

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

**ESTUDO TEÓRICO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E
MASSA NA SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS COM
FORMA PARALELEPIPÉDICA**

AUTOR(A): Mirenia Kalina Teixeira de Brito

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande, Agosto de 2016.
PB, Brasil

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

**ESTUDO TEÓRICO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E
MASSA NA SECAGEM DE TIJOLOS CERÂMICOS COM
FORMA PARALELEPIPÉDICA**

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

AUTOR(A): Mirenia Kalina Teixeira de Brito

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande, Agosto de 2016.
PB, Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S726s Brito, Mirenia Kalina Teixeira de.
Estudo teórico da transferência de calor e massa na secagem de Tijolos cerâmicos com forma paralelepípedica / Mirenia Kalina Teixeira de Brito. – Campina Grande-PB, 2016.
111 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
Referências.

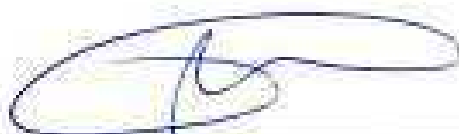
1. Secagem – Sólidos Paralelepípedicos. 2. Tijolos Cerâmicos - Secagem. 3. Modelagem. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 631.365(043)

**"ESTUDO TEÓRICO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NA SECAGEM
DE TIJOLOS CERÂMICOS COM FORMA PARALELEPÍPEDICA".**

MIRENIA KALINA TEIXEIRA DE BRITO

Dissertação Aprovada em 18/08/2016 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Vital Araújo Barbosa de Oliveira

Examinador Externo

CCTS/UEPB



Dr. Tony Herbert Freire de Andrade

Examinador Externo

UAEM/CCT/UFCG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe Severina Teixeira da Silva e ao meu pai Arlindo Tranquilino da Silva por serem meu alicerce nos momentos mais difíceis da minha vida. Pelo apoio e amor incondicional que sempre me concederam.

Ao meu esposo Danilo Brito Teixeira de Almeida, pela força e auxílio, por sempre em todos os momentos, estar ao meu lado, dando-me o apoio necessário nos períodos de angústia e de fraqueza.

Aos meus sobrinhos Ana Deolice e Samuel Esdras, por acreditarem e se orgulharem do meu esforço e dedicação, doando-me sempre amor e compreensão.

Aos meus irmãos Aulibama Teixeira da Silva Oliveira e Melquisedec Teixeira da Silva, pelo suporte e apoio.

A minha avó Beatriz (in memorian) pelo amor a mim doado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelas vitórias que tenho alcançado com êxito na minha vida profissional, e pelo conhecimento que obtive durante o decorrer do mestrado.

Ao meu esposo, Danilo Brito Teixeira de Almeida que sempre me apoiou e ajudou, em todos os momentos, nos bons e ruins.

Ao meu pai Arlindo Tranquilino da Silva, por ser um homem trabalhador que nunca me deixou faltar nada.

A minha mãe Severina Teixeira da Silva, uma mulher guerreira que em meio a palavras de amor, de apoio, de conforto e de orações me ajudou a me tornar essa mulher que sou hoje.

A minha avó Beatriz (in memorian) por te me apoiado e me amado tanto em vida.

Aos meus sogros Rosângela Almeida e Antonio de Almeida que sempre me deram o apoio e incentivo necessário.

De uma forma muito especial, agradeço ao professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima que tenho como referência e que me orientou com muita dedicação e sabedoria, dando-me força e incentivo.

Aos meus colegas do Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (CCT/UFCG), pela companhia do dia-dia.

A Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade, pela confiança e por tudo que está nos oferecendo para a realização das atividades laboratoriais, metodológicas e de pesquisa.

Aos professores que fazem parte do colegiado da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Por fim e com muita satisfação, a CAPES pelo apoio financeiro.

*"Ora, a fé é o firme fundamento das coisas que se esperam,
e a prova das coisas que se não vêem."*

Hebreus 11:1

SUMÁRIO

1	Introdução	18
2	Revisão Bibliográfica	20
	2.1 A Cerâmica	20
	2.1.1 Produtos Cerâmicos	20
	2.1.2 Propriedades dos Materiais Cerâmicos	22
	2.2 Argila	23
	2.2.1 Propriedades da Argila	24
	2.2.2 Tijolos Maciços	25
	2.2.2.1 Fabricação e Tratamento	25
	2.3 Secagem	30
	2.3.1 Fundamentos	30
	2.3.2 Lei de Fick	35
	2.4 Transferência de Calor	36
	2.4.1 Fundamentos	36
	2.4.2 Modos de Transporte de Calor	36
	2.4.2.1 Condução de Calor	36
	2.4.2.2 A Equação de Condução de Calor	39
	2.5 Método de solução da Equação de Difusão	42
	2.6 Estado da Arte Sobre Secagem de Materiais cerâmicos	44
3	Metodologia	47
	3.1 Modelo Matemático do Transporte de Calor e Massa	47
	3.1.2 Procedimentos Computacionais	56
4	Resultados e Discussões	59
	4.1 Cinéticas de Secagem e Aquecimento	59
	4.2 Estimativa do Coeficiente de Difusão de Massa	95
5	Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros	96
	5.1 Conclusão	96
	5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros	97
	Referências	98
	Apêndice	106

RESUMO

BRITO, Mirenia Kalina Teixeira, *Estudo Teórico da Transferência de Calor e Massa na Secagem de Tijolos Cerâmicos com Forma Paralelepípedica*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2016 111p. Dissertação (Mestrado)

Na manufatura de materiais cerâmicos argilosos, o produto é submetido as etapas de moldagem, secagem e queima. A secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução do teor de umidade do sólido, mediante o fornecimento de energia ao mesmo. Durante a secagem, dependendo das condições operacionais, podem surgir trincas, deformações e empenamentos que contribuem para reduzir a qualidade do produto pós-secagem. O transporte de umidade, do interior para superfície do material, pode ocorrer na forma líquida e/ou vapor, dependendo do tipo de produto e do percentual de umidade presente. Este trabalho apresenta um estudo analítico da secagem de sólidos paralelepípedicos. Foi desenvolvido um modelo matemático tridimensional transiente, baseado nas Leis de Fourier e de Fick, para prever a transferência de calor e massa que ocorre no sólido, considerando propriedades termo físicas constantes e condições de contorno de 3ª espécie (convecção). Todo formalismo matemático e solução analítica via método de separação de variáveis das equações diferenciais parciais que compõem o modelo referenciado foram apresentadas. Para obtenção dos resultados, foi desenvolvido um código computacional no ambiente do *software* Mathematica[®]. Aplicação foi dada secagem de tijolos cerâmicos comuns. Resultados simulados das cinéticas de aquecimento e secagem do sólido paralelepípedico, bem como as distribuições do teor de umidade e temperatura durante o processo são apresentados e discutidos. Verificou-se que o coeficiente de difusão de massa se mostra dependente do tipo de argila, teor de umidade inicial da amostra e da temperatura e umidade relativa do ar de secagem, variando de $0,22 \times 10^{-8}$ a $2,73 \times 10^{-8}$ m²/s, quando a temperatura aumentou de 60 para 110°C, respectivamente, e que os vértices do sólido cerâmico secam e se aquecem mais rápido, gerando nessa região tensões que podem provocar trincas e deformações que podem comprometer a qualidade final do produto.

Palavras chave: Secagem, tijolos cerâmicos, modelagem, simulação, solução exata.

ABSTRACT

BRITO, Mirenia Kalina Teixeira, *Theoretical Study of Heat and Mass Transfer on the Drying Ceramic Bricks with paralelepipedic slope*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 111p. Dissertação (Mestrado)

In the manufacture of clay ceramic materials, the product undergoes the steps of molding, drying and firing. Drying is a thermodynamic process which occurs through the reduction of the moisture content of the solid by supplying energy thereto. During drying, depending on operating conditions may arise cracks, deformation and warping which contribute to reducing the quality of the product after drying. Moisture transport from the center to surface of the product can occur in liquid and/or vapor form, depending on the type of product and moisture content. This work presents an analytical study of the drying of a parallelepiped solid. It was developed a transient and three dimensional mathematical model based on Fourier and Fick's Laws to predict heat and mass transfer that occurs in the solid, considering constant thermo physical properties and boundary conditions of 3rd kind (convection). All mathematical formalism and analytical solution of the partial differential equations using the method of separation of variables of has been presented. For obtain the results, it was developed a computational code using the Mathematica[®] commercial software. Application was done to ceramic brick drying. Simulated results of heating and drying kinetics of the parallelepiped solid, as well as of moisture content and temperature distributions during the process are presented and discussed. It was found that the mass diffusion coefficient is dependent on the chemical composition of clay (clay type), initial moisture content of the sample and temperature and relative humidity of drying air varying from 0.22×10^{-8} to 2.73×10^{-8} m²/s, when the temperature increased from 60 to 110°C, respectively, and that the vertex of the ceramic solid dry and heat more fast generating stress in this region which can provokes cracks and deformation that can a affect the final quality of the product. The control of the drying process is extremely important, because depending on the material during the drying process, there may be considerable deformation in manufactured products, ranging from thermal and water stress, thereby increasing process costs and losses of companies.

Keywords: Drying, ceramic bricks, modeling, simulation, exact solution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diferentes tipos de argila	24
Figura 2.2	Tijolos maciços	26
Figura 2.3	Esquema produtivo da cerâmica vermelha	27
Figura 2.4	Jazida de argila	28
Figura 2.5	Local de processamento de argila de uma pequena empresa	29
Figura 2.6	Curvas típicas de secagem	31
Figura 2.7	Sólido com forma arbitrária	37
Figura 2.8	Elemento diferencial para análise de condução de calor	39
Figura 3.1	Configuração geométrica do problema físico	47
Figura 4.1	Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem (Caso 1)	59
Figura 4.2	Predição do teor de umidade médio e temperatura média do tijolo em função do tempo de secagem (Caso 1)	60
Figura 4.3	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	60
Figura 4.4	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=900s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	61
Figura 4.5	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=3600s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	61
Figura 4.6	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=200s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	61
Figura 4.7	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=900s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	62
Figura 4.8	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=3600s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	62
Figura 4.9	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=200s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	63
Figura 4.10	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=900s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	63
Figura 4.11	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=3600s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	64
Figura 4.12	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=200s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	64
Figura 4.13	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=900s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	65
Figura 4.14	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=3600s$. Para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	65
Figura 4.15	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	66
Figura 4.16	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3$) em $t=900s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	66
Figura 4.17	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3$) em $t=3600s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso 1)	67

Figura 4.18	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=200s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso1)	67
Figura 4.19	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=900s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso1)	67
Figura 4.20	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=3600s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso1)	68
Figura 4.21	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=200s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso1)	68
Figura 4.22	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=900s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso1)	69
Figura 4.23	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=3600s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso1)	69
Figura 4.24	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=200s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso1)	70
Figura 4.25	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=900s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso1)	70
Figura 4.26	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=3600s$, para a secagem a $60^\circ C$ (Caso1)	71
Figura 4.27	Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem (Caso 2)	72
Figura 4.28	Predição do teor de umidade médio e temperatura média do tijolo em função do tempo de secagem (Caso 2)	73
Figura 4.29	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 2)	73
Figura 4.30	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=600s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 2)	74
Figura 4.31	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=2400s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 2)	74
Figura 4.32	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3$) em $t=200s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 2).	75
Figura 4.33	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3$) em $t=600s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 2)	75
Figura 4.34	Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3$) em $t=2400s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 2)	75
Figura 4.35	Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem (Caso 3)	76
Figura 4.36	Predição do teor de umidade médio e temperatura média do tijolo em função do tempo de secagem (Caso 3)	77
Figura 4.37	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	78
Figura 4.38	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=900s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	78
Figura 4.39	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=2400s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	78

Figura 4.40	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=200s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	79
Figura 4.41	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=900s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	79
Figura 4.42	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=2400s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	79
Figura 4.43	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=200s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	80
Figura 4.44	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=900s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	80
Figura 4.45	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=2400s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	81
Figura 4.46	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=200s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	81
Figura 4.47	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=900s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	82
Figura 4.48	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=2400s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso3)	82
Figura 4.49	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	83
Figura 4.50	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3$) em $t=900s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	83
Figura 4.51	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3$) em $t=2400s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	83
Figura 4.52	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=200s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	84
Figura 4.53	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=900s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	84
Figura 4.54	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=2400s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	84
Figura 4.55	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=200s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	85
Figura 4.56	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=900s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	85
Figura 4.57	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=2400s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	86
Figura 4.58	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=200s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	86
Figura 4.59	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=900s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	87
Figura 4.60	Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=2400s$, para a secagem a $80^\circ C$ (Caso 3)	87
Figura 4.61	Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem (Caso 4)	88

Figura 4.62	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=500s$, para secagem a $110^\circ C$ (Caso 4)	89
Figura 4.63	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=1500s$, para secagem a $110^\circ C$ (Caso 4)	89
Figura 4.64	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=3000s$, para secagem a $110^\circ C$ (Caso 4)	90
Figura 4.65	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=500s$, para secagem a $110^\circ C$ (Caso 4)	90
Figura 4.66	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=1500s$, para secagem a $110^\circ C$ (Caso 4)	90
Figura 4.67	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=3000s$, para secagem a $110^\circ C$ (Caso 4)	90
Figura 4.68	Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem (Caso 5)	91
Figura 4.69	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200s$, para a secagem a $110^\circ C$ (Caso 5)	92
Figura 4.70	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=600s$, para a secagem a $110^\circ C$ (Caso 5)	92
Figura 4.71	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=1200s$, para a secagem a $110^\circ C$ (Caso 5)	92
Figura 4.72	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=200s$, para a secagem a $110^\circ C$ (Caso 5)	93
Figura 4.73	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=600s$, para a secagem a $110^\circ C$ (Caso 5)	93
Figura 4.74	Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=1200s$, para a secagem a $110^\circ C$ (Caso 5)	93

LISTA DE TABELAS

Figura 2.1	Tipos de cerâmica e alguns usos	21
Figura 2.2	Valores de condutividades térmicas (k) para diferentes materiais de cobertura	41
Figura 3.1	Parâmetros experimentais do ar do tijolo usado nas simulações	57
Figura 3.2	Coefficientes de difusão e transferência convectiva usadas nas simulações	57
Figura 4.1	Parâmetros obtidos após o ajuste para cada caso	94

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A_i	Constantes $i=0, 1, 2, n$	[-]
a_i	Constantes $i=0, 1, 2$	[-]
A_{ij}	Constantes determinadas pela condição inicial e a propriedade das funções de ortogonalidade das funções trigonométricas	[-]
Bi_c	Número de Biot de transferência de calor	[-]
Bi_m	Número de Biot de transferência de massa	[-]
c	Calor específico	[J/kg/K]
D	Coefficiente de difusão efetivo	[m ² /s]
dM/dt	Taxa de difusão	[1/s]
$\partial M/\partial t$	Taxa de difusão	[1/s]
dM/dy	Gradiente de concentração medido normalmente a seção	[(kg/kg)/m]
ERMQ	Erro médio quadrático	[(kg/kg) ²]
exp	Exponencial	[-]
Fo	Número de Fourier	[-]
Fo_c	Número de Fourier de transferência de calor	[-]
Fo_m	Número de Fourier de transferência de massa	[-]
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² /K]
h_m	Coefficiente de transferência de massa relacionado com o teor de umidade do material	[m/s]
i, j	Posição do ponto nodal na malha	[-]
k	Condutividade térmica	[W/m/k]
M	Teor de umidade	[kg/kg]
m	massa	[kg]
M^*	Razão umidade	[kg/kg]
M_o	Teor de umidade inicial em base seca	[kg/kg]
M_e	Teor de umidade de equilíbrio em base seca	[kg/kg]
\bar{M}	Teor de umidade médio	[kg/kg]
\bar{M}^*	Razão de umidade médio	[kg/kg]
q''	Fluxo de calor	[W/m ²]
R	Comprimento relacionado as dimensões do sólido R_1, R_2 e R_3	[m]
$2xR_1$	Dimensão do sólido em relação ao comprimento	[m]
$2xR_2$	Dimensão do sólido em relação a profundidade (largura)	[m]
$2xR_3$	Dimensão do sólido em relação a altura (espessura)	[m]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura do ar de secagem	[°C]
t_c^*	Tempo adimensional de transferência de calor	[-]
t_m^*	Tempo adimensional de transferência de massa	[-]
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido	[°C]
UR	Umidade Relativa	[%]
V	Volume	[]
V_o	Volume inicial do corpo	[]
x, y, z	Coordenadas cartesianas	[m]

Letras Gregas

α	Difusividade térmica	[m ² /s]
β_n	Autovalores das equações transcendentais	[-]
θ	Variável relacionada com Φ	[-]
θ	Temperatura do produto	[°C]
ρ	Densidade (massa específica)	[kg/m ³]
∇	Gradiente	[-]
∇	Divergente	[-]
∇^2	Laplaciano	[-]
Δ, δ	Variação	[-]
γ	Coefficiente de dilatação térmica	[]
Φ''	Fluxo de Φ por unidade de área	[1/m ²]
Φ'''	Geração interna de massa ou energia	[-]
Φ	Variável	[-]
Φ_i	Valor da variável Φ em t=0	[-]
Φ	Variável na superfície do produto	[-]
Φ_∞	Variável fora da camada limite	[-]
Φ^*	Variável adimensional	[-]
$\bar{\Phi}^*$	Variável média adimensional	[-]
Γ^Φ	Propriedade do material	[-]
$\zeta = \rho$	Densidade do sólido seco	[kg/m ³]

Sobrescrito

*	Adimensional
x	Face x
y	Face y
z	Face z

Subscrito

a	Ar
abs	Adsoluta
c	Calor
e	Equilíbrio
f	Final, superfície
m	massa
o	Inicial
s	Seco, sólido
t	Tempo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução do teor de umidade, do interior do material para a superfície mediante o fornecimento de calor. É nesta fase que a água em excesso que está contida no material é retirada. O transporte de massa ocorrido dentro de um determinado sólido pode se dar na forma líquida e/ou vapor, estando diretamente relacionado com o tipo do material e teor de umidade existente nele. O controle do processo de desumidificação e o conhecimento do mecanismo do movimento de umidade são de fundamental importância no processo de secagem, uma vez que com dados de simulação e/ou experimental, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia (Nascimento, 2002).

Segundo Bergman et al. (2014) e Incropera e DeWitt (2001), a transferência de calor é definida como sendo o "trânsito de energia provocado por uma diferença de temperatura". Esse fenômeno pode acontecer por três processos diferentes que são: condução, convecção e radiação. Sempre que um corpo está a uma temperatura maior que a de outro ou, inclusive, no mesmo corpo existem temperaturas diferentes, ocorre uma cessão de energia da região de temperatura mais elevada para mais baixa, e a esse fenômeno dá-se o nome de transmissão de calor.

Várias teorias e modelos matemáticos, para descrever o processo de secagem, são reportados na literatura, dentre as quais pode-se citar a difusão líquida. Segundo Chemkhi et al. (2005), o coeficiente de difusão de massa de materiais argilosos depende principalmente do teor de umidade (em base seca), do produto e a temperatura do ar de secagem.

Soluções analítica e/ou numéricas da equação de difusão, para diversas geometrias, condições de contorno e coeficientes difusivos constantes ou variáveis são encontradas na literatura, no entanto existem poucos resultados científicos obtidos a partir de geometrias tridimensionais (Murugesan et al., 2001; Khalili et al., 2014; Chemkhi et al., 2005; Silva et al., 2013; Almeida et al., 2013).

Assim, o trabalho tem por objetivo geral estudar teoricamente a transferência de calor e massa durante a secagem de tijolos cerâmicos maciços com forma paralelepípedica. Como objetivos específicos, pode-se citar:

- Apresentar um modelo matemático e sua solução analítica para prever a distribuição de temperatura e umidade em tijolos cerâmicos maciços com forma paralelepípedica, e suas respectivas cinéticas de aquecimento e secagem;
- Estudar o processo de secagem e o aquecimento de tijolos cerâmicos em diferentes condições operacionais;
- Comparar os resultados numéricos e experimentais do teor de umidade do material selecionado disponíveis na literatura, e determinar os coeficientes de transferência de calor e massa difusivo no interior e convectivo na superfície do produto, para várias condições de secagem;
- Analisar o efeito da secagem na qualidade do material.

Diante do exposto, este trabalho é bastante versátil. Os modelos apresentados além de serem tridimensionais, incluem coeficientes difusivos constantes, condições de contorno, constantes ou convectivas e pode ser aplicado diretamente em fenômenos de secagem, umidificação, aquecimento e resfriamento de sólidos com geometria de um paralelepípedo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Cerâmica

A Associação Brasileira de Cerâmica define que a cerâmica ou material cerâmico, compreendem todos os materiais inorgânicos ou não metálicos, neste caso, são os materiais de construção em engenharia, ou produtos químicos inorgânicos, com exceção dos metais e suas ligas.

2.1.1 Produtos Cerâmicos

De acordo com Nascimento (2002), a cerâmica ou material cerâmico envolve todos os materiais inorgânicos, não metálicos, geralmente adquiridos logo após o tratamento térmico em elevadas temperaturas. Produtos cerâmicos são fundamentalmente determinados pelas matérias primas e pela microestrutura final. Portanto a tentativa de controle das propriedades do produto deve passar pelo entendimento e controle das propriedades básicas dos materiais, como o processo de fabricação (Almeida, 2009).

Em relação ao setor cerâmico no Brasil, as regiões Sudeste e Sul, são onde se concentram a maior quantidade de indústrias de todos os segmentos cerâmicos. Isto se dá, devido a grande facilidade de matérias-primas, energia, centros de pesquisas, universidades e escolas técnicas. Entretanto, outras regiões do país tem apresentado certo grau de desenvolvimento, principalmente no Nordeste, onde tem aumentado a demanda de materiais cerâmicos, devido ao crescimento na área da construção civil. A diversificação do setor industrial da cerâmica é bem diversificada, podendo ser dividido nos seguintes segmentos (ABC, 2011):

- Cerâmica Vermelha;
- Materiais de revestimento;

- Materiais refratários;
- Louça sanitária;
- Isoladores elétricos de porcelana;
- Louça de mesa;
- Cerâmica artística (decorativa e utilitária);
- Filtros cerâmicos de água para uso doméstico;
- Cerâmica técnica;
- Isolantes térmicos.

No Brasil existem todos estes segmentos com maior ou menor grau de desenvolvimento e capacidade de produção. Ademais, existem fabricantes de matérias-primas sintéticas para cerâmica (alumina calcinada, alumina eletrofundida, carbetto de silício e outras), de vidrados e corantes, gesso, equipamento e alguns produtos químicos auxiliares (ABC, 2011; Silva, 2009). A seguir, a Tabela 2.1 apresenta a classificação citada anteriormente.

Tabela 2.1 - Tipos de cerâmica e alguns usos.

	TIPOS	USOS
Tradicional	–	Tijolos/telhas; tubos/manilhas; vasos/objetos decorativos.
Técnica	Louça Faiança; Louça natural (vermelha); Louça fina (calcítica); Louça semivítrea (feldspática)	Louça de mesa; louça de mesa/objetos.
	Grês natural	Louça de mesa.
	Grês fino	Louça sanitária.
	Grês fino; Grês vítreo; Grês Jaspe; Grês Balsático	–
	Porcelana de hotel	Louça de mesa com espessura grossa.
	Porcelana doméstica	Louça de mesa com espessura normal.
	Porcelana de ossos	Louça de mesa com espessura fina.
	Porcelana resistente à chama	Panelas/travessas.
	Porcelana Elétrica	Componentes elétricos.
Avançada	Caixa de motores /talheres; revestimento de naves espaciais; próteses ósseas e dentárias; componentes eletrônicos.	

Fonte: Fernandes (1998).

Produtos cerâmicos são aplicados em vários campos. De acordo com alguns autores, as cerâmicas são classificadas em tradicionais, técnicas e avançadas.

Segundo Shun-Lung Su (1997), materiais utilizados para a construção de edifícios, sistemas de drenagem, estradas e outros projetos relacionados a engenharia, são classificados como cerâmica estrutural. Produtos de argila são utilizados para construção de paredes de edifícios e semelhantes.

O setor de cerâmica vermelha (ou cerâmica estrutural) é composto por um amplo número de indústrias com distintos níveis de desenvolvimento tecnológico e capacidades produtivas. Apesar de algumas grandes empresas despontem no setor, ele tem caracterização de possuir um elevado número de pequenas e médias empresas, distribuídas ao longo de todo país. Em relação ao nível tecnológico, neste trabalho a atenção está voltada para o tipo tradicional, devido o produto utilizado ser justamente o tijolo maciço. A argila que é composta de uma coloração geralmente vermelha, podendo ser também castanha ou amarela, é caracterizada como cerâmica tradicional. Esse tipo de material possui um alto teor de ferro em sua composição mineralógica. Esta cerâmica sofre secagem e queima a temperaturas de 110°C e 950°C, respectivamente (Nascimento, 2002).

2.1.2 Propriedades dos Materiais Cerâmicos

Conforme Albuquerque (2000) e Silva (2009), as propriedades dos materiais cerâmicos são:

a) Propriedades termo-físicas

- Massa específica aparente (γ): 1,9 a 2,1 t/m³;
- Umidade higroscópica de equilíbrio (ψ): entre 0,5 a 1,0%;
- Absorção de água (AA): na cerâmica vermelha os valores chegam da ordem de 20 a 25%;
- Coeficiente de dilatação linear (α): bastante variável, podendo-se assumir o valor aproximado de $0,6 \times 10^{-5}$ mm/mm°C para tijolo;

- Calor específico (c): Aproximadamente 878,22 J/kg°C;
- Coeficiente de condutibilidade térmica (λ): Em torno de 0,8364 W/m°C.

b) Propriedades mecânicas e elásticas

- Resistência a compressão: 2 MPa tijolos de barro cozidos;
- Resistência à tração na flexão: da ordem de 15 a 20% da resistência à tração;
- Módulo de deformabilidade longitudinal: Na faixa de 6000 à 60000 MPa, devido os materiais cerâmicos serem essencialmente frágeis;
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,20$ a $0,30$;
- Dureza superficial: particularmente importante à dureza nos pisos cerâmicos em geral é muito elevada, chegando 6 ou 7 na escala de Mohs (feldspato e quartzo).

c) Características químicas

Os materiais cerâmicos apresentam em geral, um desempenho bem adequado frente à ação de agentes químicos, ao contrário, por exemplo, de metais, plásticos e concretos, sujeitos à diferentes mecanismos de degradação (corrosão, lixiviação, volatilização de componentes, entre outros). Esse comportamento é consequência da elasticidade química da cerâmica, ou seja, não há facilidade de reação entre seus componentes e outros elementos químicos.

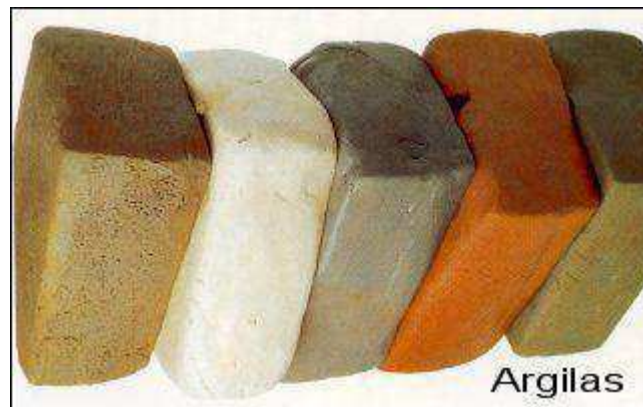
2.2 Argila

A argila como mostra Figura 2.1, é considerada a matéria-prima básica dos produtos cerâmicos (Gonçalves, 2003). Ela é constituída por grande parte de material amorfo, predominando o material cristalino. Os cristais da argila podem agrupar-se em espécies mineralógicas bem definidas. No ponto de vista físico-químico, as argilas podem ser consideradas como sistemas dispersos de minerais nos quais predominam partículas de diâmetro abaixo de 2 μm (Andrade et al., 2005).

As substâncias de maior importância encontradas na argila são;

- Silicatos;
- Minerais do grupo caulinita;
- Minerais do grupo montmorilonita ou esmecita;
- Minerais micáceos;
- Minerais de alumínio hidratados.

Figura 2.1 - Diferentes tipos de argila.



Fonte: www.mineralex.net

2.2.1 Propriedades da Argila

Segundo Andrade (2005), as características intrínsecas da argila são:

- a) Granulometria;
- b) Composição química e mineralógica;
- c) Capacidade de troca de cátions, resultante de substituições isomórficas no retículo cristalino dos argilominerais.

Assim, dessas características decorrem as propriedades da argila. Muitos produtos cerâmicos são produzidos utilizando a argila. E o que está relacionado ao grande uso dessa matéria-prima em variados produtos cerâmicos são suas propriedades (Neves, 1998), que são:

- **Plasticidade:** Muito versátil nos processos de conformação plástica.
- **Resistência mecânica:** Corpos produzidos a partir de argilas apresentam notável resistência verde, a seco e após tratamento térmico em temperaturas adequadas;
- **Retração de secagem e pó-queima:** Produtos produzidos a partir de argilas eventualmente sofrem redução de tamanho após a secagem e queima. Na secagem, essa redução se dá pela eliminação da água utilizada na formação do corpo. Com a eliminação da água surgem os vazios por ela deixados ocorrendo assim uma aproximação das partículas em consequência das forças de atração eletrostática ocasionando a chamada aglomeração ou adensamento;
- **Sinterização:** É o processo de adensamento de partículas sólidas com redução ou eliminação dos poros mediante tratamento térmico.

2.2.2 Tijolos Maciços

De acordo com a ABNT os tijolos maciços possuem todas as faces plenas de material, podendo apresentar rebaixos de fabricação em uma das faces de maior área.

2.2.2.1 Fabricação e Tratamento

O tratamento da matéria prima (argila) compreende todos os processos de depuração, divisão, homogeneização e obtenção da umidade adequada da matéria prima, sendo a moldagem uma operação efetivada com o intuito de fornecer a forma desejada a massa cerâmica (Bauer, 1994; Neves, 1998). Existem quatro processos básicos de moldagem que são:

- **Moldagem com pasta plástica consistente;**

- Moldagem com pasta plástica mole;
- Moldagem com pasta fluida e a seco ou semi-seco.

Após a moldagem, a peça cerâmica úmida como, por exemplo, tijolo cerâmico passa por um processo de secagem com o intuito de reduzir o teor de umidade da mesma, para posteriormente ser submetido ao processo de queima.

Figura 2.2 - Tijolos maciços.



Fonte: <http://cepazzi.com.br/index.html>

O método de fabricação/desenvolvimento das peças cerâmicas é dividido em várias etapas (Guilherme 1998 e Bauer 1994), que são:

- Exploração das Jazidas;
- Tratamento prévio das matérias primas;
- Homogeneização;
- Secagem;
- Queima.

A Figura 2.3 ilustra o esquema desde a exploração de jazidas até a finalização e expedição do produto.

Figura 2.3 - Fluxograma produtivo da cerâmica vermelha.



Fonte: Villar (1988), Cavaliere et al. (1997), Mafra (1999), Pauletti (2001).

Inicialmente, é feito um estudo completo das características e volume disponível do material, para assim começar a exploração das jazidas de argila (Figura 2.4). Em meio ao estudo qualitativo a composição, a pureza, as características físicas, o comportamento durante a secagem e o cozimento da matéria prima são precisamente analisados. Essa etapa é de grande importância, pois é ela quem define os produtos finais obtidos, as correções a serem feitas e o equipamento a ser utilizado na extração. A estimativa do valor comercial da jazida é avaliada de acordo com a quantidade e a qualidade do material disponível. As facilidades de acesso ao local da jazida, sua localização, transporte e a quantidade de água disponível nas proximidades são também levadas em consideração na avaliação (Neves, 1998; Guilherme, 1998; Bauer, 1994).

Figura 2.4 - Jazida de argila.



Fonte: Silva (2009).

