



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

JACQUELINE FÉLIX DE BRITO DINIZ

TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM SÓLIDOS POROSOS
COM FORMA PARALELEPIPÉDICA. ESTUDO DE CASO:
SECAGEM DE FIBRAS DE SISAL

Campina Grande - PB, Novembro de 2018.

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

JACQUELINE FÉLIX DE BRITO DINIZ

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM SÓLIDOS POROSOS
COM FORMA PARALELEPÍPEDICA. ESTUDO DE CASO:
SECAGEM DE FIBRAS DE SISAL**

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande - PB, Novembro de 2018.

- D585t Diniz, Jacqueline Félix de Brito.
Transferência de calor e massa em sólidos porosos com forma paralelepípedica. Estudo de caso : secagem de fibras de sisal / Jacqueline Félix de Brito Diniz. – Campina Grande, 2018.
202 f.: il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, 2018.
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
Referências.
1. Secagem. 2. Fibras Vegetais. 3. Experimentos. 4. Modelagem. 5. Simulação. 6. Volumes Finitos. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 66.047-037.1(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **JACQUELINE FÉLIX DE BRITO DINIZ** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

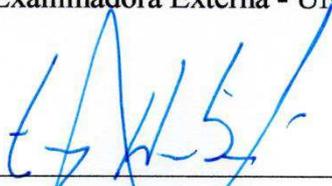
Tese de Doutorado **aprovada** em 30 de novembro de 2018.



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
Orientador - UAEM/ CCT/UFCG



Prof.ª Dr.ª Ana Flávia Camara Bezerra
Examinadora Externa - UNIFAVIP - WYDEN



Prof. Dr. Tony Herbert Freire de Andrade
Examinador Externo - UAEPetro/CCT/UFCG



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira - DESA/CCT/UEPB
Examinador Externo - DESA/CCT/UEPB



Prof.ª Dr.ª Ivonete Batista dos Santos
Examinadora Externa - DF/CCT/UEPB

Campina Grande - PB, Novembro de 2018.

DEDICATÓRIA

À Deus, pai de todo conhecimento, que me permitiu concluir mais essa etapa na minha vida.

À meu querido esposo Josinaldo da Silva Diniz e as minhas amadas filhas Ana Beatriz e Maria Clara, por todo incentivo, compreensão e apoio incondicional em todos os momentos.

À minha mãe Odília Félix de Brito, alicerce e pilar fundamental da minha existência.

Aos meus irmãos, Alexandre, Alexandra e Pedro, inesgotáveis fontes de estímulo, essenciais nos momentos de angústia.

AGRADECIMENTOS

À Deus,

Como agradecer pelo bem que tens feito a mim?

Como demonstrar quanto amor tu tens ó Deus por mim!

Nem anjos podem expressar a minha eterna gratidão.

Tudo o que sou e o que vier a ser aqui, eu ofereço a ti.

À Deus toda glória, que por mim tanto fez.

“Aos homens isto é impossível, mas a Deus tudo é possível.” (Mt. 19:26)

Aos **meus familiares**, a minha eterna gratidão por sua presença em todos os momentos de minha vida, dando-me força, auxiliando-me, compreendendo-me e fortalecendo-me nas horas difíceis.

Ao meu orientador **Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**, pela dedicação, atenção e, principalmente, pelas suas experiências, que muito contribuíram a concluir uma grande e importante etapa de minha vida. Muito obrigada, que Deus continue lhe abençoando!

Aos membros da banca examinadora, os professores doutores **Ana Flávia Camara Bezerra, Tony Herbert Freire de Andrade, Fernando Fernandes Vieira e Ivonete Batista dos Santos** por disponibilizarem seu precioso tempo na avaliação deste trabalho e pelas valiosas contribuições.

Ao médico cardiologista **Dr. Isaac Newton Guimarães Andrade**, que me possibilitou continuar vivendo para concluir esse trabalho e ver minhas filhas crescerem. Agradeço por todas as palavras encorajadoras, por mostrar saídas, por ter escolhido a medicina e dedicar sua vida a ajudar. Que Deus continue lhe abençoando nessa linda jornada!

Aos **médicos, enfermeiros e técnicos do Hospital Antonio Targino**. Agradeço muito a vocês não só pelo atendimento hospitalar durante quase um mês de internação, mas pela ajuda emocional e de forma humanizada, pois foram meus amigos em um ambiente que não era o meu. Obrigada de verdade!

À **todos os professores e funcionários** da Pós-Graduação em Engenharia de Processos que de certa forma contribuíram para realização deste trabalho.

À **todos que fazem a UAMat/UFCG**, pelo apoio e a todos os colegas de trabalho pelo encorajamento tão fundamental para a realização desse trabalho.

Aos **meus amigos** que compartilharam comigo esses anos de estudo, sabendo cultivar a amizade e a compreensão, os meus agradecimentos.

Aos meus colegas de doutorado, especialmente, **Hallyson, Kalina Aires, Edna, Célia, Danielton, Mirenia Kalina, Robson, Vanderson, Rodrigo, Verônica, João Paulo, Brasileiro, Balbina e Morgana**, pelo companheirismo, apoio e incentivo.

Aos órgãos financiadores **CAPES, CNPq e FINEP** pelo apoio à projetos de pesquisa liderados pelo Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima.

À **todos** que contribuíram, de forma direta, ou indiretamente, para concretização deste trabalho, meu muito obrigada!

RESUMO

DINIZ, J. F. B., *Transferência de calor e massa em sólidos porosos com forma paralelepípedica. Estudo de caso: secagem de fibras de sisal*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2018. 202 p. Tese (Doutorado)

Nos últimos anos, com a crescente conscientização de preservação do meio ambiente, e controle de poluição, o interesse pelo uso de fibras naturais em materiais compósitos poliméricos tem aumentado significativamente. No entanto, fibras vegetais são altamente higroscópica e o seu uso, quando úmida, na fabricação de compósitos, afeta fortemente as propriedades desses materiais. Buscando melhoria para o processo de secagem de fibras vegetais, este trabalho apresenta um estudo numérico e experimental da secagem de corpos fibrosos. Um modelo matemático tridimensional transiente foi desenvolvido para prever a transferência de calor e massa e simular a distribuição do teor de umidade, concentração de vapor de água e temperatura no interior do corpo fibroso na forma de paralelepípedo, considerando simetria em torno do centro do sólido, propriedades termofísicas e volume constantes. A solução numérica da equação de difusão foi obtida via método numérico dos volumes finitos, considerando-se a condição de contorno convectiva na superfície do sólido. Para validação da metodologia numérica foram realizados experimentos de secagem com fibras de sisal da variedade *Agave sisalana* com teor de umidade médio de 11,19% (base seca). As fibras foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar nas temperaturas de 50, 60, 70, 80 e 90°C. Foram propostos modelos matemáticos de camada fina (exponencial e logarítmico) para representar os dados experimentais da secagem das fibras de sisal, sendo seu ajuste realizado por análise de regressão não linear. Resultados experimentais das cinéticas de secagem e aquecimento das fibras foram apresentados e analisados. Verificou-se que as curvas de perda de umidade e temperatura das fibras de sisal foram influenciadas pela temperatura de secagem, mostrando uma variação gradativa com o tempo de secagem, sendo mais acentuada nas maiores temperaturas do ar de secagem. Resultados teóricos do teor de umidade e temperatura das fibras de sisal foram comparados aos resultados experimentais, permitindo a determinação do coeficiente de difusão de massa e dos coeficientes convectivos de massa e calor. Um bom ajuste foi observado entre os resultados preditos e experimentais, caracterizados por coeficientes de correlação próximos de 1,0.

Palavras-chave: Secagem, fibras vegetais, experimentos, modelagem, simulação, volumes finitos.

ABSTRACT

DINIZ, J. F. B., *Heat transfer and mass in porous solids with parallelepipedic form. Case study: Sisal fiber drying*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2018. 202 p. Tese (Doutorado)

In recent years, with the growing awareness of environmental preservation and pollution control, interest in the use of natural fibers in polymer composites has increased significantly. However, vegetable fibers are highly hygroscopic and their use, when wet, in the manufacture of composites, strongly affects the properties of these materials. Seeking improvement to the drying process of vegetable fibers, this work presents a numerical and experimental study of the drying process of fibrous bodies. A three-dimensional transient mathematical model was developed to predict the heat transfer and mass to simulate the distribution of moisture content, water vapor concentration and temperature inside the fibrous body in the form of a parallelepiped, considering the symmetry around the center of the solid, constant thermophysical properties and volume. The numerical solution of the diffusion equation was obtained by numerical method of the finite volumes, considering the condition of convective contour on the surface of the solid. For validation of the numerical methodology drying experiments were carried out with sisal fibers of the variety *Agave sisalana* with an average moisture content of 11,19% (d.b.). The fibers were subjected to oven drying with forced air circulation at 50, 60, 70, 80 e 90°C. Thin layer mathematical models (exponential and logarithmic) were proposed to represent experimental data on the drying of sisal fibers, and their adjustment was performed by non - linear regression analysis. Experimental results of drying and heating kinetics of the fibers were presented and analyzed. It was verified that the curves of moisture loss and temperature of the sisal fibers were influenced by the drying temperature, showing a gradual variation with the drying time, being more accentuated in the higher temperatures of the drying air. Theoretical results of the moisture content and temperature of the sisal fibers were compared to the experimental results, allowing the determination of the mass diffusion coefficient and the convective co-efficients of mass and heat. A good agreement was observed between the predicted and experimental results, characterized by correlation coefficients close to 1.0.

Keywords: Drying, vegetable fibers, experiments, modeling, simulation, finite volumes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Classificação das fibras químicas.....	28
Figura 2.2 - Classificação das fibras naturais.....	29
Figura 2.3 - Micrografias longitudinais da fibra de sisal sem tratamento obtidas por MEV: (a) ampliação de 100x; e (b) ampliação de 500x.....	31
Figura 2.4 - Constituição estrutural de uma fibra vegetal elementar.....	32
Figura 2.5 - Estrutura da celobiose, unidade repetitiva da celulose.....	33
Figura 2.6 - Plantação de sisal.....	44
Figura 2.7 - Máquina desfibradeira.....	46
Figura 2.8 - (a) Folha de sisal e (b) ampliação mostrando os tipos de fibras na folha de sisal.....	47
Figura 2.9 - (a) Planta de sisal; (b) secção transversal da folha de sisal; (c) fibra de sisal; (d) fibrocélula; (e) fibrilas da parede celular; (f) microfibrilas e (g) cristais de celulose.....	48
Figura 2.10 - (a) Seção de uma fibra arco; (b) secção de uma fibra mecânica; (c) micrografia da seção de uma fibra de sisal e (d) desenho esquemático de uma fibrocélula individual.....	49
Figura 2.11 - Variação do índice de absorção de água (IA) das fibras de sisal após os ciclos de molhagem e secagem.....	49
Figura 2.12 - Seção transversal das fibras mostrando detalhe das fibrocélulas: (a-b) sem tratamento e (c-d) tratadas.....	50
Figura 3.1 - Fibras de sisal que foram utilizadas no experimento: (a) fibras em seu estado original; (b) fibras após o 1º processo de seleção; (c) fibras após o 2º processo de seleção e (d) fibras prontas para secagem.....	64
Figura 3.2 - Cesto com as fibras de sisal.....	64
Figura 3.3 - (a) Balança digital; (b) paquímetro digital; e (c) termômetro digital, modelo TI - 890.....	65
Figura 3.4 - (a) Estufa com circulação de ar forçada; (b) escalímetro; e (c) termohigrômetro digital.....	66
Figura 3.5 - Corpo de prova mostrando a largura ($2R_3$), a altura ($2R_2$), o compri-	

mento ($2R_1$) e local da medição da temperatura do meio fibroso.....	67
Figura 3.6 - Ilustração do processo de contagem das fibras de sisal da amostra seca à 80°C	69
Figura 3.7 - (a) Configuração geométrica do problema físico e (b) meio fibroso.....	72
Figura 3.8 - Pequeno elemento de volume de um sólido fibroso na forma de paralelepípedo.....	73
Figura 3.9 - Configuração geométrica do problema físico - Paralelepípedo.....	84
Figura 3.10 - Geometria cartesiana.....	85
Figura 3.11 - Domínio tridimensional discretizado com 27 tipos de volumes de controle.....	85
Figura 3.12 - Volume de controle interno de ponto nodal P e seus vizinhos ao norte (N), ao sul (S), a oeste (W), a leste (E), na frente (F) e atrás (B).....	87
Figura 3.13 - Volume de controle no contorno leste (E) - norte (N) - frente (F) e seus vizinhos.....	89
Figura 3.14 - Esquema utilizado para explorar a condição de simetria inerente ao paralelepípedo: (a) domínio; (b) e (c) destaque para $1/8$ do paralelepípedo e (d) novo domínio.....	94
Figura 3.15 - Esquema utilizado para explorar a condição de simetria inerente ao paralelepípedo.....	95
Figura 3.16 - Esquema utilizado para simulação.....	95
Figura 3.17 - Dois volumes de controle com coeficientes de transporte D_P^C e D_E^C	97
Figura 3.18 - Representação do esquema utilizado para simulação da face esquerda	99
Figura 3.19 - Representação do esquema utilizado para simulação da face frontal...	101
Figura 3.20 - Representação do esquema utilizado para simulação da aresta direita superior.....	103
Figura 3.21 - Representação do esquema utilizado para simulação da aresta frontal direita.....	104
Figura 3.22 - Representação do esquema utilizado para simulação dos vértices.....	107
Figura 3.23 - Diagrama do algoritmo computacional.....	115
Figura 4.1 - Teores de umidade (base seca) das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C	121
Figura 4.2 - Temperaturas superficiais das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C	121
Figura 4.3 - Taxas de secagem das fibras de sisal durante a secagem a 50, 60, 70,	

80 e 90°C.....	122
Figura 4.4 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 50°C e UR 17,52%.....	124
Figura 4.5 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 60°C e UR 11,04%.....	124
Figura 4.6 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 70°C e UR 6,89%.....	125
Figura 4.7 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 80°C e UR 4,19%.....	125
Figura 4.8 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 90°C e UR 3,28%.....	126
Figura 4.9 - Aspecto da fibra de sisal: (a) antes; (b) depois da secagem a 50°C; e (c) depois de 24 h de secagem a 105°C.....	127
Figura 4.10 - Aspecto da fibra de sisal após secagem: (a) 50°C e (b) 90°C.....	128
Figura 4.11 - Aspecto da fibra de sisal: (a) antes e (b) depois da secagem a 90°C....	129
Figura 4.12 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 50°C.....	131
Figura 4.13 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 60°C.....	131
Figura 4.14 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 70°C.....	132
Figura 4.15 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 80°C.....	132
Figura 4.16 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de	

90°C.....	133
Figura 4.17 - Comparação entre as temperaturas da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 50°C.....	134
Figura 4.18 - Comparação entre as temperaturas da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 60°C.....	135
Figura 4.19 - Comparação entre as temperaturas da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 70°C.....	135
Figura 4.20 - Comparação entre as temperaturas da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 80°C.....	136
Figura 4.21 - Comparação entre as temperaturas da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 90°C.....	136
Figura 4.22 - Comparação dos teores de umidade de equilíbrio das amostras, experimental e predito para os experimentos realizado nas temperaturas de 50°C, 60°C, 70°C, 80°C e 90°C.....	137
Figura 4.23 - Comparação entre os resultados numéricos dos teores de umidade média das fibras de sisal em função do tempo para malhas de (10 × 10 × 10), (20 × 20 × 20) e (40 × 40 × 40) pontos nodais, temperatura de 50°C e $\Delta t = 20$ s.....	143
Figura 4.24 - Comparação entre os resultados numéricos dos teores de umidade média das fibras de sisal em função do tempo para intervalos de tempo de 10 s, 20 s e 40 s, temperatura de 50°C e malhas de 20 × 20 × 20 pontos nodais.....	144
Figura 4.25 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais do teor de umidade médio do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 50°C.....	145
Figura 4.26 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais do teor de umidade médio do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 60°C.....	145
Figura 4.27 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais do teor de umidade médio do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 70°C.....	146
Figura 4.28 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais do teor de umidade médio do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 80°C.....	146

