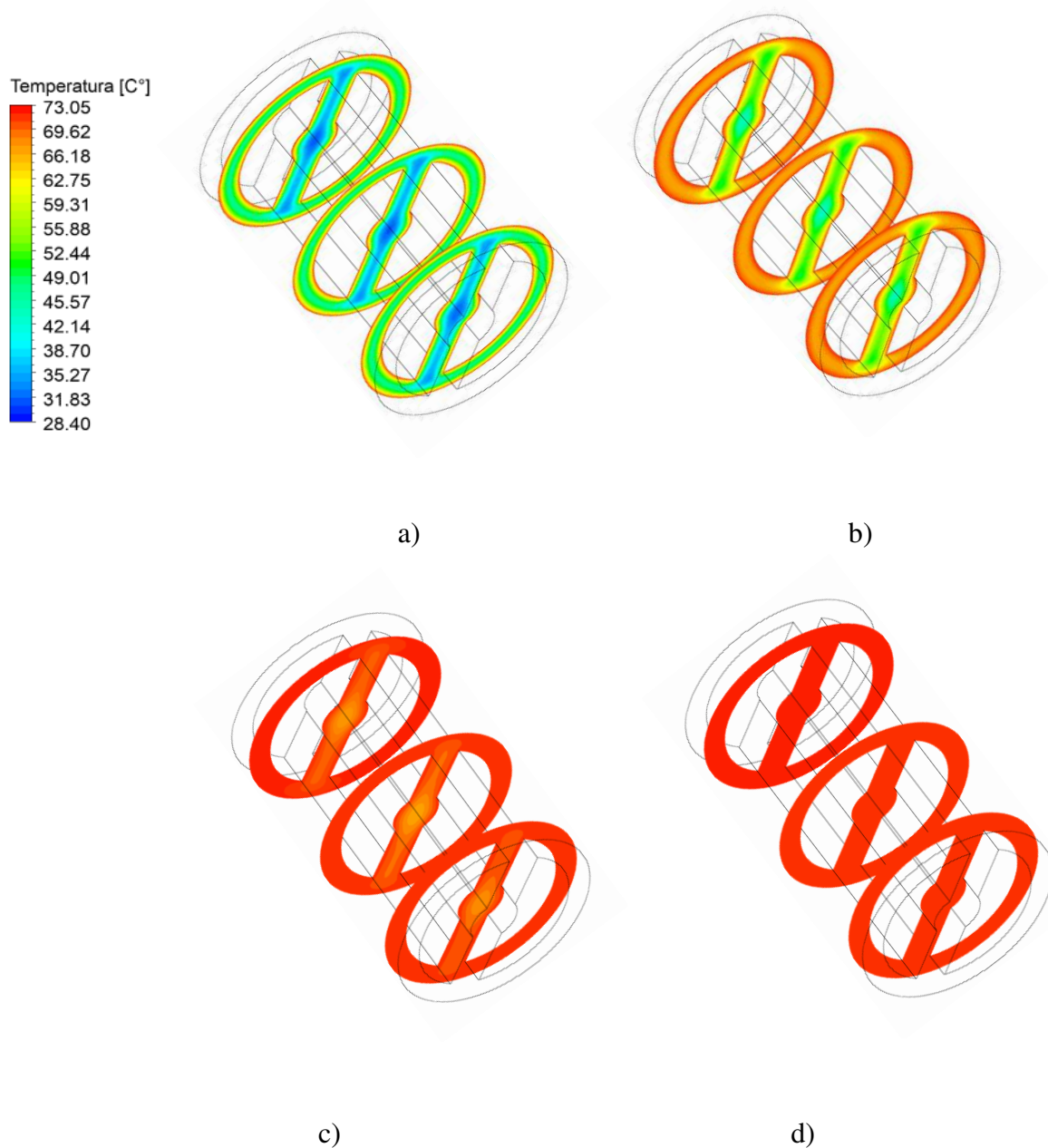


Figura 4.32 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do tubo cilindro com barra transversal em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 5$ min, b) $t = 15$ min, c) $t = 25$ min e d) $t = 35$ min.