Durante o processo de secagem, devido vários fatores operacionais, podem ocorrer trincas, empenamentos e deformações ocasionando à perda do material, causando prejuízos as empresas. Augier et al. (2002) afirmam que, quando o processo de secagem acontece com encolhimento, gradientes de umidade e deslocamento no material leva à tensões induzidas pela secagem. Assim, o controle destas tensões é de extrema importância, pois pode levar a deformações e/ou rachaduras que afetam definitivamente a qualidade do produto.

De acordo com Oliveira et al. (2005), os seguintes defeitos em tijolos podem ocorrer durante o processo.

a) Eflorescência

Depósitos de sais formam-se nas superfícies dos tijolos gerando cores e manchas indesejadas.

b) Coração negro

Após o processo de queima manchas de coloração preta e cinzas aparecem no produto.

c) Empenamentos

Causados por secagem diferencial (quando uma face da peça seca mais rapidamente que a outra formando tensões residuais de contração), mal posicionamento no suporte de secagem e Boquilhas de feira (empenamento notado logo após a secagem).

d) Trincas

Trincas de secagem são pequenas fissuras causadas por secagem rápida.

Este é o caminho percorrido para chegar à finalização e qualificação dos produtos cerâmicos. Evidente que, neste caso, trata-se de procedimentos de empresas de grande porte que passam fielmente por todo este processo. Pequenas empresas em cidades do interior da Paraíba, por exemplo, compram a matéria prima (argila ainda sem tratamento) a terceiros e aplicam as outras etapas para tentar chegar a uma boa argila, apesar de o método ser totalmente "rústico" as etapas seguidas são as mesmas.

Figura 2.5 - Local de processamento de argila de uma pequena empresa.



Muitos dos processos de formação de argila requerem a adição de água à mistura dos materiais. Assim que a argila é formada, ela é exposta a altas temperaturas. Sem um passo

adequado de pré-secagem, a alta temperatura fará com que a água que está na argila se transforme rapidamente em vapor, podendo assim, danificar o produto severamente. Assim, o ideal a ser feito é a remoção da maior parte da água antes do processo de queima (Shun-Lung Su, 1997).

Artesanalmente quando se coloca as peças para secar, geralmente são colocadas em algum lugar com sombra, para que o processo de desumidificação não seja tão rápido, porque se o produto perder água rapidamente, isso faz com que as peças criem rachaduras ou trinques, aumentando assim o prejuízo tanto econômico quanto energético. Já em grandes empresas, devido também a um conhecimento mais científico, e não o senso comum tem menos perdas, porém isso não significa que os prejuízos são mínimos.

2.3 Secagem

2.3.1 Fundamentos

Segundo Fioreze (2004) e Almeida (2003), a secagem de um produto qualquer é um processo termodinâmico que está relacionado a duas etapas principais e simultâneas, sendo uma delas a troca de energia por condução, convecção e/ou radiação, podendo também ser uma combinação desses processos. A segunda etapa caracteriza-se com a mudança de estado da água líquida para vapor, e sua retirada para o meio ambiente. Caso aconteça de um ou outro processo de transferência de calor influenciar na secagem, somente a velocidade de transferência será alterada, no entanto seus princípios obedecem as mesmas leis da física.

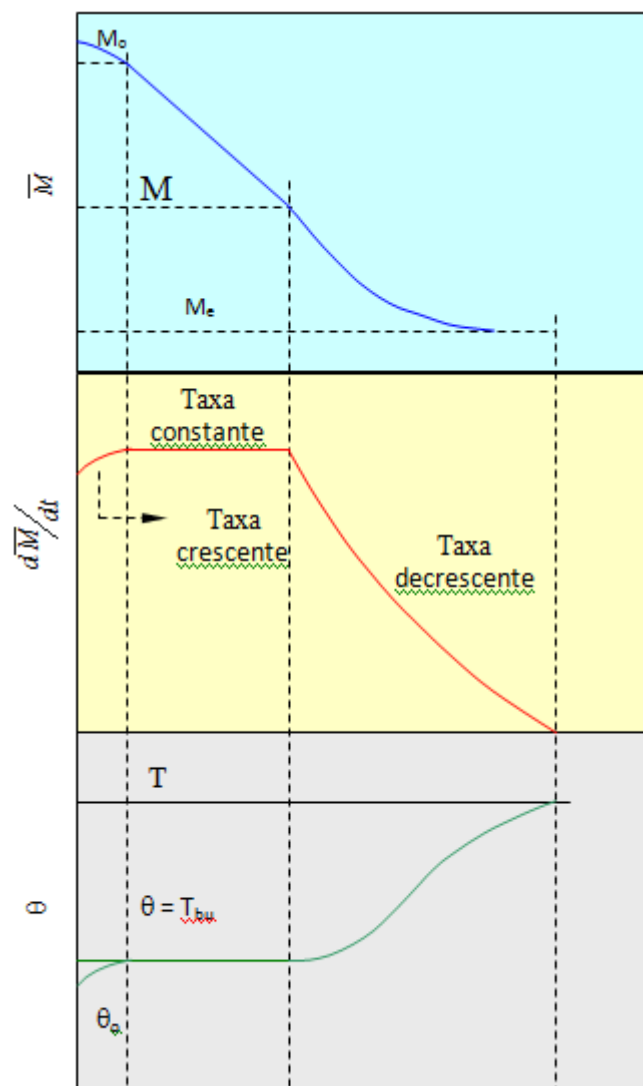
O transporte de umidade, do interior para a superfície do material pode ocorrer na forma líquida e/ou vapor, dependendo do tipo do produto e do percentual de umidade presente. O controle do processo de desumidificação e o conhecimento do mecanismo do movimento de umidade são fundamentais, uma vez que com dados de simulação e/ou experimental, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia (Almeida, 2003; Almeida, 2009; Silva, 2009).

O ar aquecido é um fornecedor de calor no processo industrial de secagem convectiva, assim suas propriedades termodinâmicas devem ser bem avaliadas. Neste âmbito, é essencial o conhecimento da temperatura, velocidade, umidade relativa do ar, de tal maneira que, sob

determinadas condições operacionais, se possa proporcionar uma secagem uniforme do produto (Nascimento, 2002).

A transferência de calor e massa entre o sólido e o ar de secagem é um fenômeno associado a qualquer condição de secagem. Portanto, como ilustra a Figura 2.6, o processo de desidratação em materiais apresenta as três etapas clássicas de secagem (Anosti Jr. et al., 1999).

Figura 2.6 - Curvas típicas de secagem.



Fonte: Anosti Jr. et al. (1999).

As respectivas curvas de secagem são:

a) Curvas da redução do teor de umidade do sólido:

O período onde o teor de umidade é o inicial (M_o) representa o início da secagem, com elevação da temperatura e da pressão de vapor de água.

b) Da taxa de secagem:

- Crescente:

Segundo Reeds (1991), no período inicial da secagem a taxa de secagem é crescente, devido à umidade relativa do ar na camada limite ser menor que 100%, ocorrendo o que usualmente chama-se de acomodação. Essas elevações acontecem até o ponto onde aconteça equivalência entre a transferência de calor e massa (água).

- Constante:

Neste período, a transferência de massa é influenciada pelas condições externas. A água evaporada é água livre. Enquanto houver umidade superficial para acompanhar o processo de evaporação, a taxa de secagem será constante, e a temperatura do sólido é a temperatura de bulbo-úmido do ar (θ_{bu}). Neste período, a taxa de evaporação e a evaporação superficial são constantes, e a massa de água evaporada é diretamente proporcional à diferença entre a pressão de vapor do líquido na superfície do sólido à temperatura de evaporação (P_w) e a pressão de vapor do líquido no ar ambiente ao redor do sólido (P_a), ocorrendo a secagem se P_w for maior que P_a (Reeds, 1991). O período termina quando o sólido atinge um teor de umidade, a partir do qual a temperatura começa a se elevar. O ponto de término desse período é definido por teor de umidade crítica. A temperatura da superfície

do sólido, a partir deste ponto eleva-se e a taxa de secagem cai, iniciando o período decrescente (Nascimento 2002).

- Decrescente:

A superfície do sólido vai ficando cada vez com menos líquido, acontece uma redução da transferência de massa, e a transferência de calor, não é equivalente a de massa; o fator da não equivalência é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto.

- c) Da variação de temperatura do sólido ao longo do período de secagem.

Durante o período da taxa de secagem decrescente, a temperatura do produto aumenta, até atingir a temperatura do ar de secagem, ou seja, a temperatura de bulbo-seco. Quando o sólido atinge o ponto de umidade de equilíbrio (menor teor de umidade atingido no processo de secagem com o sólido nas condições a que está submetido), em relação ao ar de secagem, o processo de transferência de massa cessa.

No decorrer do processo de secagem, devido os complexos fenômenos de transferência de calor, massa, quantidade de movimento e variações dimensionais, ocorreu a necessidade de criar modelos matemáticos que simulem o processo. E para que isso ocorra é necessário inserir o máximo de informações no modelo de secagem, sendo elas: mecanismo de transporte de calor e umidade no interior do sólido, coeficiente de difusão, encolhimento, transferência de calor e massa acoplados, condições ambientes externas próximas do sólido, entre outros, assim sendo possível relacionar o mais coerente possível o modelo com a situação real (Almeida, 2003; Silva, 2009).

De acordo com Brooker et al. (1992), no decorrer do processo da secagem há uma transferência de calor ao material por meio da convecção, através do ar, ou por condução, através do contato com uma superfície quente. Esse calor é utilizado para vaporizar o líquido na superfície do sólido ou próximo da superfície se a mudança de estado ocorrer no interior do corpo. O vapor produzido é retirado pelo fluxo de ar, seja em convecção natural ou forçada. Com a retirada da água da superfície e das camadas mais externas, cria-se um

gradiente de concentração internamente ao produto causando um processo migratório de umidade do centro para superfície (Fioreze, 2004; Farias, 2006).

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

Essa migração de umidade, na verdade, pode ocorrer por uma combinação de variados processos simultaneamente. Entretanto, observa-se, que alguns autores trabalham com a hipótese do transporte de água acontecer como uma combinação de difusão líquida e difusão de vapor, enquanto outros preferem considerar apenas a difusão de líquidos. O modelo que considera apenas a difusão líquida é uma simplificação para o movimento migratório da água no interior do sólido (Brooker et al., 1992; Fioreze, 2004; Park et al., 2007). Apesar de esse modelo sofrer algumas críticas, ele vem ganhando a preferência de um considerável número de pesquisadores na área de secagem, sendo amplamente utilizado no dimensionamento migratório da umidade (Lima, 1999; Nascimento, 2002; Carmo, 2000; Farias, 2006; Mellado, 2007; Silva, 2007; Lima et al., 2004; Salina et al., 2004; Silva et al., 2007; Silva, C. et al., 2010).

Diversos mecanismos de transporte de umidade em sólidos têm sido propostos na literatura como segue (Brooker et al., 1992; Fioreze, 2004; Lima, 1999; Fortes e Okos, 1980; Strumillo e Kudra, 1986):

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

Mais informações adicionais sobre cada mecanismo de transporte de umidade citados anteriormente, podem ser encontradas nas literaturas citadas.

2.3.2 Lei de Fick

Em 1985, Fick, seguindo o trabalho de Fourier de 1822 (Bird et al., 1960), estudou o processo de difusão de mistura de soluções e formulou duas leis. A primeira lei de Fick é fenomenológica e indica que o fluxo J de uma substância difundida através de uma área de secção transversal unitária é proporcional ao gradiente de concentração medido normalmente a esta secção. Em símbolos tem-se:

$$\bar{J} = -D\rho_s \frac{dM}{dy} \quad (2.1)$$

onde \bar{J} é o fluxo de massa relativo ao referencial que se move na velocidade mássica média da mistura.

Em 1921, Lewis, introduziu a notação da difusão de líquidos no interior de sólidos (Keey, 1992). Ele assumiu que a taxa de transferência de umidade é proporcional ao gradiente de concentração de umidade dentro do sólido.

A segunda Lei de Fick tem sido muito utilizada para descrever a difusão de umidade no interior do sólido:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D\nabla M) \quad (2.2)$$

Em geral o coeficiente de difusão D é considerado constante, ou dependente da temperatura e/ou do teor de umidade do sólido.

O encolhimento do produto durante o processo de secagem é um fenômeno físico observável que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade. Este efeito pode gerar uma influência considerável no coeficiente de difusão de massa, e conseqüentemente na taxa de secagem. Entretanto, apesar de alguns autores não considerar o encolhimento, a teoria da difusão líquida vem ganhando ao longo do tempo a preferência dos pesquisadores. Para

materiais cerâmicos, podem ser citados Hanatani e Itaya (1992), Nascimento (2002), Cadé (2004), Lucena (2005), Nascimento et al. (2005), Batista e Nascimento (2007) e Silva (2007).

2.4 Transferência de Calor

2.4.1 Fundamentos

Segundo Incropera e DeWitt (2001), a transferência de calor é definida como sendo o trânsito de energia provocado por uma diferença de temperatura. Esse fenômeno pode acontecer por três processos diferentes, que são: condução, convecção e radiação.

De acordo com Fioreze (2004), a termodinâmica é o segmento da física que trata do relacionamento entre calor e outras formas de energia. Assim, como outros princípios imutáveis observados da natureza ao longo dos tempos, que foram transformados em postulados, ou "leis", a transferência de calor obedece a algumas leis. A primeira lei da termodinâmica estabelece que a energia não pode ser criada ou destruída, mas apenas transformada de uma forma ou outra.

Enfatizando a condução, ela é a transferência de calor que ocorre por meio da propagação do calor de partícula à partícula, neste caso, os átomos "quentes" colidem com os "frios" ocorrendo uma transferência de calor de uma partícula para outra. É como se tivesse partículas mais energéticas de uma determinada substância se chocando e transmitindo calor para partículas menos energéticas.

2.4.2 Modos de Transporte de Calor

2.4.2.1 Condução de Calor

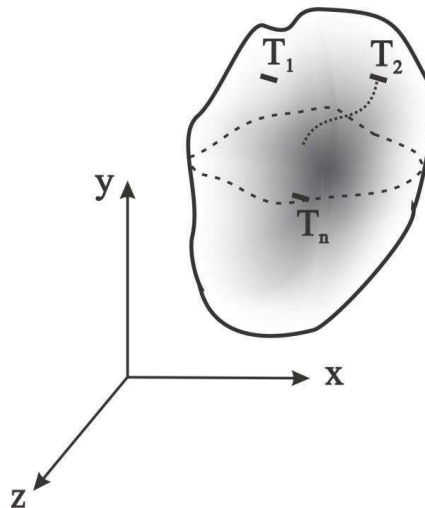
Fenômenos de transferência de calor por condução são corriqueiramente encontrados em praticamente todo mundo físico e no domínio industrial. A descrição analítica da presente forma de transferência de calor é considerada uma das mais bem sucedidas em questão de

compreensão. Algumas das bases de entendimento da condução remetem-se de volta a história inicial. Reconheceu-se que chamando algumas simplificações de importância relativamente menor, resultaram diretamente em soluções matemáticas. Algumas dessas soluções foram de forma muito fáceis formuladas. Assim com o passar dos anos ocorreu um desenvolvimento rigoroso de aplicações para uma ampla variedade de processos (Boehm, 1999).

Pode-se quantificar o processo de transferência de calor em termos da equação da taxa apropriada. Essa equação pode ser usada para calcular a energia transferida por unidade de tempo. Na condução de calor, a equação da taxa é conhecida como a Lei de Fourier.

Para entender melhor o processo de transporte de calor por condução, será apresentado a seguir todo o formalismo matemático deste fenômeno, baseando-se na Lei de Fourier. Para isto, considere um sólido com a distribuição (ou campo) de temperatura T num tempo dada por $T = f(x, y, z, t)$, conforme ilustra a Figura 2.7.

Figura 2.7 - Sólido com forma arbitrária.



A lei de Fourier foi desenvolvida pelo matemático e físico francês Jean Baptiste Joseph em 1811, conhecido como Barão Fourier. A lei de Fourier constitui uma lei empírica, isto é, estabelecida a partir de experiência, e descreve a teoria da condutibilidade calorífica em regimes de temperaturas estacionárias e variáveis.

Joseph Fourier publicou seu notável livro *Theorie Analytique de la Chaleur*, em 1822. Ele formulou uma explicação muito completa da teoria da condução de calor. Ele começou

sua dissertação, afirmando a lei empírica que leva seu nome: o fluxo de calor, q (w/m^2), resultante de condução térmica é proporcional a grandeza do gradiente de temperatura e contrária no sinal (Lienhard IV e Lienhard V, 2001).

Pode-se afirmar que, o fluxo de calor por unidade de área é proporcional a intensidade do campo de temperatura ou o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura. Em símbolos pode-se escrever:

$$q'' = -k\nabla T \quad (2.3)$$

onde k é a condutividade térmica do material e ∇T é o gradiente de temperatura dado por:

$$\nabla T = \text{Grad}T = \vec{n} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \quad (2.4)$$

onde \vec{n} é um vetor unitário, ou ainda:

$$\nabla T = \text{Grad}T = \vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.5)$$

A condutividade térmica é uma propriedade física de um corpo caracterizado pela sua habilidade para transferir calor: $k=f$ (composição química, estrutura física e estado do material), ou ainda: $k=f$ (T , ε , P , Composição e estado do material, posição dentro do campo, etc.).

Assim uma formulação mais geral, para matérias anisotrópicas, tem-se:

$$q'' = -k_{i,j} \frac{\partial T}{\partial n_j} = -k_{1,1} \frac{\partial T}{\partial x} - k_{1,2} \frac{\partial T}{\partial y} - k_{1,3} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.6)$$

- Se $k_{i,j} = 0$, $i \neq j$, então $k_{i,i} = k_i \Rightarrow$ material ortotrópico.
- Se $k_{1,1} = k_{2,2} = k_{3,3} = k \Rightarrow$ material isotrópico.

Neste caso, pode-se escrever da seguinte forma:

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.7)$$

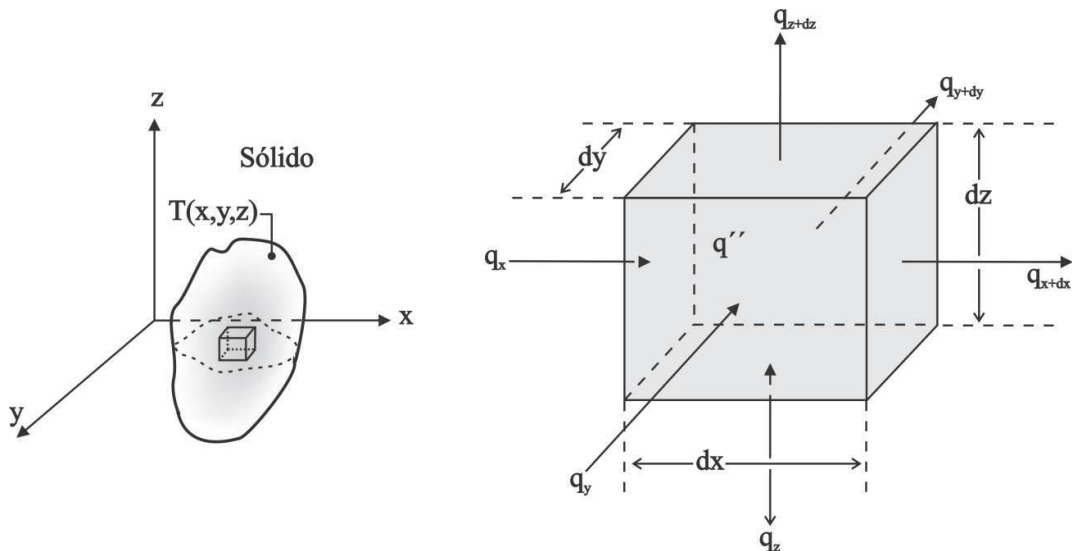
$$q_y'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.8)$$

$$q_z'' = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.9)$$

2.4.2.2 A Equação de Condução de Calor

Para demonstrar a equação diferencial de calor no sistema de coordenadas cartesianas, considere a Figura 2.9, abaixo:

Figura 2.8 - Elemento diferencial para a análise de condução de calor.



A quantidade q_{i+di} é uma função desconhecida de i . Expandindo em série de Taylor onde somente os 2 primeiros termos da série são considerados, tem-se:

$$q_{x+dx} \cong q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (2.10)$$

$$q_{y+dy} \cong q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (2.11)$$

$$q_{z+dz} \cong q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (2.12)$$

Aplicando a conservação de energia no volume de controle diferencial, obtém:

$$(q_x - q_{x+dx}) + (q_y - q_{y+dy}) + (q_z - q_{z+dz}) + q''' dV = mC_p \frac{\partial T}{\partial t} q'' \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (2.13)$$

que resulta em:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + q''' dx dy dz = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.14)$$

Portanto, como:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} dy dz \quad (2.15)$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} dx dz \quad (2.16)$$

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \quad (2.17)$$

e substituindo-se na equação (2.14), tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.18)$$

que é equação de difusão de calor na sua forma tridimensional, transiente com geração interna de energia.

Numa forma mais simplificada, pode-se escrever da seguinte maneira:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \nabla \cdot (k \nabla T) + q''' \quad (2.19)$$

onde k , ρ e C_p são as condutividade térmica, densidade e calor específico do material.

A Tabela 2.2 apresenta alguns valores típicos da condutividade térmica de alguns materiais. A condutividade térmica se diferencia de acordo com a matéria. Por exemplo, a condutividade de um sólido é maior que a de um líquido, que por sua vez é maior que a de um gás.

Tabela 2.2 - Valores de condutividades térmicas (k) para diferentes materiais de cobertura.

Material	k (w/m.°C)
Alumínio	230
Aço	47
Concreto	1,74
Tijolo maciço	0,81
Fibrocimento	0,76
Água	0,64
Palha	0,12
Lã de vidro	0,036
Poliestireno expandido	0,035
Ar	0,023

Fonte: Adaptada de Kreith et al. (1999).

O parâmetro termofísico ∇^2 é o operador Laplaciano e $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ é a difusividade térmica do material.

A difusividade térmica serve para medir a relação entre a capacidade térmica e a sua capacidade em acumular energia térmica. Os materiais que possuem o α grande respondem rapidamente as variações do ambiente térmico, enquanto que os materiais com difusividades menores respondem mais lentamente, e levam mais tempo para atingir novas condições de equilíbrio (Incropera et al., 2014).

Todos os corpos existentes na natureza sejam eles líquidos, sólidos ou gasosos quando passam pelo processo de resfriamento ou aquecimento estão suscetíveis à dilatação ou contração térmica. Esse processo se dá em virtude do aumento ou diminuição da energia cinética média das moléculas que constituem a matéria. No aquecimento de tijolos maciços, devido à intensificação do grau de agitação de suas moléculas ocorre um aumento das distancias intermoleculares e conseqüentemente dilatação do sólido. Se o processo de aquecimento do corpo for não homogêneo o sólido sofrerá deformações e conseqüentemente falhas irreversíveis no produto.

Durante o aquecimento do material, devido ao coeficiente de dilatação volumétrica, há uma variação dimensional pra mais no material. Essa variação é calculada com a seguinte expressão:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_o \cdot \Delta T \quad (2.20)$$

onde γ é o coeficiente de dilatação térmica volumétrica, V_o é o volume inicial do corpo e ΔV e ΔT são, respectivamente, a variação do volume e a variação da temperatura do corpo.

2.5 Método de Solução da Equação de Difusão

Para solução da equação de difusão (calor ou massa) pode-se usar técnicas tanto analíticas quanto numéricas.

a) Analítica

Podem ser:

- Separação de variáveis;

$$T(x, y, z, t) = X(x)Y(y)Z(z)\tau(t) \quad (2.21)$$

- Transformada de Laplace (Transformada Integral);

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt}f(t)dt \quad (2.22)$$

- Reflexão e superposição;
- Produto de soluções para problemas simples.

$$T(x, y, z, t) = T_1(x, t)T_2(y, t)T_3(z, t)\tau(t) \quad (2.23)$$

Ou ainda outras soluções aproximadas (Carslaw e Jaeger, 1959; Luikov, 1968).

b) Soluções numéricas

Podem ser, entre outros:

- Elementos finitos;
- Elementos de fronteiras ou de contorno;
- Diferenças finitas;
- Volumes finitos;
- Transformada integral generalizada (GITT).

A solução numérica de uma equação diferencial parcial pode ser usada nos casos, por exemplo, onde existem não-linearidades, uma vez que a obtenção de uma solução analítica é de notável complexidade.

Diversos autores descrevem estes métodos (Patankar, 1980; Maliska, 1995; Minkowicz et al., 1988; Shih, 1984; Cotta, 1993).

2.6 Estado da Arte Sobre Secagem de Materiais Cerâmicos

Nascimento (2002) apresenta um estudo analítico/numérico/experimental da secagem de tijolos cerâmicos, moldados por argila ball-clay e vermelha. Foram apresentados vários modelos matemáticos tridimensionais transientes ou variáveis, condições de contorno constante ou do tipo convectiva, com ou sem efeito de encolhimento e soluções analíticas e numéricas foram mostradas. O autor verificou a influência dos números de Fourier e Biot, coeficientes de transporte e de encolhimento e forma do corpo, na transferência interna de calor e massa.

Silva (2009) apresentou um estudo numérico e experimental da secagem de tijolos vazados, utilizando um modelo matemático tridimensional transiente para prever a transferência de massa e calor. O autor evidenciou que para temperaturas menores a velocidade de secagem é menor, diminuindo os riscos de defeitos no produto. Porém nas temperaturas maiores surgem altos gradientes de temperatura e umidade no interior do tijolo que geram tensões termo-hídricas, ocasionando grandes fissuras e trincas no material.

Almeida (2009) desenvolveu um estudo teórico e experimental na secagem de tijolos cerâmicos vazados em estufa e em secador industrial tipo túnel de fluxo cruzado. Um modelo matemático foi apresentado para descrever a transferência de calor e massa entre o ar e o produto que considera as propriedades termo-físicas variável. Uma solução numérica das equações governantes é realizada usando o método dos volumes finitos. O autor verificou que a secagem com temperatura variável (50 à 100°C) e umidade relativa alta (70 à 80%), assegura tijolos com excelente qualidade, e que o secador industrial apresenta baixas eficiências energéticas e exegética, alto consumo de exaustão evidenciando a secagem um processo altamente dissipativo.

Chemkhi e Zagrouba (2005) apresentaram um estudo experimental da secagem de três diferentes tipos de materiais argilosos. Foi trabalhado sob diferentes condições experimentais

variando-se a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Neste trabalho foram mostradas as cinéticas de secagem e o coeficiente de difusão. A análise feita do coeficiente de difusão, determinada a partir das curvas de secagem, mostrou que nenhum resultado inequívoco pode ser obtido, salientando assim que os coeficientes de difusão dependem das condições experimentais.

Murugesan et al. (2001) apresentaram um estudo numérico sobre a secagem evaporativa de um tijolo retangular bidimensional como um problema conjugado. Para predição do comportamento de secagem de tijolos, eles utilizaram as equações de Navier-Stokes para a obtenção do campo de escoamento e solução do escoamento correspondente. Verificaram que a predição da temperatura e do teor de umidade nas pontas acontecem mais espontaneamente se comparada com os lados dos sólidos.

Erdogdu (2008) reporta um estudo sobre a determinação da difusividade térmica e aplicou matematicamente metodologias de otimização para determinação simultânea de coeficientes de transferência de calor. Para esse caso, a otimização foi restringida em metodologias baseadas em soluções analíticas de placa infinita, cilindro infinito e esfera. O estudo mostrou que uma determinação exata da difusividade térmica e do coeficiente de transferência de calor por convecção é uma tarefa bastante difícil, porém tendo conhecimento da localização em que o tempo-temperatura experimental obtidos simplificaria consideravelmente o problema.

Lopez e Cortes (2013) desenvolveram um estudo sobre a transferência de umidade durante a secagem de tijolos, analisada pelos perfis de temperatura e umidade relativa que estão associados com os períodos de taxa de secagem. Descreve também, o comportamento dos perfis de umidade e o instante em que o teor de umidade crítico aparece. Os resultados mostraram que os perfis de temperatura e umidade relativa são úteis para descrever a transferência de massa durante o processo de secagem.

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

Itaya et al. (1997) estudaram a secagem de materiais cerâmicos argilosos, usando a teoria da difusão líquida, num estudo numérico tridimensional transiente. Os efeitos dos parâmetros adimensionais como os números de Biot e de Lewis, foram analisados com o objetivo de se obter uma ótima condição de secagem. Os autores evidenciaram que os

gradientes de umidade e as máximas tensões que geram trincas no material são mais significativos com os acréscimos destes parâmetros. Evidenciaram também aumentos nas tensões termomecânicas com o aumento do número de Biot e encolhimento.

Ketelaars et al. (1992) desenvolveram um estudo numérico uni e bidimensional, com o objetivo de analisar a influência do encolhimento na cinética de secagem e tensões internas, em um material cerâmico argiloso. Assumiram diferentes tipos de considerações: encolhimento unidirecional, encolhimento isotrópico e sem encolhimento. Concluíram que a taxa de secagem é influenciada pelo tipo de encolhimento, sendo maior para um encolhimento unidimensional, e que as tensões que podem provocar trincas e deformações, crescem com o aumento dos níveis de encolhimento.

Nascimento et al. (2008), apresenta um estudo experimental da secagem, queima e choque térmico de amostras de tijolos cerâmicos maciços e vazados de argila para cerâmica vermelha, com diferentes dimensões e umidades iniciais. São oferecidas técnicas numéricas, analítica e experimental à problemas específicos envolvendo transferência de calor e massa, retração volumétrica e tensões oriundas de gradientes térmicos e de umidade, direcionadas ao desenvolvimento de sistemas de secagem, particularmente a secagem de materiais cerâmicos com forma paralelepípedica nos níveis de partícula e de equipamento industrial (secador).

Farias (2011) abordou um estudo sobre solução numérica da equação de difusão tridimensional em regime transiente, para um domínio arbitrário, utilizando o método dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita para a discretização da equação. A validação da solução proposta foi feita usando soluções analíticas e numéricas da equação de difusão para várias geometrias, permitindo validar tanto malhas ortogonais quanto não ortogonais. Um código computacional desenvolvido foi aplicado na simulação, a partir de dados experimentais da secagem de telhas cerâmicas com diferentes condições experimentais. Com a simulação o autor determinou o coeficiente de difusão efetivo em função da razão de umidade e da temperatura do ar de secagem e também o valor do coeficiente de transferência convectivo de massa correspondente para cada temperatura.

CAPÍTULO 3

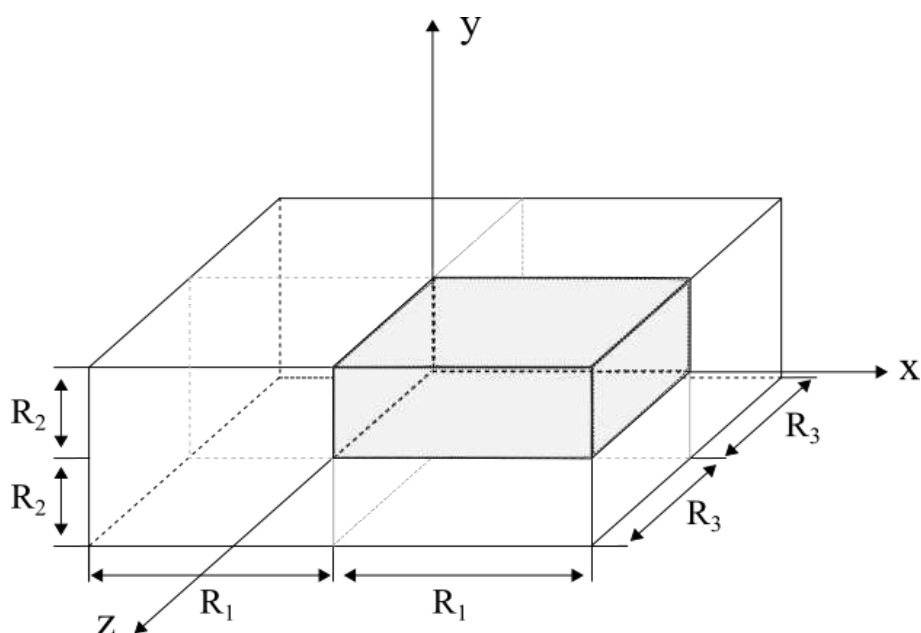
METODOLOGIA

A seguir apresenta-se todo o formalismo matemático do problema físico tratado nesta pesquisa.