Figura 4.29 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais do teor de umidade médio do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 90°C.....	147
Figura 4.30 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais da temperatura superficial do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 50°C.....	148
Figura 4.31 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais da temperatura superficial do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 60°C.....	148
Figura 4.32 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais da temperatura superficial do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 70°C.....	149
Figura 4.33 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais da temperatura superficial do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 80°C.....	149
Figura 4.34 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais da temperatura superficial do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 90°C.....	150
Figura 4.35 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano yz em $x = 0,025 \text{ m}$ ($R_1/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C.....	151
Figura 4.36 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano xz em $y = 0,0125 \text{ m}$ ($R_2/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C.....	152
Figura 4.37 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano xy em $z = 0,025 \text{ m}$ ($R_3/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C.....	153
Figura 4.38 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano yz em $x = 0,025 \text{ m}$ ($R_1/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C.....	154
Figura 4.39 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano xz em $y = 0,0125 \text{ m}$ ($R_2/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C....	155
Figura 4.40 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano	

xy em $z = 0,025$ m ($R_3/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C	156
Figura 4.41 - Distribuição da temperatura ($^\circ\text{C}$) no plano yz em $x = 0,025$ m ($R_1/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C	158
Figura 4.42 - Distribuição da temperatura ($^\circ\text{C}$) no plano xz em $y = 0,0125$ m ($R_2/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C	159
Figura 4.43 - Distribuição da temperatura ($^\circ\text{C}$) no plano xy em $z = 0,025$ m ($R_3/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C	160
Figura 4.44 - Distribuição da temperatura ($^\circ\text{C}$) no plano yz em $x = 0,025$ m ($R_1/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C	161
Figura 4.45 - Distribuição da temperatura ($^\circ\text{C}$) no plano xz em $y = 0,0125$ m ($R_2/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C	162
Figura 4.46 - Distribuição da temperatura ($^\circ\text{C}$) no plano xy em $z = 0,025$ m ($R_3/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química de algumas fibras vegetais.....	34
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas e características de fibras vegetais e fibras convencionais de reforço.....	35
Tabela 2.3 - Propriedades das fibras de sisal estudadas por vários autores.....	37
Tabela 2.4 - Equações empíricas para a cinética de absorção/dessorção de umidade de produtos.....	57
Tabela 3.1 - Parâmetros experimentais do ar e dimensões do meio fibroso utilizado nos experimentos.....	67
Tabela 4.1 - Parâmetros experimentais do ar e das fibras para cada teste de secagem.....	120
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas das fibras de sisal secas.....	128
Tabela 4.3 - Parâmetros físicas da fibra de sisal antes da secagem.....	129
Tabela 4.4 - Parâmetros da Equação (3.8) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade.....	130
Tabela 4.5 - Parâmetros da Equação (3.9) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura.....	134
Tabela 4.6 - Parâmetros experimentais do ar e das fibras para cada teste de secagem.....	137
Tabela 4.7 - Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da umidade de equilíbrio das amostras.....	138
Tabela 4.8 - Parâmetros experimentais do ar e das fibras para as temperaturas de 50°C e 90°C.....	138
Tabela 4.9 - Propriedades termofísicas das amostras utilizadas na simulação.....	140
Tabela 4.10 - Propriedades termofísicas do ar de secagem na pressão atmosférica...	141
Tabela 4.11 - Parâmetros de transporte calculados para cada teste experimental.....	142
Tabela 4.12 - Valores iniciais dos coeficientes de transporte utilizados durante os ajustes para cada teste experimental.....	165
Tabela 4.13 - Coeficientes de transporte estimados para cada teste experimental.....	166

NOMECLATURA

Letras Latinas

$A_p, A_w, A_e, A_s, A_f, A_b$ - Coeficientes da equação de difusão discretizada..	[-]
a, b, c - Parâmetros de ajuste.....	[-]
B - Termo independente na equação de difusão discretizada.....	[-]
B_i - Número de Biot de transferência de massa.....	[-]
C - Concentração de vapor de água nos espaços vazios (inter-fibras).....	[kgm ⁻³]
C_∞, C_{eq} - Concentração de vapor de água de equilíbrio.....	[kgm ⁻³]
C_w'', C_n'', C_f'' - Fluxo de C por unidade de área nos contornos oeste, norte e na frente, respectivamente.....	[-]
c_p - Calor específico à pressão constante.....	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
D' - Difusividade efetiva de massa.....	[m ² s ⁻¹]
D_{AB} - Difusividade efetiva de massa.....	[m ² s ⁻¹]
D_E^C - Coeficiente de transporte no ponto nodal E.....	[-]
D_W^C - Coeficiente de transporte na interface entre “W” e “P”.....	[-]
E, W, N, S, F, B, P - Pontos nodais.....	[-]
h_m - Coeficiente de transferência de massa por convecção.....	[ms ⁻¹]
h_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção.....	[Wm ⁻² K ⁻¹]
h_s - Entalpia.....	[J]
h_{mx}, h_{my}, h_{mz} - Coeficientes métricos em coordenadas cartesianas.....	[-]
h_{cx}, h_{cy}, h_{cz} - Coeficientes métricos em coordenadas cartesianas.....	[-]
i, j, k - Índices para uma posição de pontos na malha.....	[-]
K - Condutividade térmica.....	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]
K_E^T - Coeficiente de transporte no ponto nodal E.....	[-]
K_W^T - Coeficiente de transporte na interface entre “W” e “P”.....	[-]
L_x - Espessura de um paralelepípedo.....	[m]
L_y - Largura de um paralelepípedo.....	[m]
L_z - Comprimento de um paralelepípedo.....	[m]
M - Teor de umidade absorvida por unidade de massa de fibra (base seca)...	[kgkg ⁻¹]
M' - Teor de umidade (base úmida).....	[kgkg ⁻¹]

m_a - Massa de água contida no corpo.....	[kg]
m_s - Massa do corpo totalmente seco.....	[kg]
m - Massa total do corpo.....	[kg]
M_e - Teor de umidade de equilíbrio.....	[kgkg ⁻¹]
M_o - Teor de umidade inicial.....	[kgkg ⁻¹]
\bar{M} - Teor de umidade médio.....	[kgkg ⁻¹]
\bar{M}^* - Teor de umidade adimensional.....	[-]
S^Φ - Termo fonte da equação de transporte.....	[-]
S^C, S^T - Termos fonte da equação de difusão.....	[-]
\bar{S}^2 - Variância.....	[-]
t - Tempo.....	[s]
T - Temperatura.....	[°C]
T_o - Temperatura inicial.....	[°C]
T_∞, T_{eq} - Temperatura de equilíbrio.....	[°C]
T_w'', T_n'', T_f'' - Fluxo de T por unidade de área nos contornos oeste, norte e na frente, respectivamente.....	[-]
\vec{v} - Vetor velocidade do meio.....	[ms ⁻¹]
$\vec{V}(\xi, \eta, \gamma)$ - Função vetorial.....	[-]
ΔV - Volume elementar.....	[m ³]
ΔV_{ij} - Volume do volume de controle.....	[m ³]
V - Volume.....	[m ³]
x, y, z - Coordenadas cartesianas.....	[m]

Letras Gregas

α, σ, β - Parâmetros de ajuste.....	[-]
ε - Porosidade da fibra.....	[-]
Φ - Variável dependente de transporte.....	[-]
Γ^Φ - Coeficiente de transporte.....	[-]
λ - Parâmetro de transporte.....	[-]
Γ_e^Φ - Coeficiente de transporte na interface entre “P” e “E”.....	[-]
ξ, η, γ - Eixos curvilíneos.....	[-]
ρ - Densidade da fibra (massa específica).....	[kgm ⁻³]

ρ_s - Densidade da fibra seca (massa específica).....	[kgm ⁻³]
ρ_{ar} - Densidade do ar de secagem.....	[kgm ⁻³]
χ^2 - Qui-quadrado.....	[-]
∇ - Gradiente.....	[-]
$\nabla \cdot$ - Divergente.....	[-]
∇^2 - Laplaciano.....	[-]
Δ - Variação.....	[-]

Sobrescritos

- 0 - Tempo anterior
- w - Face oeste do volume de controle
- P - Nó do volume de controle em estudo

Subscritos

- ef - Efetiva
- eq - Equilíbrio
- e, w, n, s, f, b - Fronteiras de um volume de controle
- H₂O - Água
- o - Inicial
- m - massa
- s - Seco
- v - Vapor
- bs - Base seca
- f - front
- b - back

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	23
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 - Fibras.....	27
2.1.1 - Fibras Químicas.....	27
2.1.2 - Fibras Naturais.....	28
2.1.2.1 - Classificação.....	28
2.1.2.2 - Fibras Vegetais.....	30
2.1.2.3 - Fibra de Sisal.....	43
2.2 - O Processo de Umidificação/Secagem.....	52
2.2.1 - Considerações gerais	52
2.2.2 - Períodos de taxa de umidificação/secagem e aquecimento do sólido	53
2.2.3 - Teores de umidade	53
2.2.4 - Teoria de transferência de calor e massa.....	54
2.2.5 - Simulação da umidificação/secagem	55
2.2.5.1 - Modelos empíricos.....	55
2.2.5.2 - Modelos distribuídos.....	55
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	63
3.1 - Metodologia experimental.....	63
3.1.1 - Materiais e equipamentos utilizados na secagem.....	63
3.1.2 - Procedimentos Experimentais.....	66
3.1.3 - Cálculos auxiliares.....	68
3.1.4 - Tratamento estatístico dos dados.....	70
3.1.4.1 - Teor de umidade médio.....	70
3.1.4.2 - Temperatura superficial da fibra.....	71
3.1.4.3 - Estimativa dos parâmetros da equação de equilíbrio.....	71
3.2 - Modelagem matemática	72
3.2.1 - Equação de equilíbrio.....	73
3.2.2 - Equação de difusão de vapor.....	73
3.2.3 - Equação de condução de calor	75

3.2.4 - Equação de difusão de vapor em coordenadas cartesianas tridimensional..	77
3.2.5 - Equação de condução de calor em coordenadas cartesianas tridimensional.	80
3.3 - Solução numérica para equação de difusão: Geometria na forma de paralelepípedo.....	81
3.3.1 - Solução numérica para a equação de difusão de vapor: Geometria cartesiana tridimensional.....	84
3.3.1.1 - Discretização: Volumes Internos.....	87
3.3.1.2 - Volume de controle na fronteira leste-norte-frente: condição de contorno convectiva.....	89
3.3.1.3 - O uso da simetria.....	94
3.3.1.4 - Geração da malha.....	95
3.3.1.5 - Parâmetro D^C	96
3.3.1.6 - Valor médio de C	98
3.3.1.7 - Estimativa dos pontos externos na superfície.....	99
3.3.2 - Solução numérica para a equação de condução de calor: Geometria cartesiana tridimensional.....	108
3.3.2.1 - Discretização: Volumes Internos.....	109
3.3.2.2 - Volume de controle na fronteira leste-norte-frente: condição de contorno convectiva.....	110
3.3.3 - <i>Software</i> computacional.....	114
3.3.4 - Estimativa dos coeficientes de transporte.....	116
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	119
4.1 - Experimental.....	119
4.1.1 - Secagem de fibras de sisal.....	119
4.1.2 - Propriedades físicas e parâmetros geométricos das fibras de sisal.....	126
4.1.3 - Ajuste das equações e estimativa dos parâmetros.....	130
4.1.3.1 - Cinéticas de secagem.....	130
4.1.3.2 - Cinéticas de aquecimento.....	133
4.1.3.3 - Equação de equilíbrio.....	137
4.2 - Numérico.....	139
4.2.1 - Validação da malha e do passo de tempo.....	143
4.2.2 - Análise da secagem e aquecimento do sólido.....	144

4.2.3 - Estimativa dos coeficientes de transporte (D , h_m e h_c).....	164
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUJESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	168
5.1 - Conclusões.....	168
5.2 - Sugestões para futuros trabalhos.....	172
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	173
APÊNDICE.....	189

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Com a crescente conscientização de preservação do meio ambiente, e controle de poluição, tem-se dado grande importância à utilização de recursos renováveis na fabricação de diversos produtos tais como: polímeros comerciais, blocos de concretos, equipamentos sanitários, telhas ecológicas e peças de acabamento interno de veículos (GHOSH, 1997; NÓBREGA et al., 2010; BARRETO et al., 2011; CRUZ et al., 2011).

O desenvolvimento de materiais dentro de padrões ecológicos aceitáveis e uma melhor adequação dos processos tem sido uma necessidade para minimizar os problemas ambientais no mundo. A utilização de matérias-primas de fontes renováveis vem sendo objeto de diversos estudos e pesquisas, devido ao seu potencial na substituição de derivados petroquímicos (ALVES et al., 2010).

Neste contexto, o uso de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos, com o objetivo de substituir total ou parcialmente as fibras sintéticas, tem recebido atenção dos pesquisadores. Isto porque as fibras vegetais apresentam importantes vantagens como: baixo custo, baixa densidade, elevada resistência específica e rigidez, baixa abrasividade aos equipamentos de processo, são biodegradáveis, não tóxicas, não poluentes, o que diminui os problemas ambientais, além de serem originárias de fontes renováveis e serem disponíveis em todo o mundo (BLEDZKI e GASSAN, 1999; MEDEIROS et al., 2003; CAVALCANTI et al., 2004; MOTHÉ et al., 2004; NÓBREGA et al., 2005; NÓBREGA et al., 2010; CRUZ et al.,

2011; MELO FILHO et al., 2013; ZHOU et al., 2014; SANTOS, 2017). Contudo, as fibras vegetais são susceptíveis as ações de umidade e temperatura, as quais afetam fortemente suas propriedades, principalmente quando usadas como reforço em materiais poliméricos.

Nos últimos anos, o uso de fibras vegetais como coco, sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar, juta, abacaxi, dentre outras, como reforço em materiais poliméricos teve um acelerado crescimento. Decorrente disso, o estudo de fibras de alta resistência mecânica e baixo custo torna-se imprescindível para atender as necessidades tecnológicas (ISHIZAKI et al., 2006; D'ALMEIDA et al., 2006; WEI et al., 2014; SANTOS, 2017).

No entanto, as fibras vegetais, por terem alta capacidade de absorção de umidade, quando extraídas das plantas, estão úmidas, o que requer a sua secagem. Assim, devido a sua importância, a secagem que é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução da umidade de um corpo. Envolve complexos fenômenos de transferência de calor, massa, quantidade de movimento e variações dimensionais (LIMA et al., 2016), tem sido estudada de forma experimental e teórica.

Para descrever a transferência de umidade e calor dentro de um meio fibroso de forma teórica e analisar os efeitos de certos parâmetros nas suas propriedades mecânicas, torna-se necessário que o transporte de umidade e calor dentro do meio fibroso seja bem representado por um modelo matemático. Portanto, é importante inserir ao máximo todos os efeitos dentro dos modelos matemáticos para que seja possível descrever com realismo o fenômeno físico, e aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

O transporte de umidade do interior para a superfície do material (ou vice-versa), pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo de produto e do percentual de umidade presente. O processo de difusão deve ocorrer de maneira controlada para que os fluxos de umidade e calor possam ocorrer de maneira uniforme, evitando elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do material que podem provocar a redução nas propriedades do material. Sabendo-se que os efeitos do transporte de calor e massa alteram as propriedades físicas e químicas do produto e estas por sua vez afetam o processo de transferência de calor e massa, torna-se de fundamental importância conhecer os seus efeitos e o controle dos mesmos. Assim, a

compreensão dos mecanismos envolvidos na difusão é um requisito fundamental no estudo de soluções que minimizem tais problemas.

Soluções analíticas e numéricas para o problema de difusão transiente para várias geometrias têm sido reportadas na literatura, contudo são escassos os trabalhos relacionados a problemas transientes e tridimensionais, particularmente aqueles relacionados a fibras vegetais e que incorpore, o efeito da porosidade no interior do meio fibroso.

Diante do exposto, pode-se citar diversos pontos relevantes que justificam esta pesquisa: a) as fibras vegetais apresentam propriedades mecânicas que indicam boas aplicações; b) elas são usadas por diversas comunidades para o artesanato e para confecção de vários artefatos, contribuindo assim para o desenvolvimento regional; c) a investigação de difusão simultânea de calor e umidade em fibras vegetais e a formulação matemática para prever tal processo praticamente não foi estudada por pesquisadores da área; e d) existem soluções analíticas e numéricas da equação de difusão, para diversas geometrias, porém são poucos os estudos científicos que incorporam o efeito da porosidade no interior do meio fibroso.

Assim sendo, este estudo tem como objetivo geral analisar teoricamente e experimentalmente a transferência de calor e massa em fibras vegetais.

De forma específica, procurando avançar dentro da linha de pesquisa de transferência de calor e massa, este trabalho propõe-se atingir os seguintes objetivos:

- realizar experimentos de secagem das fibras de sisal em diferentes condições operacionais;
- propor equações matemáticas para descrever as cinéticas de secagem, aquecimento e teor de umidade de equilíbrio das fibras;
- apresentar uma modelagem matemática tridimensional transiente e sua solução numérica para descrever a transferência de calor e massa em sólidos porosos, utilizando o método dos volumes finitos;
- desenvolver um programa computacional para simular o processo de difusão de calor e umidade proposto;

- aplicar os modelos numéricos desenvolvidos à secagem de fibras de sisal;
- simular a distribuição de temperatura e teor de umidade no interior do meio fibroso e suas cinéticas de transporte de massa e aquecimento;
- comparar os resultados numéricos e experimentais do teor de umidade e temperatura, e determinar os coeficientes de transferência de calor e massa: difusivo no interior e convectivo na superfície do produto, para várias condições experimentais;
- estudar o efeito das considerações adotadas em cada modelo, sobre os coeficientes de transporte e porosidade do meio fibroso.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Fibras

As fibras são matérias muito finas e alongadas, como filamentos. Toda fibra é um polímero e sua classificação é feita de acordo com a polimerização. Pode-se classificar as fibras em dois grupos principais: fibras químicas e fibras naturais (ROMERO et al., 1995; SILVEIRA, 2015).

2.1.1 - Fibras Químicas

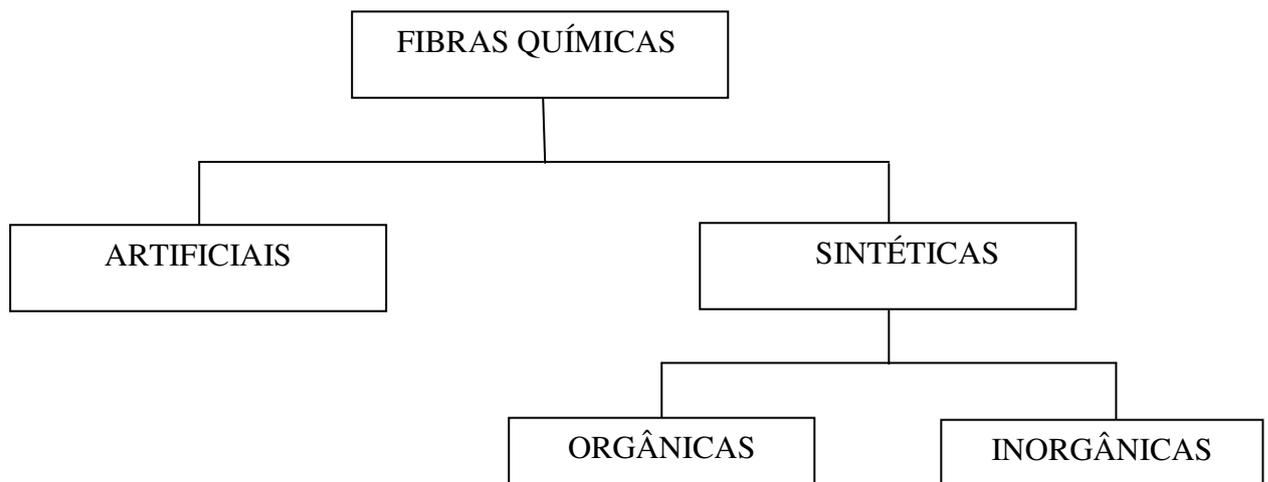
De acordo com Romero et al. (1995) e Silveira (2015), as fibras químicas podem ser divididas em dois grupos atendendo às suas diferenças não só químicas, mas de obtenção industrial:

- (i) **sintéticas**: são fibras fabricadas em indústrias próprias, partindo de substâncias puramente químicas. Ex.: Poliéster, acrílico.