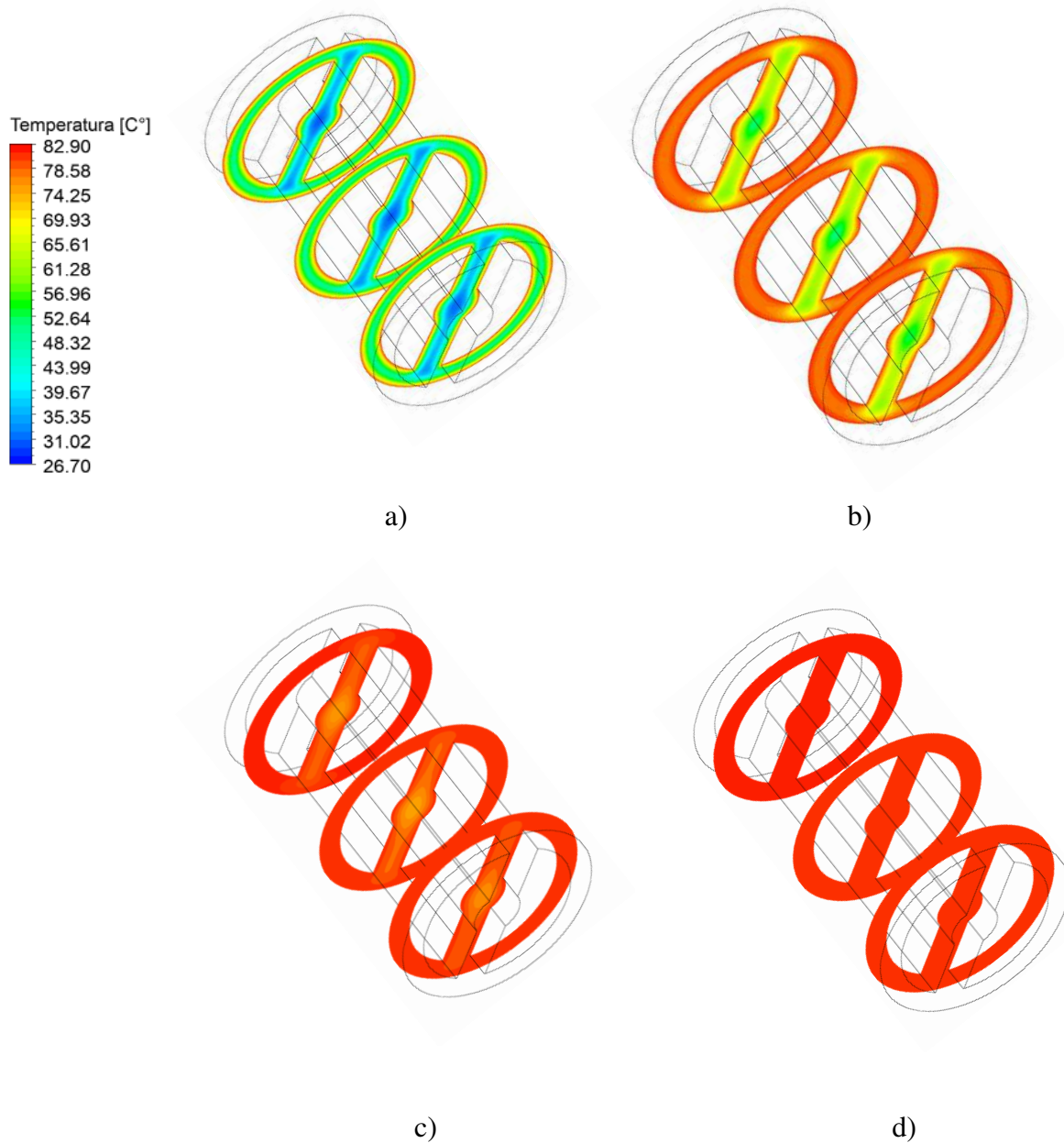


Figura 4.33 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do tubo cilindro com barra transversal em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 15\text{min}$, c) $t = 25\text{ min}$ e d) $t = 35\text{ min}$.