3.1. Modelo Matemático do Transporte de Calor e Massa

Considere o problema de difusão de uma variável $\Phi(x, y, z, t)$ em um paralelepípedo sólido de dimensões $2R_1 \times 2R_2 \times 2R_3$, de acordo com a Figura 3.1.

Figura 3.1 - Configuração geométrica do problema físico.



A equação diferencial que descreve o fenômeno de difusão neste sólido é da forma:

$$\frac{\partial(\zeta\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + \Phi''' \quad (3.1)$$

onde o operador Nabla ∇ é dado por:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (3.2)$$

Desde que a equação (3.2) é uma equação tridimensional transiente, necessita-se de no mínimo, seis condições de contorno na posição e uma no tempo.

Devido à simetria que existe neste sólido, considera-se apenas 1/8 do seu volume. Sendo assim a condição inicial, de simetria e de contorno do problema especificado são as seguintes:

- Condição inicial:

$$\Phi(x, y, z, t = 0) = \Phi_0 \quad (3.3)$$

- Condição de simetria:

$$-\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x=0, y, z, t)}{\partial x} = -\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x, y=0, z, t)}{\partial y} = -\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x, y, z=0, t)}{\partial z} = 0, \text{ em } t > 0 \quad (3.4)$$

- Condição de contorno na superfície:

$$-\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x=R_1, y, z, t)}{\partial x} = h[\Phi(x=R_1, y, z, t) - \Phi_e] \text{ em } t > 0. \quad (3.5)$$

$$-\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x, y=R_2, z, t)}{\partial y} = h[\Phi(x, y=R_2, z, t) - \Phi_e] \text{ em } t > 0. \quad (3.6)$$

$$-\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi(x, y, z=R_3, t)}{\partial z} = h[\Phi(x, y, z=R_3, t) - \Phi_e] \text{ em } t > 0. \quad (3.7)$$

onde h é o coeficiente de transferência convectiva e Φ_e é o valor de Φ na condição de equilíbrio.

Assim, a solução geral do problema de difusão tridimensional transiente com as condições de contorno especificadas nas equações é obtida pela superposição de problemas unidimensionais em coordenadas cartesianas e no tempo, de placas infinitas, cuja interseção forma o paralelepípedo (Gebhart, 1993; Luikov, 1968). Este formalismo matemático será apresentado a seguir.

A equação diferencial parcial que governa a distribuição da variável Φ na direção x , no interior de uma placa plana infinita será dada por:

$$\frac{\partial(\zeta\Phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) \quad (3.8)$$

cujas condições de contorno, são:

- $\Phi(x, t) = \Phi_0$ em $t=0$ e $-R_1 \leq x \leq R_1$; (3.9)

- $-\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi(x, t)}{\partial x} = 0$ em $t>0$ e $x=0$ (simetria); (3.10)

- $-\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi(x, t)}{\partial x} = h[(\Phi(x, t) - \Phi_e)]$ em $x=R_1$. (3.11)

Visando simplificar o modelo matemático proposto, as seguintes considerações foram adotadas:

- a) Propriedades termofísicas constantes;
- b) Geração interna por unidade de volume da variável Φ , desprezível;
- c) Corpo homogêneo e isotrópico;
- d) Distribuição de Φ constante e uniforme em todo o sólido, no início do processo;
- e) Simetria em torno do centro do produto;

- f) Condição de contorno convectiva na superfície do sólido, com teor de umidade e temperatura dependente da posição e do tempo;
- g) Não ha existência de variação de volume.

Fazendo $\Psi = \Phi(x, t) - \Phi_e$, a equação (3.8) assume a forma:

$$\Gamma^\Phi \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \zeta \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (3.12)$$

As condições iniciais, de simetria e de contorno são respectivamente:

$$\bullet \quad \Psi(x, t) = \Psi_o = \Phi_o - \Phi_e \text{ em } t=0 \text{ e } -R_1 \leq x \leq R_1 \quad (3.13)$$

$$\bullet \quad -\Gamma^\Phi \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial x} = 0 \text{ em } t>0 \text{ e } x=0 \quad (3.14)$$

$$\bullet \quad -\Gamma^\Phi \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial x} = h\Psi(x, t) \text{ em } t>0 \text{ e } x=R_1 \quad (3.15)$$

Desde que $\Psi = \Psi(x, t)$ e usando o método da separação de variáveis, pode-se escrever.

$$\Psi(x, t) = \Psi_1(x) \cdot \Psi_2(t) \quad (3.16)$$

Sendo assim a solução analítica da equação (3.8) é o produto de soluções, dependente da coordenada espacial x e outra dependente do tempo t .

Derivando a equação (3.16) e substituindo na equação (3.12), tem-se:

$$\frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} \frac{d^2 \Psi_1}{dx^2} \Psi_2 = \Psi_1 \frac{d\Psi_2}{dt} \quad (3.17)$$

Igualando-se os termos da equação (3.17) a $-\beta^2$ real e reorganizando os termos, obtém-se as seguintes equações diferenciais ordinárias:

$$\frac{d^2\Psi_1}{dx^2} + \beta^2\Psi_1 = 0 \quad (3.18)$$

$$\frac{d\Psi_1}{dt} + \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta}\beta^2\Psi_2 = 0 \quad (3.19)$$

As soluções das equações (3.18) e (3.19) são respectivamente:

$$\Psi_1(x) = C_1\text{sen}(\beta x) + C_2\text{cos}(\beta x) \quad (3.20)$$

$$\Psi_2(t) = C_3 e^{-\frac{\Gamma^\Phi}{\zeta}\beta^2 t} \quad (3.21)$$

Logo, a solução particular do problema unidimensional transiente será:

$$\Psi(x, t) = [C_1\text{sen}(\beta x) + C_2\text{cos}(\beta x)]C_3 e^{-\frac{\Gamma^\Phi}{\zeta}\beta^2 t} \quad (3.22)$$

onde as constantes C_1 , C_2 e β são obtidas usando-se as condições de contorno em $x=0$ e $x=R_1$.

Sendo assim, usando-se o princípio da combinação linear de soluções, tem-se a solução para o problema apresentado dada por:

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \text{cos}(\beta_n x) e^{-\beta_n^2 \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \quad (3.23)$$

Os autovalores β_n da equação (3.23) são raízes da equação transiente a seguir:

$$\cotg(\beta_n R_1) = \frac{\beta_n R_1}{Bi} \quad (3.24)$$

sendo $Bi = \frac{h\Gamma^\Phi}{R_1}$, chama-se número de Biot de Transferência.

Aplicando a condição inicial $t=0$ na equação (3.23) tem-se:

$$\Psi_0 = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(\beta_n x) \quad (3.25)$$

Multiplicando ambos os dados da equação acima por $\cos(\beta_n x)$, integrando estes sobre o intervalo $[0, R_1]$, e obedecendo o critério de ortogonalidade das funções trigonométricas, têm-se após adequada manipulação algébrica, os coeficientes C_n da série de cosseno de Fourier, determinados por:

$$C_n = \frac{2\beta_n}{[\beta_n R_1 + \text{sen}(\beta_n R_1)\text{cos}(\beta_n R_1)]} \int_0^{R_1} \Psi_0 \cos(\beta_n x) dx \quad (3.26)$$

Assim, resolvendo a equação (3.26) tem-se que:

$$C_n = \frac{2\Psi_0 \text{sen}(\beta_n R_1)}{[\beta_n R_1 + \text{sen}(\beta_n R_1)\text{cos}(\beta_n R_1)]} \quad (3.27)$$

Sendo assim, a solução final será:

$$\Psi(x, t) = 2\Psi_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}(\beta_n R_1)\text{cos}(\beta_n x)}{[\beta_n R_1 + \text{sen}(\beta_n R_1)\text{cos}(\beta_n R_1)]} e^{-\beta_n^2 \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \quad (3.28)$$

O valor médio de Ψ é dado por:

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{V} \int_V \Psi \cdot dV \quad (3.29)$$

Portanto:

$$\bar{\Psi} = 2\Psi_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Bi^2}{(\beta_n R_1)^2 [Bi^2 + Bi + (\beta_n R_1)^2]} e^{-\beta_n^2 \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \quad (3.30)$$

Considere o seguinte parâmetro adimensional:

$$\Phi^* = \frac{\Psi(x, t)}{\Psi_0} \quad (3.31)$$

Utilizando-se o parâmetro adimensional definido na equação (3.31), a equação (3.28) pode ser reescrita na forma:

$$\Phi^* = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}(\beta_n R_1) \cos(\beta_n R_1 x^*)}{[\beta_n R_1 + \text{sen}(\beta_n R_1) \cos(\beta_n R_1)]} e^{-\beta_n^2 \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \quad (3.32)$$

Sendo assim o valor médio da distribuição de Φ^* será dada por:

$$\bar{\Phi}^* = \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\beta_n^2 \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \quad (3.33)$$

onde:

$$B_n = \frac{2Bi^2}{(\beta_n R_1)^2 [Bi^2 + Bi + (\beta_n R_1)^2]} \quad (3.34)$$

Desde que a solução tridimensional transiente para o problema de difusão de Φ é dada por uma solução produto de problemas unidimensionais transientes, então a solução para o problema de difusão Φ num paralelepípedo será:

$$\Phi^* = \frac{\Phi(x, y, z, t) - \Phi_e}{\Phi_0 - \Phi_e} = \left(\frac{\Phi(x, t) - \Phi_e}{\Phi_0 - \Phi_e} \right) \left(\frac{\Phi(y, t) - \Phi_e}{\Phi_0 - \Phi_e} \right) \left(\frac{\Phi(z, t) - \Phi_e}{\Phi_0 - \Phi_e} \right) \quad (3.35)$$

Portanto tem-se que:

$$\begin{aligned} \Phi^*(x, y, z, t) = & \left[\left(2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}(\beta_n R_1) \cos(\beta_n x)}{[\beta_n R_1 + \text{sen}(\beta_n R_1) \cos(\beta_n R_1)]} e^{-\beta_n^2 \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \right) \right] \times \\ & \left[\left(2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\text{sen}(\beta_m R_2) \cos(\beta_m y)}{[\beta_m R_2 + \text{sen}(\beta_m R_2) \cos(\beta_m R_2)]} e^{-\beta_m^2 \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \right) \right] \times \\ & \left[\left(2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\text{sen}(\beta_k R_3) \cos(\beta_k z)}{[\beta_k R_3 + \text{sen}(\beta_k R_3) \cos(\beta_k R_3)]} e^{-\beta_k^2 \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.36)$$

Rearranjando os termos da equação (3.36) e introduzindo os índices 1, 2 e 3 referentes as faces do sólido, perpendiculares aos eixos x, y e z, respectivamente, tem-se:

$$\Phi^*(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{n1} A_{m2} A_{k3} \cos(\beta_{n1} x) \cos(\beta_{m2} y) \cos(\beta_{k3} z) e^{-[\beta_{n1}^2 + \beta_{m2}^2 + \beta_{k3}^2] \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \quad (3.37)$$

Sendo:

$$A_{n1} = \frac{2 \text{sen}(\beta_{n1} R_1)}{\beta_{n1} R_1 + \text{sen}(\beta_{n1} R_1) \cos(\beta_{n1} R_1)} \quad (3.38)$$

$$A_{n2} = \frac{2\text{sen}(\beta_{m2}R_1)}{\beta_{m2}R_2 + \text{sen}(\beta_{m2}R_2)\cos(\beta_{m2}R_2)} \quad (3.39)$$

$$A_{k3} = \frac{2\text{sen}(\beta_{k3}R_3)}{\beta_{k3}R_3 + \text{sen}(\beta_{k3}R_3)\cos(\beta_{k3}R_3)} \quad (3.40)$$

e:

$$\cotg(\beta_{n1}R_1) = \frac{\beta_{n1}R_1}{Bi_1} \quad (3.41)$$

$$\cotg(\beta_{m2}R_2) = \frac{\beta_{m2}R_2}{Bi_2} \quad (3.42)$$

$$\cotg(\beta_{k3}R_3) = \frac{\beta_{k3}R_3}{Bi_3} \quad (3.43)$$

onde $\Phi^* = \frac{\Phi - \Phi_e}{\Phi_o - \Phi_e}$, β são os autovalores e Bi é o número de Biot de transferência dado por

$Bi = \frac{hL}{\Gamma^\Phi}$, sendo L um comprimento característico do sólido, digamos R_1 , R_2 ou R_3 .

O valor médio de Φ^* neste caso será dado por:

$$\bar{\Phi}^* = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_{n1} B_{m2} B_{k3} e^{-[\beta_{n1} + \beta_{m2} + \beta_{k3}] \frac{\Gamma^\Phi}{\zeta} t} \quad (3.44)$$

onde:

$$B_{n1} = \frac{2Bi_1^2}{(\beta_{n1}R_1)^2 [Bi_1^2 + Bi_1 + (\beta_{n1}R_1)^2]} \quad (3.45)$$

$$B_{m2} = \frac{2Bi_2^2}{(\beta_{m2}R_2)^2 [Bi_2^2 + Bi_2 + (\beta_{m2}R_2)^2]} \quad (3.46)$$

$$B_{k3} = \frac{2Bi_3^2}{(\beta_{k3}R_3)^2 [Bi_3^2 + Bi_3 + (\beta_{k3}R_3)^2]} \quad (3.47)$$

sendo $Bi_1 = \frac{hR_1}{\Gamma^\Phi}$, $Bi_2 = \frac{hR_2}{\Gamma^\Phi}$ e $Bi_3 = \frac{hR_3}{\Gamma^\Phi}$.

Nas equações (3.44) e (3.47), para o caso de transferência de calor $\Gamma^\Phi = k$, $\zeta = \rho c_p$, $h = h_c$ e $\Phi = \theta$ (a temperatura do sólido), enquanto que para transferência de massa, $\Gamma^\Phi = \rho D$, $\zeta = \rho$, $h = h_m$ e $\Phi = M$ (o teor de umidade do material). O coeficiente D , que aparece na formulação para transferência de massa, é denominado de coeficiente de difusão ou difusividade de massa. Geralmente, é dependente da temperatura e teor de umidade do sólido.

3.2 Procedimentos Computacionais

O advento do computador foi de um avanço impar para a ciência no século XX. Nesse sentido, o estudo de novas técnicas computacionais para solução de problemas diversos em engenharia é de suma importância.

Para a obtenção dos resultados analíticos, foram implementados dois códigos computacionais, utilizando o *software* Wolfram Mathematica[®], sendo um código para obter os autovalores β_n e outro para obter Φ^* e $\bar{\Phi}^*$.

Foram determinados 30 autovalores para β_{n1} , 30 para β_{n2} e 30 para β_{n3} , totalizando 2700 termos nas séries apresentada na equação (3.37) e (3.44). No Apêndice encontram-se tabela de alguns destes valores.

Como aplicação a metodologia foi usada para descrever a secagem de tijolos comuns de argila. As Tab. 3.1 e 3.2 a seguir apresentam os dados da amostra (tijolos cerâmicos), que foi utilizada nas simulações, tal qual reportados por Nascimento (2002).

Tabela 3.1 - Parâmetros experimentais do ar do tijolo usado nas simulações.

Dados Experimentais											
Caso	Ar			Tijolo							
	T _a (°C)	UR (%)	V (m/s)	M _o × 10 ⁺¹ (b.s)	M _e × 10 ⁺³ (b.s)	θ _o (°C)	2R ₁	2R ₂	2R ₃	t (min)	Tipo de Argila
1	60	10,1	0,1	1,00	1,730	27,42	60,45	7,06	20,54	270	Vermelha
2	80	4,66	0,1	0,77	0,841	24,65	60,81	5,39	20,43	216	Ball Clay
3	80	5,00	0,1	2,71	9,024	27,94	60,26	6,55	20,56	270	Vermelha
4	110	2,30	0,0	2,27	9,024	27,94	60,25	9,56	20,31	390	Vermelha
5	110	2,20	0,0	0,78	1,810	24,65	60,66	5,11	20,48	220	Ball Clay

Tabela 3.2 - Coeficientes de difusão e transferência convectiva usadas nas simulações.

Coeficientes de Transporte Estimados Pelos Modelos Numéricos						
Caso	k (W/mK)	c _p (J/KgK)	ρ (kg/m ³)	D × 10 ⁺⁸ (m ² /s)	h _m × 10 ⁺⁶ (m/s)	h _c (W/m ² .°C)
1	1,00	1673,51	1920	0,233	1,650	4,92
2	1,00	1673,51	1920	0,357	4,190	4,88
3	1,00	1673,51	1920	1,296	1,350	4,90
4	1,00	1673,51	1920	1,520	1,820	1,39
5	1,00	1673,51	1920	2,030	2,670	1,38

De posse destas informações experimentais, esses dados foram incorporados ao código computacional desenvolvido para simular os resultados. Após obter-se os dados preditos do teor de umidade, estes foram usados para comparação com os resultados experimentais para encontrar o menor erro possível, usando a técnica do erro mínimo quadrático.

Desta forma foi possível obter o coeficiente de difusão de massa otimizado (Nascimento, 2002).

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

$$ERMQ = \sum_{i=1}^n (\Phi_{i,Num}^* - \Phi_{i,Exp}^*)^2 \quad (3.48)$$

$$\bar{S}^2 = \frac{ERMQ}{(n - \hat{n})} \quad (3.49)$$

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

Os menores valores de ERMQ e \bar{S}^2 obtidos durante a comparação foram usados para obter os melhores valores do coeficiente de difusão D . No caso da estimativa de D , Φ foi substituído por M .

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

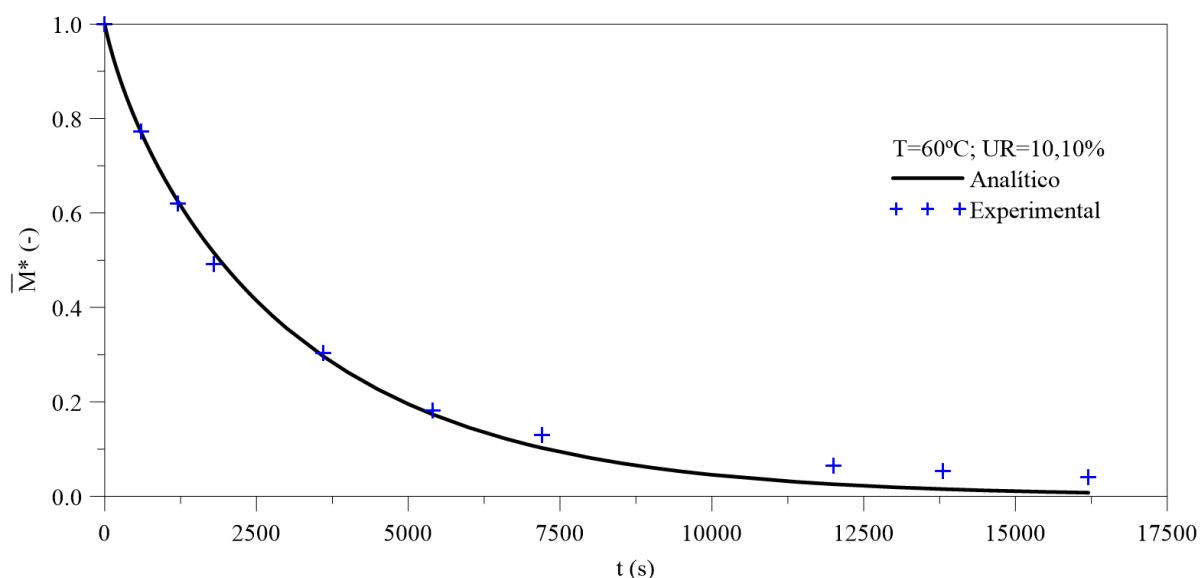
4.2 Cinéticas de Secagem e Aquecimento

a) Caso 1 (Argila Vermelha, T=60°C)

A Figura 4.1 ilustra a comparação entre os resultados preditos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo de secagem de tijolos cerâmicos comuns na temperatura de 60°C, referente ao Caso 1 das Tabelas 3.1 e 3.2.

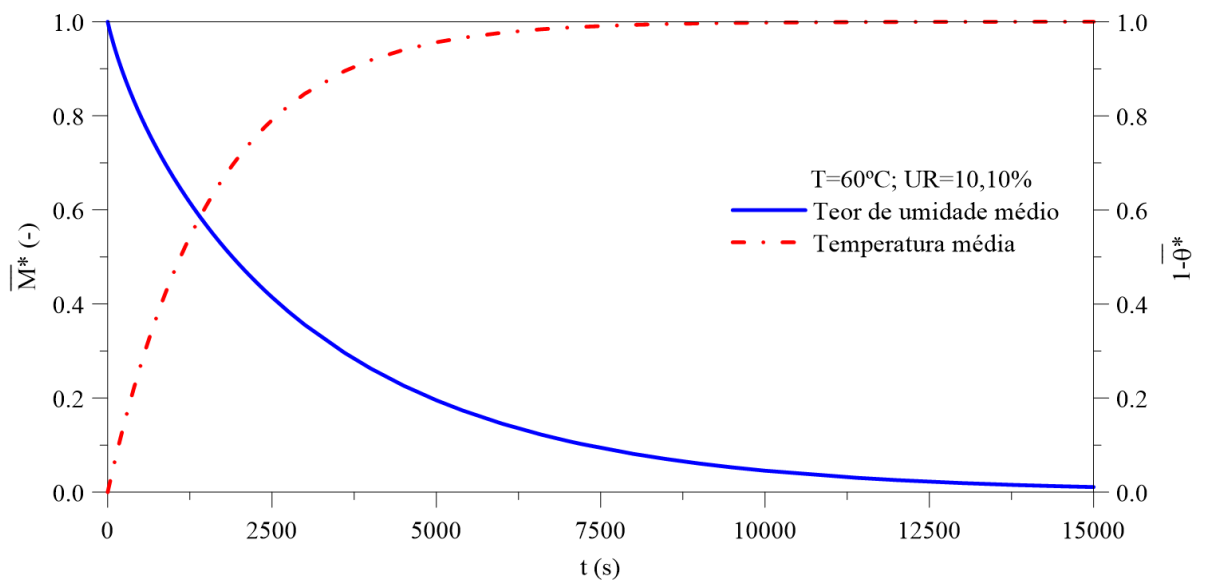
Como pode ser visto na Figura 4.1 os resultados analítico e experimental estão praticamente superpostos indicando que o ajuste foi muito satisfatório. No ajuste obteve-se um coeficiente de difusão de massa de $0,22 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, um resultado de 5,58% menor que o valor reportado por Nascimento (2002) e um erro médio quadrático de $0,00628346 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)^2$.

Figura 4.1 - Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem (Caso 1).



A Figura 4.2 ilustra a variação do teor de umidade médio e a temperatura média do material em função do tempo. Observa-se que em aproximadamente 7500 segundos, o material atingiu seu equilíbrio térmico, mas ainda não atingiu o equilíbrio higroscópico. A partir deste instante, o processo de secagem ocorre de forma isotérmica. Todo processo de secagem ocorreu a uma taxa de secagem decrescente.

Figura 4.2 - Predição do teor de umidade médio e temperatura média do tijolo em função do tempo de secagem (Caso 1).



As Figuras 4.3 a 4.14 dão uma visão geral da distribuição do teor de umidade para diferentes tempos de processo em diversos planos do sólido.

- Plano xy ($z=R_3$)

Figura 4.3 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

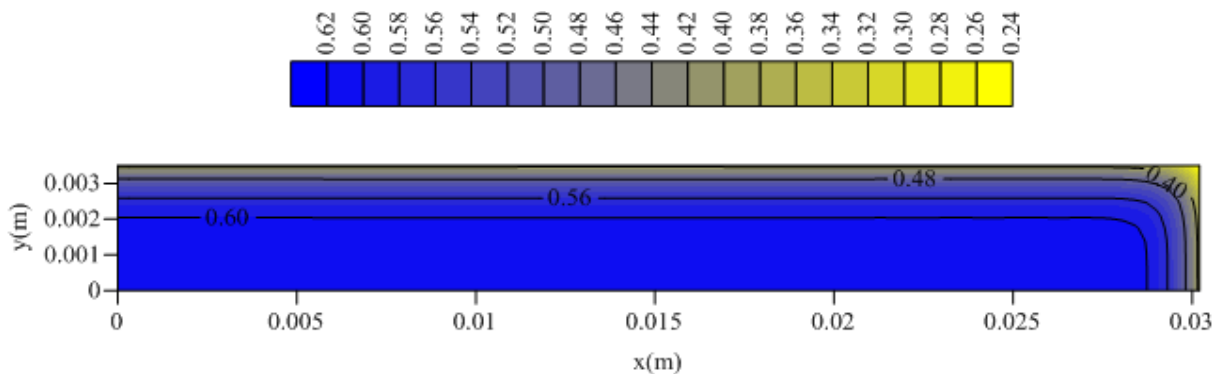


Figura 4.4 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=900$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

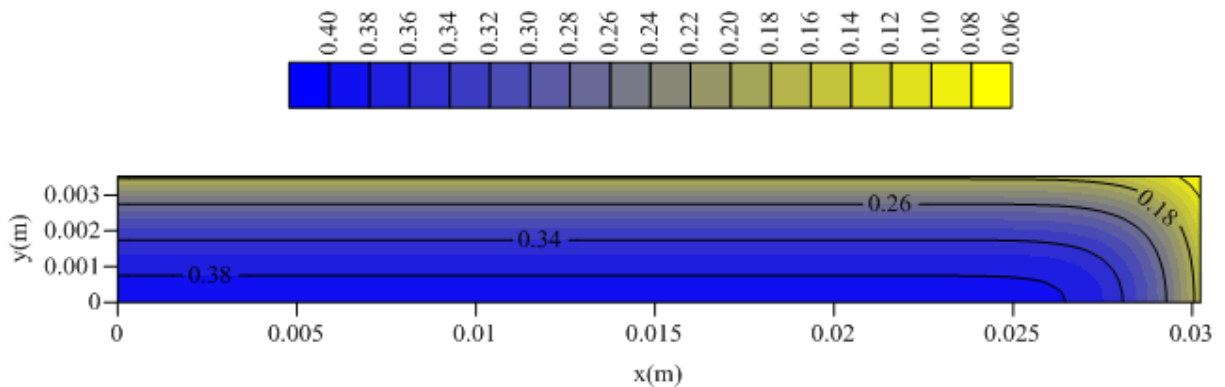
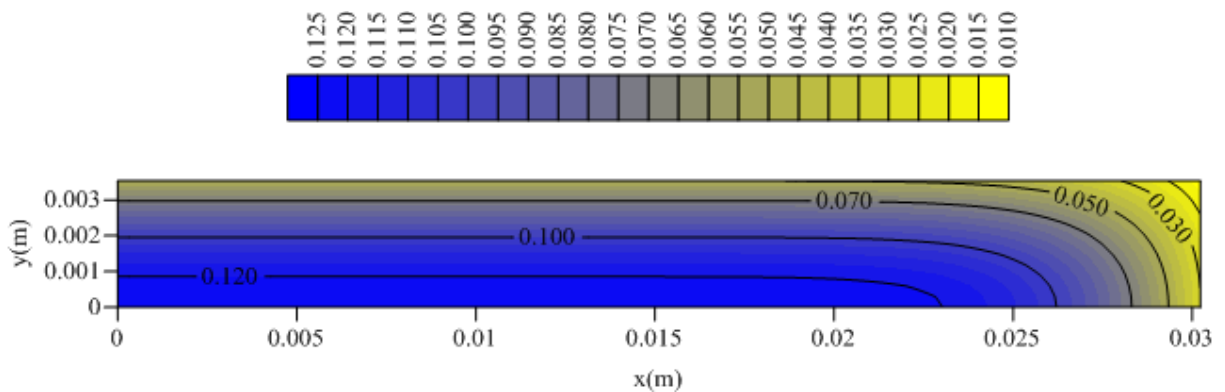


Figura 4.5 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=3600$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).



- Plano xy ($z=R_2/2$)

Figura 4.6 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

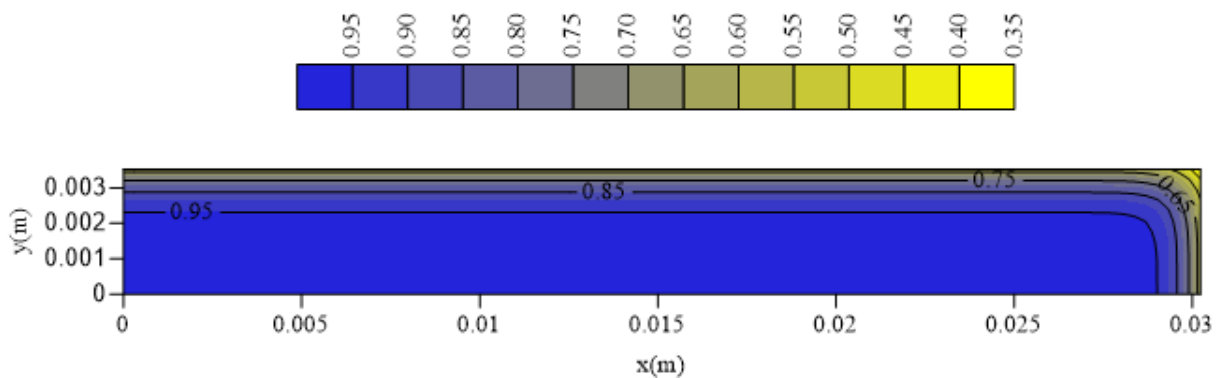


Figura 4.7 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

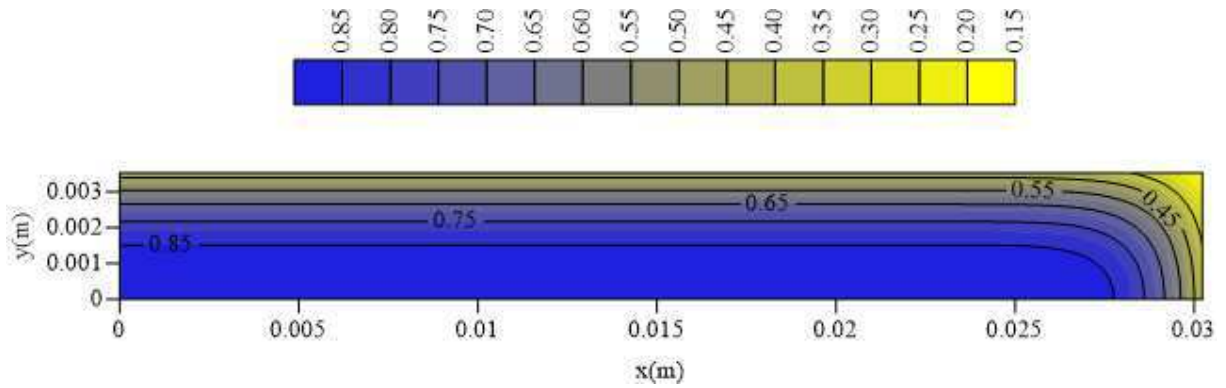
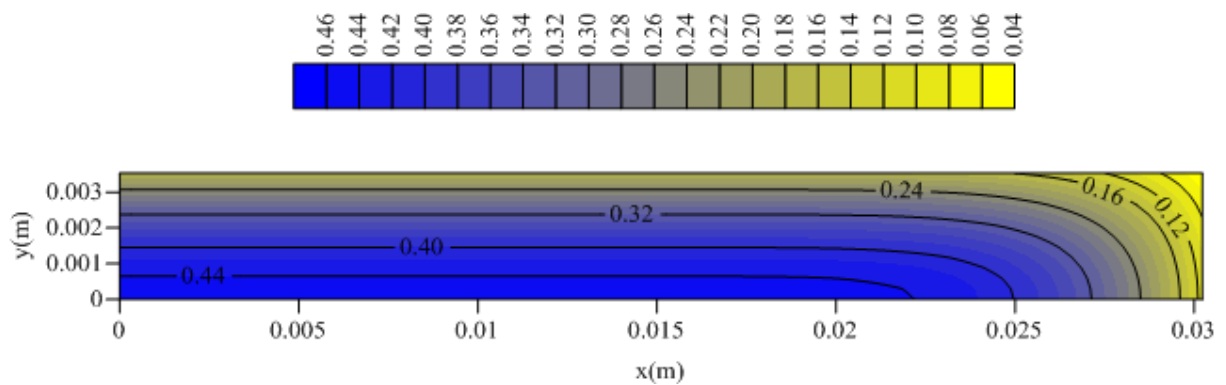


Figura 4.8 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=3600$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).