(ii) **artificiais**: são fibras fabricadas também em indústrias próprias, mas partindo de matéria de origem natural, nomeadamente restos de fibras naturais que não têm as características necessárias para poderem ser trabalhadas como fibras têxteis. Ex.: Viscose e acetato.

A Figura 2.1 ilustra a classificação das fibras químicas.

Figura 2.1 - Classificação das fibras químicas.



Fonte: Autoria própria.

2.1.2 - Fibras Naturais

As fibras naturais são fibras retiradas prontas da natureza.

2.1.2.1 - Classificação

As fibras naturais podem ser divididas, de acordo com sua natureza, em três grupos:

- **Fibras de origem mineral:** as fibras de origem mineral têm a sua origem em rochas com estrutura fibrosa e são constituídas, essencialmente, por silicatos (SILVEIRA, 2015). Ex.: Amianto e asbesto.
- **Fibras de origem animal (protéicas):** o nome protéica origina da palavra proteína, que é a substância básica das fibras de origem animal. Por isso quando

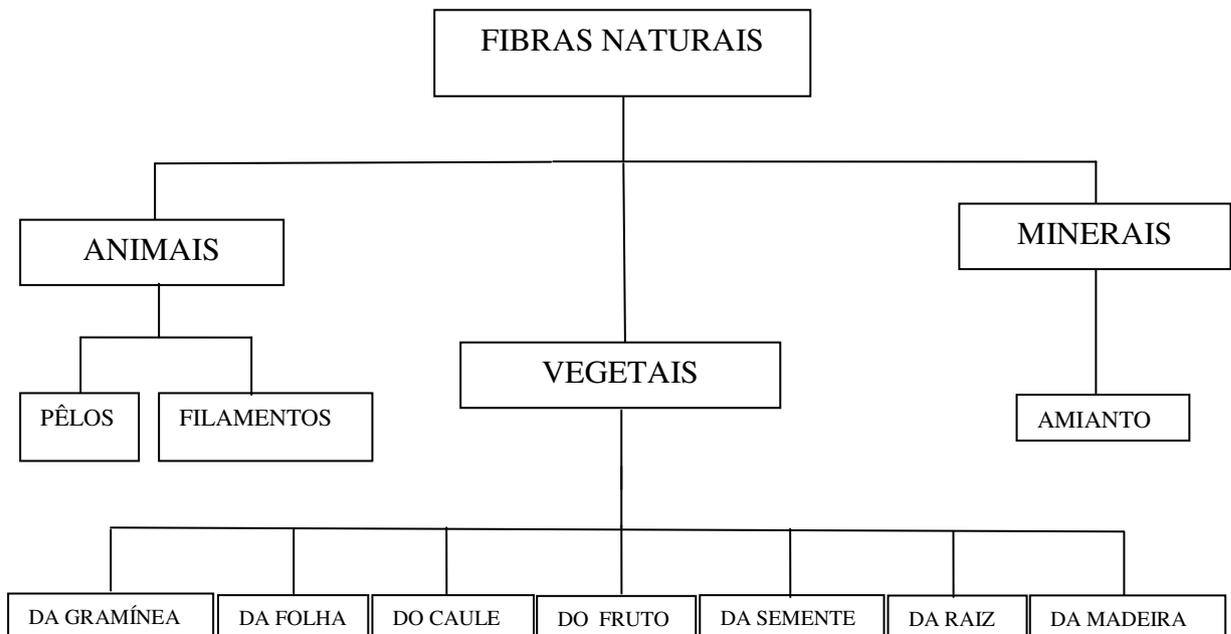
esta fibra é queimada tem um cheiro muito característico a unha queimada (SILVEIRA, 2015). Ex.: Seda e lã.

- **Fibras de origem vegetal (celulósicas):** o nome celulósicas origina da palavra celulose, que é a substância básica das fibras de origem vegetal. Por isso quando esta fibra é queimada tem um cheiro característico similar ao do papel queimado (SILVEIRA, 2015). As fibras vegetais são classificadas em sete grupos:

- Fibras de gramínea – Ex.: Bambu, bagaço de cana-de-açúcar, junco;
- Fibras de folhas – Ex.: Abacá, abacaxi, sisal, banana;
- Fibras de caule – Ex.: Juta, rami, linho;
- Fibras de fruto – Ex.: Coco;
- Fibras de semente – Ex.: Algodão, sumaúma;
- Fibras de raiz – Ex.: Zacatão;
- Fibras de madeira – Ex.: Eucalipto, pinho.

A Figura 2.2 ilustra a classificação das fibras naturais.

Figura 2.2 - Classificação das fibras naturais.



Fonte: Autoria própria.

Embora quase todas as fibras vegetais possam ser usadas como agente de reforço em matrizes poliméricas, as fibras de folha são as mais empregadas, pois, em geral, são mais duras do que as fibras de caule. As fibras de folhas são geralmente conhecidas como “fibras duras” enquanto fibras de caule são conhecidas como “fibras macias” (SILVA, 2003).

2.1.2.2 - Fibras Vegetais

a) Fundamentos

As fibras vegetais estão em todas as partes do mundo e são também conhecidas como fibras celulósicas, devido ao seu principal componente químico ser a celulose. A disponibilidade de grandes quantidades destas fibras com propriedades bem definidas é um pré-requisito para o uso bem sucedido destes materiais.

Essas fibras apresentam vantagens quando comparadas com as fibras sintéticas, tais como, fonte abundante e de rápida renovação, baixo custo, baixa densidade, alta resistência específica, biodegradabilidade, não-tóxicas e são menos abrasivas se comparadas às fibras de vidro (BLEDZKI e GASSAN, 1999; NABI SAHEB e JOG, 1999; IBRAHIM et al., 1997).

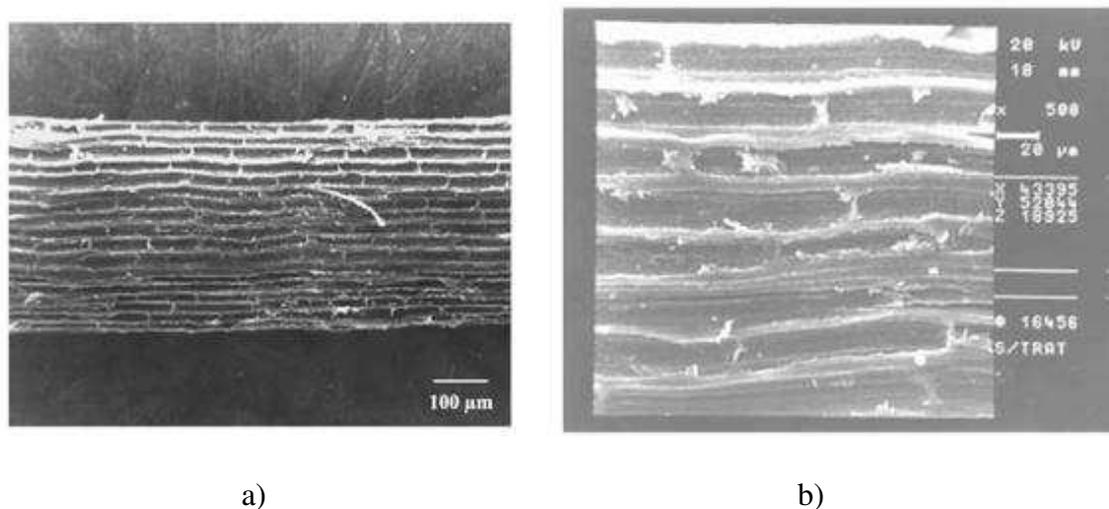
Nas últimas décadas a utilização de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos substituindo as fibras sintéticas tem sido o foco de inúmeras pesquisas devido às novas exigências legislativas quanto ao uso e destino final das fibras sintéticas e resinas derivadas do petróleo. As fibras vegetais vêm sendo uma alternativa na busca de novos materiais; além disso, o alto preço das fibras sintéticas e a maior conscientização dos próprios consumidores, da necessidade de preservação do meio ambiente, têm contribuído para o desenvolvimento de novas pesquisas nesta área (SILVA, 2003). Pesquisadores têm desenvolvido compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais, tais como curauá (MOTHÉ e ARAUJO, 2004), coco (SILVA et al., 2013), sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar (SILVA et al., 2012), juta e abacaxi (MISHIRA et al., 2004).

As fibras vegetais apresentam algumas desvantagens, tais como baixa temperatura de processamento, limitada a aproximadamente 200°C, falta de uniformidade de propriedades mecânicas, que dependem da origem das fibras, da região

do plantio, da variedade de espécies e da habilidade manual durante a colheita, e alta absorção de umidade, que pode causar o inchaço das fibras (SILVA, 2003).

Uma fibra vegetal é um corpo constituído em parte por fibras (sólido) e, em parte, por espaços vazios (ar), como mostra as micrografias da Figura 2.3.

Figura 2.3 - Micrografias longitudinais da fibra de sisal sem tratamento obtidas por MEV: (a) ampliação de 100x e (b) ampliação de 500x.



Fonte: Silva et al. (2008).

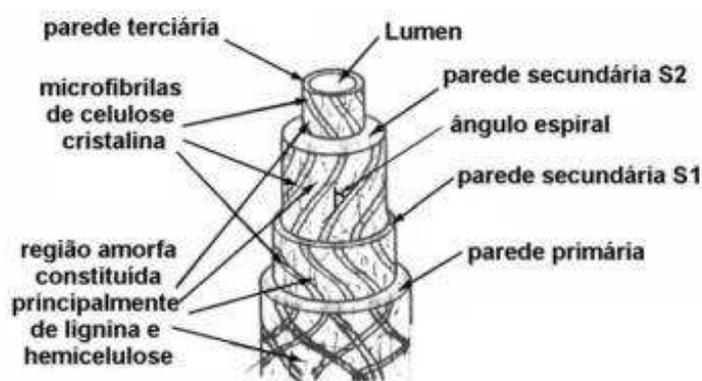
A Figura 2.3 apresenta micrografias representativas de uma fibra de sisal sem tratamento. Nota-se que a superfície da fibra está recoberta pelas células de parênquima e pelos resíduos provenientes do processo de beneficiamento da fibra, que podem prejudicar a interação fibra/matriz. Entretanto, segundo Silva et al. (2008), lavagem com água quente remove estes resíduos superficiais e parcialmente as células de parênquima.

Os principais componentes químicos das fibras vegetais são substâncias polares, tais como a celulose, a hemicelulose (ou polioses) e a lignina, com menores percentuais de outros componentes como pectina, cera e substâncias solúveis em água. Sua composição química varia ligeiramente de acordo com a região de cultivo, tipo de solo e condições climáticas (SILVA, 2003).

Uma fibra vegetal é constituída de várias fibras elementares ligadas fortemente entre si por um material de cementação constituído principalmente de lignina. Cada fibra elementar é essencialmente um compósito no qual microfibrilas rígidas de celulose são envolvidas em uma matriz amorfa de lignina e hemicelulose. A lignina atua como

material de cementação “matriz”, unindo as microfibrilas, enquanto a hemicelulose atua como interface entre a microfibrila de celulose e a lignina (SILVA, 2003). A estrutura de uma fibra vegetal elementar é constituída por uma parede espessa formada por vários espirais de microfibrilas ao longo do eixo da fibra, tendo um lúmen no centro, como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Constituição estrutural de uma fibra vegetal elementar.

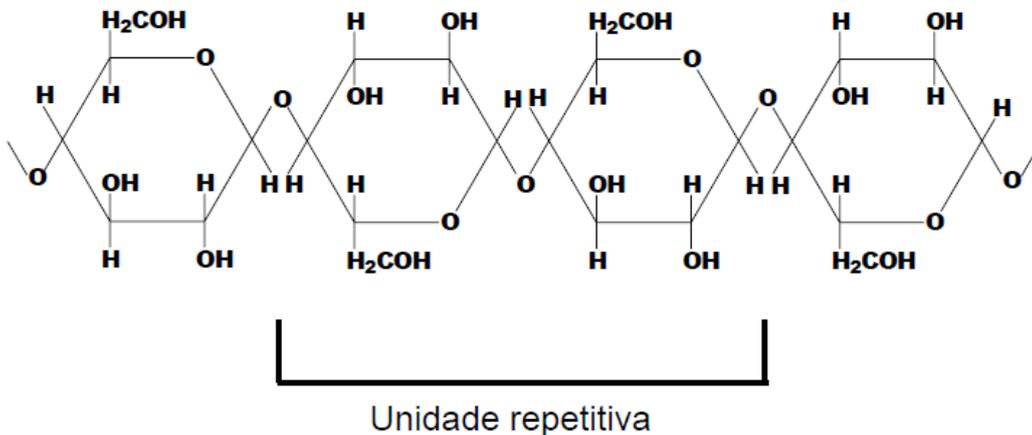


Fonte: Silva (2003).

A lignina, responsável por unir as fibras celulósicas formando a parede celular é um polímero amorfo com constituintes alifáticos e aromáticos. Sua concentração nas fibras influencia nas propriedades mecânicas, na estrutura, na morfologia, na flexibilidade e na taxa de hidrólise das mesmas. Contribui para resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, enrijecendo a parede celular e protegendo os carboidratos (açúcares) contra danos físicos e químicos. Fibras com alto teor de lignina são de excelente qualidade e flexíveis (PASSOS, 2005).

A celulose é o componente principal de todas as fibras vegetais e principal responsável pela sua resistência mecânica e estabilidade. É um polissacarídeo linear de alta massa molar constituído por unidades de anidro-D-glicose ($C_6H_{11}O_5$), formando, pela união de unidades, uma cadeia molecular. A estrutura da glicose-D é mostrada na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Estrutura da celobiose, unidade repetitiva da celulose.



Fonte: Fengel e Wegener (1989).

Cada unidade de anidro-D-glicose contém três grupos hidroxila (-OH). Estas hidroxilas formam ligações de hidrogênio dentro da molécula (intramolecular) e entre moléculas de celulose (intermolecular). As ligações de hidrogênio intermolecular são as principais responsáveis pela cristalinidade da celulose (LIMA JÚNIOR, 2007; SILVA, 2003).

As ligações de hidrogênio proporcionam natureza hidrofílica às fibras vegetais que é incompatível com a natureza hidrofóbica da maioria dos polímeros. Esta é a maior dificuldade na utilização das fibras vegetais como reforço em compósitos de matriz polimérica, tendo em vista que tanto as propriedades mecânicas da fibra quanto as propriedades do compósito, sofrem influência dessa natureza hidrofílica. Há ainda a tendência de formar agregados durante o processamento, que reduzem o potencial das fibras a serem utilizadas como reforço em polímeros (NABI SAHEB e JOG, 1999; SILVA, 2003; CRUZ, 2011). A absorção de umidade pode ser criticamente reduzida pela modificação química das fibras e pela boa adesão na interface fibra/matriz.

Quando o vapor de água é absorvido pela fibra, uma grande quantidade de calor é transferido para o seu interior, o qual produz um considerável aumento da temperatura. Segundo King e Gassie (1940), a absorção de umidade depende da pressão de vapor e também da temperatura, a absorção é maior quanto maior for a pressão de vapor, mas é reduzida por um aumento da temperatura. Tem-se assim dois processos, a transferência de umidade e a transferência de calor, que acontecem simultaneamente, e não se pode, em geral, considerar um processo sem considerar o outro.

A hemicelulose é um polissacarídeo constituído por diferentes unidades de açúcares. Os principais açúcares são as pentoses, hexoses, 6-desoxi-hexoses e os ácidos urônicos. O seu grau de polimerização é de 10 a 100 vezes menor que o da celulose e as cadeias possuem um considerável grau de ramificação em relação à celulose (SILVA, 2003). Geralmente, a hemicelulose age como um elemento de ligação entre a celulose e a lignina, não estando diretamente correlacionada à resistência e rigidez das fibras.

Outros constituintes das fibras vegetais são a pectina e componentes minerais. A pectina é um polissacarídeo presente nas paredes celulares, rico em ácido galacturônico e tem função aglutinante. Já os componentes minerais, após a incineração das fibras, são os responsáveis pela formação das cinzas (PASSOS, 2005).

Fibras como as de juta e sisal são indicadas para uso como material de reforço em compósitos por apresentarem percentuais altos, tanto de celulose como de lignina. A Tabela 2.1 exhibe a composição de algumas fibras vegetais.

Tabela 2.1 - Composição química de algumas fibras vegetais.

Fibra	Ângulo espiral (°)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Pectina (%)	Cinzas (%)	Água (%)
Sisal	20	65,8	12	9,9	0,8	NA	10
Folha de bananeira	---	60 – 65	6-8	5-10	NA	4,7	10-15
Juta	8,0	64,4	12	11,8	0,2	NA	10
Rami	7,5	68,6	13,1	0,6	1,9	NA	10
Coco	45	36 – 43	0,15 - 0,25	20 - 45	3,0	2,7-10,2	10-12
Algodão	---	82,7	5,7	---	5,7	NA	10
Linho	10,0	64,1	16,7	2,0	1,8	NA	10

Fonte: Bledzki e Gassan (1999).