Analisando as Figuras 4.32 e 4.33 pode-se deduzir que, após 25 minutos, a secagem ocorreu em todo tubo cilindro com barra transversal. Contudo, o centro do tubo atingiu a temperatura de equilíbrio. Considerando as camadas mais próximas da superfície do tubo, percebe-se que existem diferentes temperaturas no interior do mesmo.

A Figura 4.34 representa a distribuição de temperatura no interior do tubo cilindro com barra transversal para quatro instantes de secagem ($T = 100^{\circ}\text{C}$).

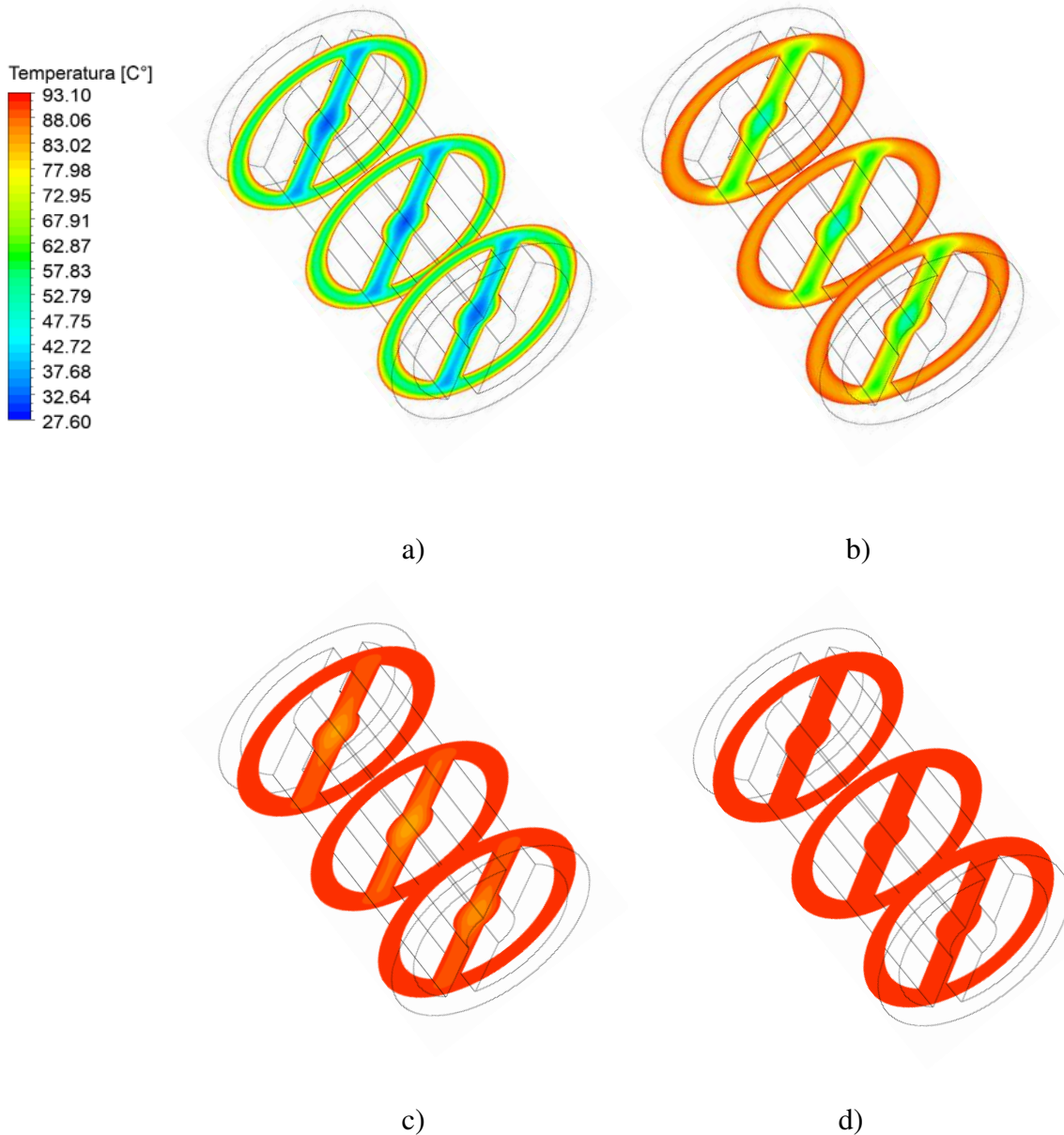


Figura 4.34 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do tubo vazado em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 5\text{min}$, b) $t = 15\text{min}$, c) $t = 25\text{ min}$ e d) $t = 35\text{ min}$.