Comparando os planos xy ($z=R_3$) e xy ($z=R_3/2$), percebe-se nitidamente a diferença entre o valor do teor de umidade nos planos citados. A face do sólido (xy em $z=R_3$) em $t=200$ s, por exemplo, encontra-se com do teor de umidade aproximadamente 60% enquanto que no plano xy ($z=R_3/2$), o teor de umidade encontra-se em aproximadamente 90%. O mesmo comportamento foi observado também nos planos xz e yz.

- Plano xz ($y=R_2/2$)

Figura 4.9 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

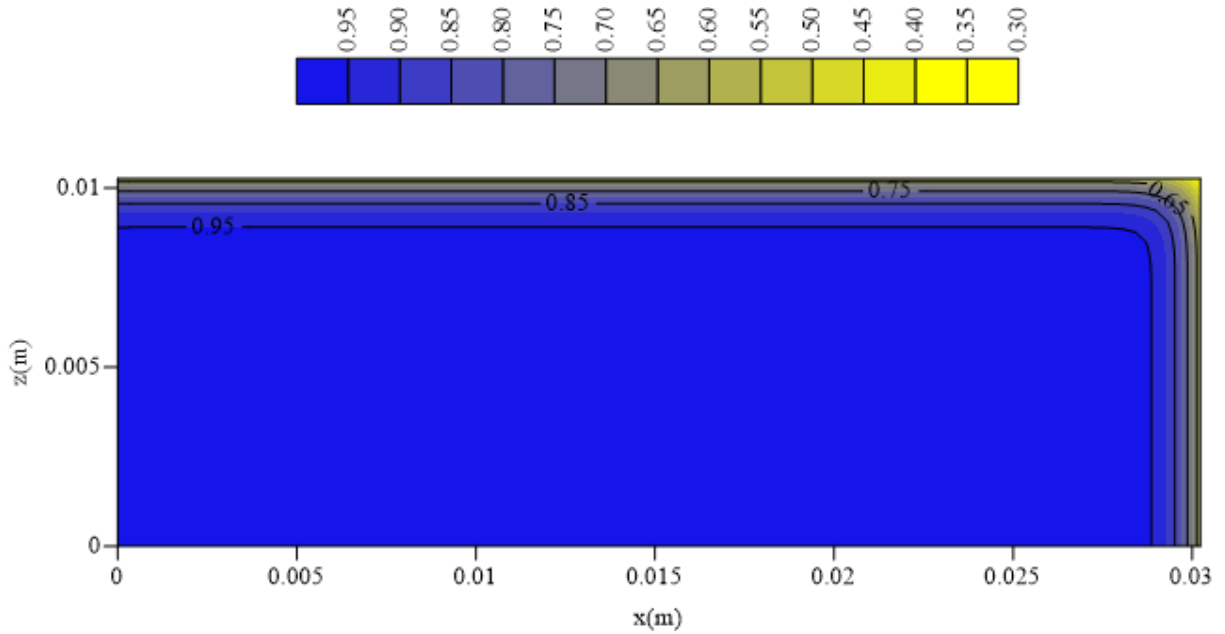


Figura 4.10 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

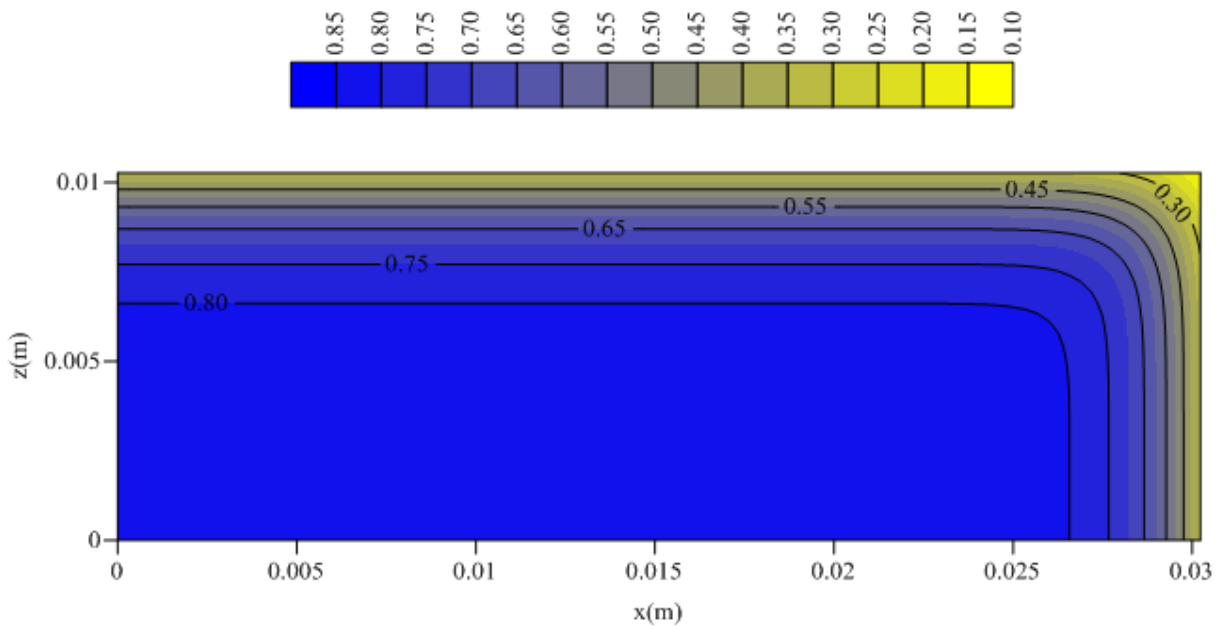
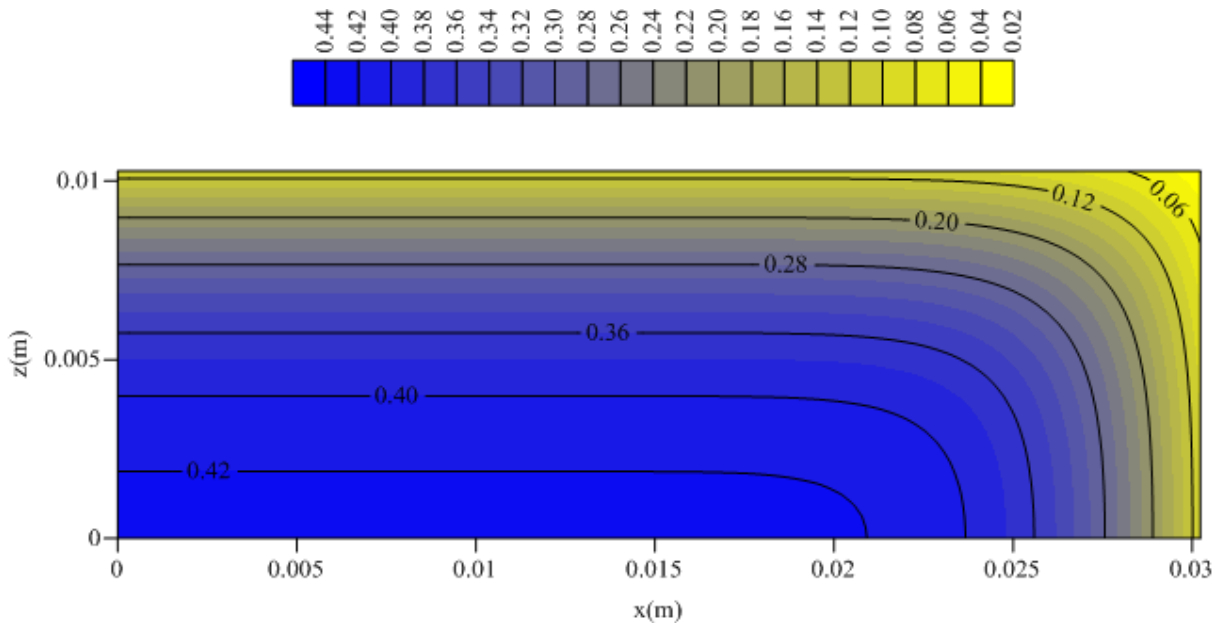


Figura 4.11 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=3600$ s. para a secagem a 60°C (Caso 1).



- Plano yz ($x=R_1/2$)

Figura 4.12 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

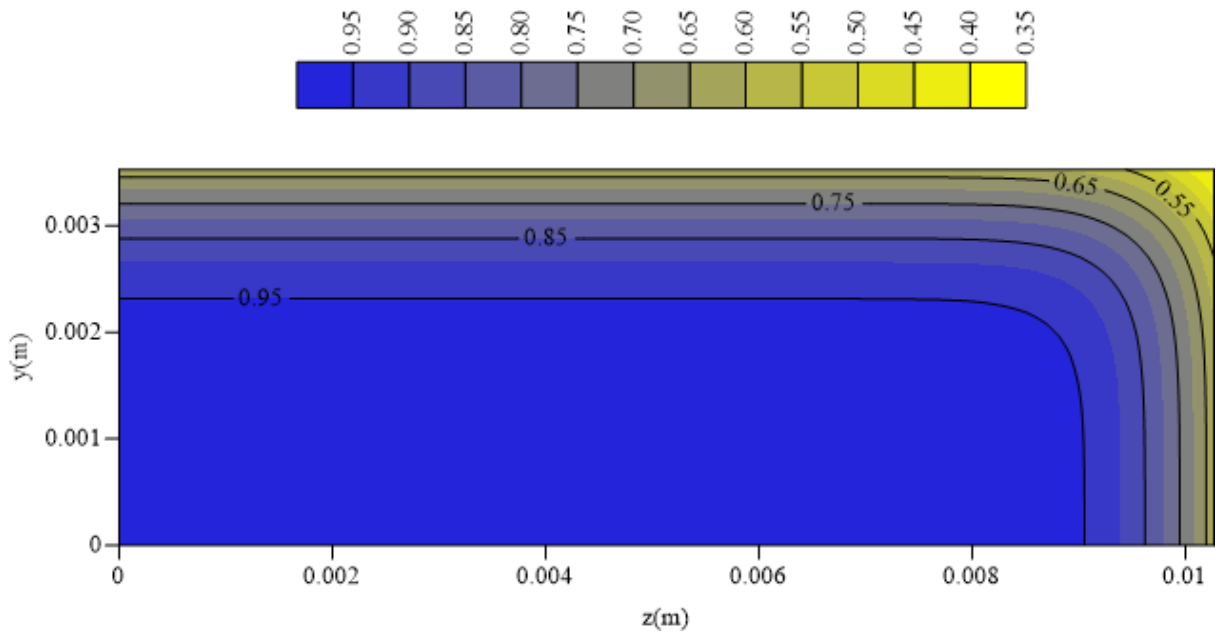


Figura 4.13 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

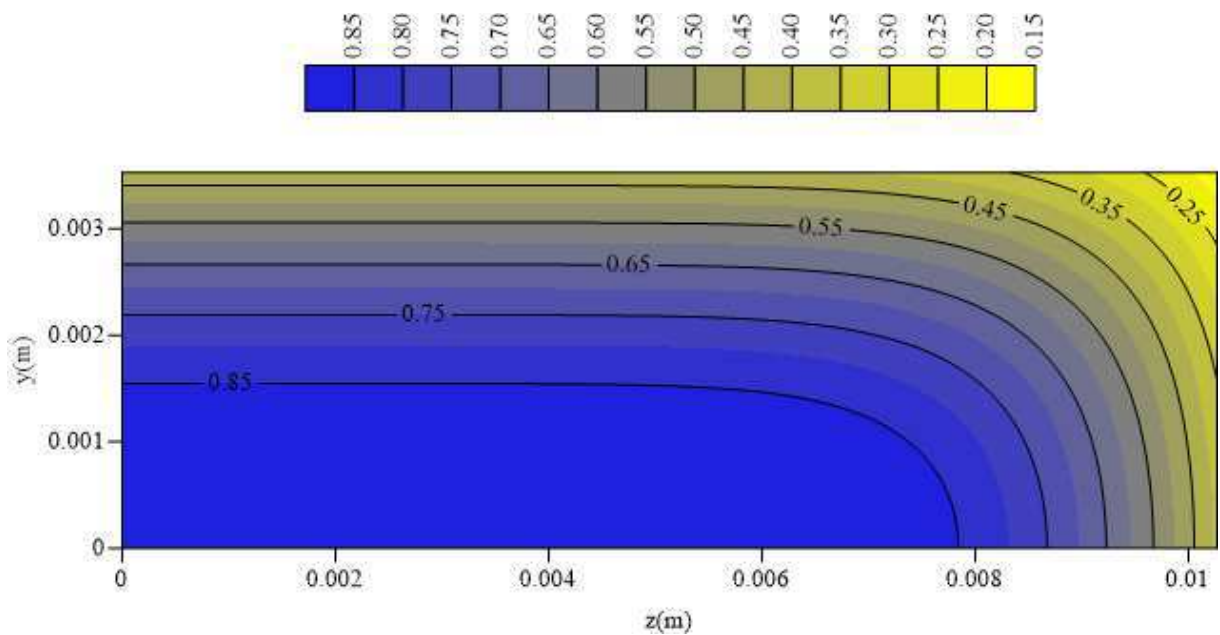
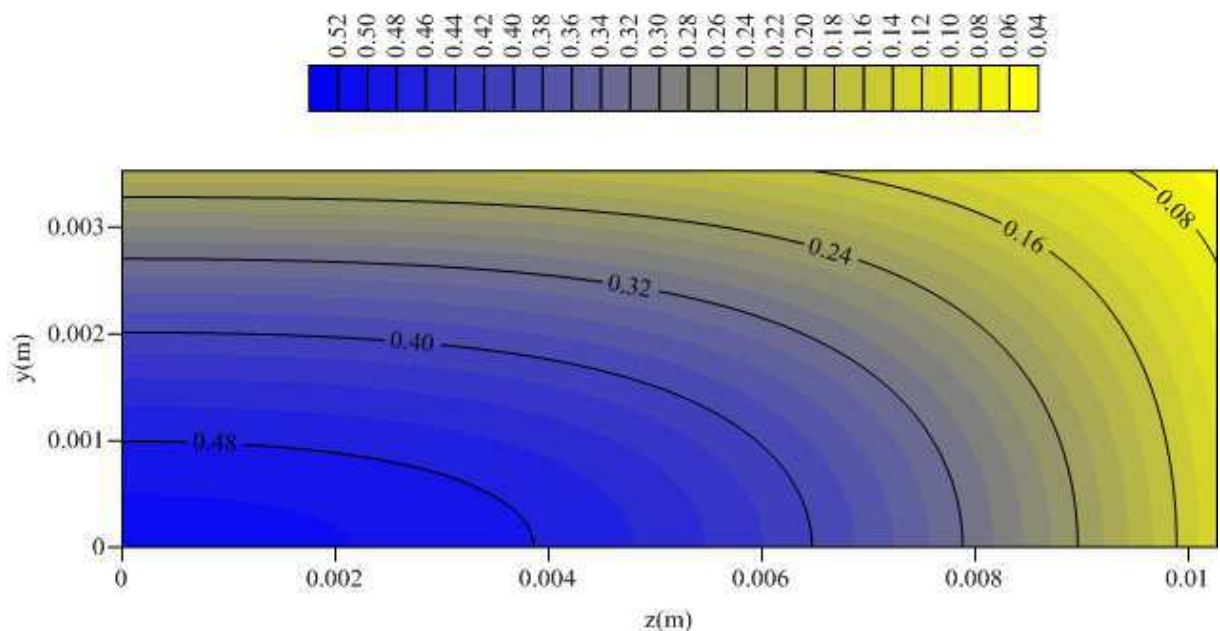


Figura 4.14 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=3600$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).



Analisando essas figuras percebe-se que o material seca primeiro na superfície enquanto o centro continua consideravelmente úmido, indicando que o fluxo de umidade se

dá do centro para superfície (secando de fora para dentro). Assim, devido à superfície do material secar mais rápido, principalmente nas pontas (que é onde se tem os mais altos gradientes de umidade), as chances de ocorrer trincas devido à perda de umidade nesse local são bastante altas.

As Figuras 4.15 a 4.26 ilustram a distribuição da temperatura em diversos planos do sólido em diferentes tempos, para a secagem realizada a 60°C (Caso 1).

- Plano xy ($z=R_3$)

Figura 4.15 - Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

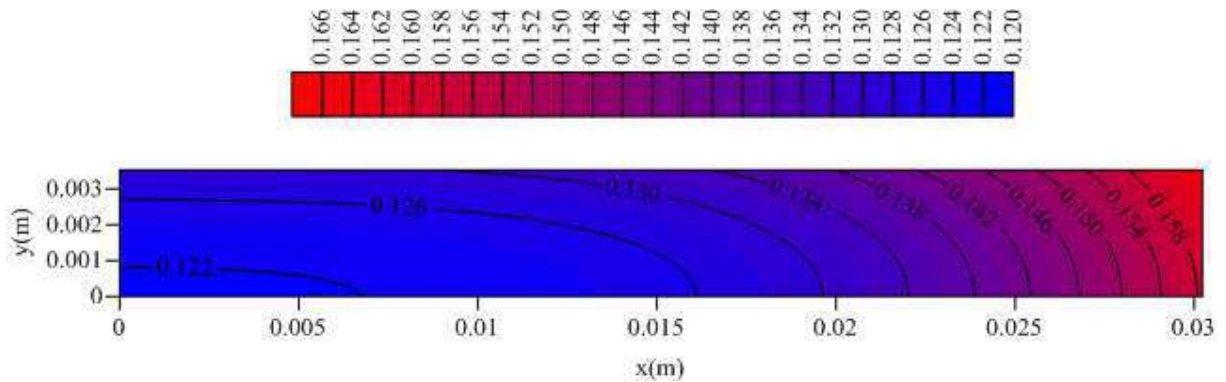


Figura 4.16 - Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3$) em $t=900$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

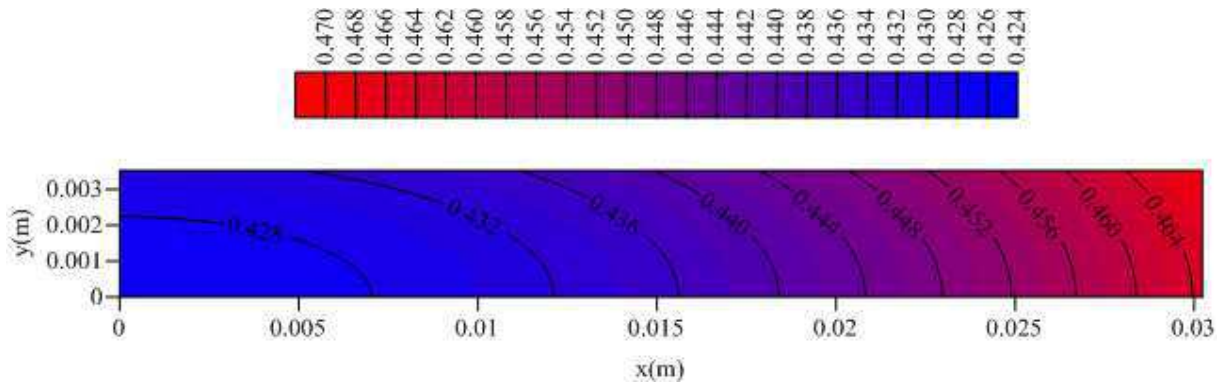
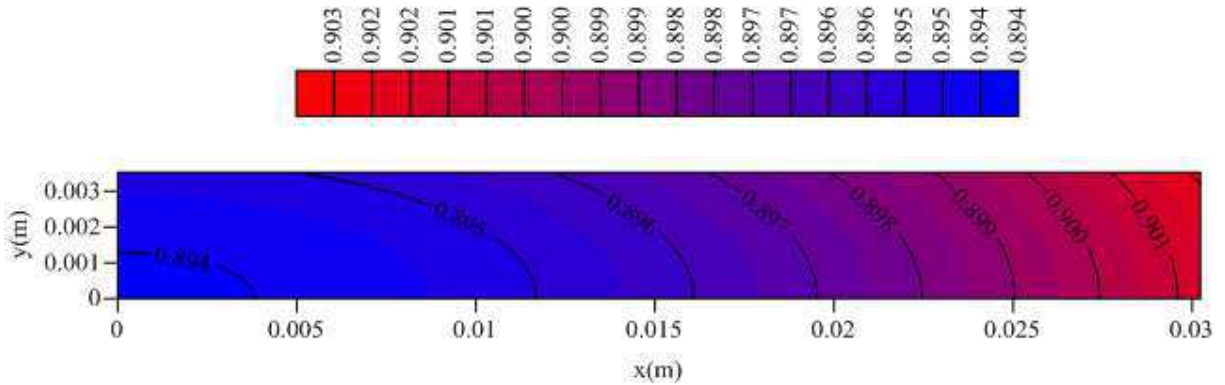


Figura 4.17 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3$) em $t=3600$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).



- Plano xy ($z=R_3/2$)

Figura 4.18 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

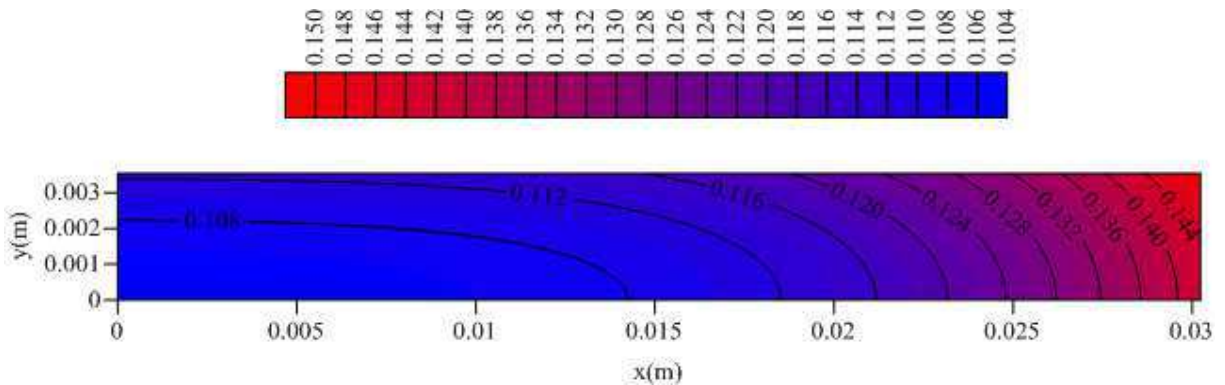


Figura 4.19 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

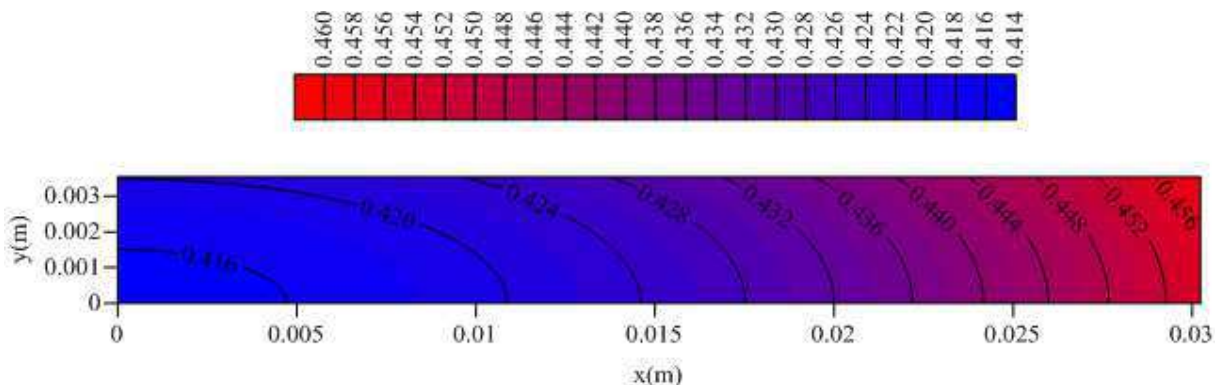
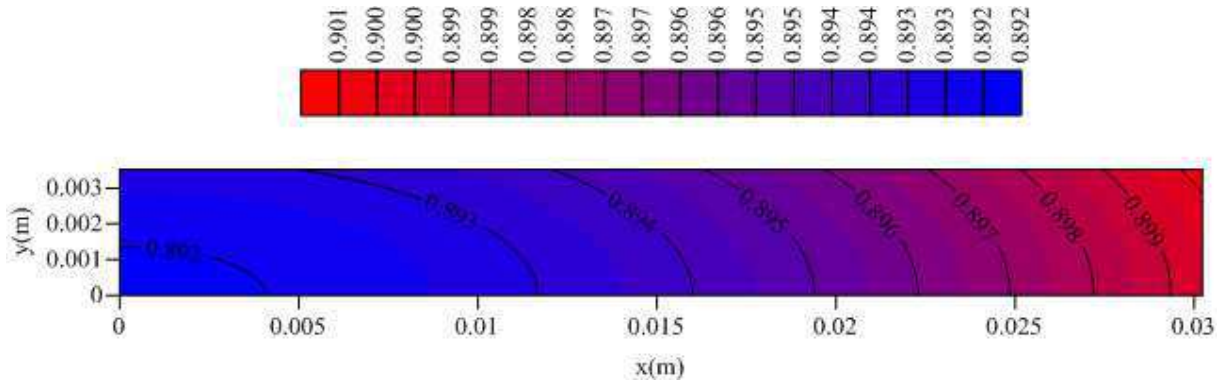


Figura 4.20 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=3600$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).



- Plano xz ($y=R_2/2$)

Figura 4.21 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

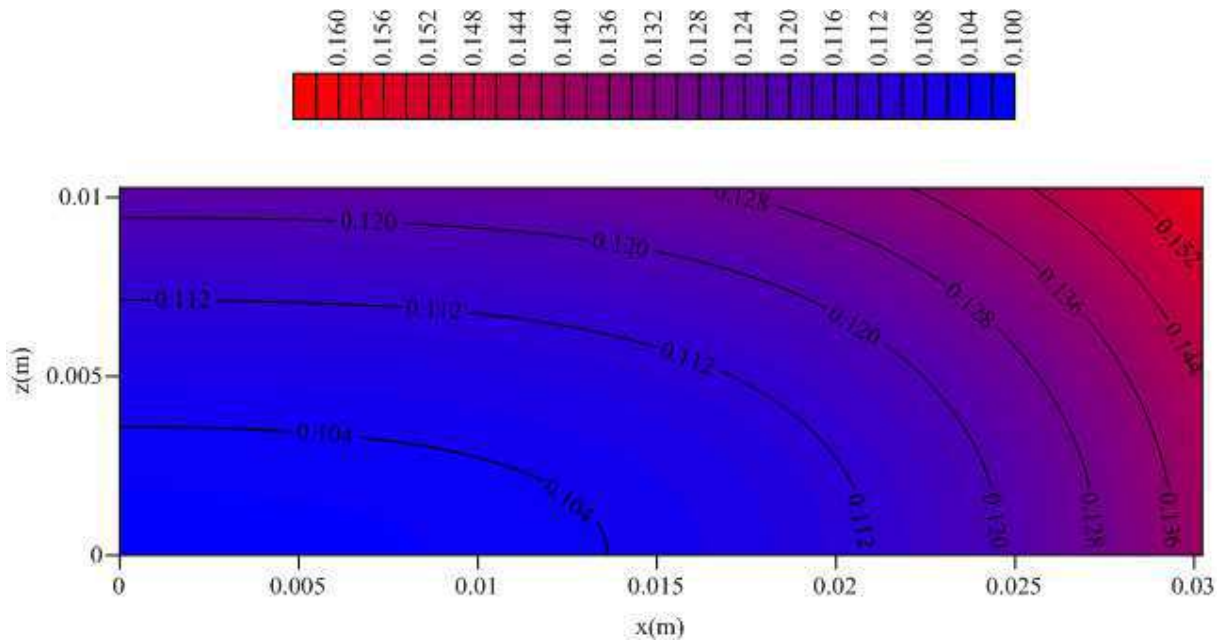


Figura 4.22 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

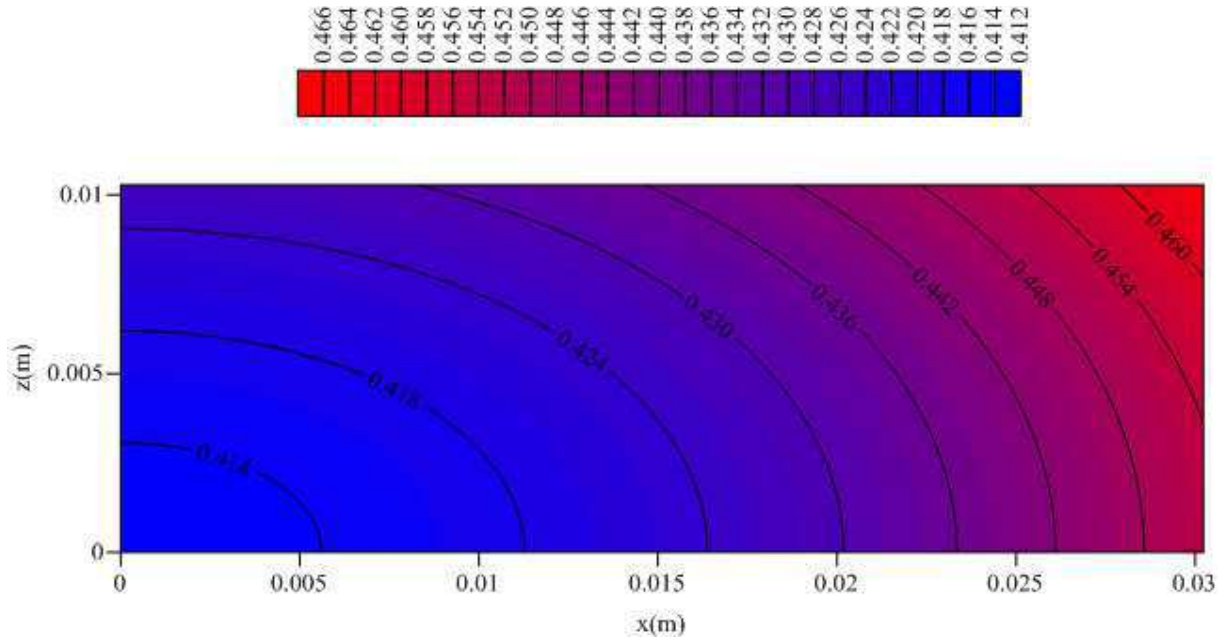
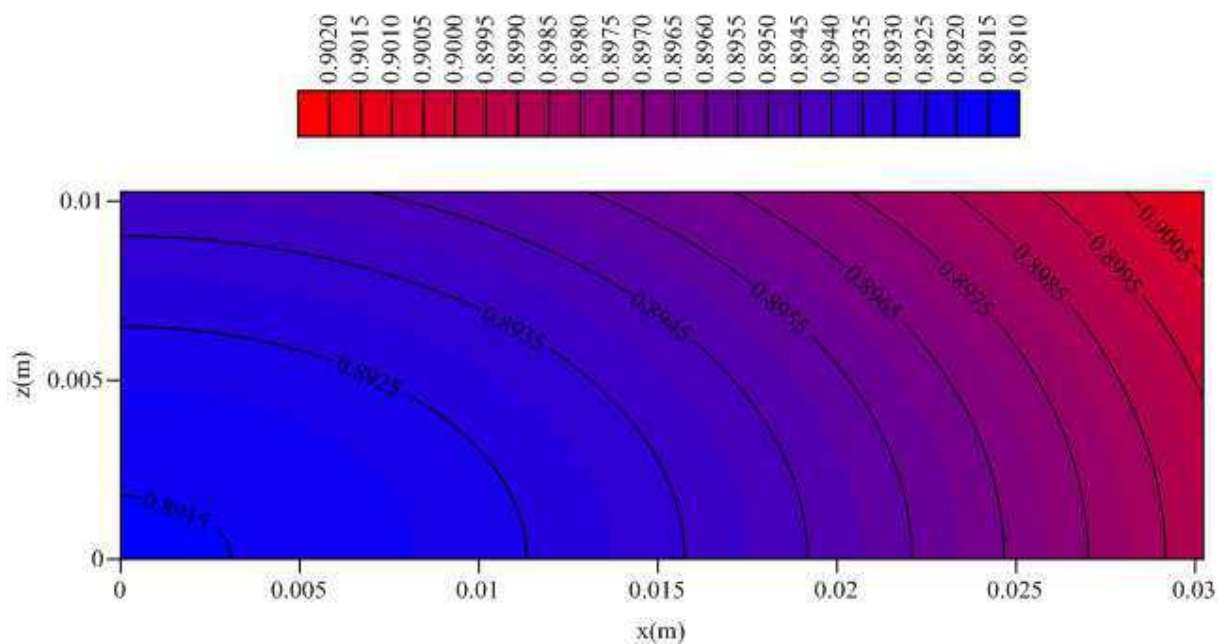


Figura 4.23 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=3600$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).