As propriedades mecânicas das fibras vegetais variam em função do tipo de fibra devido à variação da composição e orientação das fibrilas de celulose (ângulo espiral). Essas características dependem da origem da fibra e são determinantes nas suas propriedades mecânicas. Na Tabela 2.2 são apresentadas as propriedades mecânicas e características de algumas fibras vegetais em comparação com fibras convencionais.

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas e características de fibras vegetais e fibras convencionais de reforço.

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Algodão	16 – 21	1,5 – 1,6	287 – 597	5,5 – 12,6	7 – 8
Juta	200	1,3	393 – 773	26,5	1,5 – 1,8
Linho	---	1,5	345 – 1035	27,6	2,7 – 3,2
Cânhamo	---	---	690	---	1,6
Rami	---	1,5	400 – 938	61,4 – 128	3,6 – 3,8
Sisal	50 – 300	1,45	511 – 635	9,4 – 22	3 – 7
Coco	100 – 450	1,15 – 1,45	131 – 175	4 – 13	15 – 40
Vidro – E	8 – 14	2,5	2000 – 3500	70	1,8 – 3,2
Vidro – S	10	2,5	4590	86	5,7
Kevlar-49	12	1,48	2800 – 3792	131	2,2 – 2,8
Carbono	7 – 10	1,6 – 1,9	4000	230 - 240	1,4 – 1,8

Fonte: Bledzki e Gassan (1999).

As fibras com alto teor de celulose como algodão e rami, são indicadas como reforço em materiais compósitos, principalmente por fornecer resistência para o material, como pode ser visto na Tabela 2.2 (SILVA, 2003).

Comparando-se as Tabelas 2.1 e 2.2, observa-se que a baixa resistência da fibra de coco é consequência do baixo teor de celulose e do alto ângulo espiral. Onde verifica-se que, quanto menor for o alinhamento das microfibrilas da celulose ao longo do eixo da fibra, menor é a sua resistência (PASSOS, 2005).

A Tabela 2.3 apresenta resultados obtidos de estudos da fibra de sisal que mostram valores de densidade, tensão, deslocamento máximo e o módulo de elasticidade segundo diversas fontes.

Tabela 2.3 - Propriedades das fibras de sisal estudadas por vários autores.

Densidade (kg/m ³)	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deslocamento Máximo (%)
1450	604	9,4 – 15,8	---
1450	530 – 640	9,4 – 22	3 – 7
1030	500 – 600	16 – 21	3,6 – 5,1
1410	400 – 700	9 – 20	5 – 14
1400	450 – 700	7 – 13	4 – 9
1450	450 – 700	7 – 13	4 – 9

Fonte: adaptado de Li (2000).

Para Martin et al. (2010), as características mecânicas de um compósito reforçado com fibras naturais é proporcional ao tipo e qualidade da fibra a ser utilizada. Nas fibras de sisal, os tamanhos das fibras podem variar, assim como a suas propriedades mecânicas.

b) Estado da arte sobre fibras vegetais e seu uso como reforço

A seguir, algumas das pesquisas reportadas por diversos autores referentes às fibras vegetais são apresentadas.

Joseph et al. (1996) estudaram e avaliaram as propriedades mecânicas de compósitos fabricados com resina fenólica, epóxi, poliéster e de polietileno de baixa densidade, variando o comprimento e fração volumétrica das fibras. Os resultados mostraram que houve uma tendência de aumento dos valores das propriedades mecânicas para fibras de maior comprimento, quando a faixa de comprimento avaliada foi de 5 a 30 mm. Para a matriz fenólica, a maior resistência foi obtida com fibras de 30 mm. Entretanto, para a matriz de poliéster e epóxi, os resultados apontaram decréscimo dos valores das propriedades, quando se aumentou o comprimento das fibras de 20 mm para 30 mm, em virtude do maior contato entre fibras devido ao processo de fabricação.

Além disso, para a matriz termoplástica com fibras variando de 2 a 10 mm de comprimento, um valor crítico de 6 mm foi observado, sendo este menor que nas matrizes termorrígidas, devido ao maior limite de fluidez do polietileno. Portanto, os compósitos de maior resistência mecânica foram aqueles fabricados com os seguintes comprimentos/frações volumétricas de fibras: 20 mm/50, 30 mm/35, 20 mm/35 e 6 mm/30, para as matrizes de resina epóxi, fenólica, poliéster e polietileno de baixa densidade, respectivamente.

Paul et al. (1997) estudaram compósitos de polietileno de baixa densidade reforçados com fibras curtas (6 mm) de sisal testando diversos tratamentos das fibras nas propriedades elétricas dos compósitos. Foram avaliados os tratamentos com sais alcalinos, acetilação, peróxidos de benzoila, ácido esteárico, permanganato de potássio, e isocianato. Constataram que os valores da constante dielétrica dos compósitos decresceram com os tratamentos químicos devido à baixa absorção de água das fibras tratadas, e aumentaram com o aumento da fração volumétrica das fibras. Por outro lado, a resistividade volumétrica aumentou com os tratamentos da superfície das fibras.

Bisanda (2000) estudou compósitos reforçados com fibras unidirecionais, avaliando a influência do tratamento alcalino com hidróxido de sódio em fibras contínuas de sisal na resistência à compressão dos compósitos fabricados com resina epóxi. Os resultados revelaram aumento da resistência à compressão com o aumento da fração de fibras, e que o tratamento alcalino proporcionou melhoria das propriedades mecânicas e físicas dos compósitos em relação às fibras não tratadas.

Rong et al. (2001) estudaram compósitos reforçados com fibras unidirecionais. Foi avaliado o efeito de tratamentos químicos e físicos na fibra de sisal sobre as propriedades mecânicas de tração e flexão de compósitos de resina epóxi com fibras contínuas, e verificaram que as fibras de sisal podem ser efetivamente modificadas por tais tratamentos. Os resultados revelaram que nos compósitos de fibras não tratadas a resistência à tração aumentou com o aumento do percentual de fibras até 58%, acima do qual um pequeno incremento na resistência foi apresentado. Já nos compósitos com fibras tratadas, a resistência mecânica foi maior que as de fibras não tratadas e continuou aumentando para percentuais mais elevados de fibras. O módulo de elasticidade em tração apresentou decréscimo com o aumento da fração de fibras tratadas. Em relação ao comportamento do compósito em flexão, notou-se um aumento

gradativo em função do teor de fibras, tanto na resistência quanto no módulo de elasticidade dos compósitos.

Srrekala et al. (2002) estudaram a cinética de sorção de água em compósitos de fenol-formaldeído reforçado por fibras de palma e nos híbridos fenol-formaldeído/palma/fibra de vidro em função do teor e do tratamento superficial das fibras, e da temperatura (30, 50 e 70°C). As amostras foram tratadas superficialmente com uma solução de hidróxido de sódio (5% por 48h, à temperatura ambiente) e com agentes de acoplamento do tipo silano e isocianato. De acordo com os resultados, verificou-se que o valor máximo de sorção foi para o compósito com fibras não tratadas e no teor de 10%, quando submetidas à temperatura de 30°C. O tratamento alcalino diminuiu a sorção de água dos compósitos, o que foi atribuído a uma reação química entre os grupos hidroxilas da celulose e da lignina com as fibras tratadas, reduzindo seu caráter hidrofílico devido a diminuição de umidade das mesmas. O tratamento com os agentes de acoplamento aumentou a sorção de água nos compósitos, tendo em vista que não houve uma boa interação fibra-matriz. Dessa forma, os autores concluíram que a sorção de água depende não só da estrutura da fibra e do polímero, mas também da interação entre a fibra e matriz.

Espert et al. (2004) estudaram os efeitos da sorção de água em compósitos de matriz polipropileno reforçados com fibras vegetais de sisal, polpa de celulose e esponja *Luffa sponge*. Os estudos da sorção de água foram realizados em diferentes temperaturas 23, 50, e 70°C e diferentes composições. A cinética de sorção de água foi determinada pela teoria de Fick e os coeficientes de difusão calculados pela equação de Arrhenius. Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas dos compósitos são fortemente afetadas pela sorção de água e pelo teor de reforço. A resistência à tração e o módulo de elasticidade apresentaram queda mais significativa para teores acima de 20% de fibras. A difusão de água no compósito é rápida nas primeiras 50 horas de processo, reduzindo sua velocidade para tempos maiores.

Chand e Jain (2005) avaliaram o efeito da orientação da fibra vegetais sobre as propriedades elétricas de compósitos fabricados com resina epóxi reforçada por fibras longas de sisal (volume de fibras de 20%). As direções das fibras avaliadas foram de 0° e 90°, ou seja, fibras paralelas e perpendiculares ao campo elétrico aplicado. Os resultados revelaram que a constante dielétrica é maior para o compósito com fibras orientadas a 90°, devido à maior área de contato da fibra de sisal com os eletrodos nessa

orientação. A orientação da fibra no compósito muda a estrutura do material que causa mudanças na constante dielétrica em diferentes orientações.

Silva e Frollini (2005) estudaram as propriedades de compósitos com matriz fenólica e reforçada com fibras naturais (lignocelulósicas de sisal e celulose de algodão). Os resultados mostraram que a resistência ao impacto, dos compósitos fenólicos com celulose microcristalinas e lignocelulósicas, são superiores à da matriz termorrígida. Os autores concluíram que as fibras não agem simplesmente como carga e sim como reforço da matriz, e que a fibra lignocelulósica apresenta um desempenho superior ao compósito celulósico.

Paiva et al. (2006) estudaram compósitos de matriz fenólica e lignofenólica reforçados com fibras curtas de sisal (3 mm). Investigaram os efeitos dos tratamentos mercerização (10% NaOH), esterificação (anidrido succínico) e tratamento com ar ionizado (corrente de descarga de 5 mA) das fibras, sobre as propriedades das fibras e dos compósitos, principalmente propriedades térmicas. Os resultados apontaram maior adesão interfacial para as fibras mercerizadas e esterificadas em comparação com o tratamento com ar ionizado. No entanto, os autores sugeriram que outros testes fossem realizados para esse último tratamento por se tratar de um método via seco.

Kiran et al. (2007) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster reforçada com fibras curtas de sisal (10, 20, 30, 40, 50 e 70 mm) tratadas numa solução de 1% de NaOH por 30 minutos. Os maiores valores de resistência mecânica foram obtidos para o compósito fabricado com 54% de fração volumétrica de fibras de sisal com comprimento de 30 mm.

Towo e Ansell (2008) estudaram o comportamento em fadiga de compósitos reforçados por fibras unidimensionais de sisal, fabricados com matrizes poliméricas de resina epóxi e poliéster. As fibras foram utilizadas como recebidas e mercerizadas (tratamento alcalino com solução de 0,06 mol/L NaOH) em frações volumétricas de 68,2% e 64,4% para a resina poliéster e 71,5% e 68,5% para a resina epóxi, respectivamente. Os resultados mostraram que o tratamento das fibras de sisal com solução de hidróxido de sódio aumenta a resistência à tração dos compósitos fabricados com resina poliéster, mas não influencia a vida do material em fadiga, especialmente em baixos níveis de carga aplicada. Os compósitos fabricados com resina epóxi e fibras de sisal tratadas não apresentaram aumento na vida em fadiga em relação às fibras sem

tratamento. Este comportamento pode ser atribuído à forte adesão entre a resina epóxi e as fibras de sisal não tratadas.

Martin et al. (2009) investigaram as propriedades químicas, físicas, térmicas e estruturais da fibra de sisal brasileira da variedade “Agave Sisalana”. Os autores avaliaram a qualidade e o desempenho desta fibra para aplicações, por microscopia eletrônica de varredura (MEV) ao longo do comprimento da fibra. Os resultados mostraram que esta fibra apresenta propriedades mecânicas dentro da faixa relatada na literatura, mostrando-se adequada para ser utilizada em materiais compósitos poliméricos, assim como em outras aplicações. As fibras apresentaram, também, boa estabilidade térmica até cerca de 250°C, podendo desta forma, serem utilizadas para processamento com a maioria dos polímeros na produção de compósitos. Em relação às propriedades ao longo do comprimento da fibra observou-se que a parte mais resistente da fibra está localizada cerca de 30 a 60 cm da sua base e a de menor desempenho na região apical (90 - 120 cm).

Spinacé et al. (2009) investigaram a caracterização das fibras de curauá e sisal a fim de comparar suas propriedades e correlacioná-las ao efeito do reforço em compósitos com matriz polimérica. Realizaram ensaios de densidade (modelo AccuPyc II 1340 V1.02), ensaios de tração (EMIC DL 2000) e microscopia eletrônica de Varredura (JEOL JSM-6360LV). Os autores compararam as propriedades das fibras de sisal e curauá, e concluíram que a fibra de curauá apresenta menores valores de densidade e diâmetro, e maior valor de tensão na força máxima. Esses resultados indicam que a fibra de curauá proporciona um maior reforço, desde que a interação interfacial seja adequada, aos compósitos poliméricos.

Lopes et al. (2010) estudaram os efeitos da acetilação em fibras de sisal, em diferentes temperaturas e tempos reacionais. A eficiência desses tratamentos, considerando-se a redução da hidrofobicidade e a manutenção do desempenho mecânico das fibras, foi avaliada pela capacidade de absorção de água por imersão, ensaios de resistência mecânica e por espectroscopia de infravermelho. Fibras acetiladas apresentaram reduções de peso por absorção de até 50% quando comparadas com às não tratadas. Os autores constataram que os tratamentos por 3 h apresentaram as maiores perdas na resistência mecânica, e que o tratamento a 120°C por 1 h indicaram as melhores características físico-mecânicas.

Nóbrega et al. (2010) realizaram um estudo teórico e experimental sobre absorção de água em compósitos de poliéster insaturado reforçados com fibras de caroá à 25, 50 e 70°C. Levaram em consideração estudos que mostram que compósitos reforçados com fibras naturais são sensíveis à influência de agentes ambientais, tais como água. A umidade provoca a degradação mais acentuada das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras naturais, quando comparada com compósitos reforçados com fibra sintética. Ressaltaram que esta é uma consequência da absorção de umidade mais elevada, bem como a natureza orgânica das fibras naturais. Foi desenvolvido um modelo matemático tridimensional para prever a transferência de massa (Lei de Fick) durante a absorção de água nos sólidos paralelepípedicos. Os resultados da cinética de absorção de água e distribuição do teor de umidade dentro destes compósitos foram apresentados e analisados pelos autores. O conhecimento dessa distribuição de umidade permite verificar áreas mais favoráveis que apresentam problemas de delaminação devido à fraqueza da interface fibra-matriz e, conseqüentemente, redução das propriedades mecânicas. Os resultados revelaram que a degradação induzida pela umidade nas amostras de compósitos foi mais significativa à temperatura mais elevada.

Cruz et al. (2011) apresentaram um estudo experimental de absorção de água em compósitos de poliéster insaturado reforçado com fibra natural de Macambira. Enfatizaram que a utilização de matérias-primas de fontes renováveis, tais como fibras de origem vegetal, por exemplo, tem sido objeto de vários estudos e pesquisas. Os autores destacaram que uma grande desvantagem da utilização de fibras vegetais em compósitos de polímeros é a sua natureza hidrofílica que proporciona fraca adesão interfacial da fibra em compósitos poliméricos reforçado por fibras. As amostras estudadas têm composição de 30% de fibra de Macambira e 70% poliéster insaturado, com dimensões de 20×20×3 mm³ e 20×20×6 mm³. Os testes de absorção de água foram realizadas por imersão das mesmas em um banho de água destilada, a 25, 50 e 70°C, e a absorção de água foi medido gravimetricamente ao longo do processo. Os resultados das micrografias eletrônicas, o teor de umidade e a relação área/volume dos compósitos foram mostrados e analisados pelos autores.

Rosário et al. (2011) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçados com fibras de sisal e verificaram que os compósitos reforçados com 30% em massa de fibras de sisal apresentaram melhor desempenho em relação à

matriz sem fibra, no que se refere à resistência à tração, módulo de Young e especialmente resistência ao impacto.

Silva et al. (2012) fez uma caracterização de compósitos poliméricos de matriz epóxi reforçado com fibras unidirecionais de sisal e bananeira com a adição de micropartículas de sílica e anidrido maleico. Duas frações de fibra em massa (30% e 50%) foram investigadas. Concluiu-se que a fibra de sisal obteve melhor propriedade somente na resistência à tração. A adição de 2% em massa de anidrido maleico aumentou a resistência à tração e a tenacidade do compósito. As partículas de sílica reduziram a resistência mecânica, entretanto aumentaram o módulo de elasticidade do material. Os compósitos reforçados com fibras de sisal apresentaram propriedades mecânicas superiores com 30% em fração volumétrica de fibra, além disso a absorção de umidade é inferior quando comparado com os compósitos reforçados com fibras de bananeira.

Melo Filho et al. (2013) estudaram a cinética de degradação das fibras vegetais (sisal) e os mecanismos responsáveis pela deterioração dos compósitos de cimento reforçados com fibras de sisal. Foram usadas duas matrizes: uma com 50% de substituição parcial de cimento por metacaulina (PC-MK) e uma matriz de referência que possui apenas um aglutinamento de cimento Portland (PC). O desempenho de durabilidade dos sistemas compostos foi examinado e os mecanismos para o atraso significativo na degradação de fibras quando a quantidade total de hidróxido de cálcio é reduzida a partir da matriz, discutido. Dois mecanismos de degradação da fibra foram observadas nos compósitos com PC: fibra de mineralização, devido à precipitação de hidróxido de cálcio na célula e superfície, e a degradação da celulose, hemicelulose e lignina da fibra devido à adsorção de íons de cálcio e hidroxila. A partir das conclusões obtidas sobre os mecanismos de durabilidade de compósitos à base de cimento e fibra de sisal, os autores sugeriram dois mecanismos para a degradação das fibras de sisal: o principal mecanismo (i) mineralização da fibra por precipitação de hidróxido de cálcio na superfície da fibra, e um processo secundário e menos grave (ii) deterioração da lignina e hemicelulose através da adsorção de íons de cálcio e hidroxila.