Constata-se na Figura 4.34, que após 25 minutos, o tubo está próximo de atingir o equilíbrio térmico, equilíbrio este mostrado por um plano transversal. Conforme a representação gráfica pode-se perceber que esse intervalo de tempo não foi suficiente para secar completamente o produto, pelo contrário a secagem ainda está acontecendo de fato.

Parâmetros operacionais intimamente ligados aos danos térmicos podem provocar nos sólidos danos imediatos e latentes cujos resultados se expressam mais em trincamentos e incidência de defeitos nos tubos cerâmicos argilosos, respectivamente. Quando o fluxo de calor que entra no sólido, é maior que a energia necessária para evaporar todo o líquido do interior desse sólido, esse demora mais para aquecer-se e leva menos tempo para evaporar o líquido em seu interior; já quando acontece o inverso, o corpo se aquece mais rápido e demora mais para evaporar o líquido em seu interior. Aumentar a temperatura do ar de secagem durante o processo, implica em menor gasto de energia por unidade de água removida e maior velocidade na taxa de secagem, e maior gradiente de temperatura e umidade, enquanto que um aumento no fluxo de ar reduz a eficiência energética.

Como comentário final pode-se dizer que a secagem em altas temperaturas pode ser a principal causa de fissuras ou quebra dos produtos. A formação de fissuras são resultados de tensões e compressões que surgem no interior do material cerâmicos devido a elevados gradientes de umidade ou de temperaturas. Desta forma torna-se perceptível que quanto mais rápido for o processo de secagem, maiores gradientes são produzidos e, desta forma, maiores possibilidades de fissuras. Para se obter uma secagem eficiente e ao mesmo tempo propiciar uma boa qualidade final do produto, o ideal é secar com temperaturas mais baixas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Os resultados obtidos foram analisados após a simulação da secagem nos corpos com geometria complexa, desta forma pode-se concluir que:

- O modelo matemático de difusão de massa e calor, disponível pelo ANSYS CFX®, representou muito bem a física do problema. Com o aumento do tempo de secagem, verificou-se que a umidade migra a partir do centro para a superfície, proporcionando assim gradientes de umidade no interior do tubo cilíndrico com barra transversal, porém no tubo vazado a secagem foi uniforme devido a geometria do mesmo;
- A transferência de massa no material cerâmico acontece por difusão de líquido;
- As difusividades de massa e térmica que afetam respectivamente a transferência de calor e massa, exerceu uma grande influência no processo de secagem, informando a velocidade em que ocorre cada processo. Temperatura mais elevada implica em difusividade de massa maior.
- Verificou-se que os maiores gradientes de umidade e de temperatura ocorrem nas extremidades do produto, sendo essa região a mais afetada por tensões termo-hidro-

mecânicas, tornando-se mais susceptíveis ao surgimento de defeitos, como trincas e deformações.

- Os resultados numéricos apresentaram uma excelente concordância com os dados experimentais do teor de umidade das amostras submetidas à secagem, mostrando assim que a metodologia usada para estimar os coeficientes de transporte é satisfatória.
- Nos tubos cerâmicos argilosos, a transferência de calor no processo de secagem ocorre de maneira mais rápida em relação a transferência de massa. Este fato contribui para que o mesmo consiga atingir a temperatura de equilíbrio em um menor tempo, proporcionando assim um rápido aquecimento do produto;
- O tubo vazado atinge o seu equilíbrio térmico em aproximadamente 15 s , enquanto que a secagem neste instante está apenas no início; o produto está no período de acomodação de processo.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- a) Aplicar os modelos apresentados neste trabalho à secagem de outros produtos cerâmicos ;
- b) Desenvolver soluções analíticas para comparar com os dados numéricos desta pesquisa;
- c) Aprofundar estudos sobre a distribuição de umidade dentro do núcleo do material cerâmico estudado, pois raramente tem sido validada por técnicas experimentais. A incerteza sobre o verdadeiro mecanismo de migração de umidade ainda não está completamente resolvido;
- d) Simular casos com variáveis mais reais, como a condição de contorno de 3ª espécie.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Anuário Brasileiro de Cerâmica “ABC eram” 2004. São Paulo: ABC, 2004.