- Plano yz ($x=R_1/2$)

Figura 4.24 - Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

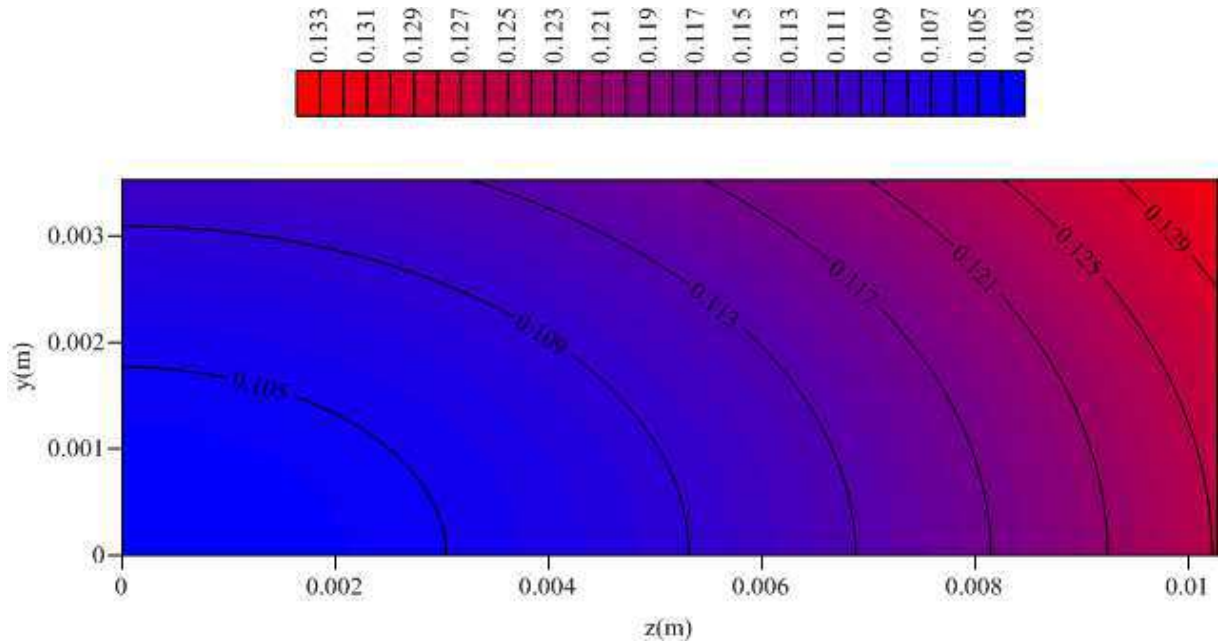


Figura 4.25 - Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).

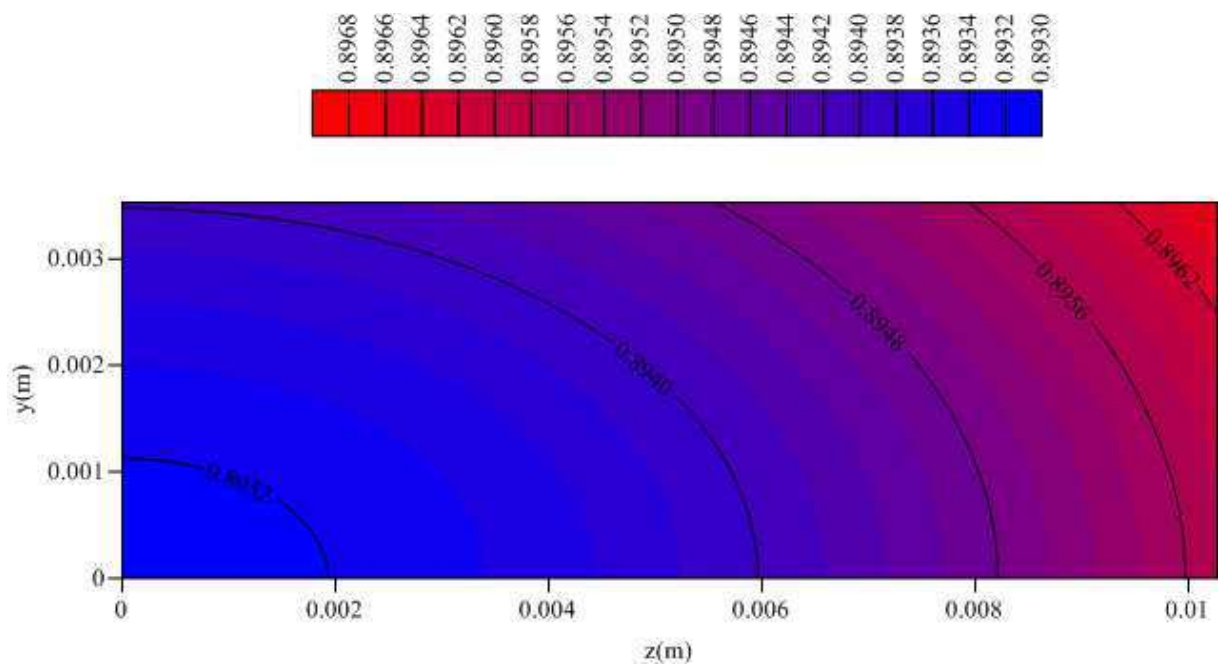
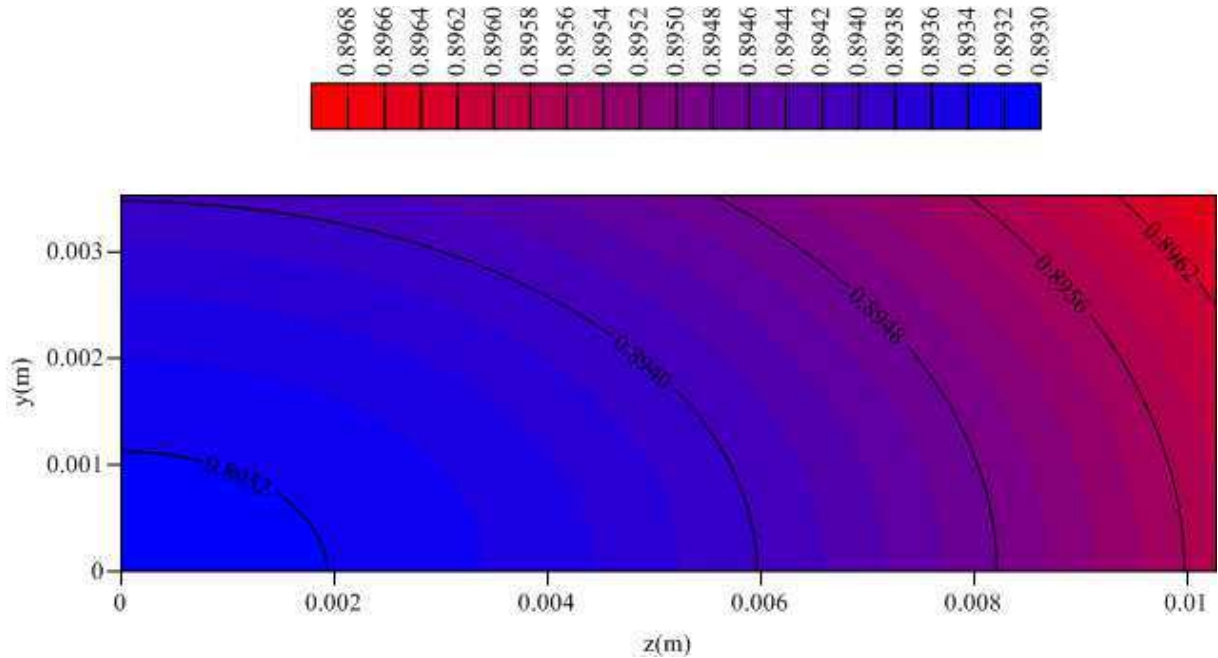


Figura 4.26 - Distribuição de temperatura adimensional $(1 - \theta^*)$ no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=3600$ s, para a secagem a 60°C (Caso 1).



Nestas figuras, observou-se que, em todos os planos analisados, o fluxo de calor se dá de fora para dentro do material. Verifica-se, que nas pontas encontram-se baixos gradientes de temperatura mas que podem gerar nestes locais trincas e deformações, devido as tensões térmicas, que certamente poderá contribuir para a redução da qualidade final do material pós-secagem.

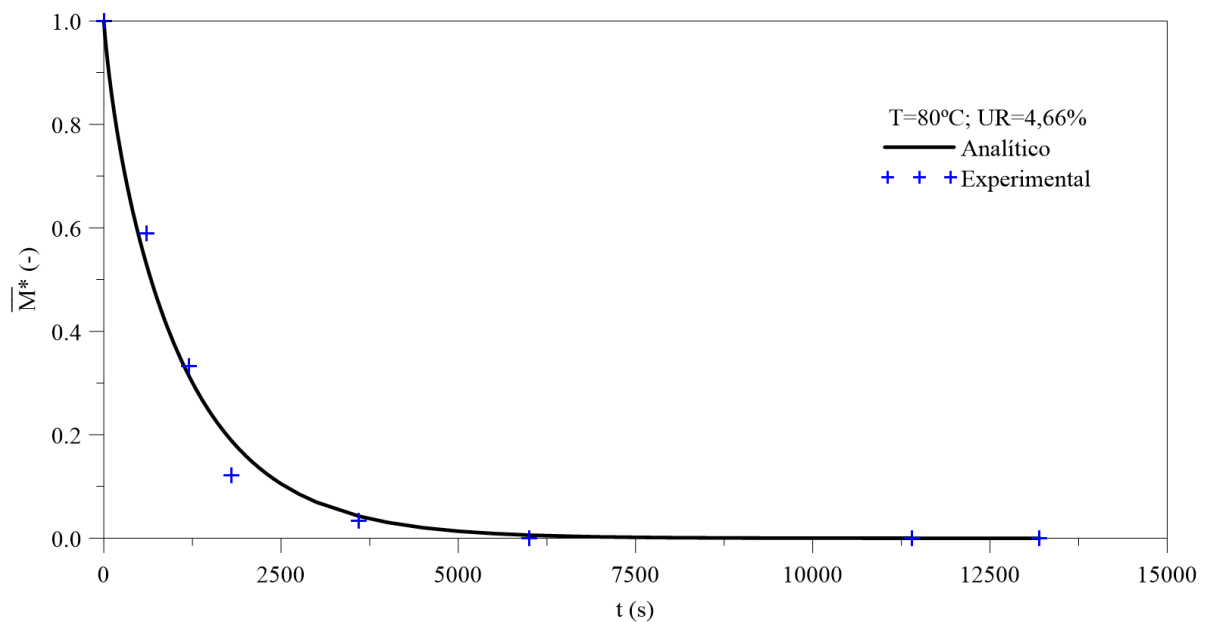
Comparando os planos xy ($z=R_3$) e xy ($z=R_3/2$), percebe-se nitidamente a diferença entre o valor da temperatura nos planos citados. Na face do sólido (xy em $z=R_3$), em $t=200$ s, por exemplo, a temperatura encontra-se apenas com aproximadamente 16% enquanto no plano xy ($z=R_3/2$), a temperatura encontra-se em aproximadamente 14%, isso prova que nas faces do material o equilíbrio térmico é alcançado mais rápido do que dentro do sólido. O mesmo comportamento foi observado também nos planos xz e yz.

Os baixos gradientes de temperatura no interior do tijolo ocorre devido ao baixo coeficiente de transferência de calor convectivo na estufa, características de situação física em ambientes sob convecção natural.

b) Caso 2 (Argila Ball Clay, T=80°C)

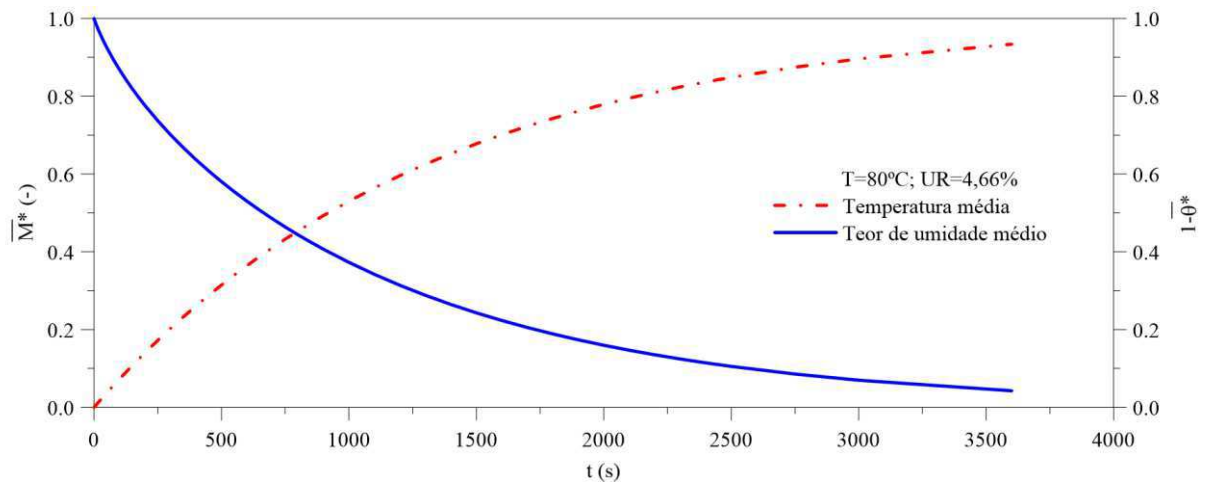
A comparação entre os resultados preditos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo de secagem de tijolos maciços a uma temperatura de 80°C, relativo ao Caso 2 das Tabelas 3.1 e 3.2, é representada pela Figura 4.27. Verifica-se, após a observação dessa figura que os resultados analítico e experimental estão aproximadamente superpostos sinalizando que o ajuste foi bem satisfatório. No ajuste obteve-se um coeficiente de difusão de massa de $0,36 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, resultado esse 0,84% maior que o valor reportado por Nascimento (2002) e um erro médio quadrático correspondente a $0,00840254 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)^2$.

Figura 4.27 - Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem (Caso 2).



De acordo com a Figura 4.28 observa-se a variação do teor de umidade médio e a temperatura média do material em função do tempo de secagem. Nota-se que em torno de 3500 segundos (aproximadamente 1 h), o material ainda não atingiu seu ponto de equilíbrio térmico nem de seu equilíbrio higroscópico. Constata-se também, que tanto o equilíbrio térmico quanto o higroscópico neste caso, caminham praticamente juntos para o equilíbrio. Resultado similar foi observado por Silva (2009), ao estudar a secagem de tijolos furados.

Figura 4.28 - Predição do teor de umidade médio e temperatura média do tijolo em função do tempo de secagem (Caso 2).



As Figuras 4.29 a 4.32 mostram a distribuição do teor de umidade no plano xy para diferentes tempos de processo de secagem de tijolos cerâmicos comuns a $T=80^{\circ}\text{C}$ e $UR=4,66\%$ (Caso 2).

Figura 4.29 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200$ s, para a secagem a 80°C (Caso 2).

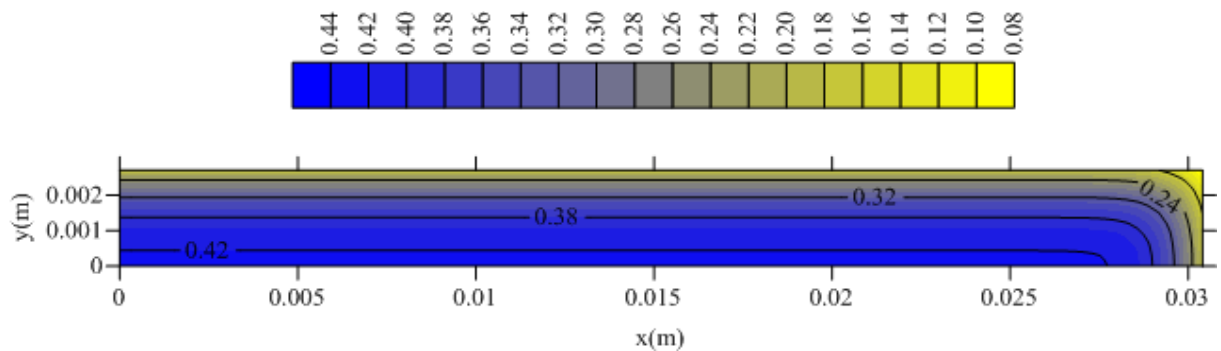


Figura 4.30 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=600$ s, para a secagem a 80°C (Caso 2).

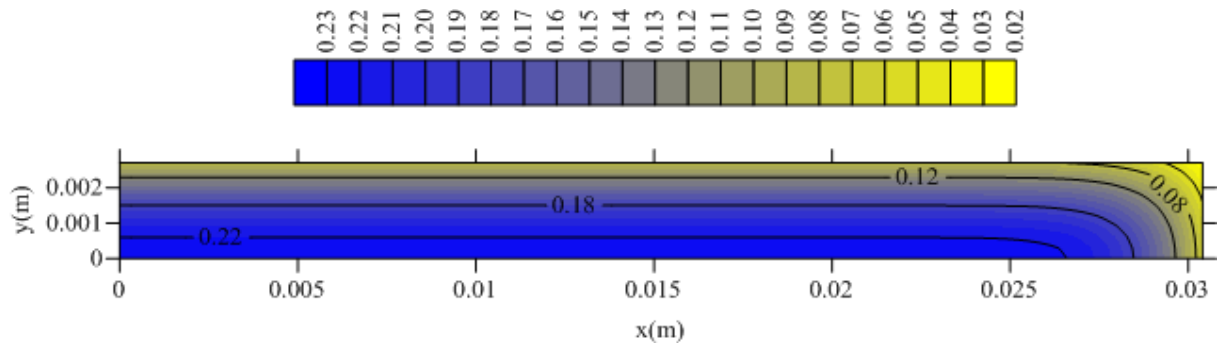
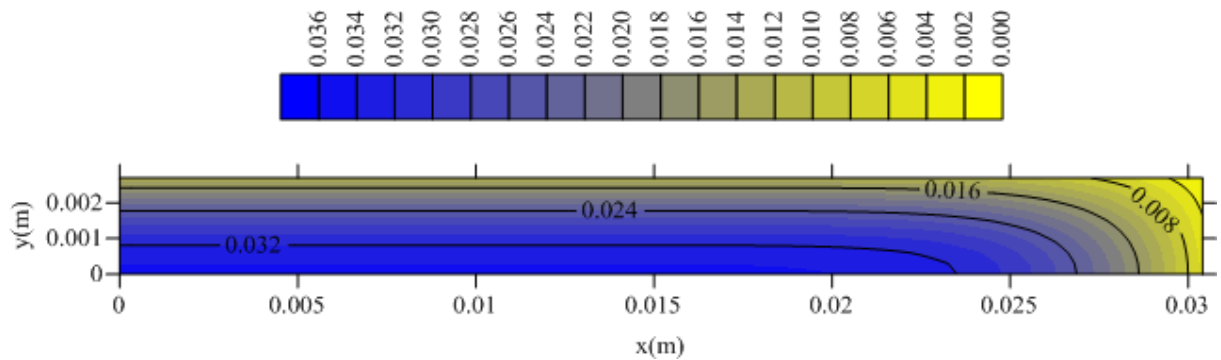


Figura 4.31 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=2400$ s, para a secagem a 80°C (Caso 2).



Verifica-se que o processo entra em conformidade com o esperado. O produto no decorrer do tempo, vai perdendo umidade gradativamente do centro do material para a superfície à medida em que é aquecido pelo ar que o circunda, gerando altos gradientes de umidade, principalmente nos vértices do sólido.

As Figuras 4.33 a 4.35 ilustram a distribuição da temperatura no plano xy em diferentes tempos de secagem. Percebe-se que o fluxo de calor se dá de fora para dentro do material. Como esperado, nas pontas encontram-se altos gradientes de temperatura sendo propícios a deformidades, fissuras e rupturas que contribuem para a redução da qualidade do material pós-secagem.

Figura 4.32 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3$) em $t=200$ s, para a secagem a 80°C (Caso 2).

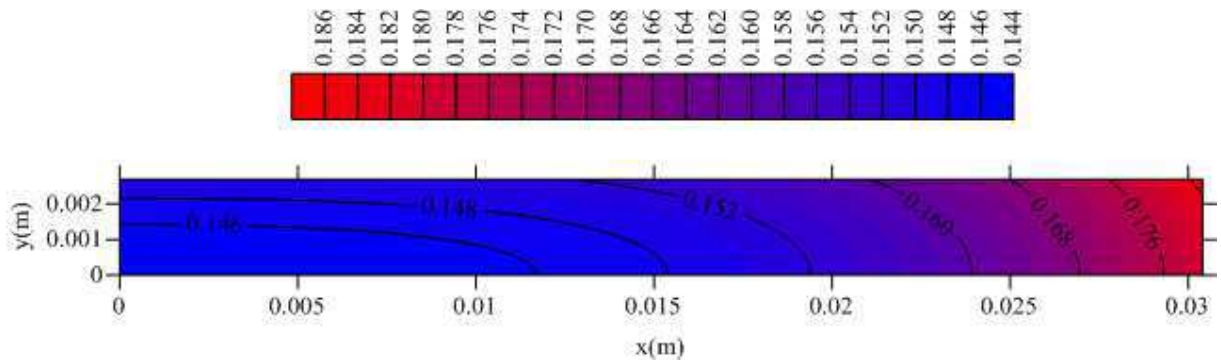


Figura 4.33 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3$) em $t=600$ s, para a secagem a 80°C (Caso 2).

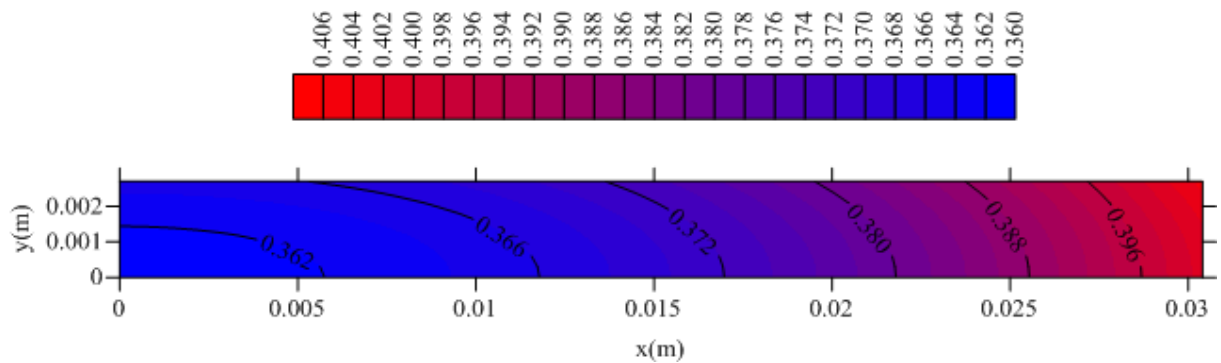
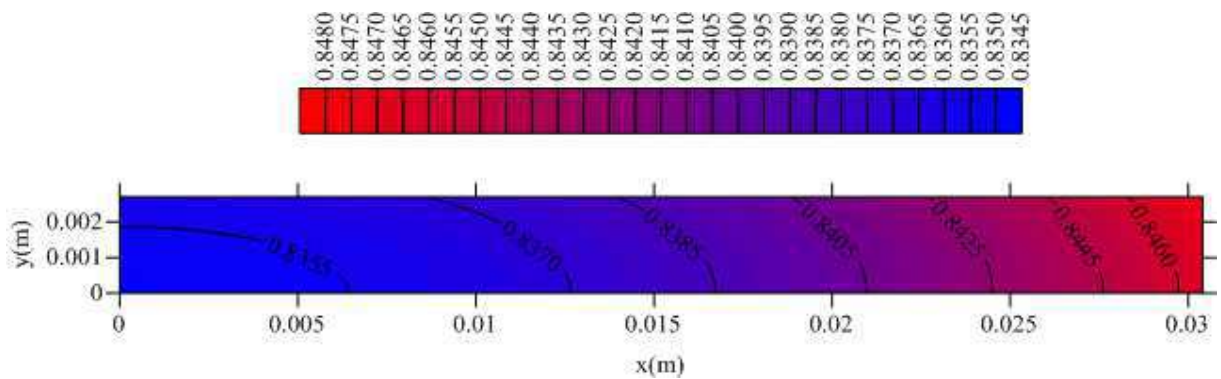


Figura 4.34 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3$) em $t=2400$ s, para a secagem a 80°C (Caso 2).

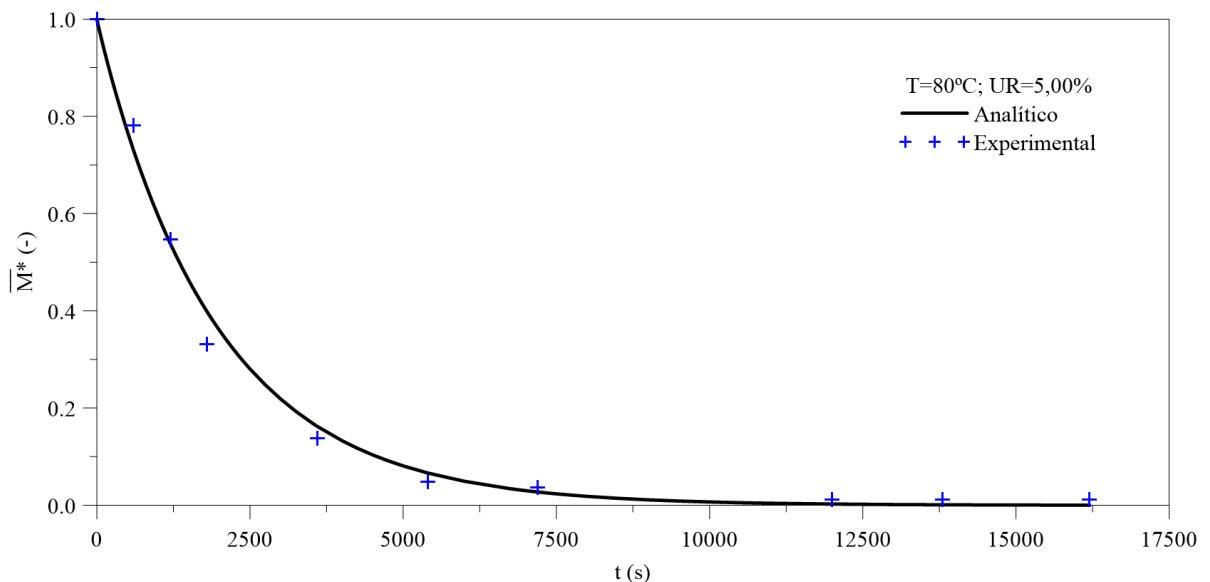


Comparando-se com o Caso 1, pode-se dizer que os processos de secagem e aquecimento do tijolo na temperatura de 80°C foram mais rápidos.

c) Caso 3 (Argila Vermelha, T=80°C)

A Figura 4.35 ilustra a comparação entre os resultados preditos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo de secagem de tijolos cerâmicos comuns na temperatura de 80°C, referente ao Caso 3 das Tabelas 3.1 e 3.2. Observa-se nesta figura que os resultados analítico e experimental estão praticamente superpostos comprovando que o ajuste foi bem satisfatório. No ajuste obteve-se um coeficiente de difusão de massa de $1,410 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, resultado esse 8,70% maior que o valor reportado por Nascimento (2002) e um erro médio quadrático de $0,00846885 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)^2$.

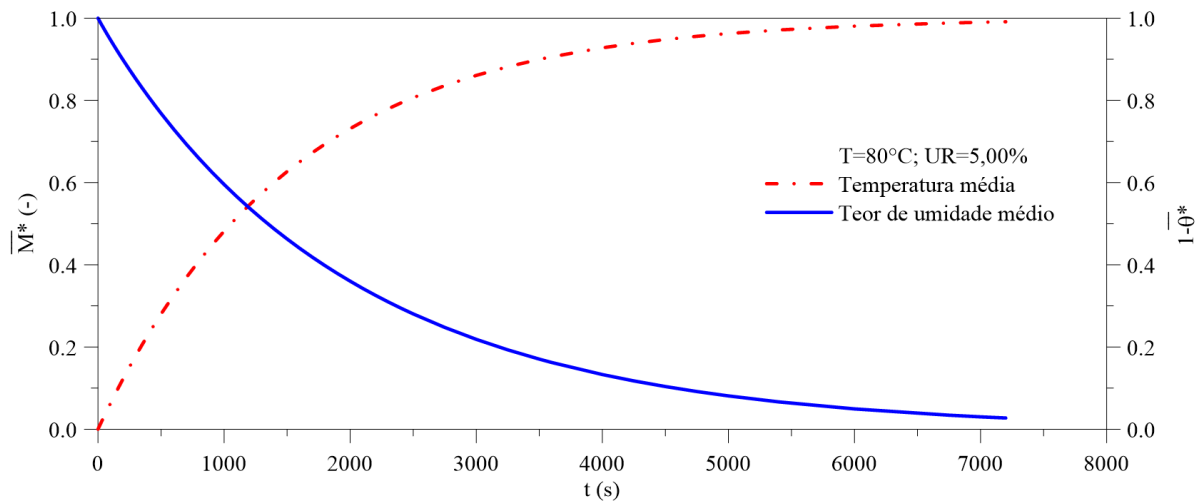
Figura 4.35 - Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem (Caso 3).



A Figura 4.36 ilustra a variação do teor de umidade médio e a temperatura média do material em função do tempo. Observa-se que em aproximadamente 7100 segundos

(aproximadamente 2 h), o material praticamente atingiu seu equilíbrio térmico, entretanto não atingindo, no momento, seu equilíbrio higroscópico.

Figura 4.36 - Predição do teor de umidade médio e temperatura média do tijolo em função do tempo de secagem (Caso 3).



As Figuras 4.37 a 4.48 mostram a distribuição do teor de umidade e as Figuras 4.49 a 4.60 ilustram a distribuição da temperatura, ambas em planos variados e em diferentes tempos de processo. Nota-se que o processo entra em conformidade com o esperado. Ao decorrer do tempo, o produto vai perdendo umidade do centro do material para a superfície. Entretanto, o fluxo de calor se dá de fora para dentro do material.

Comparando-se com o caso 2, cuja temperatura e umidade relativa do ar de secagem são praticamente as mesmas, há uma diferença nas taxas de secagem e aquecimento do material. Essas diferenças estão associadas ao teor de umidade e temperatura iniciais e tipo de argila usada na confecção do tijolo. No Caso 2 foi usada argila do tipo Ball Clay e no caso 3 argila vermelha.