Wei et al. (2014) estudaram dois métodos na tentativa de melhorar a resistência à degradação da fibra de sisal em concreto armado por meio de tratamento da superfície das fibras. Afim de melhorar a resistência à degradação da fibra de sisal no ambiente alcalino do concreto, o tratamento térmico e o tratamento de Na_2CO_3 em fibra foram

estudados. Mecanismos de tratamento foram analisados por meio de DRX, TGA e investigação microscópica. Tanto o tratamento térmico de superfície, como o tratamento com Na_2CO_3 durante 7 dias mostraram ter o potencial de melhorar a durabilidade da fibra de sisal em concreto. Os resultados apontaram que o tratamento térmico melhorou as propriedades mecânicas das fibras de sisal, devido à melhoria da cristalinidade de celulose, o que garante maior resistência inicial e uma maior durabilidade da fibra de sisal em concreto. Já o tratamento com Na_2CO_3 não melhorou a força inicial das fibras, mas melhorou a durabilidade do concreto reforçado com fibra de sisal. Os autores concluíram ainda que os tratamentos de superfície, tanto os térmicos como os químicos, são econômicos e fáceis de aplicar e, portanto, merecem ser mais estudados.

Zhou et al. (2014) modificaram as fibras de sisal utilizando agentes de acoplamento de silano para determinar o mecanismo da reação química entre a fibra e o silano. Uma combinação de microscopia eletrônica de varredura, com transformada de Fourier de infravermelhos (FTIR), termogravimetria (TG), calorimetria de varredura diferencial (DSC) e TG/espectrometria de massa (TG/MS), foram utilizados para investigar os efeitos de um tratamento químico em fibras de sisal. Os resultados mostraram que uma camada de filme foi formado sobre a superfície da fibra por adsorção do silano. A camada consistia de siloxano e poli-siloxano. Os espectros no infravermelho indicaram ligações químicas formadas entre o agente de acoplamento do silano e a fibra. Foi ainda verificado, por TG-DSC e análise TG/MS, que as propriedades de decomposição das fibras de sisal foram alterados pela formação de ligações químicas entre o silano e a superfície da fibra de sisal. Os resultados obtidos usando uma combinação de SEM, FTIR, TG- DSC, e TG/MS confirmam a ocorrência de uma reação química entre as fibras de sisal e de silano hidrolisado. Os autores sugeriram a utilização deste tratamento para conceber novos tipos de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais.

2.1.2.3 - Fibra de Sisal

O sisal (*Agave sisalana*) é uma planta da família das cactáceas que, devido à sua resistência à aridez e ao sol intenso, é cultivada em regiões semiáridas.

a) Características gerais

O sisal é uma planta da família das cactáceas, Figura 2.6, com o nome científico *Agave Sisalana Perrine*, sendo cultivado em regiões semiáridas, por ser resistente à aridez e ao sol intenso. As primeiras plantações de sisal foram desenvolvidas no México pelos Maias, antes da chegada dos Europeus. São conhecidas atualmente cerca de 57 espécies (CHAVAMI et al., 1999). No Brasil, as primeiras mudas de sisal foram trazidas provavelmente da Flórida (Estados Unidos), através de uma empresa americana. O cultivo da planta foi difundido a partir de 1920, inicialmente no Estado da Paraíba e somente no final da década de 30, na Bahia (BARRETO et al., 2011).

Figura 2.6 - Plantação de sisal.



Fonte: EMBRAPA - CNPA, (1997).

No ano de 2009, a fibra do sisal correspondeu a aproximadamente 70% de toda a produção comercial de fibras duras (MARTIN et al., 2009).

b) Rede produtiva do sisal

Cerca de 4,5 milhões de toneladas de fibra de sisal são produzidas a cada ano em todo o mundo. O Brasil é o maior produtor mundial e exportador de sisal, respondendo

por cerca de 140.000 toneladas por ano (EMBRAPA, 2015). Além de maior produtor mundial, o Brasil é o maior exportador da fibra. Estima-se que mais de 80% da produção nacional é exportada para mais de 50 países, sendo os principais importadores os Estados Unidos, China, México e Portugal. Beneficiada ou industrializada, essa fibra representa cerca de 80 milhões de dólares em divisas para o Brasil, além de gerar mais de meio milhão de empregos diretos ou indiretos através de sua cadeia de serviços, que começa com as atividades de manutenção das lavouras, colheita, desfibramento e beneficiamento da fibra e termina com a industrialização e confecção de artesanato (MARTIN et al., 2009).

Os principais estados produtores do Brasil são Rio Grande do Norte, Paraíba e Bahia (maior polo produtor e industrial do sisal do mundo). Só a Bahia corresponde a mais de 95% da produção nacional. Em 2011, o Estado da Bahia exportou o correspondente a US\$8,3 milhões, o que equivale a 1,32% da sua pauta de exportação (MELO FILHO, 2012). Na lista dos países que mais produzem o sisal também estão os da África Oriental, entre eles, Tanzânia, Quênia e Uganda (MARTIN et al., 2009).

A cultura do sisal é de grande importância sócio-econômica para o Brasil, visto que, além de ser fonte de renda e emprego para um grande número de trabalhadores, é também um importante agente de fixação do homem à região semi-árida nordestina, sendo, em algumas dessas regiões, a única alternativa de cultivo com resultados econômicos satisfatórios. A agaveicultura se concentra em áreas de pequenos produtores, com predomínio do trabalho familiar.

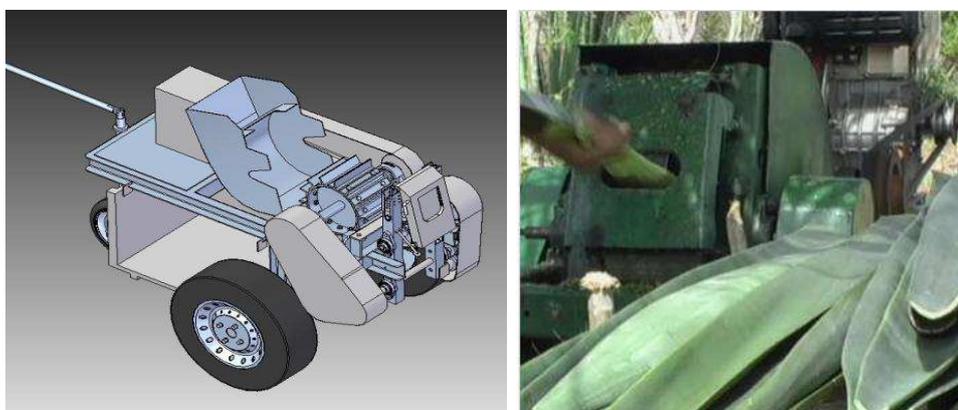
O principal e mais conhecido produto do sisal é o fio biodegradável utilizado em artesanato, no enfardamento de forragens, cordas de várias utilidades, inclusive navais, torcidos, terminais e cordéis. O sisal também é usado na produção de estofos, pasta para indústria de celulose, produção de tequila, tapetes decorativos, remédios, biofertilizantes, ração animal, adubo orgânico e sacarias. As fibras podem ainda ser utilizadas na indústria automobilística, substituindo a fibra de vidro.

O ciclo de transformação do sisal em fios naturais começa aos três anos de vida da planta ou quando suas folhas atingem cerca de 150 cm de comprimento. O crescimento da planta depende, entre outros fatores, da disponibilidade de água; a planta estoca água na estação chuvosa para consumi-la na estação seca. Sua vida útil é de seis a sete anos, sendo que as folhas são cortadas a cada seis meses. O sisal pode produzir entre 200 e 250 folhas antes de florescer, cada folha mede de 6 a 10 cm de largura, tem

150 a 200 cm de comprimento e contém aproximadamente 700 a 1400 feixes de fibras com comprimento variando de 0,5 a 1,0 m. A folha de sisal consiste em uma estrutura composta por aproximadamente 4% de fibras, 1% de película (cutícula), 8% de matéria seca e 87% de água. Exceto as fibras, esses materiais são considerados resíduos do beneficiamento, sendo utilizados como adubo orgânico, ração animal e pela indústria farmacêutica (MARTIN et al., 2009; WEI et al., 2014).

O trabalho no campo concentra-se basicamente no corte das folhas, desfibramento, lavagem/secagem e batimento das fibras. O processo de extração da fibra de sisal, que consiste na eliminação da polpa das fibras, pode ser feito manualmente, por maceração ou por meio de um processo mecânico chamado de decorticamento (SILVA, 2008). No processo de decorticamento, as folhas de sisal são esmagadas pela passagem entre duas rodas com facas sem corte (desfibrilador), de forma que somente as fibras permanecem (SILVA, 2008). No Nordeste brasileiro, o desfibramento é realizado por meio de uma máquina denominada “motor de agave” ou “máquina Paraibana” (Figura 2.7).

Figura 2.7 - Máquina desfibradeira.



Fonte: Appeluz (2011).

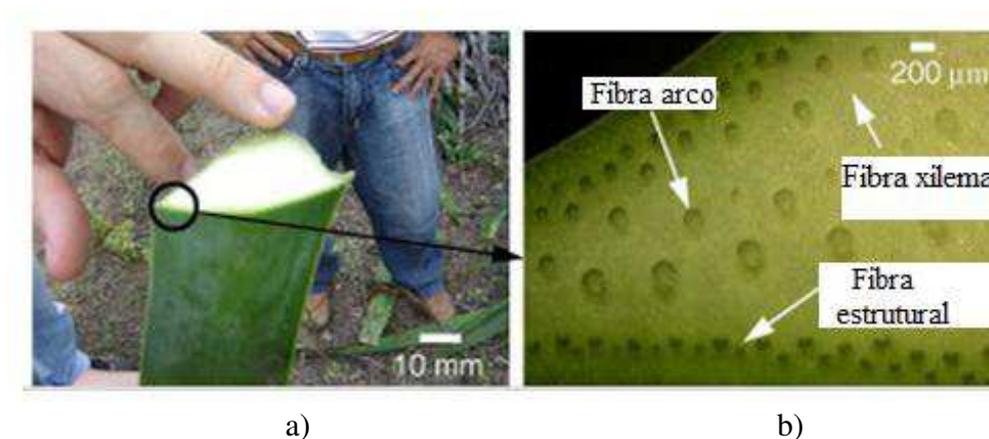
Esta máquina desfibra em torno de 150 a 200 kg de fibra seca em um turno de 10 horas de trabalho, desperdiçando, em média, 20 a 30% da fibra (APPELUZ, 2011). A fibra obtida é imersa, por período de oito a dez horas, em tanques com água limpa para a eliminação dos resíduos da mucilagem péctica e da seiva clorofílica, que ficam

aderidos à fibra de sisal. Após a lavagem, as fibras são secas ao sol por período que varia de 8 a 10 horas. Depois de secas, as fibras são amarradas em pequenos feixes e armazenadas.

c) Propriedades mecânicas e morfológicas das fibras de sisal

As fibras de sisal encontram-se longitudinalmente ao longo do comprimento da folha, com comprimentos que variam de 45 a 120 cm. São encontrados três tipos básicos de fibras: a fibra mecânica (estrutural), a fibra arco e a fibra xilema (Figura 2.8).

Figura 2.8 - (a) Folha de sisal e (b) ampliação mostrando os tipos de fibras na folha de sisal.



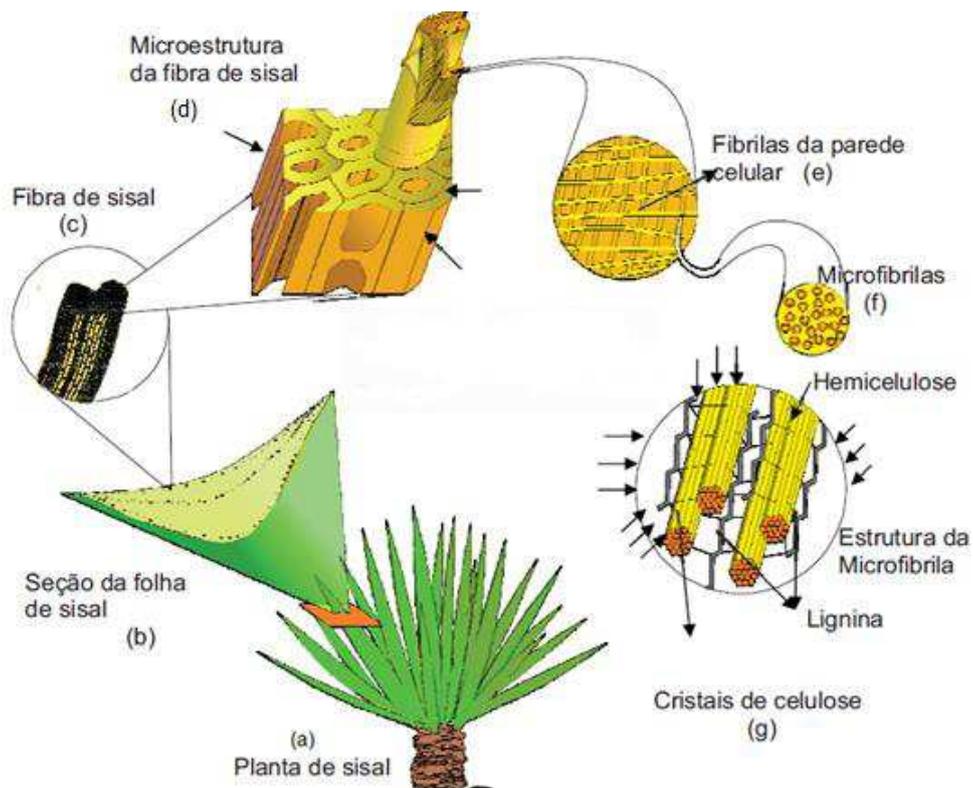
Fonte: Silva (2008).

As fibras mecânicas, cuja função é dar sustentação e rigidez às folhas, são encontradas na periferia das folhas e estão presentes em maior número. Seu diâmetro é aproximadamente 200 µm, tendo seção transversal raramente circular. Essas fibras são de grande importância comercial pelo fato de não arrebentarem durante o processo de extração. As fibras arco são normalmente encontradas no meio da folha e crescem em associação com os tecidos da planta. Essas fibras se estendem da base até o topo da planta, apresentando boa resistência mecânica. As fibras xilema crescem opostas às fibras de arco e são conectadas a elas pelo tecido condutor (SILVA, 2008).

A Figura 2.9, apresenta um desenho esquemático da estrutura da folha de sisal desde a escala macro até a escala micro da estrutura da fibra de sisal. Quando uma seção

transversal de uma única fibra de sisal é examinada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), a estrutura da fibrocélula, esquematizada na Figura 2.9 (d), é vista claramente.

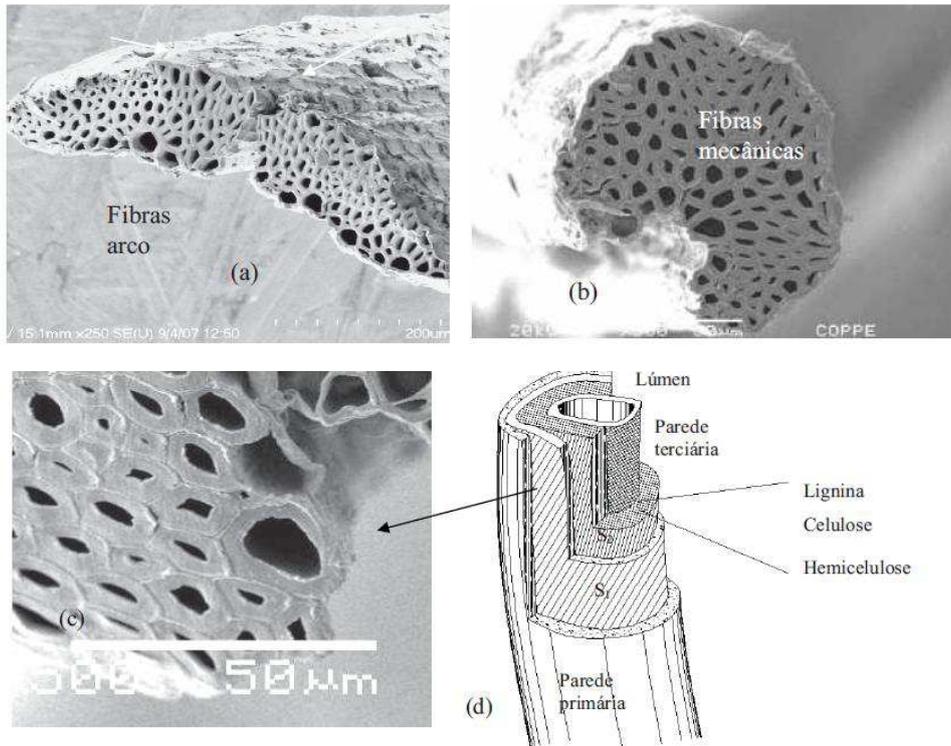
Figura 2.9 - (a) Planta de sisal; (b) seção transversal da folha de sisal; (c) fibra de sisal; (d) Fibrocélula; (e) fibrilas da parede celular; (f) microfibrilas e (g) cristais de celulose.



Fonte: Melo Filho (2012).

Cada fibrocélula tem um diâmetro médio de 10 a 20 μm e remete a forma poligonal, com um furo central chamado lúmen, compreendendo cerca de 10% da área da seção transversal da fibrocélula, como mostrado na Figura 2.10 (c). Um desenho esquemático de uma fibrocélula é apresentado na Figura 2.10 (d).