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*, **Elsevier** v.55, n.2, p. 78–86, 2013.

ARRIECHE, L. S., CORRÊA, R. G., e SARTORI, D. J. M. Drying stresses and strains in a spherical food model. *Computers and Chemical Engineering*, v.33, n.11, p.1805–1813, 2009.

BARBOSA, F. F.; FAGUNDES, C. A. A.; ELIAS, M. C. **Secagem estacionária e intermitente de grãos de arroz**. Disponível em: <http://www.milweb.com.br/sistemas/arquivos/Arroz1.pdf>. Acesso em Novembro de 2011.

BARROS, J. V. **Produção e estudo da microestrutura e propriedade mecânica da cerâmica Ba₂HoZrO₅, 5 a base de zircônia para fabricação de cadinhos de alta temperatura**. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, 2003. Dissertação (Mestrado).

BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia**. 2 ed. São Paulo: Contexto, 2004, 389p.

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. 3.1, n.4, p. 46-61, 2008.

BATISTA, V.R.; NASCIMENTO, J.J.S.; LIMA, A.G.B. Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental. **Matéria (Rio) [online]**. 2009, v.14, n.4, p. 1088-1100, 2009.

BELLEGGHEM, M. V.; STEEMAN, M.; JANSSEN, H.; JANSSENS, A. M. P. Validation of a coupled heat, vapour and liquid moisture transport model for porous materials implemented in CFD. **Elsevier**, v. 81, n.4, p. 340-353, 2014.

BELLINGIERI, J. C. As origens da indústria cerâmica em São Paulo. **Revista Cerâmica Industrial**. v.10, n. 3, p.38-47, 2005.

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). V Congresso Brasileiro de História Econômica, 6ª Conferência Internacional de História de Empresas, Associação Brasileira de Pesquisadores em História Econômica – ABPHE, Caxambu, 2003.

BERTI, M.; AHRENS, D.C.; BEUSSO, D. R. Secagem estacionária de sementes de trigo com utilização de gás liquefeito de petróleo. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 27, n.2, p.81-86, 2005.

BIAGI, J. D.; BERTOL, R. **Secagem de grãos**. Disponível em: <http://www.ufsm.br/sementes/textos/secagem.pdf>. Acesso em: Novembro de 2017.

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

CADÊ, 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. 433-453, 2005.

CALLISTER JR., W.D. **Materials Science and Engineering an Introduction**, seventhed., John Wiley & Sons, Inc, USA, 2007.

CAMACHO, D. G.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p.59-68, 2004.

CANO, N.F.; RIBEIROA, R. B.; MUNITAA, C. S. M.; WATANABEC, S.; NEVES, E. G. ; TAMANAHA E.K. Dating and determination of firing temperature of ancient potteries from

São Paulo IIarchaeological site, Brazil by TL and EPR techniques, *Journal of Cultural Heritage* V.16, n.3, p.361–364, 2014.

CARMO, J. E. F. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais oblatos. Estudo de caso: secagem de lentilhas.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil. 139p. 2004.

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

COLINART T.; GLOUANNEC , Influence of the setting process and the formulation on the drying of hemp concrete, **sciencedirect**,v.30 ,n.5, p. 372-380, 2012.

COSTA, L. V. 25 séculos de cerâmica. Lisboa: Estampa, 2000. 157 p. ISBN 9723315882

DANTAS, M. A.; GALVÃO, S.B.; FELIPE, R.N.B.; FELIPE, R.C.T.S. Avaliação das características geométricas dos blocos cerâmicos. Engenharia e ciência dos materiais foz do Iguaçu PR 2006

DEFRAEYE T. Advanced computational modelling for drying processes – **A review elsevier** v.131, n.6, p. 323-344, 2014.