- Plano xy ($z=R_3$)

Figura 4.37 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

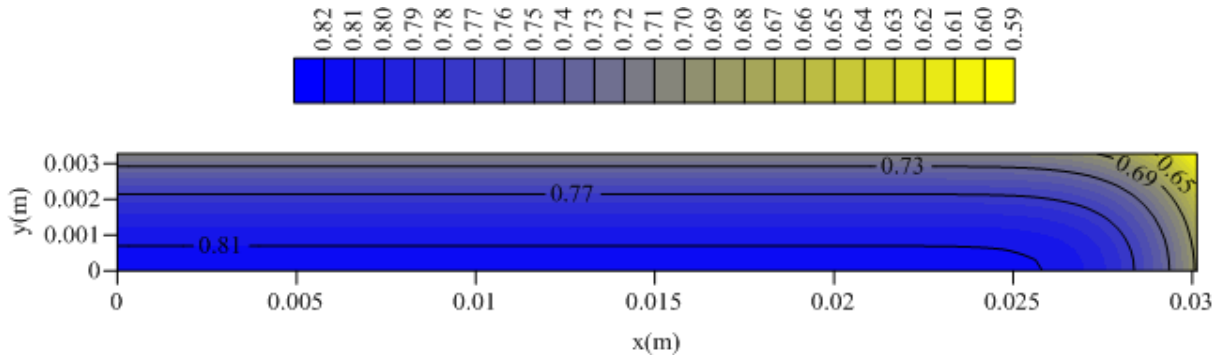


Figura 4.38 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=900$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

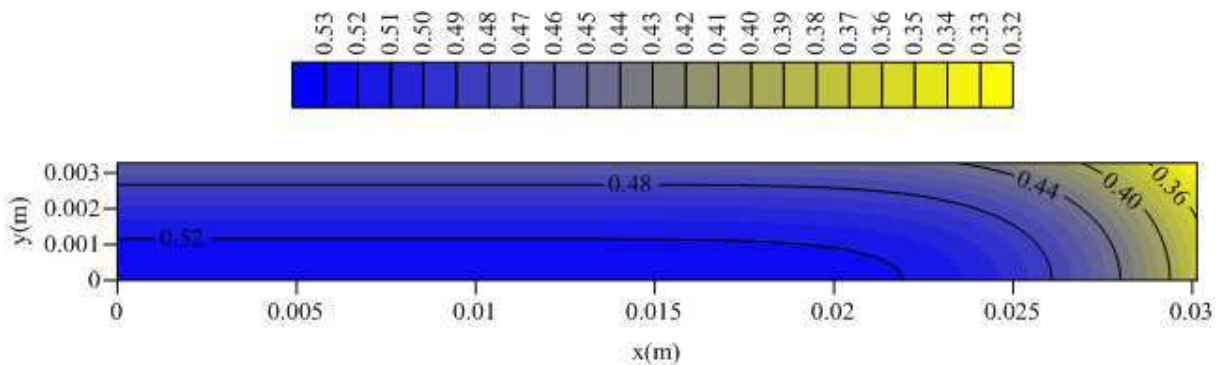
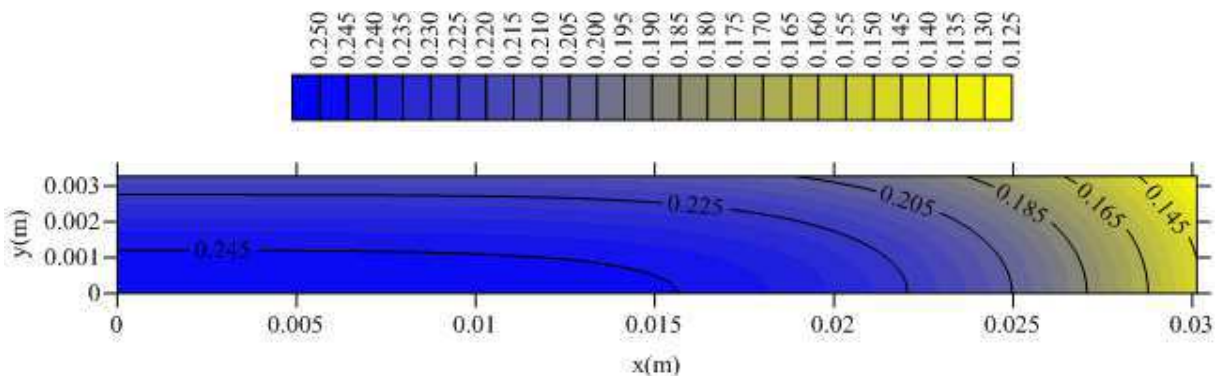


Figura 4.39 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=2400$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).



- Plano xy ($z=R_3/2$)

Figura 4.40 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

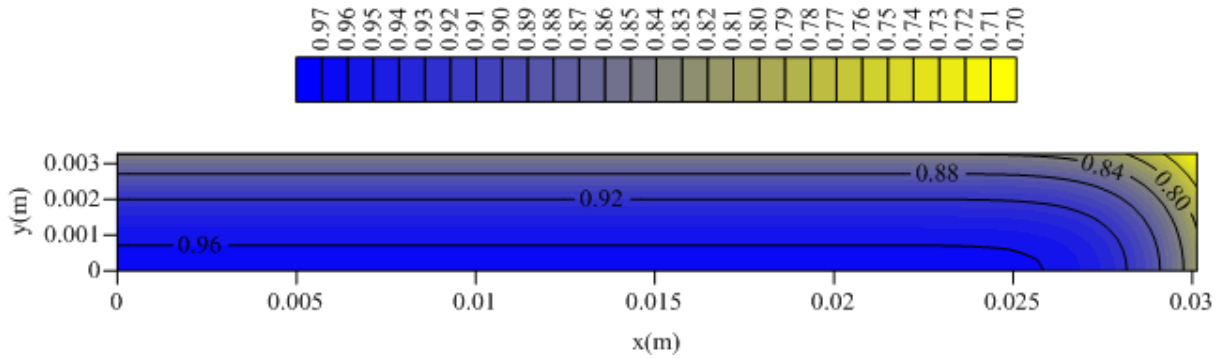


Figura 4.41 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

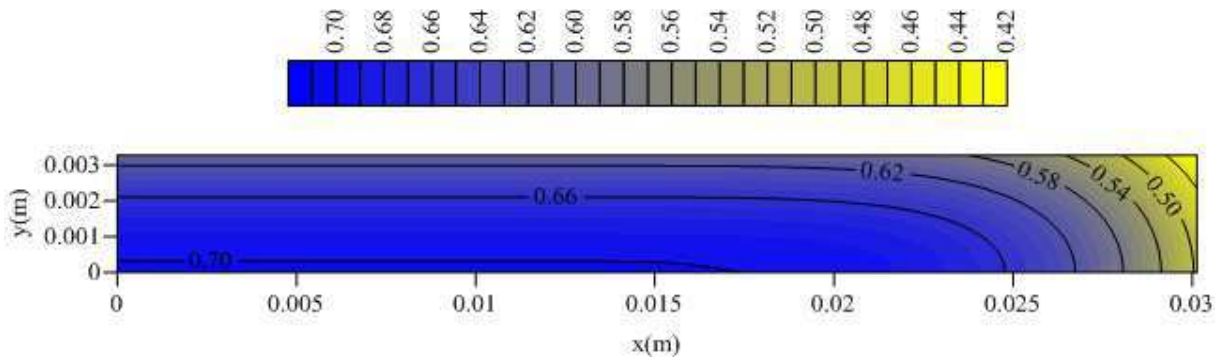
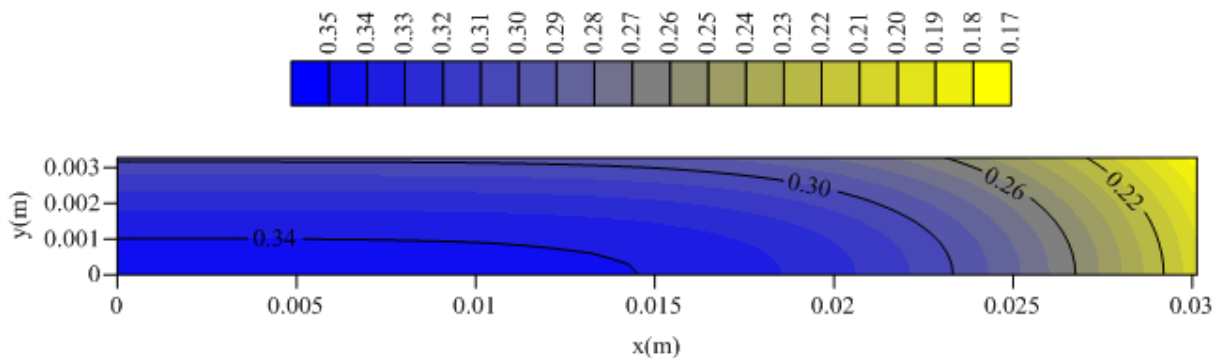


Figura 4.42 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=2400$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).



- Plano xz ($y=R_2/2$)

Figura 4.43 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

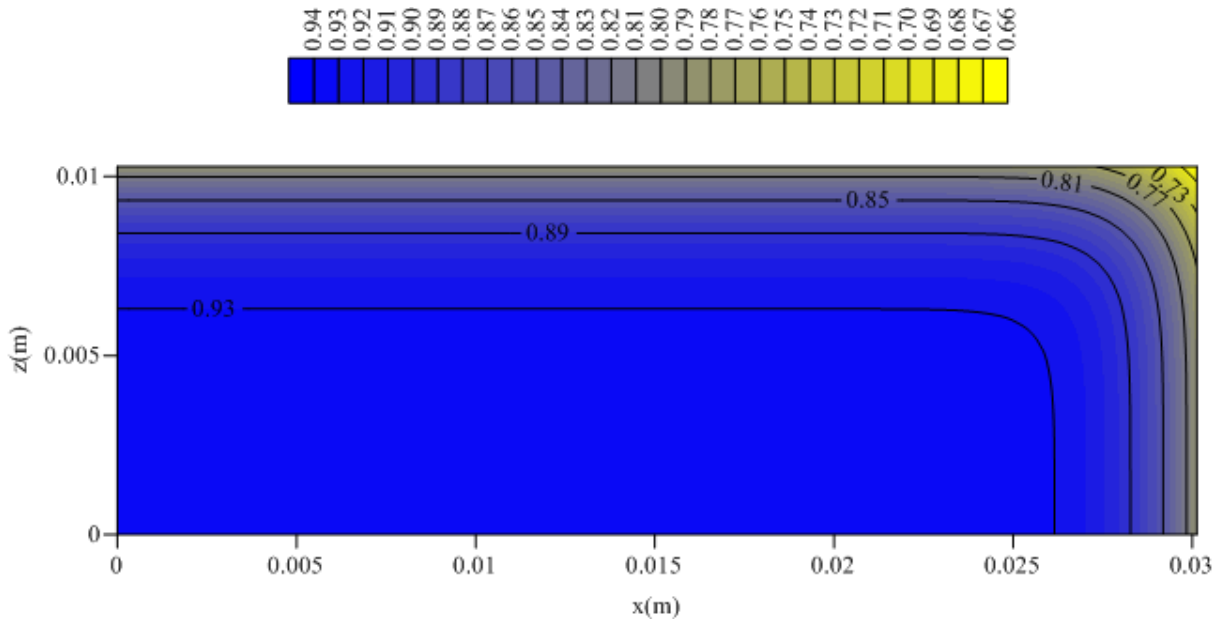


Figura 4.44 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

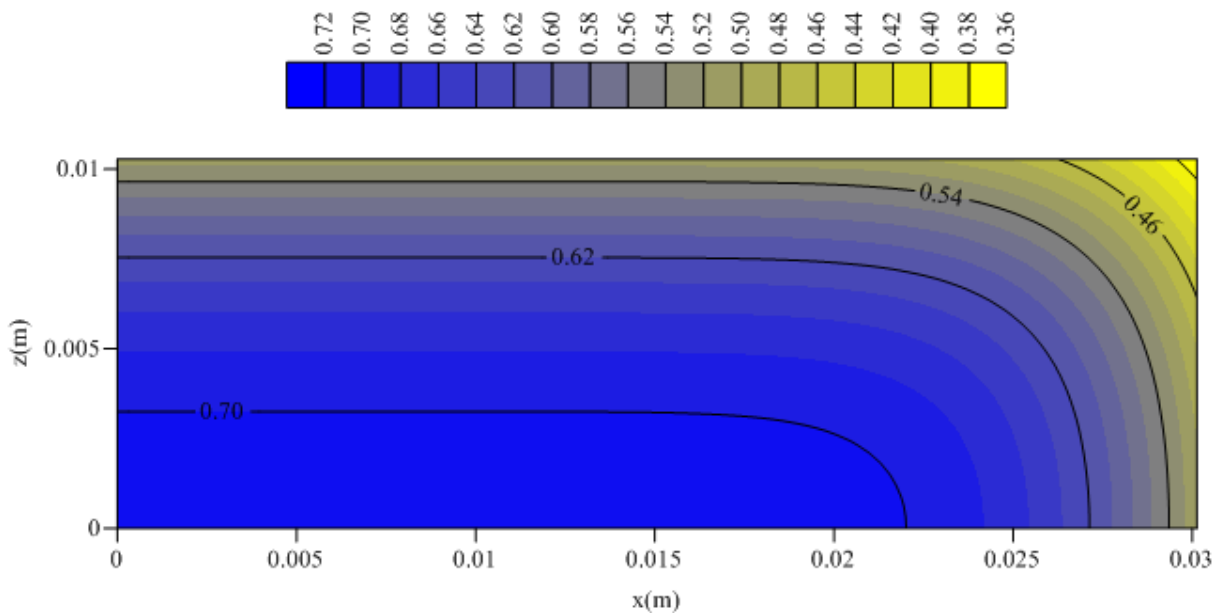
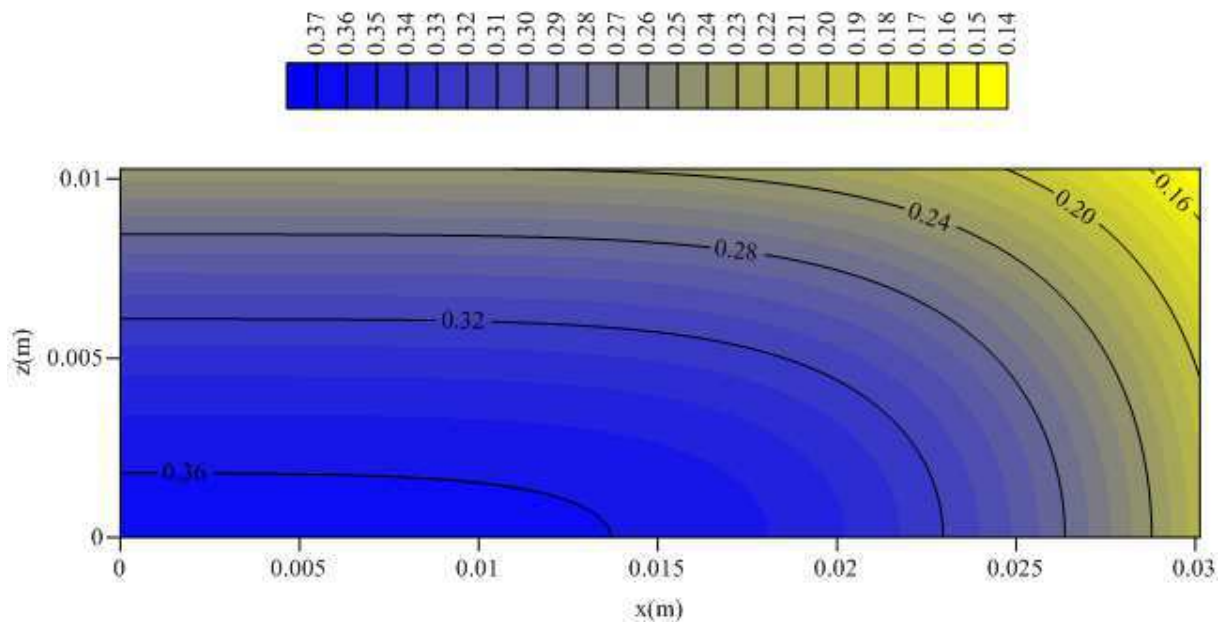


Figura 4.45 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=2400$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).



- Plano yz ($x=R_1/2$)

Figura 4.46 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

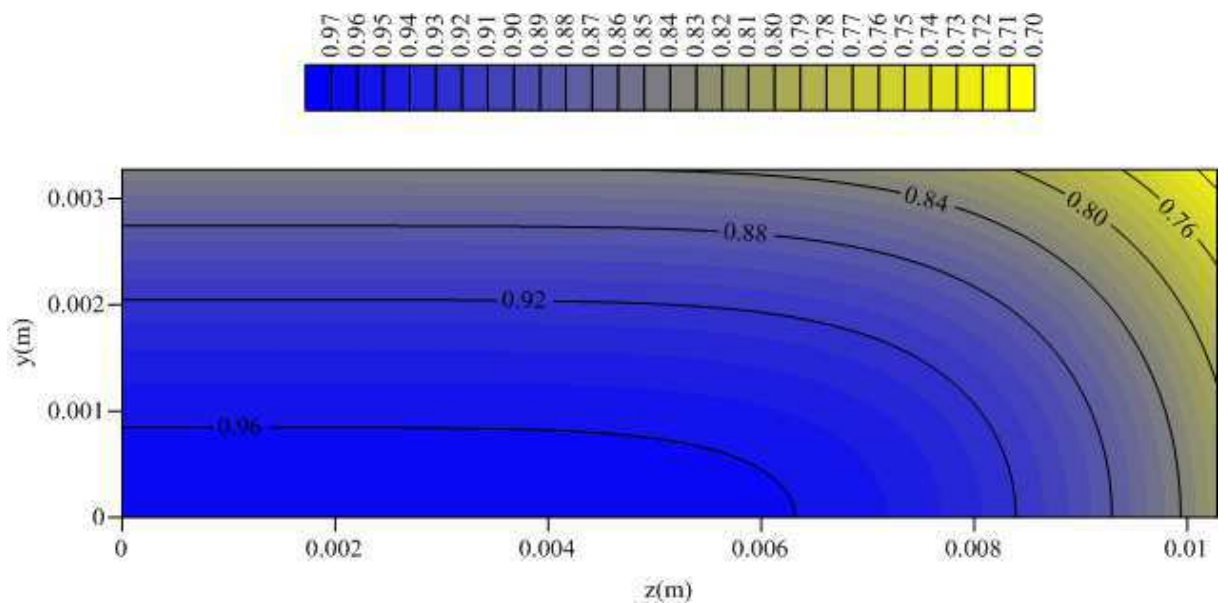


Figura 4.47 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

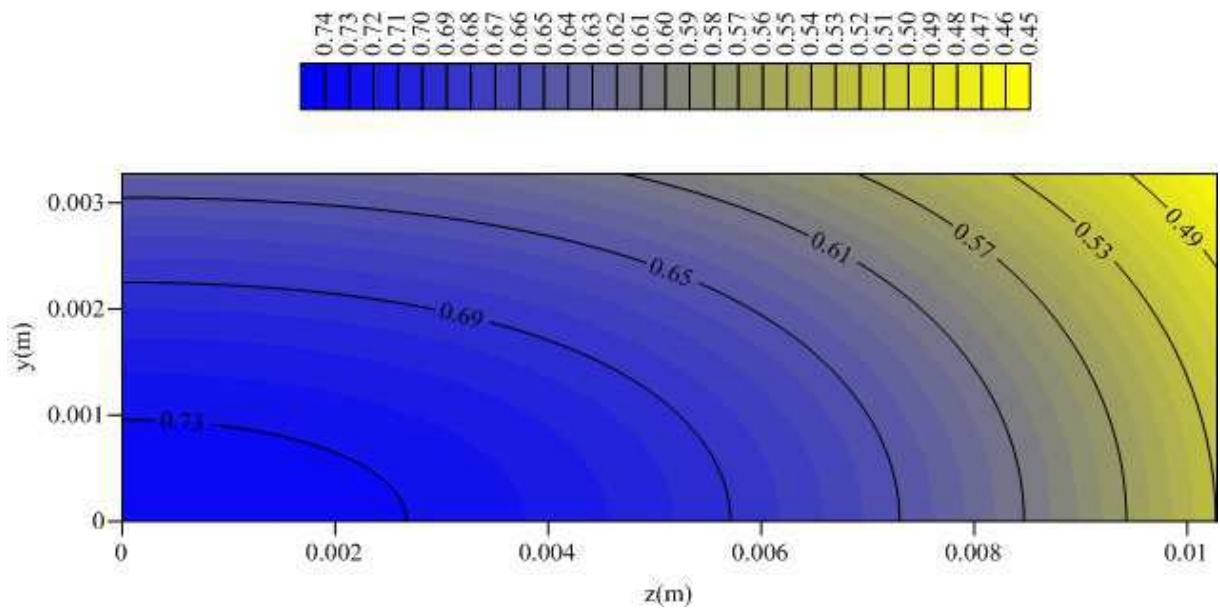
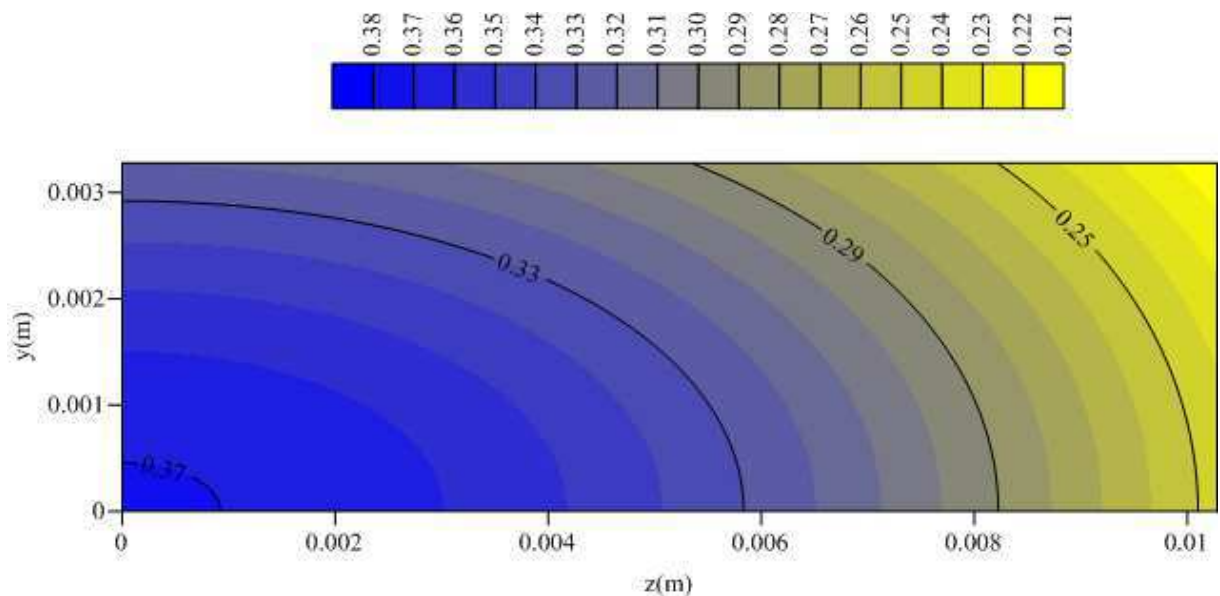


Figura 4.48 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=2400$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).



- Plano xy ($z=R_3$)

Figura 4.49 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3$) em $t=200$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

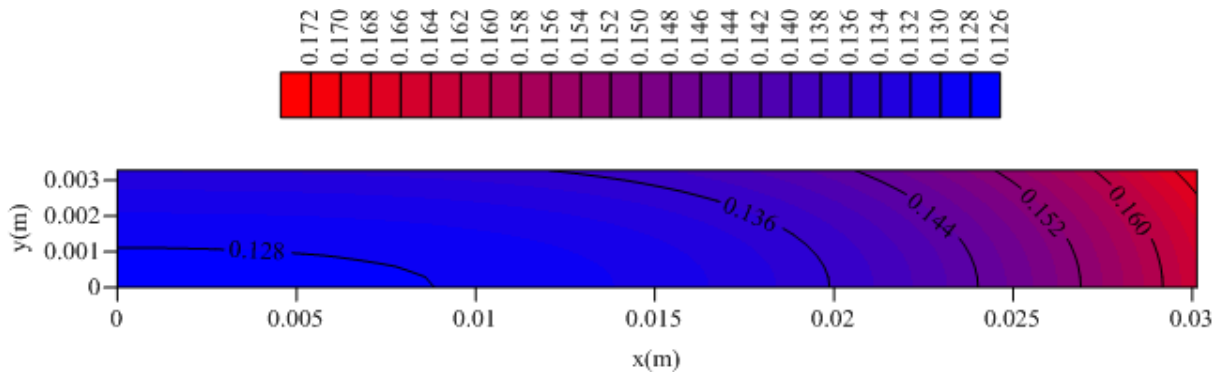


Figura 4.50 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3$) em $t=900$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

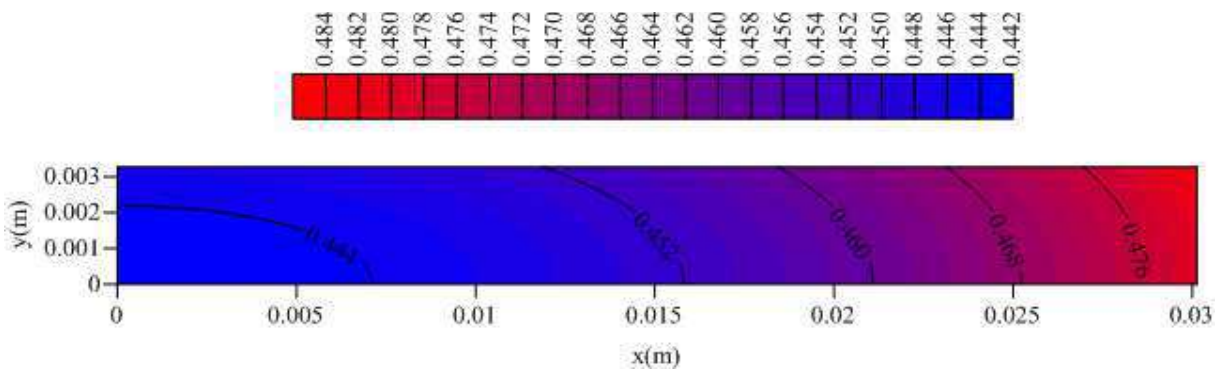
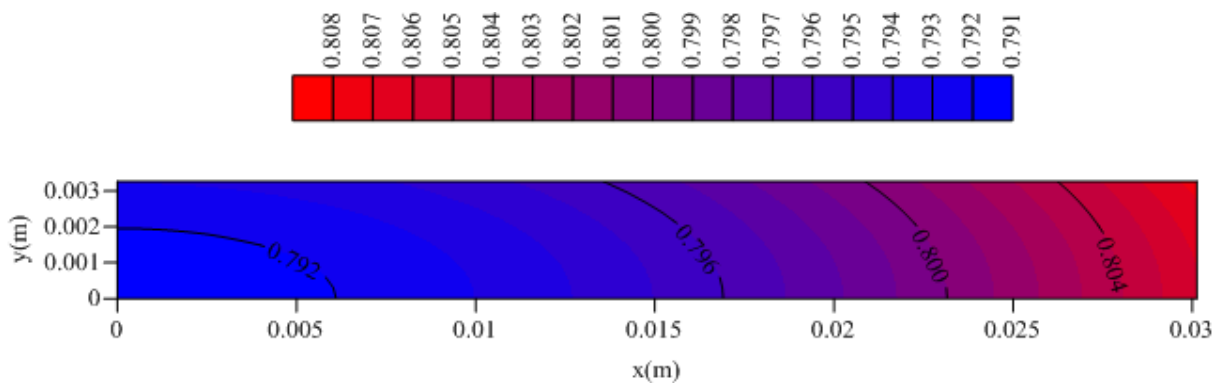


Figura 4.51 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xy ($z=R_3$) em $t=2400$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).



- Plano xy ($z=R_3/2$)

Figura 4.52 - Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

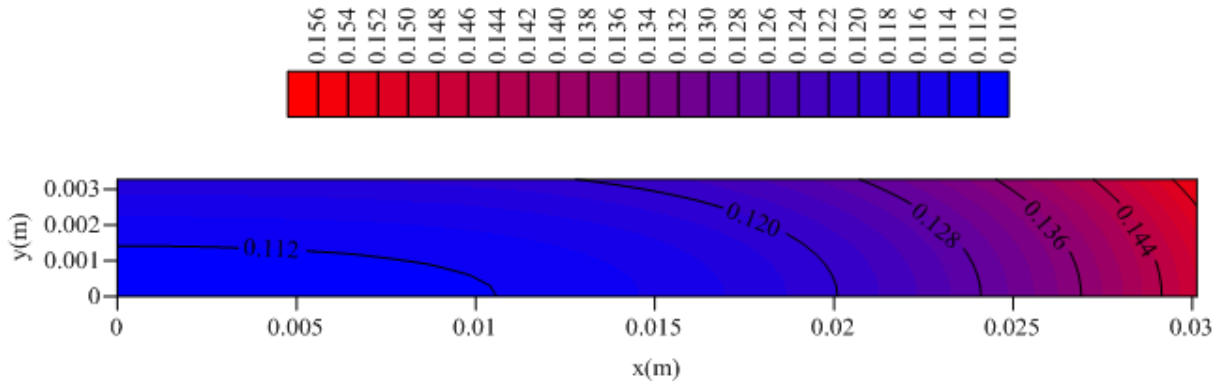


Figura 4.53 - Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

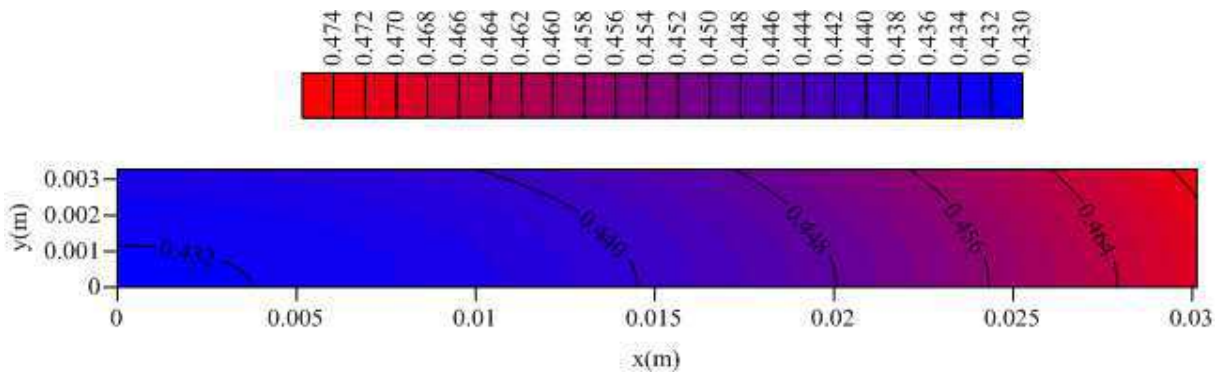
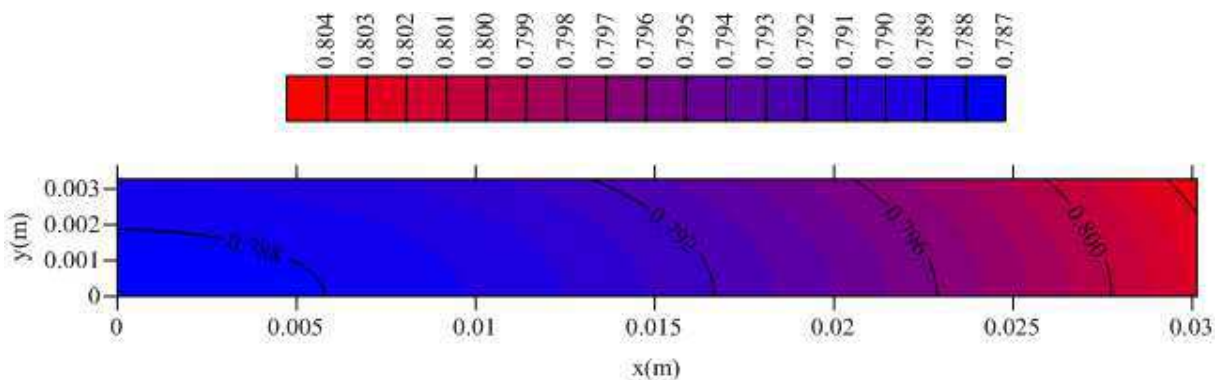


Figura 4.54 - Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=2400$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).