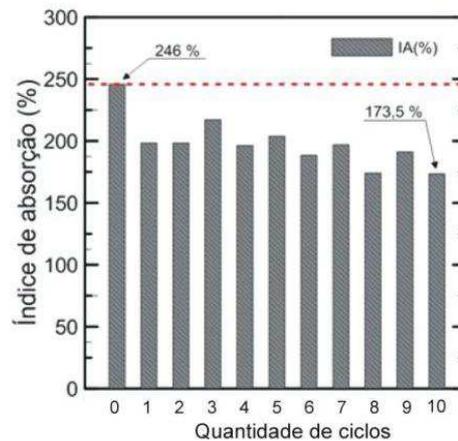
Figura 2.10 - (a) Seção de uma fibra arco; (b) seção de uma fibra mecânica; (c) micrografia da seção de uma fibra de sisal e (d) desenho esquemático de uma fibrocélula individual.



Fonte: Melo Filho (2012).

Ferreira et al. (2012) investigaram os efeitos dos ciclos de umidificação e secagem realizados nas fibras de sisal. Constataram uma diminuição no índice de absorção de água (IA) das fibras após os ciclos como mostra a Figura 2.11.

Figura 2.11 - Variação do índice de absorção de água (IA) das fibras de sisal após os ciclos de umidificação e secagem.

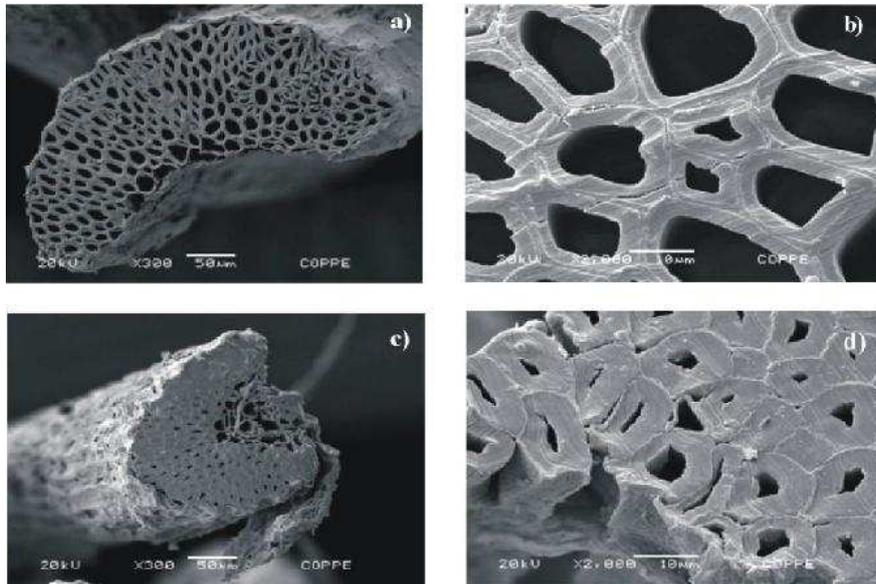


Fonte: Ferreira et al. (2012).

Os autores constataram que, após 10 ciclos de umidificação e secagem, a variação no índice de absorção das fibras é de cerca de 30%. Este comportamento pode ser explicado pelo enrijecimento da estrutura polimérica das fibrocélulas do sisal que ocorre durante o processo de umidificação e secagem (processo conhecido como hornoficação). De acordo com Ferreira et al. (2012), as cadeias de polissacarídeos da celulose são arranjadas de forma mais apertada com a remoção de água durante a secagem e com isso as microfibrilas se juntam, no estado seco, como resultado do maior empacotamento. Os vazios capilares da fibra são progressivamente fechados com a secagem e não conseguem ser completamente reabertos com a reumidificação.

As Figuras 2.12 (a) e 2.12 (c), apresentam a seção transversal das fibras, e nas Figuras 2.12 (b) e 2.12 (d), verifica-se um maior empacotamento das fibrocélulas e uma redução do lúmen após submissão ao tratamento, o que, conseqüentemente, reduz a capacidade de absorção de água da fibra.

Figura 2.12 - Seção transversal das fibras mostrando detalhe das fibrocélulas: (a-b) sem tratamento e (c-d) tratadas.



Fonte: Ferreira et al. (2012)

Uma consequência direta da redução da absorção é a diminuição da variação dimensional da fibra entre o estado seco e saturado. Resultando assim, em maior estabilidade dimensional da fibra.

Por ser uma fibra ligno-celulósica, leve e atóxica, apresentando altos módulo e resistência específica, de custo aproximadamente dez vezes menor que a fibra de vidro (fibra inorgânica), causando menos danos por abrasão aos equipamentos e moldes, o sisal pode ter seu valor comercial multiplicado se utilizado como reforço em compósitos poliméricos (ANGRIZANI et al., 2006; BARRETO et al., 2011).

O sisal é atualmente uma das fibras naturais mais estudadas e este interesse é decorrente das vantagens apresentadas pela mesma, tais como: facilidade de modificação superficial; abundância no Brasil; facilidade de cultivo; por ser um material biodegradável que provém de fonte renovável; e por apresentar boas propriedades como isolante térmico e acústico. Estes fatores, aliados à alta tenacidade, resistência à abrasão e ao baixo custo, têm levado um grande número de pesquisadores a realizarem estudos nos vastos campos da pesquisa de controle, secagem e armazenamento, com o objetivo de preservar as fibras do sisal para sua utilização em diversas aplicações tecnológicas (ANGRIZANI et al., 2006; BARRETO et al., 2011).

A facilidade de utilização das fibras vegetais (especialmente o sisal) como reforço em matriz poliéster na produção de compósitos híbridos, deve-se ao fato das fibras vegetais serem abundantes em nosso país e apresentarem boas características mecânicas. Além disso, sisal é uma fibra relevante à economia das regiões Norte e Nordeste do Brasil.

A utilização da fibra de sisal em compósitos de alto desempenho requer estudo do comportamento mecânico das fibras. Existe grande discrepância entre os valores reportados na literatura para a resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra de sisal. A variabilidade nas propriedades dessas fibras pode ser atribuída a três fatores principais: parâmetros e condições de teste, características das plantas e o método de medição da seção transversal. Dentre os parâmetros e/ou condições de teste que podem influenciar nas propriedades mecânicas das fibras, podem ser citados a precisão dos instrumentos, o comprimento da fibra, a velocidade de ensaio, os tipos de garras utilizados e a própria sensibilidade do equipamento. Como características das próprias plantas entendem-se a origem da planta, idade, tipo de processamento (processo de extração) assim como sua microestrutura. A medição da seção transversal pode, ainda, ocasionar variação na medida das propriedades mecânicas devido à forma indefinida da seção e pela própria variação ao longo da fibra (SILVA, 2008).

2.2 - O Processo de Umidificação/Secagem

2.2.1 - Considerações gerais

A umidificação/secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre o aumento/redução da umidade de um corpo. O transporte de umidade da superfície do corpo para o seu interior ou vice-versa, pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo do material e do percentual de umidade presente. De modo geral, a umidificação/secagem é uma operação de absorção/remoção de parte da água ou qualquer outro líquido de um corpo, através de processos mecânicos ou térmicos (FORTES e OKOS, 1980; SILVA, C., 2010).

A umidificação/secagem de um produto seco/úmido pode ocorrer de forma natural ou artificial. Dentre os métodos artificiais, o mais comum consiste em umidificar/pré-aquecer o ar ambiente, aumentando/diminuindo assim sua umidade relativa. Em seguida, o ar é transferido a uma certa velocidade, para o ambiente no qual ele é colocado em contato com o produto. Com isso, no caso da umidificação há um processo contínuo de transferência de água do ar para a superfície do produto, na forma de vapor, e desta para o interior do produto. Já no caso da secagem o processo é inverso (ALVARENGA et al., 1980; HALL, 1980; STRUMILLO e KUDRA, 1986; MARIZ, 1986; BROOKER et al., 1992).

O processo de umidificação assim como a secagem, envolve complexos fenômenos de transferência de calor, massa, quantidade de movimento e variações dimensionais, exigindo a necessidade de gerar modelos matemáticos que descreva o processo com realismo físico. Para que isso ocorra, é importante inserir no modelo matemático o máximo de informações, tais como: mecanismo de transporte de calor e umidade dentro do sólido, coeficiente de difusão, variação dimensional, condições ambientais externas próximo do sólido, entre outros, tornando possível relacionar corretamente o modelo com a situação real. O conhecimento dos mecanismos de transferência de água no interior de um corpo seco/úmido, numa dada temperatura é fundamental, uma vez que possibilita verificar o efeito dos processos nas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas do material. (FORTES e OKOS, 1980; LIMA, 1995; IBRAHIM et al., 1997; SILVA, C., 2010).

2.2.2 - Períodos de taxa de umidificação/secagem e aquecimento do sólido

Muitos meios porosos durante o processo de umidificação/secagem individual ou em camada delgada apresentam um ganho/perda de umidade a uma taxa constante no período inicial do processo, seguido por um período a uma taxa decrescente (SILVA, R. V., 2003).

A umidificação/secagem à taxa constante ocorre normalmente em produtos nos quais a resistência interna ao transporte de umidade é inferior comparada à resistência externa à absorção/remoção do vapor de água na superfície do produto para o interior do material (no caso da umidificação) ou para o meio ambiente (no caso da secagem). Por outro lado, durante o período de umidificação à taxa decrescente, o produto encontra-se mais úmido, assim a resistência interna ao transporte de água se torna maior do que a resistência externa (FORTES e OKOS, 1980; ALVARENGA et al., 1980; LIMA, 1995; IBRAHIM et al., 1997; SILVA, C., 2010).

2.2.3 - Teores de umidade

Durante o processo de umidificação/secagem, o material pode conter ou atingir os seguintes teores de umidade: teor de umidade inicial, teor de umidade crítico e teor de umidade de equilíbrio. O teor de umidade inicial consiste no valor da umidade no material no início do processo. Quando ocorre uma mudança na taxa de umidificação/secagem de constante para decrescente, tem-se o teor de umidade crítico. Já o teor de umidade de equilíbrio acontece quando o material está em equilíbrio com o meio externo. Consequentemente, não existe troca de umidade entre eles, e o teor de umidade dentro do material se uniformiza (FIOREZE, 2003; SILVA, 2008). O teor de umidade de um produto é representado de duas formas:

a) Teor de umidade em base seca:

É dado por:

$$M = m_a/m_s, \quad (2.1)$$

onde m_a é a massa da água contida no produto e m_s é a massa do produto totalmente seco.

b) Teor de umidade em base úmida:

Dado por:

$$M' = m_a/m, \quad (2.2)$$

onde $m = m_a + m_s$ é a massa total do sólido em qualquer tempo durante o processo de secagem.

2.2.4 - Teoria de transferência de calor e massa

Devido a sua complexidade, o processo de umidificação/secagem tem sido objeto de estudo de pesquisadores de todo o mundo. Alguns consideram as condições externas, tais como temperatura do ar, velocidade e umidade relativa, correlacionadas à taxa de secagem dos produtos, enquanto outros dão ênfase às condições internas dos mesmos, levando em consideração o movimento da água no seu interior. O conhecimento desses mecanismos internos no transporte de água é de fundamental importância quando se tenta descrever a migração da água na massa de um produto (FORTES e OKOS, 1980; MARIZ, 1986; BROOKER et al., 1992; KEEY, 1992; LIMA, 1995; IBRAHIM et al., 1997; SILVA, C., 2010). Em seguida, listar-se-á várias teorias que tentam descrever o transporte de água e calor em meios porosos:

- Teoria da difusão líquida;
- Teoria da vaporização-condensação;
- Teoria capilar;
- Teoria de Kricher;
- Teoria de Luikov;
- Teoria de Philip e De Vrie;
- Teoria de Berger e Pei;
- Teoria de Fortes e Okos.

Na literatura, encontra-se descritos os seguintes mecanismos de transporte de água:

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

2.2.5 - Simulação da umidificação/secagem

Segundo Gouveia et al. (2003), com o objetivo de descrever o transporte de água no interior de produtos, muitos trabalhos reportados na literatura, apresentam apenas dados experimentais. Porém, se a finalidade for apresentar uma descrição detalhada do transporte de água, modelos matemáticos devem ser usados. A principal finalidade do uso desses modelos é correlacionar os dados experimentais da umidificação/secagem a uma equação matemática que visa representar a cinética de absorção/dessorção de umidade pelo produto. Deve-se observar que alguns desses modelos possibilitam prever a distribuição de umidade no interior do produto, em qualquer instante de tempo.

Dependendo da espessura da camada do material estudado, estes modelos podem ser classificados em modelos em camada fina (modelos à nível de partícula) e em

camada espessa (modelos à nível de secador). A secagem em camada fina possui limitações, devido o fato dos materiais serem geralmente secos em camadas espessas: estacionárias ou em movimento. Por outro lado, os modelos mais usados pelos pesquisadores levam em consideração propriedades termofísicas, cinéticas de secagem e balanço de massa e energia no secador, ressaltando assim, a necessidade de se trabalhar com equações que descrevam a cinética de secagem do material em camada fina com determinadas condições operacionais pré-estabelecidas.

Existem na literatura diversos modelos matemáticos de camada fina que podem ser utilizados para descrever a transferência de umidade e/ou calor em produtos higroscópicos porosos, como as fibras vegetais. De modo geral, estes modelos estão divididos em dois grandes grupos, dentre os quais podem ser citados:

- Modelos concentrados;
- Modelos distribuídos.

As equações de camada fina nos modelos concentrados podem ser classificados em empíricas, semi-empíricas e teóricas. Estas equações negligenciam os efeitos de variação de temperatura e umidade no interior do material durante o processo, assumindo que o produto alcança a temperatura média do ar imediatamente, no começo do processo.

2.2.5.1 - Modelos empíricos

Modelo empírico consiste em uma correlação direta entre o teor de umidade médio e o tempo de secagem. Esse tipo de modelo normalmente descreve bem a cinética de secagem, mas não possibilita visualizar a distribuição de umidade no interior do produto, em um instante de tempo previamente especificado (SILVA, 2007), ou seja, este modelo não descreve o fenômeno no interior do produto, utilizando apenas informações obtidas por dados experimentais, extrínsecos ao produto. Neste caso, já que não se pode prever a distribuição de água com a utilização de um modelo empírico, não se pode, também, prever as regiões de maiores tensões hídricas (e térmicas) no interior do produto. Assim, não se pode exercer um maior controle sobre as condições de secagem de forma a evitar danos ao produto durante o processo. Além disso, segundo Baini e Langrish (2007), modelos empíricos não são adequados para descrever a

cinética de secagem intermitente. Apesar destas limitações, os modelos empíricos são bastante encontrados na literatura (CAVALCANTE, 2006; NÓBREGA, 2007; SANTOS, 2017). Na Tabela 2.4 são apresentadas algumas equações empíricas referentes a esses modelos.

Tabela 2.4 - Equações empíricas para a cinética de absorção/dessorção de umidade de produtos.

Nº	Nome do modelo	Modelo empírico
1	Newton	$\bar{M} = M_e + (M_o - M_{eq})\exp(-at)$
2	Page	$\bar{M} = M_e + (M_o - M_{eq})\exp(-at^b)$
3	Henderson e Pabis	$\bar{M}^* = a \exp(-bt)$
4	Dois termos	$\bar{M}^* = a \exp(-bt) + b \exp(-ct)$
5	Wang e Sing	$\bar{M}^* = 1 + at + bt^2$
6	Midilli	$\bar{M}^* = a \exp(-bt^c) + dt$
7	Aproximação da difusão	$\bar{M}^* = a \exp(-bt) + (1 - a)\exp(-ct)$
8	Thompson	$t = a \ln(\bar{M}^*) + b[\ln(\bar{M}^*)]^2$

Fonte: Corrêa et al. (2007).

Na Tabela 2.4, os parâmetros apresentados nas equações são definidos como segue:

M_{eq} → é o teor de umidade de equilíbrio;

M_o → é o teor de umidade inicial;

\bar{M} → é o teor de umidade médio;

a, b e c → são constantes.

O termo $\bar{M}^* = (\bar{M} - M_{eq}) / (M_o - M_{eq})$, que aparece na Tabela 2.4, é definido como sendo o teor de umidade adimensional, também chamado de razão de umidade.

Carlesso et al. (2007), utilizaram 5 modelos empíricos para representar a cinética de secagem (dessorção) por convecção em camada fina de maracujá amarelo. De acordo com esses autores, dentre os modelos utilizados, o que melhor descreveu a cinética de secagem foi o modelo exponencial duplo, que envolve quatro parâmetros de ajuste.

Corrêa et al. (2007), usaram 12 modelos empíricos para descrever curvas da cinética de secagem (dessorção) de feijão. Com base em parâmetros estatísticos, os autores concluíram que a metade dos modelos testados representava bem a cinética de

secagem. Portanto, o modelo de Page, pela sua simplicidade e pela disseminação no meio científico, foi o selecionado pelos autores para descrever o processo.

Diversos outros trabalhos reportados na literatura, citam a utilização de modelos empíricos, dentre esses, podem ser citados (LIMA, 1999; GANJLOO et al., 2011; MERCALI et al., 2011; MANEGHETTI et al., 2012; KOPRIVICA et al., 2013; SILVA et al., 2013).

Em particular, encontra-se vários trabalhos reportados na literatura, nos quais citam a utilização de modelos empíricos à compósitos fibrosos, dentre esses, podem ser citados (CAVALCANTE, 2006; NÓBREGA, 2007; SANTOS, 2017).

2.2.5.2 - Modelos distribuídos

No estudo teórico dos mecanismos de umidificação/secagem, necessita-se de um modelo matemático para descrever o processo. Dentre os vários modelos encontrados na literatura, a teoria da difusão líquida é a que mais se adequa e simplifica o processo admitindo que, a transferência de água para o interior de um produto da sua superfície externa (ou vice-versa), ocorre na fase líquida. Consequentemente, o modelo matemático adequado para a descrição do processo envolve a equação da difusão (LIMA, 1999).