EL-SEBAIIA, A.; SHALABY, S.M. Solar drying of agricultural products. **Sciencedirect**, v.16, n.1, p. 37–43, (2012).

FARIAS, V. S. O.; SILVA, C. M. D. S.; SOUZA, J. A. R.; SILVA, W. P.; MATA, M. E. R. M. C. Comportamento da secagem de sementes de grão de bico (*cicer arietinum* L.) em camada fina: equação de page e modelo difusivo. Anais do XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, CD ROOM, 2009a.

FARIAS, V. S. O. **Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas Generalizadas.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Programa de Pós-

Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

FARIAS, V. S. O.; SILVA, C. M. D. S.; SILVA, W. P.; LIMA, A. G. B. Influência da geometria na simulação do processo de secagem de telhas cerâmicas através do modelo de difusão usando soluções analíticas e método inverso. *Anais do VI Congresso Nacional de Engenharia*, 2010a.

GAUSS, C. F., *General Investigations Curved Surfaces*, The Princeton University Library 1855

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; NETO, S. A. R. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. ***Ciência e Tecnologia de Alimentos***. Campinas, v. 27, n.1, p.135-140, 2007.

HACIHAFIZOĞLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K.; LIMA, A. G. B. A liquid diffusion model for thinlayer drying of rough rice. ***European Food Research and Technology***, v.226, n.4, p.787-793, 2008.

HEMANTHAKUMARIW, P.N, SATAPATHY, L.N. **A Comparison of the Effects of Microwave Versus Conventional Drying on the Mechanical Properties Distribution of Dried Green Porcelains**. Ceramic Technological Institute, Bharat Heavy Electricals Limited Corporate Research and Development, (2008) Bangalore 560012, India.

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

INCROPERA, F. P.; DE WITT, P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: John Wiley & Sons, 1992, 455f.

KEEY, R. B. **Drying: Principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 1972.

KHALILI, K.; HEYDARI, M. Drying Clay Bricks with Variable Young's Modulus A 7^a Conferência Internacional Interdisciplinaridade em Engenharia, INTER-ENG, Petru Maior Universidade de Tirgu Mures, Roménia v. 12 , p. 382-387, 2014.

KOSHIMISU, L. **Conformação Viscoplastica por rolos a frio e Caracterização de substratos de alumina.** Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materias. Universidade Federal de São Carlos – UFSC, São Carlos, SP, 2008.

KOWALSKI S.J. , PAWŁOWSKI A. Intermittent drying of initially saturated porous materials Chemical Engineering **Chemical Engineering Science** V. 66, n.9, p. 1893-1905, 2011.

LERTWORASIRIKUL, S.; TIPSUWAN , Y. Moisture content and water activity prediction of semi-finished cassava crackers from drying process with artificial neural network, **Journal of Food Engineering** v. 84, n.1 , p. 65-74, 2008.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas.** 1999 256f Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, SP.

LIMA, D. R.; FARIAS, S. N.; LIMA, A. G. B. Mass transport in spheroids using the Galerkin method. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 21, n. 4, p. 667-680, 2004

LOULOU, T.; ADHIKARI, B.; LECOMTE, D. Estimation of concentration-dependent diffusion coefficient in drying process from the space-averaged concentration versus time with experimental data. **Chemical Engineering Science**, v.61, n.22, p.7185-7198, 2006.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** LTC Editora S.A., Rio de Janeiro, 2004, 453 p.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; MELO, E. C.; BARBOSA, F. F. Difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes

comprimentos de corte e temperaturas do ar. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.9, p.68-72, 2007.

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de pinus**. 2007. Tese de doutorado em Engenharia Florestal Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, PR, Brasil.

MIRADE, P. S.; DAUDIN, J. D.; DUCEPT, F.; TRYSTRAM, G.; CLEMENT, J. Characterizations and CFD modeling of air temperature and velocity profiles in Industrial Biscuit Baking Tunnel Oven. **Food Research International**, v.37, p.1031-1039, 2004.

MISHA, S.; MAT, S.; RUSLAN, M.H.; SOPIAN, K. Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods. **A review Elsevier**, v.16, n.7, p.4686–4707, 2012.