- Plano xz ($y=R_2/2$)

Figura 4.55 - Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

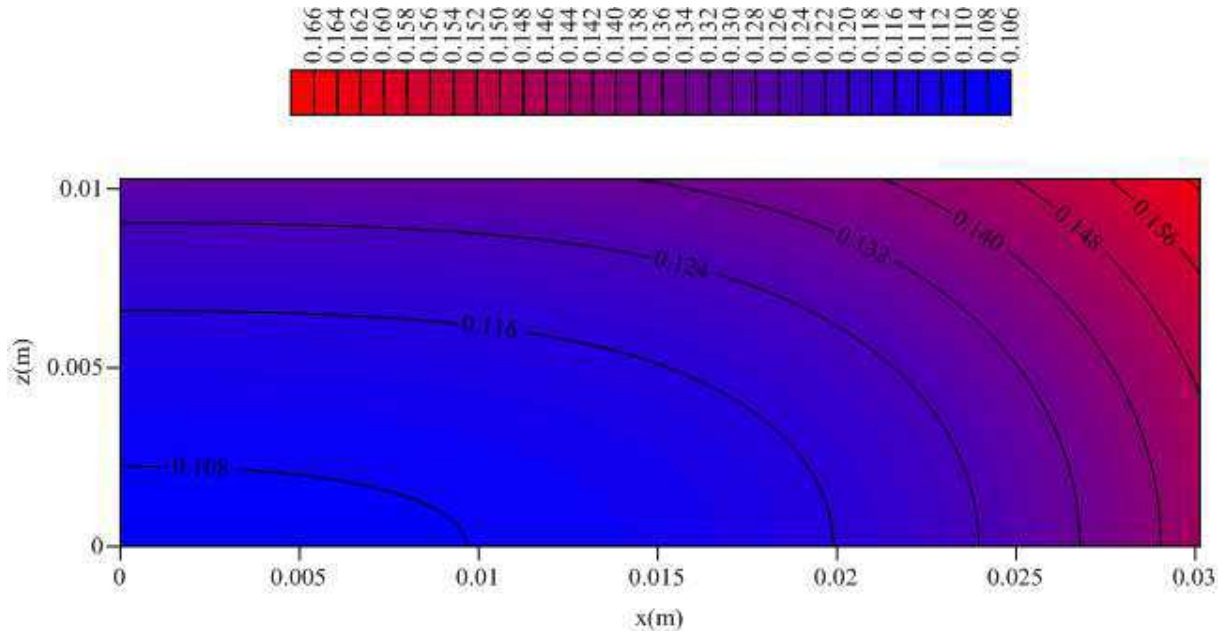


Figura 4.56 - Distribuição de temperatura adimensional ($1-\theta^*$) no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

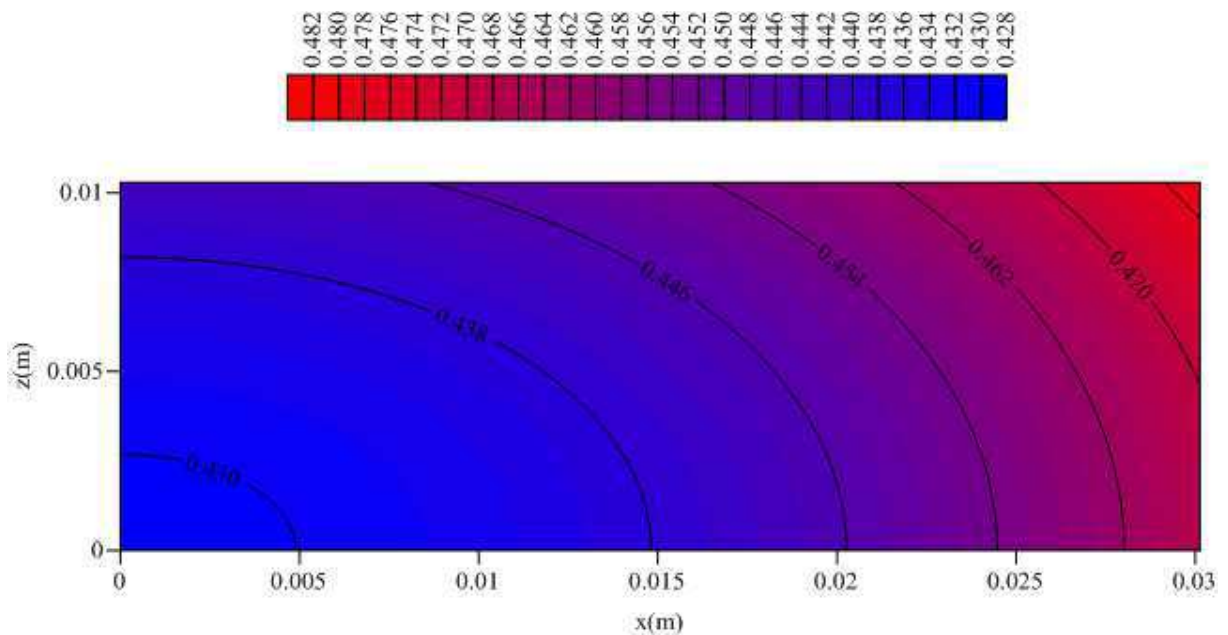
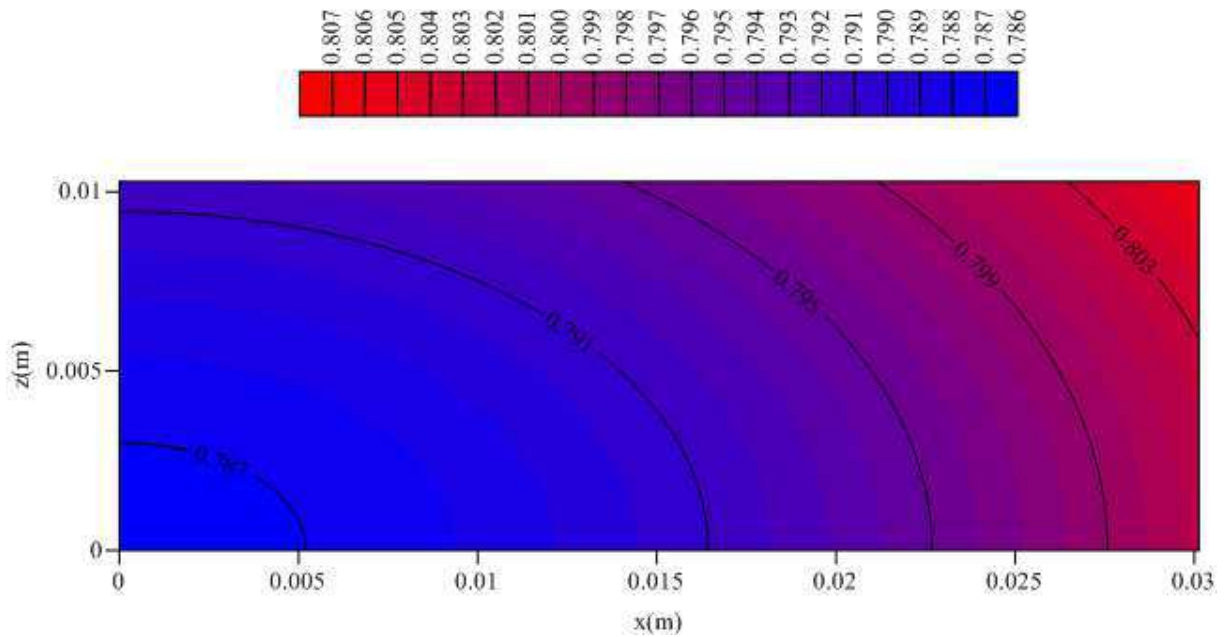


Figura 4.57 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano xz ($y=R_2/2$) em $t=2400$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).



- Plano yz ($x=R_1/2$)

Figura 4.58 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

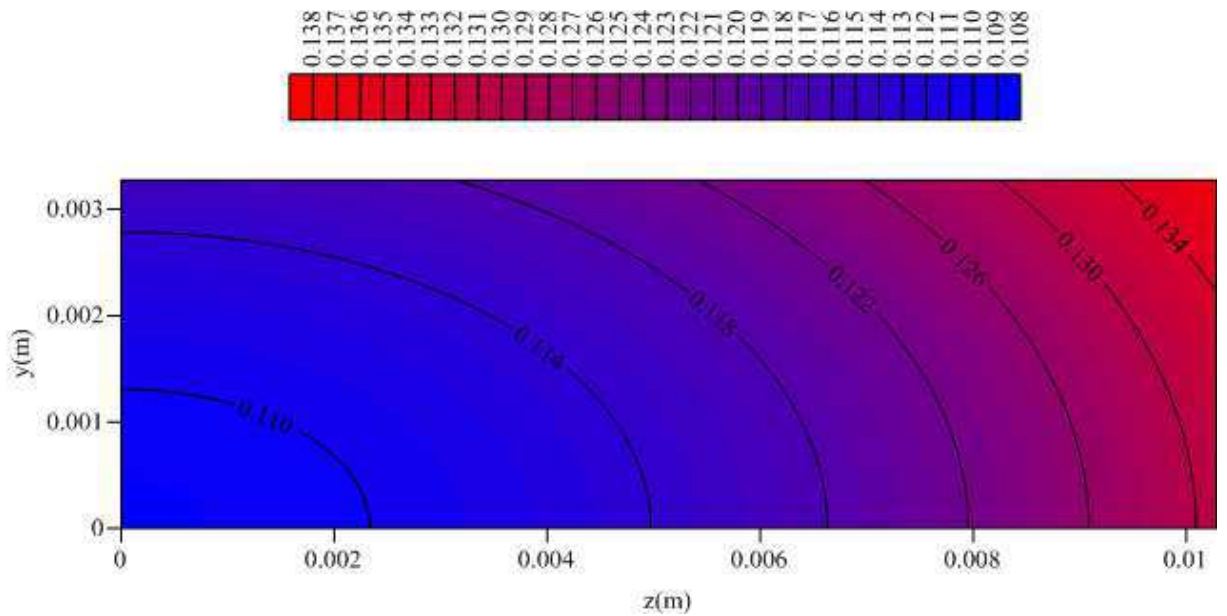


Figura 4.59 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=900$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

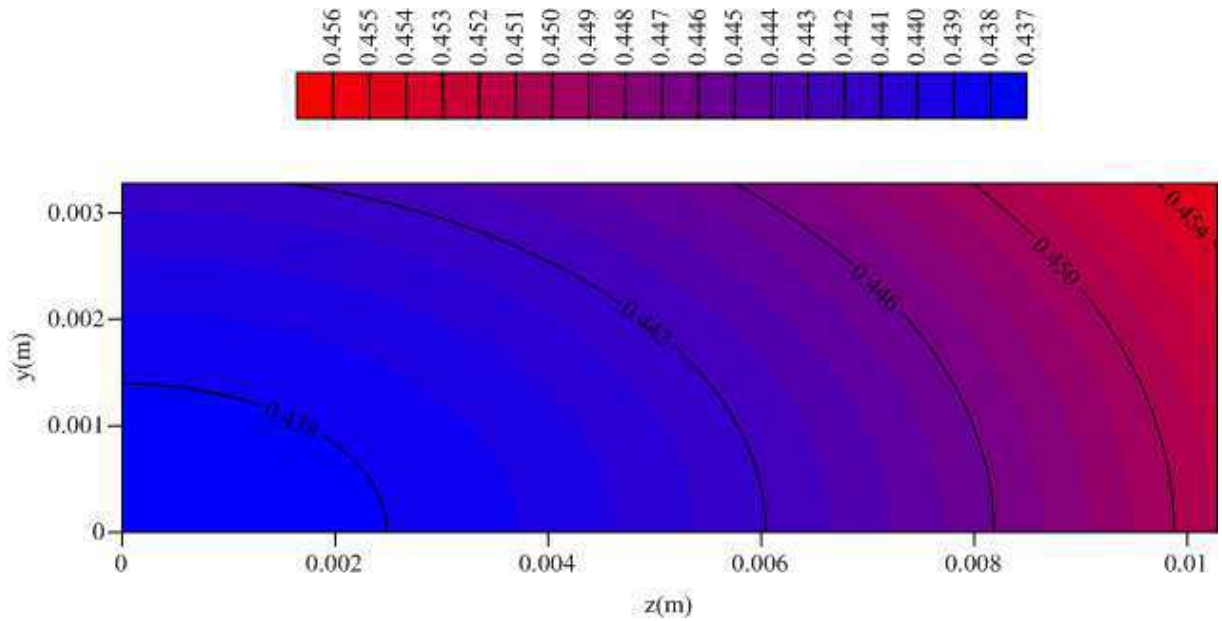
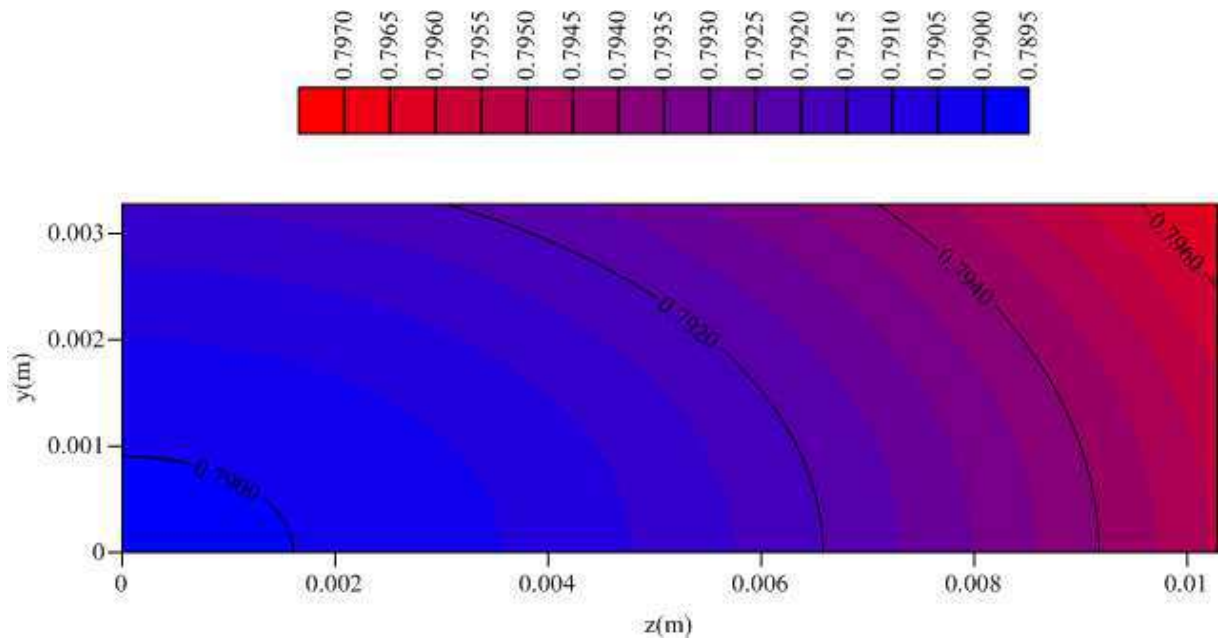


Figura 4.60 - Distribuição de temperatura adimensional $(1-\theta^*)$ no plano yz ($x=R_1/2$) em $t=2400$ s, para a secagem a 80°C (Caso 3).

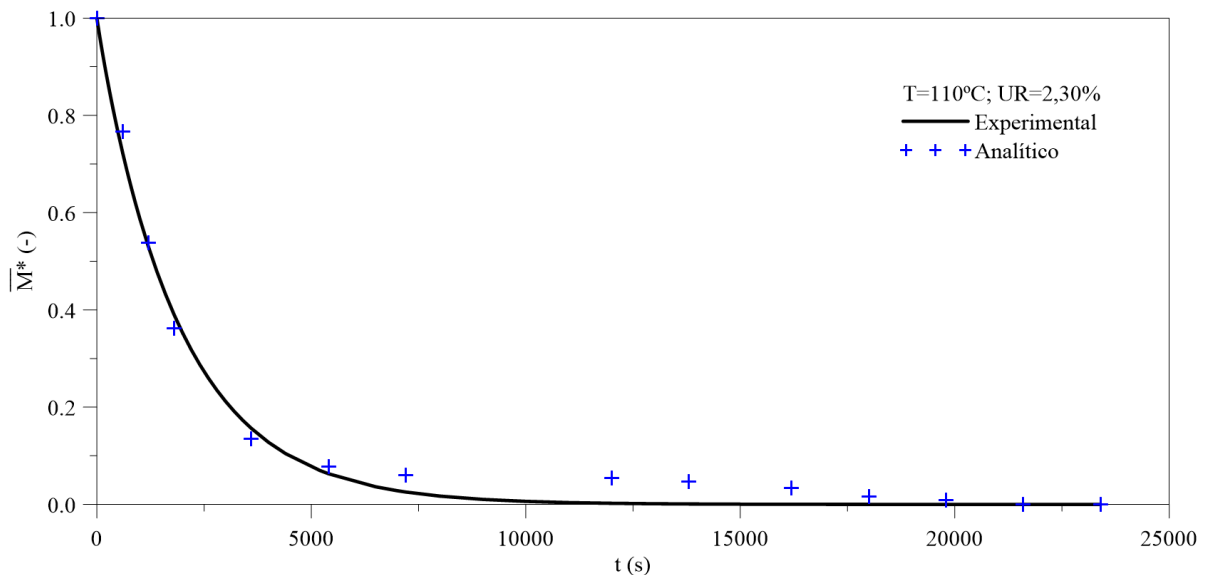


d) Caso 4 (Argila Vermelha, $T=110^\circ\text{C}$)

Neste caso avaliou-se apenas, como mostra a Figura 4.61, a comparação entre os resultados preditos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo de

secagem de tijolos cerâmicos comuns a uma temperatura de 110°C, referente ao Caso 4 das Tabelas 3.1 e 3.2.

Figura 4.61 - Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem (Caso 4).



Como pode ser visto os resultados analítico e experimental estão aproximadamente superpostos indicando que o ajuste foi bastante satisfatório. No ajuste obteve-se um coeficiente de difusão de massa de $2,10 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, um resultado de 38,16% maior que o valor reportado por Nascimento (2002) e um erro médio quadrático de $0,0107967 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)^2$.

Nas Figuras 4.62 a 4.67 observa-se a distribuição do teor de umidade no plano xy ($z=R_3$) para diferentes tempos de processo. Analisando essas figuras nota-se que o material seca primeiro na superfície enquanto o centro continua consideravelmente úmido, indicando que o fluxo de umidade se dá do centro para superfície. Assim, devido à superfície do material secar mais rápido, principalmente nas pontas, as chances de ocorrer trincas nesse local, devido às tensões hídricas, são bastante altas como reportado por Silva (2009).

- Plano xy ($z=R_3$)

Figura 4.62 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=500$ s, para secagem a 110°C (Caso 4).

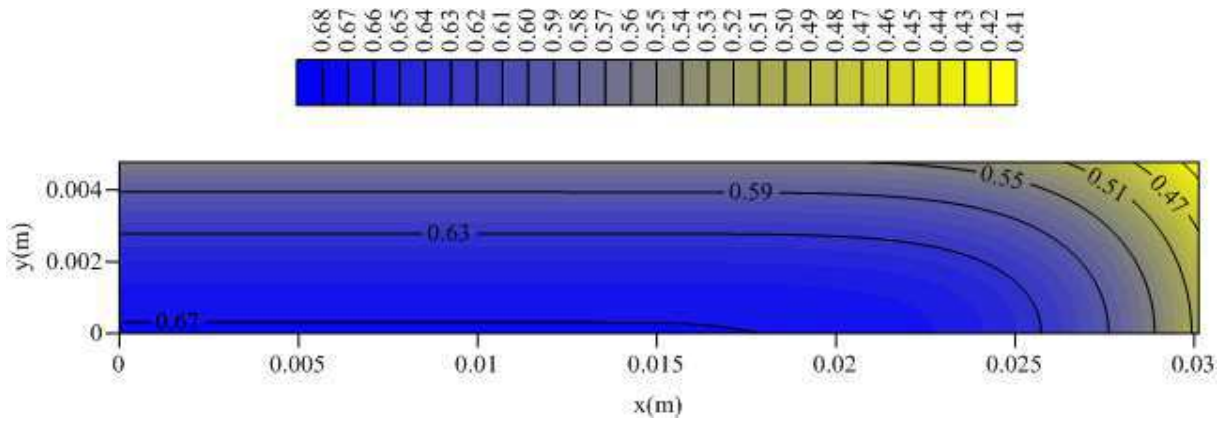


Figura 4.63 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=1500$ s, para secagem a 110°C (Caso 4).

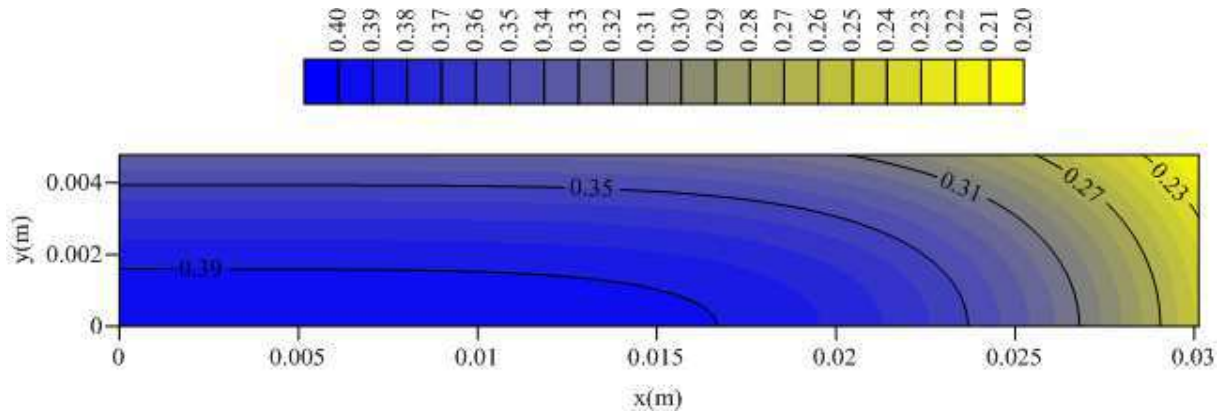
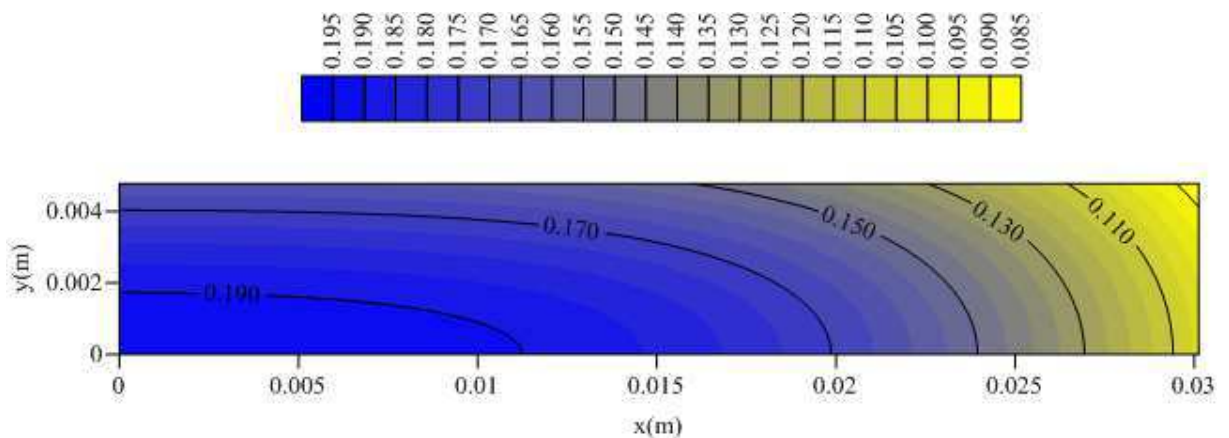


Figura 4.64 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=3000$ s, para secagem a 110°C (Caso 4).



- Plano xy ($z=R_3/2$)

Figura 4.65 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=500$ s, para secagem a 110°C (Caso 4).

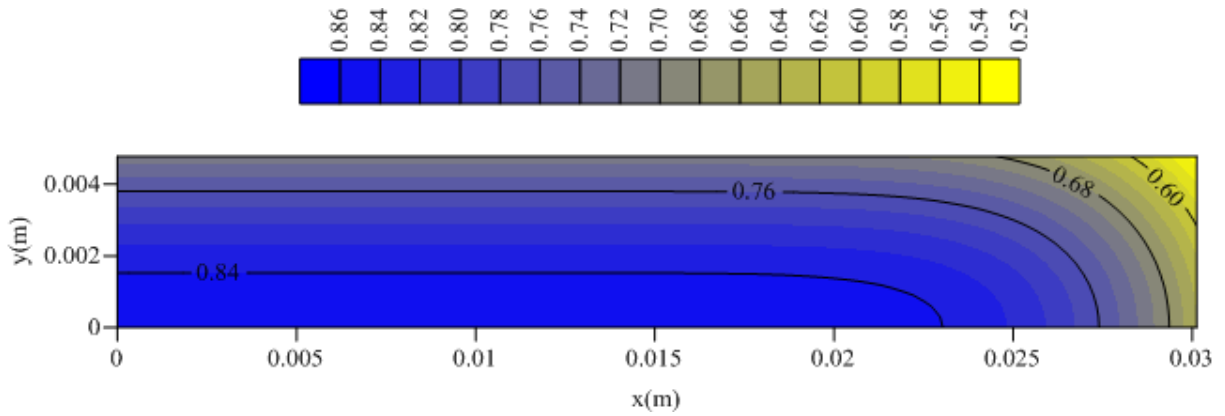


Figura 4.66 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=1500$ s, para secagem a 110°C (Caso 4).

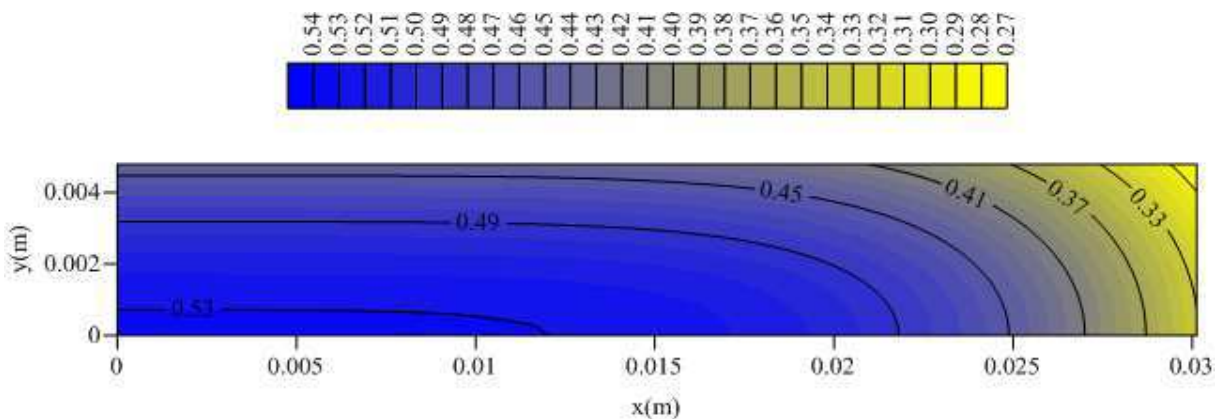
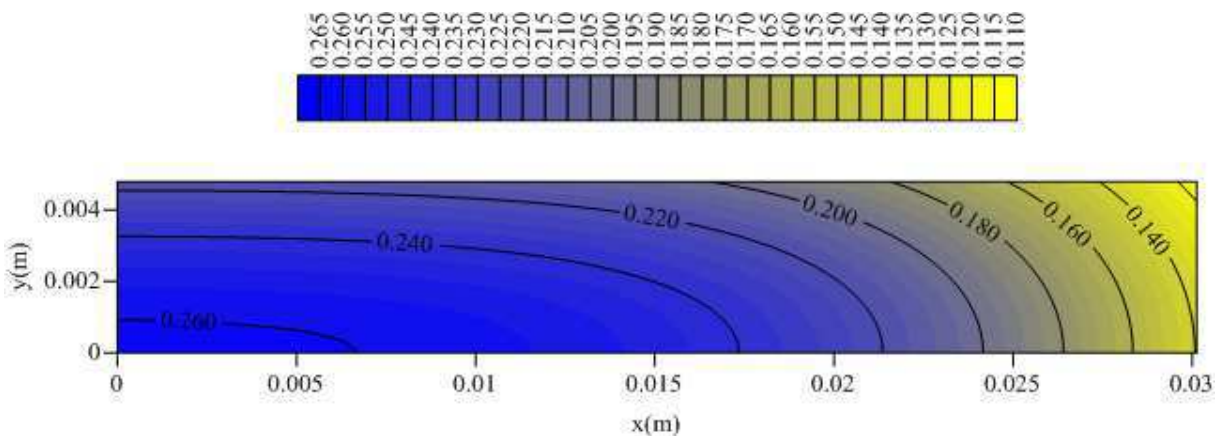


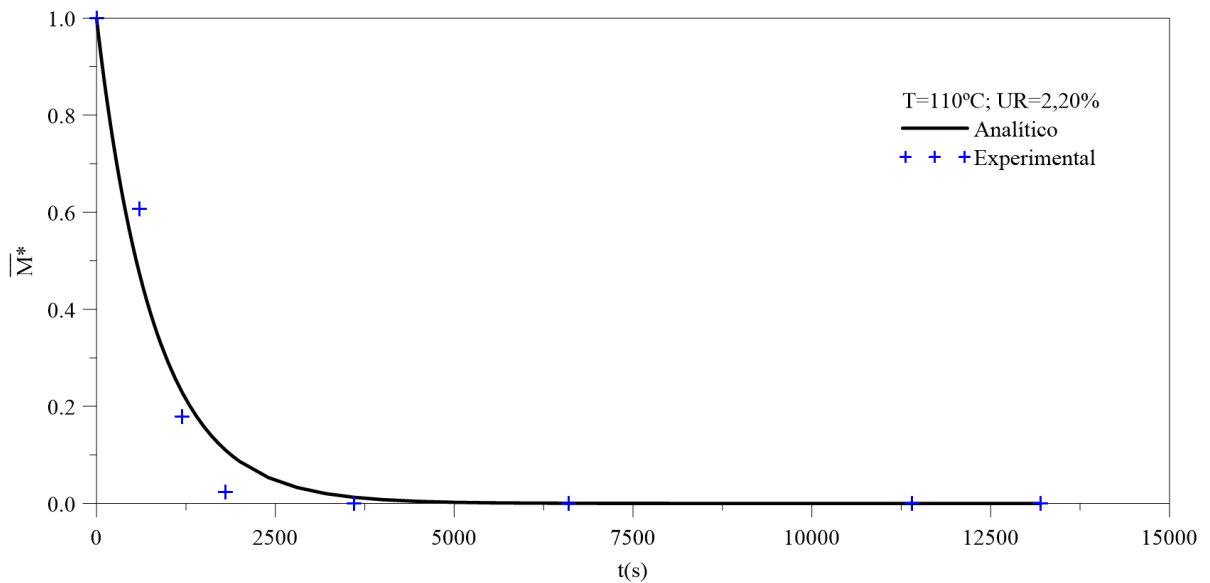
Figura 4.67 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=3000$ s, para secagem a 110°C (Caso 4).



e) **Caso 5 (Argila Ball Clay, T=110°C)**

Como no Caso 4, neste caso também se avaliou apenas, como ilustra a Figura 4.68, a comparação entre os resultados preditos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo de secagem de tijolos cerâmicos comuns a uma temperatura de 110°C, referente ao Caso 5 das Tabelas 3.1 e 3.2.

Figura 4.68 - Comparação entre o resultado teórico e experimental do teor de umidade médio adimensional em função do tempo de secagem (Caso 5).