A difusão é um tipo de mecanismos pelo qual o fenômeno do transporte pode ocorrer. Utiliza-se a teoria da difusão em muitas situações físicas para descrever a transferência de matéria e de energia em um meio. Dentre tais situações, a teoria da difusão muitas vezes é utilizada para descrever processos de secagem, umidificação, aquecimento e resfriamento. Apesar de alguns autores, tais como Brooker et al. (1992) e Fioreze (2003), considerarem a teoria da difusão líquida uma simplificação na descrição do movimento migratório, a difusão líquida descreve muito bem o transporte de água do interior do produto para várias situações de interesse, e vem ganhado ampla adesão por parte dos pesquisadores (NASCIMENTO, 2002; WU et al., 2004; CARMO, 2004; LIMA et al., 2004a; SILVA, 2007; SILVA et al., 2008a; HACIHAFIZOGLU et al., 2008; SILVA, C., 2010).

Neste modelo, a movimentação de líquido dentro do produto é representada matematicamente pela equação de difusão e explicada unicamente pela diferença de concentração de umidade. O modelo difusivo considera a resistência interna e externa

aos fluxos de massa, sendo capaz de prever a distribuição de umidade no interior de um sólido, em um dado instante de tempo. Geralmente é usado para descrever o transporte de água em meios porosos, e em particular é usado com a finalidade de descrever a umidificação/secagem de corpos secos/úmidos.

Modelos difusivos são bastante usados para determinar o coeficiente efetivo de difusão de massa, podendo descrever o que ocorre no interior do produto durante o fenômeno (SILVA et al., 2014a). Com o conhecimento da difusividade efetiva de massa, a taxa de transferência pode ser prevista de forma eficaz, simplificando a solução da equação de difusão (YADAV e SINGH, 2012).

Da equação geral de conservação (equação de transporte), obtém-se a equação de difusão que descreve o transporte de uma grandeza em um meio estacionário. Sendo assim, será apresentado um rápido estudo sobre a equação de transporte.

A equação de transporte, na sua forma infinitesimal para um volume elementar, denominado de volume de controle, pode ser escrita de modo geral, da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda\vec{v}\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi, \quad (2.3)$$

onde:

Φ → a variável dependente de interesse;

Γ^Φ → o coeficiente de transporte;

λ → o parâmetro de transporte;

\vec{v} → o vetor velocidade do meio;

S^Φ → o termo fonte.

Na Equação (2.3), tem-se que o primeiro termo indica a variação de uma grandeza característica pela variável dependente no decorrer do tempo t , dentro do volume de controle. Já o segundo termo indica a variação da grandeza na unidade de tempo por transferência de massa com uma velocidade \vec{v} para o volume de controle (termo advectivo). O terceiro termo corresponde a variação da grandeza na unidade de tempo dentro do volume de controle por difusão (termo difusivo). Já o último termo, denominado de termo fonte, indica a taxa de geração da grandeza dentro do volume de controle. Detalhes sobre a equação de transporte podem ser encontrados na literatura em: Slattery (1999) e Bird et al. (2001).

A equação que descreve o fenômeno de difusão para uma variável genérica Φ é obtida da Equação (2.3) fazendo $\vec{v} = 0$, já que neste caso o meio encontra-se em repouso (velocidade nula) e a variação da grandeza dentro do volume de controle ocorre unicamente por difusão. Assim, a equação passa a ser denominada de equação de difusão, sendo dada como segue:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi. \quad (2.4)$$

A equação de difusão pode ser resolvida numericamente ou analiticamente. No entanto, várias hipóteses devem ser estabelecidas para se chegar a solução de tal equação. Uma dessas hipóteses está relacionada às condições de contorno, que pode ser de equilíbrio (LIMA et. al., 2004a; SILVA et al., 2009b; SILVA et al., 2010b; SILVA, C., 2010), ou a convectiva (QUEIROZ e NEBRA, 2001; OLIVEIRA e LIMA, 2002; SILVA et al., 2009a; SILVA, C., 2010). Outra hipótese que deve ser estabelecida é referente ao coeficiente de difusão de massa. Na literatura, encontra-se vários trabalhos de pesquisa, onde consideraram o coeficiente de difusão de massa constante (OLIVEIRA e LIMA, 2002; NASCIMENTO et al., 2005; SILVA et al., 2009a; SILVA et al., 2010b). Por outro lado, de acordo com alguns pesquisadores, a difusividade de massa é um parâmetro variável ao longo do processo (LIMA, 1999; NASCIMENTO, 2002; SILVA, C., 2010; FARIAS, V., 2011).

Com relação às hipóteses para a solução de difusão, deve-se ainda estabelecer se a variação dimensional do sólido durante o processo pode ser desprezada (LÓPEZ e ALVARADO, 2007; SILVA et al., 2010b), ou se é significativa (NASCIMENTO et al., 2005; SILVA, 2007; SILVA, C., 2010; FARIAS, V., 2011). Normalmente, é comum em vários trabalhos de pesquisa considerar a hipótese de que o sólido seja homogêneo e isotrópico (BARONAS et al., 1999; SILVA, C., 2010; FARIAS, V., 2011), mas é possível encontrar trabalhos que consideram a heterogeneidade e anisotropia do produto (PERRÉ e TURNER, 2002).

Em muitos trabalhos, faz-se a aproximação da geometria do corpo a uma esfera, paralelepípedo ou cilindro (NASCIMENTO, 2002; BAUMER e MARIANI, 2005; LÓPEZ et al., 2005). Já em outros trabalhos, o formato do sólido é aproximado para geometrias mais complexas como os esferóides oblatos e prolatos (LIMA, 1999;

CARMO, 2004; WU et al., 2004; OLIVEIRA, 2006). As soluções analíticas são bastante comuns na descrição do transporte de massa em vários produtos (OLIVEIRA e LIMA, 2002; FARIAS, 2002; LIMA et al., 2004; LÓPES e ALVORADO, 2007; ZÚÑIGA e PEDRESCHI, 2011; ABRAÃO et al., 2013; BARBOSA JÚNIOR et al., 2013; SILVA et al., 2013; SILVA et al., 2014a; SOURAKI et al., 2014; SILVA et al., 2014b). Por outro lado, quanto mais as hipóteses estabelecidas aproximam-se das condições reais do processo, mais difícil torna-se a determinação de soluções analíticas para descrever o mesmo. Consequentemente, as soluções numéricas são bastante comuns (NASCIMENTO, 2002; WU et al., 2004; CARMO, 2004; OLIVEIRA, 2006; AMENDOLA e QUEIROZ, 2007; SILVA, 2007; RAFIEE et al., 2008; ARBALLO et al., 2012b; ABRAÃO et al., 2013; PORCIUNCULA et al., 2013; FABBRI et al., 2014; PERUSSELLO et al., 2014, SILVA et al., 2014c).

Para finalizar essa revisão bibliográfica, serão apresentados alguns trabalhos que foram de fundamental importância para realização dessa pesquisa, tendo em vista, que não foi encontrado na literatura, trabalhos voltados para o estudo de transferência de calor e umidade em fibras de sisal.

Henry (1939) estudou pela primeira vez problemas de difusão em estado transiente em fibras têxteis higroscópicas, onde analisou a penetração da umidade atmosférica em fardos de algodão. Obteve uma solução analítica aproximada para as equações diferenciais que descrevem tal fenômeno. Equações matemáticas que descrevem os fenômenos de difusão em fibras têxteis higroscópicas torna possível se calcular a concentração, temperatura, umidade e absorção total ao longo do tempo até o equilíbrio ser atingido.

Nordon et al. (1967) estudaram a difusão acoplada de calor e umidade em materiais têxteis higroscópicos. Apresentaram uma solução em diferenças finitas, com base no método de “varredura dupla” para as equações diferenciais não-lineares que descrevem tais fenômenos. Usaram a lã, como exemplo de material higroscópico, e mostraram que a transferência de umidade do ar para a lã e da lã para o ar não são processos simétricos. A difusão acoplada de calor e de massa reportada pelos autores, apresenta vantagens e desvantagens em comparação com o método analítico de Henry (1939). Entre as vantagens, pode-se citar que o ajustamento pode ser feito objetivando taxa finita de sorção da fase sólida (fibras têxteis) e que a magnitude do efeito pode ser avaliado. Além disso, um melhor método de incorporar as propriedades não-lineares do

sistema é possível e, portanto, o cálculo da variação de condições de contorno ao longo de um intervalo mais amplo deverá ser viável. Por outro lado, o método não dá a percepção física para o problema que a solução analítica proporciona. Pode-se concluir que os dois métodos são complementares.

Haghi (2001) estudou a transferência simultânea de calor e umidade em sistemas porosos. Com base na análise do equilíbrio líquido-vapor e dos processos de transferência de energia e massa em sistemas porosos, desenvolveu um modelo matemático usando o método de diferenças finitas. Os efeitos dos parâmetros operacionais, tais como, a temperatura e umidade no secador, o teor de umidade inicial do material poroso e os coeficientes de transferência de massa e calor são examinados usando este modelo. O objetivo desse estudo foi descrever transferência de calor e massa na secagem por convecção forçada de meios porosos. O modelo matemático desenvolvido neste estudo é muito abrangente e pode ser usado para prever as variações transitórias na distribuição de temperatura e teor de umidade em tecidos com precisão razoável. Com as previsões do modelo, o consumo de energia pode ser reduzido através da otimização das condições de secagem do secador.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados a metodologia experimental e os modelos matemáticos necessários para o desenvolvimento de simulações do transporte de calor e umidade (vapor) em sólidos porosos na forma de paralelepípedo, com particular referência as fibras vegetais.

3.1 - Metodologia experimental

Nessa seção será apresentada a matéria prima estudada neste trabalho, bem como os procedimentos experimentais que foram utilizados na secagem da mesma.

3.1.1 - Materiais e equipamentos utilizados na secagem

A matéria prima utilizada foi a fibra de sisal da variedade *Agave Sisalana* com teor de umidade médio de 11,19%, adquirida no município de Pocinhos-PB, já submetida a uma secagem natural.

As fibras passaram por um processo de seleção antes de serem submetidas à secagem (ver Figura 3.1), onde foram retiradas algumas impurezas, como resíduos de plantas e do solo, e também foram selecionadas as fibras que aparentemente apresentavam melhor qualidade e uniformidade.

Figura 3.1 - Fibras de sisal que foram utilizadas no experimento: (a) fibras em seu estado original; (b) fibras após o 1º processo de seleção; (c) fibras após o 2º processo de seleção; e (d) fibras prontas para secagem.



a)



b)



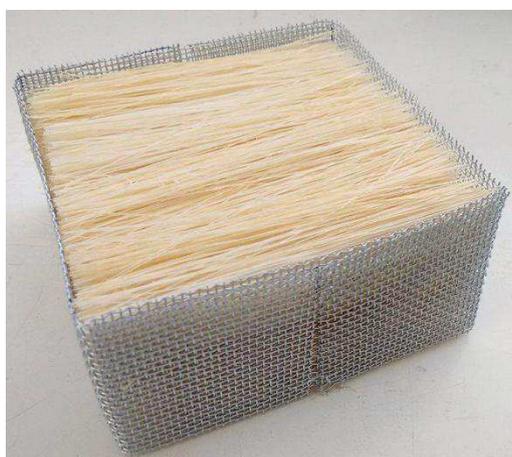
c)



d)

Os materiais utilizados para secagem em estufa foram cestos com fibras de sisal na forma de paralelepípedo (Figura 3.2).

Figura 3.2 - Cesto com as fibras de sisal.



Para a determinação dos parâmetros de secagem os seguintes equipamentos foram utilizados:

- a) Balança digital Maste-AL500 com divisão de 1 miligrama (Figura 3.3-a);
- b) Paquímetro digital da marca Messen com precisão de 0,01 mm (Figura 3.3-b);
- c) Termômetro de infravermelho com escala de -50 à 1000°C TI 890 (Figura 3.3-c);
- d) Estufa com circulação mecânica de fabricação da FANEM mod. 320E com controlador digital de temperatura (Figura 3.4-a);
- e) Escalímetro com precisão de 1 mm (Figura 3.4-b);
- f) Termohigrômetro de fabricação da ICEL, mod. HT 208 (Figura 3.4-c).

Figura 3.3 - (a) Balança digital; (b) paquímetro digital; e (c) termômetro digital, modelo TI - 890.



a)



b)

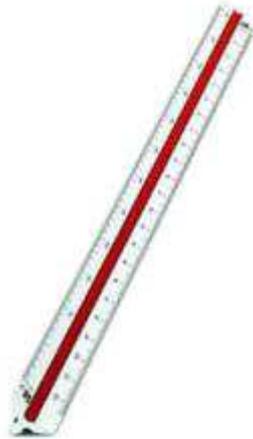


c)

Figura 3.4 - (a) Estufa com circulação de ar forçada; (b) escalímetro; e (c) termohigrômetro digital.



a)



b)



c)

3.1.2 - Procedimentos Experimentais

Todos os experimentos com a fibra de sisal foram realizados no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.

Inicialmente foram medidas as dimensões, massa, temperatura do meio fibroso, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Em seguida, as amostras foram levadas ao interior da estufa onde se realizava a secagem. Nesse processo, a temperatura interna da estufa era fixada na temperatura desejada (50°C, 60°C, 70°C, 80°C e 90°C) através do controlador de temperatura. Em intervalos pré-definidos a amostra era retirada da estufa, possibilitando a medição da temperatura e da massa. Para cada experimento, com base nos trabalhos encontrados na literatura com fibras vegetais, as medições foram feitas de 5 em 5 minutos até que a massa tivesse variação mínima (cerca de 30 min), depois de 10, 15, 20, 25 e 30 min. Em seguida, as medições passaram ser de 60 em 60 min até a massa constante ser atingida. Logo após, a amostra foi submetida a uma secagem por 24 horas para obtenção da massa de equilíbrio e, em seguida por mais 24 horas, na temperatura de 105°C, para obter-se a massa seca.

A Figura 3.5 ilustra o modelo do corpo de prova utilizado, bem como as posições onde foram obtidas as medidas do comprimento ($2R_1$), da largura ($2R_3$), da

altura ($2R_2$) e da temperatura do meio fibroso. A Tabela (3.1) apresenta para cada experimento a denominação das amostras, suas dimensões e volume, e temperatura de secagem utilizada na estufa.

Figura 3.5 - Corpo de prova mostrando a largura ($2R_3$), a altura ($2R_2$), o comprimento ($2R_1$) e local da medição da temperatura do meio fibroso.

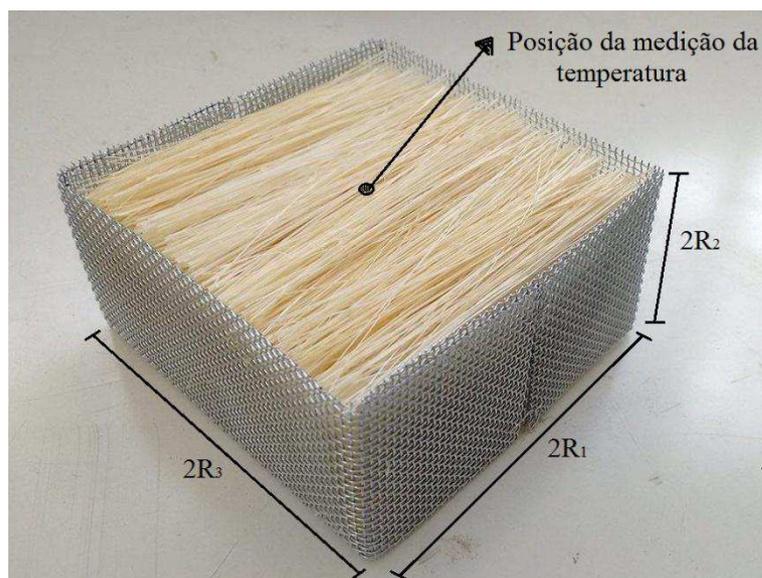


Tabela 3.1 - Parâmetros experimentais do ar e dimensões do meio fibroso utilizado nos experimentos.

Teste	Ar			Meio Fibroso			
	UR (%)	T (°C)	v (m/s)	$2R_1$ (m)	$2R_2$ (m)	$2R_3$ (m)	*V (m ³)
1	17,52	50	0,05	0,1	0,05	0,1	5×10^{-4}
2	11,04	60	0,06	0,1	0,05	0,1	5×10^{-4}
3	6,89	70	0,07	0,1	0,05	0,1	5×10^{-4}
4	4,19	80	0,08	0,1	0,05	0,1	5×10^{-4}
5	3,28	90	0,09	0,1	0,05	0,1	5×10^{-4}

*Calculado pela Equação (3.5).

3.1.3 - Cálculos auxiliares

Após a secagem de todas as amostras, a partir das dimensões e massa do meio fibroso, foram feitos alguns cálculos auxiliares para determinação de novos parâmetros, que são de suma importância para obtenção dos resultados e discussão do trabalho em questão.

- Massa de água

O cálculo da quantidade de água em cada meio fibroso (m_a) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de fibra inicial (m_o) e na massa de fibra seca (m_s), da seguinte forma:

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

- Teor de umidade em base seca

O cálculo do teor de umidade de cada corpo de prova (M) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de água do meio fibroso (m_a) e na massa do meio fibroso seco (m_s), da seguinte forma:

$$M = m_a/m_s. \quad (3.2)$$

- Teor de umidade adimensional

O cálculo do teor de umidade adimensional de cada corpo de prova (M^*) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor do teor de umidade (M), do teor de umidade inicial (M_o) e do teor de umidade de equilíbrio (M_{eq}), da seguinte forma:

$$M^* = (M - M_{eq})/(M_o - M_{eq}). \quad (3.3)$$

- Temperatura adimensional

O cálculo da temperatura adimensional de cada corpo de prova (T^*) e em cada tempo de medição, foi feito com base na temperatura no vértice do corpo de prova

(T), da temperatura inicial (T_0) e da temperatura de equilíbrio (T_{eq}), da seguinte forma:

$$T^* = (T - T_{eq}) / (T_0 - T_{eq}). \quad (3.4)$$

- Volume do meio fibroso

O cálculo do volume do meio fibroso (V), foi feito com base no valor das suas dimensões, comprimento ($2R_1$), largura ($2R_3$) e altura ($2R_2$) usando a seguinte equação:

$$V = 2R_1 \cdot 2R_2 \cdot 2R_3. \quad (3.5)$$

- Porosidade do meio fibroso

O cálculo da porosidade do meio fibroso (ϵ), foi feito usando a seguinte equação:

$$\epsilon = 1 - \frac{V_f}{V}, \quad (3.6)$$

onde V_f é o volume total das fibras e V é o volume do meio fibroso.