MÖHLER, B. C. **Avaliação das Características de Secagem dos Grãos de Soja**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química Universidade Federal do Rio Grande do Sul-Porto Alegre, Dezembro de 2010.

MUSIELAK, G.; MIERZWA, D. Permanent strains in clay-like material during drying. **Drying Technology**, v. 27, n.8, p. 894-902, 2009.

NEVES, E. G. **Ecology, ceramic chronology and distributions, long-term history, and political change in the Amazonian floodplain**. In: SILVERMAN, H.; ISBELL, W. (Eds.). *Handbook of South American Archaeology* New York: Springer, p. 359-379, 2008

OLIVEIRA, A.P.N., MONTEDO, O.R.K., PIZETE, J., CASAGRANDE, M., "Matérias-primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influência sobre as propriedades do produto final, **Cerâmica Informação**, V.3,n.10, p.57-65, Julho/Agosto 2010.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.1, p.181-189, 2006.

OLIVEIRA, E. s. *Materiais Cerâmicos. Engenharia e ciência dos materiais* foz do Iguaçu, 2011.

PARK, K. J., ANTÔNIO, G. C., OLIVEIRA, R. A., PARK, K. J. B. (2007). Conceitos de processo e equipamentos de secagem. CTEA, Campinas: 127. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>, acesso em: 16/07/2014.

PIRASTEH G.; SAIDUR, R. ; RAHMAN, S.M.A. ; RAHIM, N.A. A review on development of solar drying applications. *Energy Reviews* v. 31, n.4, p.133-148, 2014.

PRADO, U. S.; BRESSIANI J. C. *Panorama da Indústria Cerâmica Brasileira na Última Década*, 2013.

PUYATE, Y. T.; LAWRENCE, C. J. Sherwood's models for the falling-rate period: A missing link at moderate drying intensity. *Chemical Engineering Science*, v.61, n.21, p.7177-7183, 2006.

SANTOS, I. B.; SILVA L. P. L.; SILVA, A. A.; LIMA A. G. B. Transporte de massa em sólidos com forma arbitrária via método integral baseado em galerkin usando condições de contorno convectiva. *Associação argentina de mecânica computacional*, v.29, n. 2, p.2865-2881, 2010.

SANTOS, J. P. S. **Secagem Convectiva de Sólidos com Forma Complexa Usando o Método Integral Baseado em Galerkin**, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2013. Dissertação (Mestrado).

SILVA, W. P. **Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2007, PB, Brasil.

SILVA V.S. **Transferência de calor e massa em materiais com forma complexa via método da análise concentrada estudo de caso: Secagem de materiais cerâmicos**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2016, PB, Brasil.

SILVA, A. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Estudo analítico de secagem de placas cerâmicas usando o método integral baseado em Galerkin e condição de contorno de Dirichlet. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos** v. 42 n. 2, p.48-55, (2009).

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D.; Silva, L. D. Drying of clay slabs: Experimental determination and prediction by two-dimensional diffusion models. **Ceramics International**, v. 39, n.7, p.7911-7919, 2013.

SILVA, W. P.; SILVA, D. D. P. S.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, C. D. P. S. Numerical simulation of the water diffusion in cylindrical solids. **International Journal of Food Engineering**, v. 4, n. 2, p.1556-3758, 2008a.

SILVA, W. P.; SILVA, L. D.; FARIAS, V. S. O.; SILVA, C. M. D. migration in clay slabs during drying: A three-dimensional numerical approach **Ceramics International**, v. 39, n.4, p. 4017-4030, 2013.

SIMIONI, D.; OLIVEIRA, M.; PAGNUSSATT, F. A.; DEUNER, C. C., GUTKOSKI, L. C.; ELIAS, M. C. Parâmetros operacionais na secagem intermitente de grãos 497 de aveia branca cultivar UPFA 20 teixeirinha. **Ciências agrotécnica**, v. 32, n. 2, p. 497-502, 2008.

SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S. Moisture transfer in solid food materials: A review of mechanisms, models, and measurements. **International Journal of Food Properties**. 10, 739–777, 2007.

UKRAINCZYK, N. Thermal diffusivity estimation using numerical inverse solution for 1D heat conduction. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.52, n.25-26, p. 5675-5681, 2009.