Os resultados analítico e experimental estão praticamente superpostos mostrando que o ajuste foi satisfatório. No ajuste obteve-se um coeficiente de difusão de massa de $2,730 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, um resultado de 34,48% maior que o valor reportado por Nascimento (2002) e um erro equivalente de $0,0278694 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)^2$.

Nas Figuras 4.68 a 4.74 observa-se a distribuição do teor de umidade no plano xy ($z=R_3$) e xy ($z=R_3/2$) para diferentes tempos de processo.

- Plano xy ($z=R_3$)

Figura 4.69 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=200$ s, para a secagem a 110°C (Caso 5).

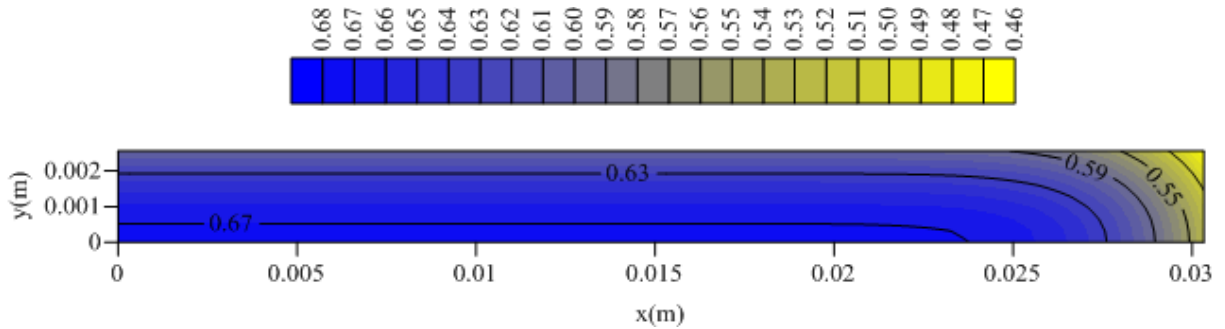


Figura 4.70 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=600$ s, para a secagem a 110°C (Caso 5).

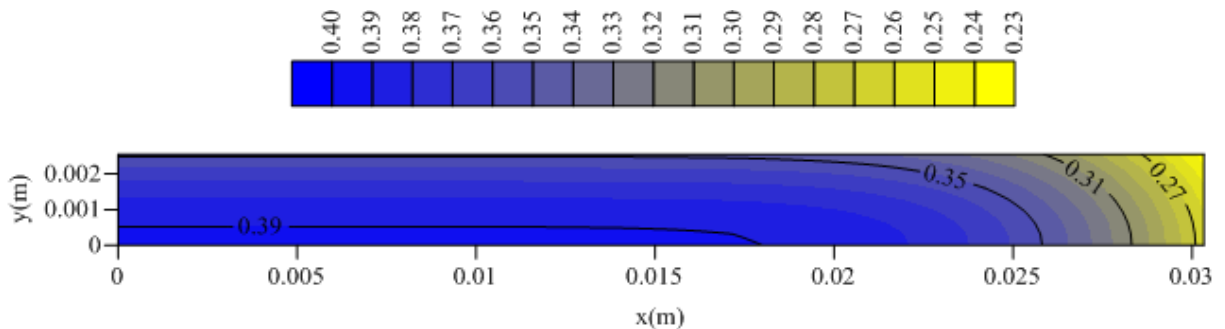
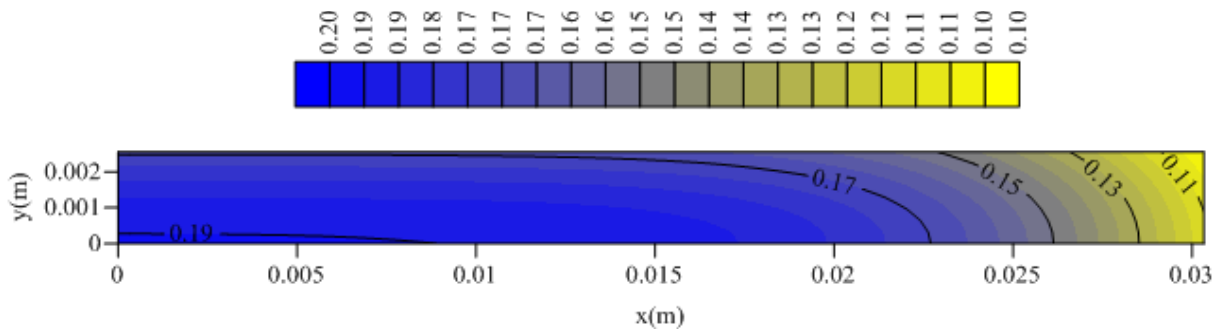


Figura 4.71 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=1200$ s, para a secagem a 110°C (Caso 5).



- Plano xy ($z=R_3/2$)

Figura 4.72 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=200$ s, para a secagem a 110°C (Caso 5).

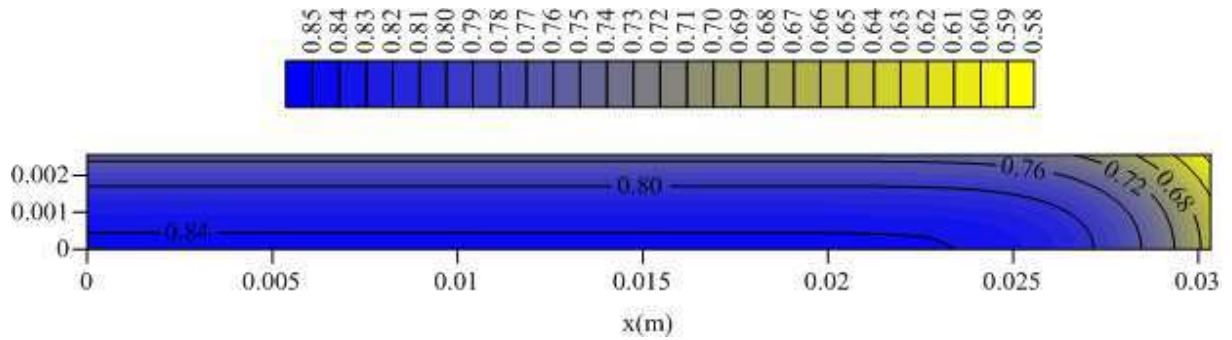


Figura 4.73 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3/2$) em $t=600$ s, para a secagem a 110°C (Caso 5).

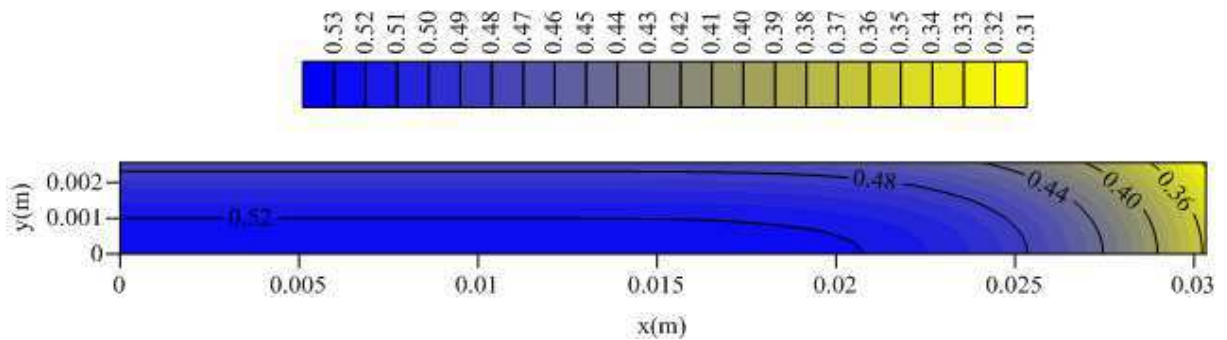
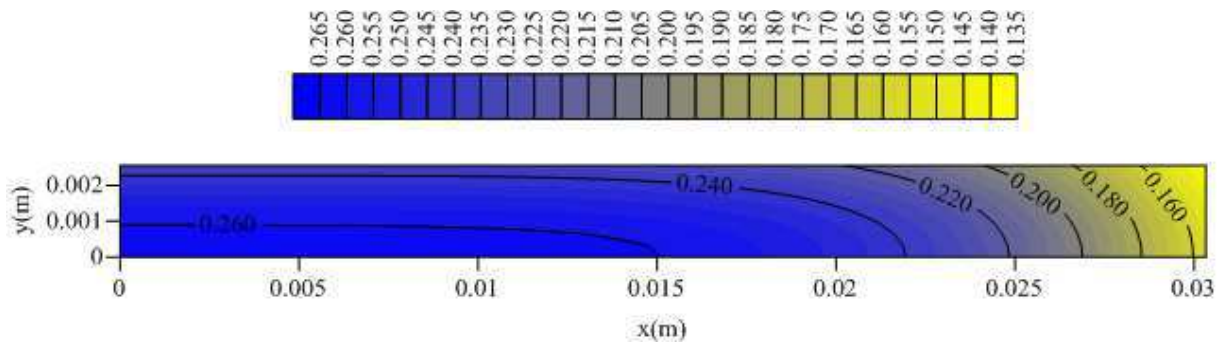


Figura 4.74 - Distribuição do teor de umidade adimensional (M^*) no plano xy ($z=R_3$) em $t=1200$ s, para a secagem a 110°C (Caso 5).



Após análise destas figuras, pode-se afirmar que o fluxo de umidade se dá do centro para superfície e o fluxo de calor ocorre da superfície para o centro. Observa-se ainda que os maiores gradientes de umidade e de temperatura encontram-se nas regiões próximas aos vértices do produto, devido essas regiões estarem em contato mais intenso com o ar de secagem. Altos gradientes de umidade geram tensões hídricas e altos gradientes de temperatura geram tensões térmicas. Ficando assim, esses locais mais susceptíveis ao aparecimento de trincas e deformidades, entrando em concordância com os resultados de Silva (2009). Fisicamente, estes acontecimentos são esperados devido à exposição do sólido a uma atmosfera mais envolvente, tendendo assim a variar mais rapidamente o valor de M^* e θ^* nessas regiões em todos os planos e em qualquer tempo de processo. Portanto, é de extrema importância controlar o processo de secagem para que os produtos não sejam danificados, pois isso acontecendo implica no aumento de custos para as empresas, pela redução da qualidade do produto, perda de matéria prima e custo de energia usada no processo.

As estimativas dos coeficientes de difusão de massa foram obtidas através dos ajustes. A Tabela 4.1 sumariza os valores desses coeficientes, bem como o erro relativo e variância, para cada caso analisado.

4.2 Estimativa do Coeficiente de Difusão de Massa

Tabela 4.1 - Parâmetros obtidos após o ajuste para cada caso.

Caso	Tipo de Argila	T _a (°C)	Nascimento (2002) $D \times 10^{+8} (\text{m}^2/\text{s})$	Este Trabalho $D \times 10^{+8} (\text{m}^2/\text{s})$	ERMQ $(\text{kg}/\text{kg})^2$	Variância \bar{S}^2
1	Vermelha	60	0,233	0,22	0,00628346	0,000698162
2	Ball Clay	80	0,357	0,36	0,00840254	0,001200360
3	Vermelha	80	1,296	1,41	0,00846885	0,000940984
4	Vermelha	110	1,520	2,10	0,01079670	0,000830515
5	Ball Clay	110	2,030	2,73	0,02786940	0,003981350

Analisando a Tabela 4.1, verifica-se que o coeficiente de difusão de massa tende a aumentar com a temperatura, teor de umidade inicial e tipo de material usado. Quanto maior a temperatura maior o coeficiente de difusão de massa.

Comparar os valores do coeficiente de difusão de massa é um tanto complexo, tendo em vista a diferença deste parâmetro com as condições de ar de secagem, forma geométrica e natureza do material (granulométrica, tipo de argila, etc.), modelo e condições de contorno usadas nessa modelagem. Contudo, Silva (2009), trabalhando com secagem de tijolos cerâmicos vazados industriais, obteve um coeficiente de difusão de massa de $8,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, na temperatura de 80°C , e Santos (2013) estudando a secagem de sólidos cerâmicos (telhas), obteve um coeficiente de difusão de massa de $5,17 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ na temperatura de 80°C .

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A secagem de tijolos cerâmicos maciços se dá a uma taxa decrescente;
- O fluxo de umidade se dá do centro para superfície do sólido, enquanto que o fluxo de calor ocorre de forma inversa ao fluxo de umidade, sendo da superfície para o centro do material;
- Quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar de secagem, mais rápido é a secagem e aquecimento do material;
- Do ponto de vista da transferência de calor e/ou massa, os gradientes de umidade e temperatura são maiores nas superfícies e especificamente nos vértices do sólido, que se encontra em contato direto com o ar de secagem. Desta maneira, essas regiões ficam extremamente susceptíveis a ocorrência de choques térmicos, trincas e deformações, assim, comprometendo a qualidade do produto fabricado;
- O controle do processo de secagem é de extrema importância pois, dependendo das tensões geradas no interior do material durante o processo de secagem, podem surgir deformações consideráveis nos produtos fabricados, variando das tensões térmicas e hídricas, aumentando assim os custos de processo e prejuízos das empresas;
- A comparação entre os resultados teóricos (Lei de Fick) e experimentais do teor de umidade médio apresentam, erros médios quadráticos pequenos, indicando um bom ajuste;
- O coeficiente de difusão de massa se mostrou dependente da temperatura e umidade relativa do ar de secagem, variando de $0,22 \times 10^{-8}$ a $2,73 \times 10^{-8}$ m^2/s , quando a temperatura aumentou de 60 para 110°C, respectivamente. Há uma dependência

do valor deste coeficiente com a composição química da argila (tipo de argila) e teor de umidade inicial da amostra.

- Por fim, o modelo matemático utilizado para descrever o processo foi bastante adequado. Neste sentido, as soluções podem ser usadas para prever processos transientes de secagem, umidificação, aquecimento e/ou resfriamento, em sólidos com geometria paralelepédica.

5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestões para futuras pesquisas, pode-se citar:

- Aplicar o modelo utilizado neste trabalho para analisar a secagem de outros produtos com geometria paralelepípedo, independentemente de sua natureza;
- Realizar experimentos de secagem medindo a temperatura, umidade e dimensões da amostra simultaneamente, a fim de permitir avaliar tanto o transporte de massa quanto o transporte de calor, simultaneamente.
- Estudar os efeitos das tensões termo-mecânicas em produtos cerâmicos com geometria paralelepédica.

REFERÊNCIAS

ABC (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA). Cerâmica no Brasil: Introdução. Disponível em: < http://www.abceram.org.br/asp/abc_21.asp >. Acesso: 07/02/2016.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). Tijolos maciços cerâmicos para alvenaria. Comitê Brasileiro de construção Civil. Comissão de Estudos de Tijolos de Barro Cozido. NBR 7170.

ALBUQUERQUE, P. J. R. Materiais cerâmicos. Dissertação de mestrado - FACENS -2000.

ALMEIDA, G. S. Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais. 2009. 211p. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.

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

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

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

ANOSTI Jr., S.; INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C., Variáveis críticas no processo de secagem de concretos refratários, Cerâmica, São Paulo, v. 45, n. 292-293, Março/Junho. 1999.

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

BAUER, L. A. F., *Materiais de construção*. Rio de Janeiro, LTC. 935p. 1994.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S. Estudo experimental da secagem de tijolos cerâmicos. *Anais do II Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, PIBIC/UFPB-CCT*. 2005.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e massa*. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport phenomena*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 780p. 1960.

BOEHM, R. F. Heat and mass transfer. *Mechanical Engineering Handbook*. Ed. Frank Kreith. Boca Raton: CRC Press LLC, p. 4. 1999.

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

CARMO, J. E. F. *Difusão em sólidos esferoidais oblatos: modelagem e simulação*. 2000. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

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

CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press, Oxford, 1995. 510 p.

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

CHEMKHI, S.; ZAGROUBA, F. Water diffusion coefficient in clay material from drying data. *Desalination*. v.185, n 1-3, p. 491-498. 2005.

COTTA, R. M. Integral transform in computational heat and flow. CRC Press, Boca Raton, FL, EUA, 1993.

ERDOGDU, F. A review on simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient. *Journal of Food Engineering*. v. 86, n. 3, p. 453-459. 2008.

FARIAS, F. P. M. Estudo teórico da termofluidodinâmica em secadores ciclônicos. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil. 2006, 131 p.

FARIAS, V. S. O. Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2011, 265 p.

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

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

FIGLIOLA, R. Princípios de secagem de produtos biológicos. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 220 p, 2004.

FORTES, M. E OKOS, M. R. A. Advances in drying. Hemisphere Publishing Corporation, Chapter Five: Drying theories: Their bases and limitations as applied to foods and grains. v. 1, p. 119-154. 1980.

GEBHART, B. Heat conduction and mass diffusion. New York: McGraw-Hill. 634 p. 1993.

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

GUILHERME, A. Fabricação em cerâmica vermelha. MINEROPAR-Minerais do Paraná/SERT. 25p. 1998.

HANATANI, N.; ITAYA, Y. Deformation characteristic of ceramics during drying, In: Proceeding of the International Drying Symposium (IDS, 92), p. 190-199, Parte A. 1992.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, P. D. Fundamentos de transferência de calor e massa. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

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

KEEY, R. B. Drying of loose and particulate materials. New York: Hemisphere Publishing Corporation. 502 p. 1992.

KETELAARS, A. A. J.; LAUF, O.; COUMANS, W. J.; KERKHOP, P. J. A. M. Determination of diffusion coefficient from experimental moisture concentration profiles in clay. Drying. 92 Part A, p. 345-352. 1992.

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

LIENHARD IV, J. H.; LIENHARD V, J. H. A heat transfer textbook. Ed. 3. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2001.

LIMA, A. G. B. Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UNICAMP, São Paulo. 1999. 244 p.

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.

LOPEZ, E. M.; CORTES, L. L. Moisture transfer analysis during drying of brick by temperature and relative humidity profiles. European Scientific Journal. v. 9, n 33, p 1857-7881 e p 1857-7431. 2013.

LUIKOV, A. V. Analytical heat diffusion theory. Academic Press, New York. 685p. 1968.

LUCENA, C., G. Transporte de massa durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados via volumes finitos. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica. Trabalho de Conclusão de Curso. 2005.

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

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

MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., 1995, 424p.

MELLADO, E. C. E. R. Modelo de Transferência de Calor e massa na secagem de madeira serrada de pinus. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal do Programa de Pós -

Graduação em Engenharia Florestal do setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, PR, Brasil. 2007, 155 p.

MINKOWICZ, W. J.; SPARROW, E. M.; SCHNEIDER, G. E.; PLETCHER, R. H. Handbook of numerical heat transfer. New York: John Wiley & sons, Inc., 1988, 1024p.

MURUGESAN, K.; SURESH, H. N.; SEETHARAMU, K. N.; NARAYANA, P. A. A. and SUNDARARAJAN, T. S theoretical model of brick drying as a conjugate problem. International Journal of Heat and Mass Transfer. v. 44, n. 21, p. 4075-4086. 2001.

NASCIMENTO, J. J. S. Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, UFPB, João Pessoa, PB, Brasil. 2002, 181 p.

NASCIMENTO, J. J. S.; BATISTA, V. R.; LIMA, A. G. B. Secagem e queima de tijolos cerâmicos maciços e vazados incluindo variações dimensionais e danos estruturais. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. v. 3, p. 46-61. 2008.

NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B.; NEVES, G. A.; BATISTA, V. R.; SANTANA, E. W. F.; BELO, F. A.; SANTANA, L. N. Experimental drying of ceramic bricks including shrinkage. Proceedings of the 18 th International Congress of Mechanical Engineering. Ouro Preto-MG. v. 1, p. 1-7. 2005.

NEVES, G. A. Introdução a ciência dos materiais - Materiais cerâmicos. Curso Especial PRÓ-DESING-SENAI-CNTCC/SENAI-PB. 1998.

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

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA R. A.; PARK, K, J. B. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. Campinas, 121 p., Março de 2007.

PATANKAR, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 197p.

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

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

SALINA, C.; ANANIAS, A.; ALVEAR, M. Simulación del secado de la madera: wod drying simulation. Maderas, Ciência e Tecnologia. v.6, n. 1, p. 3-18. 2004.

SHIH, T. Numerical heat transfer. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1984, 536 p.

SANTOS, I. B. Transporte de calor e massa em sólidos com forma arbitrária via método integral baseado em Galerkin: modelagem e simulação. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Tecnologia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil. 2013.

SILVA, C. M. D. S.; FARIAS, V. S. O.; NASCIMENTO, P. L.; SILVA, W. P.; LIMA, GOMES, J. P.; LINS, M. A. A. Determinação simultânea da condutividade efetiva e do coeficiente de Transferência convectivo de massa durante a secagem de bananas inteiras usando soluções analíticas e o método inverso. Anais do VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.

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

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, PB, Brasil. 2007, 236 p.

SILVA, J. B. Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil. 2009, 173 p.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P.; SILVA L. D. and FARIAS, V. S. O. 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. Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. 2007. 263 p.

STEFFE, J. F.; SINGH, R. P. Theoretical and practical aspects of rough rice tempering. *Transactions of the ASAE*. v. 23. n. 3, p. 775-782. 1980.

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

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

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

APÊNDICE

APÊNDICE 1

RAÍZES DA EQUAÇÃO TRANSCENDENTAL REFERENTE AO CASO 1

AUTOVALORES E VALORES DE Bi_m e Bi_c					
Massa			Calor		
Bi_{m1}	Bi_{m2}	Bi_{m3}	Bi_{c1}	Bi_{c2}	Bi_{c3}
22,6687	2,6475	7,7025	0,148707	0,0173676	0,0505284
β_{m1}	β_{n2}	β_{k3}	β_{m1}	β_{n2}	β_{k3}
1,504524	1,158361	1,392005	0,376324	0,131406	0,222910
4,515757	3,755628	4,211981	3,188202	3,147111	3,157593
7,533149	6,661478	7,108656	6,306760	6,285948	6,291217
10,55964	9,691450	10,07739	9,440529	9,426620	9,430136
13,59689	12,77078	13,09797	12,57819	12,56775	12,57039
16,64539	15,87323	16,15292	15,71742	15,70907	15,71118
19,70479	18,98809	19,23052	18,85744	18,85048	18,85224
22,77423	22,11032	22,32340	21,99791	21,99194	21,99345
25,85262	25,23726	25,42688	25,13866	25,13343	25,13475
28,93883	28,36739	28,53796	28,27959	28,27495	28,27612
32,03180	31,49978	31,65462	31,42066	31,41648	31,41753
35,13056	34,63381	34,77549	34,56182	34,55802	34,55898
38,23429	37,76909	37,89962	37,70306	37,69957	37,70045
41,34226	40,90534	41,02629	40,84435	40,84113	40,84194
44,45386	44,04234	44,15500	43,98568	43,98269	43,98345
47,56860	47,17995	47,28537	47,12705	47,12426	47,12496
50,68604	50,31805	50,41709	50,26844	50,26583	50,26649
53,80581	53,45656	53,54993	53,40986	53,40740	53,40802
56,92762	56,59541	56,68373	56,55130	56,54897	56,54956
60,05121	59,73455	59,81832	59,69275	59,69055	59,69111
63,17636	62,87394	62,95360	62,83422	62,83213	62,83266
66,30288	66,01353	66,08947	65,97570	65,97371	65,97421
69,43062	69,15330	69,22585	69,11719	69,11529	69,11577
72,55944	72,29324	72,36267	72,25869	72,25687	72,25733
75,68922	75,43331	75,49989	75,40020	75,39845	75,39889
78,81986	78,57350	78,63745	78,54171	78,54004	78,54046
81,95127	81,71380	81,77532	81,68323	81,68162	81,68203
85,08338	84,85419	84,91346	84,82475	84,82321	84,82360
88,21612	87,99467	88,05185	87,96628	87,96479	87,96517
91,34943	91,13523	91,19045	91,10782	91,10638	91,10674

APÊNDICE 2

RAÍZES DA EQUAÇÃO TRANSCENDENTAL REFERENTE AO CASO 2

AUTOVALORES E VALORES DE Bi_m e Bi_c					
Massa			Calor		
Bi_{m1}	Bi_{m2}	Bi_{m3}	Bi_{c1}	Bi_{c2}	Bi_{c3}
35,388	3,13668	11,8891	0,148376	0,0131516	0,0498492
β_{m1}	β_{n2}	β_{k3}	β_{m1}	β_{n2}	β_{k3}
1,527654	1,204230	1,449479	0,375926	0,114430	0,221431
4,583583	3,828048	4,360834	3,188100	3,145773	3,157379
7,641317	6,719901	7,303135	6,306708	6,285278	6,291109
10,70190	9,736438	10,28251	9,440494	9,426173	9,430064
13,76617	12,80657	13,29597	12,57817	12,56742	12,57034
16,83473	15,90271	16,33706	15,71740	15,70880	15,71114
19,90792	19,01306	19,39938	18,85742	18,85025	18,85220
22,98589	22,13194	22,47767	21,99789	21,99175	21,99342
26,06863	25,25630	25,56800	25,13864	25,13326	25,13472
29,15599	28,38439	28,66747	28,27958	28,27480	28,27610
32,24772	31,51513	31,77398	31,42065	31,41635	31,41751
35,34355	34,64780	34,88597	34,56181	34,55790	34,55896
38,44315	37,78194	38,00232	37,70305	37,69946	37,70043
41,54623	40,91721	41,12215	40,84434	40,84103	40,84193
44,65246	44,05338	44,24481	43,98567	43,98260	43,98343
47,76156	47,19026	47,36980	47,12704	47,12417	47,12495
50,87326	50,32773	50,49671	50,26843	50,26574	50,26647
53,98730	53,46568	53,62525	53,40985	53,40732	53,40801
57,10346	56,60403	56,75516	56,55129	56,54890	56,54955
60,22154	59,74272	59,88624	59,69275	59,69048	59,69110
63,34134	62,88169	63,01832	62,83421	62,83206	62,83265
66,46271	66,02092	66,15127	65,97569	65,97365	65,97420
69,58551	69,16036	69,28498	69,11719	69,11523	69,11576
72,70959	72,29999	72,41935	72,25868	72,25681	72,25732
75,83483	75,43978	75,55430	75,40019	75,39840	75,39888
78,96115	78,57971	78,68977	78,54171	78,53998	78,54045
82,08843	81,71977	81,82570	81,68323	81,68157	81,68202
85,21660	84,85995	84,96203	84,82475	84,82316	84,82359
88,34559	88,00022	88,09874	87,96628	87,96474	87,96516
91,47531	91,14059	91,23577	91,10782	91,10633	91,10673

APÊNDICE 3

RAÍZES DA EQUAÇÃO TRANSCENDENTAL REFERENTE AO CASO 3

AUTOVALORES E VALORES DE Bi_m e Bi_c					
Massa			Calor		
Bi_{m1}	Bi_{m2}	Bi_{m3}	Bi_{c1}	Bi_{c2}	Bi_{c3}
2,88479	0,313564	0,984255	0,147637	0,0160475	0,050372
β_{m1}	β_{n2}	β_{k3}	β_{m1}	β_{n2}	β_{k3}
1,181943	0,532326	0,855354	0,375033	0,126341	0,222570
3,791949	3,238127	3,421683	3,187872	3,146692	3,157544
6,690288	6,332660	6,434963	6,306591	6,285738	6,291192
9,713469	9,457919	9,527717	9,440416	9,426480	9,430120
12,78824	12,59127	12,64406	12,57811	12,56765	12,57038
15,88758	15,72790	15,77029	15,71736	15,70898	15,71117
19,00023	18,86617	18,90158	18,85738	18,85041	18,85223
22,12083	22,00540	22,03579	21,99786	21,99188	21,99344
25,24651	25,14521	25,17182	25,13861	25,13338	25,13475
28,37565	28,28542	28,30909	28,27955	28,27490	28,27612
31,50723	31,42590	31,44721	31,42063	31,41644	31,41753
34,64061	34,56659	34,58597	34,56179	34,55798	34,55898
37,77533	37,70743	37,72520	37,70303	37,69954	37,70045
40,91110	40,84838	40,86479	40,84432	40,84110	40,84194
44,04770	43,98943	44,00466	43,98565	43,98266	43,98344
47,18495	47,13054	47,14476	47,12702	47,12423	47,12496
50,32275	50,27172	50,28505	50,26842	50,26580	50,26648
53,46098	53,41295	53,42550	53,40984	53,40738	53,40802
56,59959	56,55421	56,56607	56,55128	56,54895	56,54956
59,73851	59,69551	59,70674	59,69273	59,69053	59,69110
62,87770	62,83684	62,84751	62,83420	62,83211	62,83265
66,01712	65,97820	65,98836	65,97568	65,97369	65,97421
69,15673	69,11957	69,12928	69,11717	69,11527	69,11577
72,29651	72,26097	72,27025	72,25867	72,25685	72,25733
75,43645	75,40238	75,41127	75,40018	75,39844	75,39889
78,57651	78,54381	78,55235	78,54170	78,54002	78,54046
81,71670	81,68525	81,69346	81,68322	81,68161	81,68203
84,85698	84,82670	84,83460	84,82474	84,82319	84,82360
87,99737	87,96816	87,97578	87,96627	87,96478	87,96517
91,13783	91,10963	91,11699	91,10781	91,10636	91,10674

APÊNDICE 4

RAÍZES DA EQUAÇÃO TRANSCENDENTAL REFERENTE AO CASO 4

Massa		
$B_{i_{m1}}$	$B_{i_{m2}}$	$B_{i_{m3}}$
2,61083	0,414267	0,8801
β_{m1}	β_{n2}	β_{k3}
1,154463	0,602411	0,820457
3,749803	3,267696	3,395227
6,656947	6,348349	6,419435
9,688015	9,468502	9,516992
12,76807	12,59924	12,63591
15,87101	15,73429	15,76374
18,98621	18,87150	18,89610
22,10869	22,00997	22,03108
25,23583	25,14921	25,16770
28,36612	28,28898	28,30542
31,49862	31,42911	31,44391
34,63276	34,56950	34,58296
37,76813	37,71010	37,72244
40,90445	40,85085	40,86224
44,04151	43,99171	44,00230
47,17917	47,13268	47,14256
50,31732	50,27372	50,28298
53,45588	53,41483	53,42355
56,59477	56,55599	56,56423
59,73394	59,69720	59,70500
62,87335	62,83845	62,84586
66,01298	65,97972	65,98678
69,15278	69,12103	69,12777
72,29273	72,26236	72,26881
75,43282	75,40372	75,40989
78,57303	78,54509	78,55102
81,71335	81,68648	81,69218
84,85376	84,82789	84,83338
87,99426	87,96930	87,97460
91,13483	91,11073	91,11585

APÊNDICE 5

RAÍZES DA EQUAÇÃO TRANSCENDENTAL REFERENTE AO CASO 5

Massa		
$B_{i_{m1}}$	$B_{i_{m2}}$	$B_{i_{m3}}$
2,96634	0,249885	1,00149
β_{m1}	β_{n2}	β_{k3}
1,189445	0,479992	0,860802
3,803904	3,219064	3,425991
6,699984	6,322687	6,437520
9,720952	9,451211	9,529488
12,79420	12,58622	12,64540
15,89249	15,72385	15,77138
19,00439	18,86280	18,90249
22,12443	22,00251	22,03656
25,24969	25,14268	25,17251
28,37848	28,28317	28,30970
31,50979	31,42388	31,44776
34,64294	34,56475	34,58647
37,77747	37,70574	37,72565
40,91308	40,84682	40,86521
44,04954	43,98798	44,00505
47,18667	47,12919	47,14513
50,32436	50,27045	50,28540
53,46250	53,41175	53,42582
56,60103	56,55309	56,56637
59,73987	59,69445	59,70703
62,87899	62,83583	62,84779
66,01835	65,97723	65,98862
69,15790	69,11865	69,12952
72,29764	72,26009	72,27049
75,43753	75,40154	75,41150
78,57755	78,54300	78,55257
81,71769	81,68447	81,69367
84,85794	84,82595	84,83481
87,99829	87,96743	87,97598
91,13872	91,10893	91,11718