Figura 3.6 - Ilustração do processo de contagem das fibras de sisal da amostra seca à 80°C.



- Volume da fibra de sisal

O cálculo do volume da fibra de sisal, foi feito com base no valor das suas dimensões, comprimento (c) e diâmetro (d) usando a seguinte equação:

$$V_{\text{fibra}} = \frac{c \pi d^2}{4}. \quad (3.7)$$

Assim, com V_{fibra} e o número de fibras (Figura 3.6), obteve-se o volume total das fibras V_f .

3.1.4 - Tratamento estatístico dos dados

3.1.4.1 - Teor de umidade médio

A partir dos dados obtidos do teor de umidade e temperatura das fibras ao longo do processo de secagem, é possível verificar que no período inicial, as taxas de perda de umidade e temperatura são mais elevadas, requerendo do pesquisador a leitura destes dados em intervalos de tempo menores, podendo ser ampliado, à medida que o processo for se desenvolvendo. Sob o aspecto físico, esta metodologia é extremamente satisfatória, em virtude de possibilitar a descrição do fenômeno com grande precisão. É estatisticamente mais adequado realizar o ajuste de parâmetros a partir de uma distribuição uniforme de pontos ao longo do processo. Desta forma, propõe-se um ajuste dos dados experimentais do teor de umidade a uma equação exponencial com 3 termos e 6 parâmetros. A equação tem a forma:

$$\bar{M} = c_1 \exp(-k_1 t) + c_2 \exp(-k_2 t) + c_3 \exp(-k_3 t), \quad (3.8)$$

onde t é dado em minutos.

A estimativa dos parâmetros c_1 , c_2 , c_3 , k_1 , k_2 e k_3 da Equação (3.8) foi realizada utilizando o método numérico de Quasi-Newton empregando o “Software” Statistica®, com critério de convergência de 0,000099.

A escolha da forma da Equação (3.8) foi baseada nos trabalhos de Lima (1999), Nascimento (2002), Silva (2009) onde verificaram que equações exponenciais com

maior número de termos se ajustam muito bem aos dados experimentais da cinética de secagem.

3.1.4.2 - Temperatura superficial da fibra

Já os dados experimentais da temperatura, propõe-se um ajuste a uma equação logarítmica com 1 termo e 7 parâmetros. A equação tem a forma:

$$T = c_1 \log_2[(k_1 t + k_2)^{c_2} \cdot (k_3 t + k_4)^{c_3}], \quad (3.9)$$

onde t é dado em minutos.

A estimativa dos parâmetros c_1 , c_2 , c_3 , k_1 , k_2 , k_3 e k_4 da Equação (3.9) foi realizada utilizando o método numérico de Quasi-Newton empregando o “Software” Statistica®, com critério de convergência de 0,000099.

3.1.4.3 - Estimativa dos parâmetros da equação de equilíbrio

Considera-se a equação de equilíbrio como sendo a equação dada por:

$$M = \alpha + \sigma C - \beta T, \quad (3.10)$$

onde M é a quantidade de umidade absorvida por unidade de massa de fibra expressa em $\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{m.s.}}$, C é a concentração de vapor de água nos espaços vazios (interfibras) expressa em $\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$, T é a temperatura em $^{\circ}\text{C}$ e α , σ e β são constantes.

Pode-se ainda escrever a Equação (3.10) da seguinte forma:

$$M = a_1 + a_2 T, \quad (3.11)$$

onde $a_1 = \alpha + \sigma C$ e $a_2 = -\beta$.

Com os valores de T_{eq} e M_{eq} para cada condição experimental, fez-se um ajuste linear da Equação (3.11) aos dados experimentais, usando o método numérico de Quasi-Newton empregando o “Software” Statistica®, com critério de convergência de 0,000099, de onde obteve-se os valores de a_1 e a_2 .

Por outro lado, a Equação de Estado de Gás Ideal é dada por:

$$P = \rho_{\text{ar}} \cdot \bar{R} \cdot T, \quad (3.12)$$

onde P é a pressão atmosférica, ρ é a densidade, \bar{R} é a constante particular do gás (ar atmosférico) e T é a temperatura de secagem. Assim, pode-se determinar a densidade do ar no interior do meio fibroso como segue:

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{P}{\bar{R} \cdot T}. \quad (3.13)$$

Para calcular a concentração de vapor de água de equilíbrio do meio fibroso (entre as fibras), considera-se a seguinte fórmula:

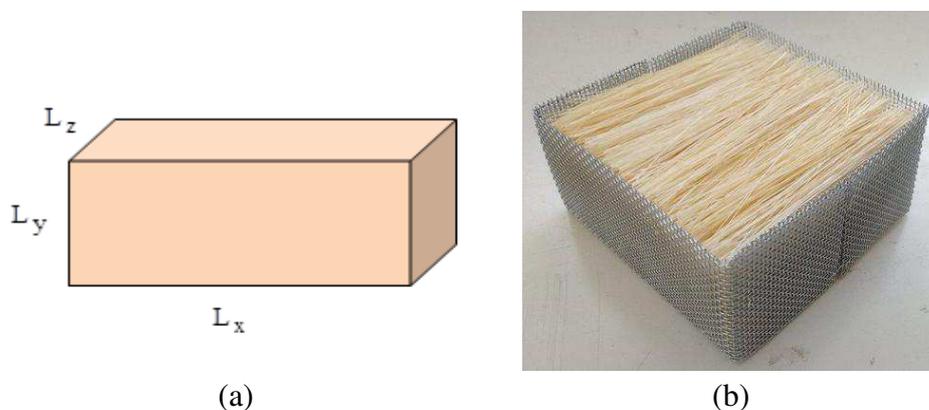
$$C_{\text{eq}} = \rho_{\text{ar}} \cdot UA, \quad (3.14)$$

onde ρ_{ar} é densidade do ar e UA é a umidade absoluta do ar nos espaços vazios, obtidos a partir da temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Assim, usando os dados de C_{eq} e M_{eq} para $T = 50$ e 90°C , e o valor de β obtido do ajuste, têm-se um sistema de equações com duas incógnitas, o que possibilita a obtenção do α e σ .

3.2 - Modelagem matemática

Toda a formulação matemática foi desenvolvida em uma região fibrosa na forma de um paralelepípedo, de acordo com a Figura 3.7.

Figura 3.7 - (a) Configuração geométrica do problema físico e (b) meio fibroso.



Fonte: Autoria própria.

3.2.1 - Equação de equilíbrio

Segundo Crank (1975), pode-se considerar sempre que a fibra entra em equilíbrio com sua vizinhança de forma imediata. Além disso, pode-se assumir a dependência linear da temperatura e do teor de umidade e escrever:

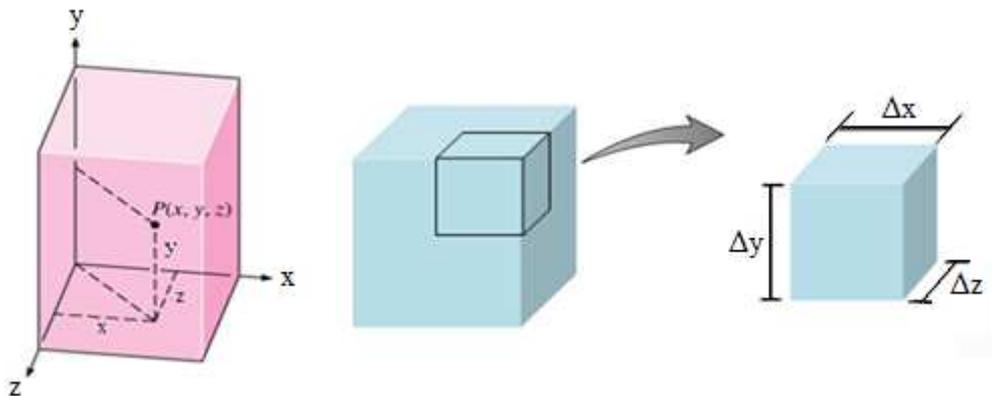
$$M = \alpha + \sigma C - \beta T, \quad (3.15)$$

onde M é a quantidade de umidade absorvida por unidade de massa de fibra, C é a concentração de vapor de água nos espaços vazios (interfibras) expresso em kgm^{-3} , T é a temperatura e α , σ e β são constantes. É apenas uma aproximação razoável sobre pequenos intervalos de umidade e temperatura.

3.2.2 - Equação de difusão de vapor

Considera-se um pequeno elemento de volume de um sólido poroso na forma de paralelepípedo (Figura 3.8). O meio poroso é constituído por uma série de fibras tramada rígida e inerte. O vapor de água é livre para difundir entre os espaços vazios da trama de fibra (interfibra), e para ser sorvido ou desorvido pela fibra. Além disso, pode-se desprezar as alterações no volume da trama de fibra devido a absorção/dessorção de umidade.

Figura 3.8 - Pequeno elemento de volume de um sólido fibroso na forma de paralelepípedo.



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Para descrever a concentração de vapor de água na trama de fibra ao longo do processo, considerou-se:

- que a difusão de vapor através dos espaços vazios e através das fibras é proporcional ao gradiente de concentração de forma habitual. A difusão através dos poros será, em muitos casos, maior do que através das fibras, mas mesmo assim, pode-se representar ambos os processos assumindo que o vapor na fibra está sempre em equilíbrio com o vapor do ar na vizinhança e que a isoterma de absorção é linear, dada pela Eq.(3.15);
- existência de absorção ou dessorção de umidade através dos espaços vazios no interior da fibra.

As equações de conservação de massa e de calor serão expressas em termos de um volume unitário da mistura ar-fibra. O vapor de água acumula-se no elemento de volume, tanto nos espaços vazios (interfibra), como nas fibras (intrafibra). Assim, pode-se escrever:

Quantidade líquida de vapor que entra no elemento de volume por difusão = Aumento da umidade do ar + Aumento da umidade na fibra	(3.16)
---	--------

Se uma fração ε do volume total da trama da fibra é ocupada pelo ar e $(1 - \varepsilon)$ pela fibra de densidade ρ_s , então o total acumulado no intervalo de tempo é descrito por:

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - \varepsilon)\rho_s \frac{\partial M}{\partial t}, \quad (3.17)$$

onde:

$\frac{\partial C}{\partial t}$ → é a taxa de concentração de vapor de água nos espaços vazios interfibra;

$\frac{\partial M}{\partial t}$ → é a taxa de concentração de vapor de água no estado adsorvido, na fibra (parte sólida).

ε → é a porosidade do meio fibroso;

ρ_s → é a densidade da fibra seca.

O transporte de massa por difusão é dado por:

$$\nabla \cdot (\varepsilon D' \nabla C), \quad (3.18)$$

onde D' é o coeficiente de difusão para umidade no ar. Observa-se que a difusão de umidade depende da concentração de vapor de água nos espaços vazios e na fibra. Assim, expressando a Equação (3.16) matematicamente, a equação diferencial que descreve o fenômeno de difusão de vapor é da forma:

$$\nabla \cdot (\varepsilon D' \nabla C) = \varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial M}{\partial t}. \quad (3.19)$$

Deve-se notar que D' não tem o valor numérico do coeficiente de difusão de vapor de água no ar, mas está relacionada com ele. No presente momento, não encontra-se na literatura, nenhuma teoria satisfatória que relaciona o coeficiente de difusão de um gás ou de vapor no interior de um corpo poroso com a porosidade e a estrutura do corpo. No entanto, D' pode ser prontamente determinado para uma dada estrutura a partir de medições de difusão de estado estacionário (CRANK, 1975; NORDON e DAVI, 1967).

É importante ressaltar que considera-se nesta pesquisa o fato de que a difusão não é ao longo de canais interconectados de ar em linha reta, mas através de uma matriz de fibras entrelaçadas e qualquer difusão ao longo das fibras pode-se admitir o coeficiente de difusão D' . Assim, para uma modelagem mais avançada, efeitos de tortuosidade e constritividade são essenciais.

3.2.3 - Equação de condução de calor

As alterações no fluxo de calor no elemento surgem a partir de vários processos: condução de calor para dentro ou para fora do elemento, a mudança de fase de vapor de água (de sorção ou dessorção), as mudanças de temperatura do sólido e da fase gasosa. A contribuição devida a última causa é pequena e irá ser desprezada.

Para determinar a taxa de variação de temperatura do elemento de volume da fibra, foi considerado:

- A condução de calor através do ar e das fibras;

- O calor liberado quando a umidade é absorvida pelas fibras.

Assim, pode-se escrever:

Aumento da energia interna na fibra = Valor líquido de calor por condução na entrada + Calor desenvolvido quando as fibras absorvem a umidade	(3.20)
---	--------

Expressando a Equação (3.20) matematicamente, a equação diferencial que descreve o fenômeno de difusão de calor é da forma:

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + h_s \rho \frac{\partial M}{\partial t}, \quad (3.21)$$

onde ρ é a densidade da fibra, c_p o seu calor específico à pressão constante, K é uma importante propriedade do material chamada condutividade térmica e h_s é a entalpia. Na Equação (3.21), usou-se a suposição que a energia do ar é insignificante em comparação com a da fibra.

Um ponto importante a ser observado é que, tanto a equação de vapor (3.19) como a equação da energia (3.21), envolvem M (umidade nas fibras). Isto evidencia que os dois processos, a transferência de umidade e a transferência de calor, são acoplados, desta forma, em geral, não se pode considerar um processo sem considerar o outro simultaneamente.

O valor médio da grandeza de interesse Φ pode ser obtido por uma média ponderada, usando o volume de cada volume de controle como o peso da ponderação (WHITAKER, 1980), ou seja:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{V} \int_V \Phi \, dV, \quad (3.22)$$

sendo $\Phi = C, T$, ou até mesmo M (Equação 3.15).

3.2.4 - Equação de difusão de vapor em coordenadas cartesianas tridimensional

- **Operador gradiente:** Considerando $\Phi = \Phi(\xi, \eta, \gamma)$, tem-se que em um sistema qualquer de coordenadas ortogonais o operador gradiente é dado por:

$$\nabla\Phi = \frac{1}{h_\xi} \frac{\partial\Phi}{\partial\xi} \hat{\xi} + \frac{1}{h_\eta} \frac{\partial\Phi}{\partial\eta} \hat{\eta} + \frac{1}{h_\gamma} \frac{\partial\Phi}{\partial\gamma} \hat{\gamma}, \quad (3.23)$$

onde $\hat{\xi}$, $\hat{\eta}$ e $\hat{\gamma}$ são, respectivamente, vetores unitários na direção dos eixos ξ , η e γ .

- **Coefficientes métricos:**

São dados por:

$$h_\xi = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \xi}\right)^2}; \quad (3.24a)$$

$$h_\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \eta}\right)^2}; \quad (3.24b)$$

$$h_\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \gamma}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \gamma}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \gamma}\right)^2}, \quad (3.24c)$$

onde $x = x(\xi, \eta, \gamma)$, $y = y(\xi, \eta, \gamma)$ e $z = z(\xi, \eta, \gamma)$.

➤ Divergente de uma função vetorial:

Considere a função vetorial $\vec{V}(\xi, \eta, \gamma) = V_\xi \hat{\xi} + V_\eta \hat{\eta} + V_\gamma \hat{\gamma}$. A forma geral do divergente da função vetorial em qualquer sistema de coordenadas ortogonais é dada por:

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{1}{h_\xi h_\eta h_\gamma} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (V_\xi h_\eta h_\gamma) + \frac{\partial}{\partial \eta} (V_\eta h_\xi h_\gamma) + \frac{\partial}{\partial \gamma} (V_\gamma h_\xi h_\eta) \right] \quad (3.25)$$

➤ **Coordenadas cartesianas:**

Considere $\xi \equiv x$, $\eta \equiv y$ e $\gamma \equiv z$. Assim, desde que $\Phi(x, y, z)$, tem-se que:

- $\frac{\partial x}{\partial x} = 1$, $\frac{\partial y}{\partial x} = 0$ e $\frac{\partial z}{\partial x} = 0$. Então, $h_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2} = 1$. (3.26)

- $\frac{\partial x}{\partial y} = 0$, $\frac{\partial y}{\partial y} = 1$ e $\frac{\partial z}{\partial y} = 0$. Então, $h_y = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} = 1$. (3.27)

- $\frac{\partial x}{\partial z} = 0$, $\frac{\partial y}{\partial z} = 0$ e $\frac{\partial z}{\partial z} = 1$. Então, $h_z = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial z}\right)^2} = 1$. (3.28)

O operador gradiente em coordenadas cartesianas é dado por:

$$\nabla\Phi = \frac{1}{h_x} \frac{\partial\Phi}{\partial x} \hat{i} + \frac{1}{h_y} \frac{\partial\Phi}{\partial y} \hat{j} + \frac{1}{h_z} \frac{\partial\Phi}{\partial z} \hat{k}, \quad (3.29)$$

o que implica,

$$\nabla\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial\Phi}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial\Phi}{\partial z} \hat{k}, \quad (3.30)$$

onde \hat{i} , \hat{j} e \hat{k} são os vetores unitários na direção x, y e z, respectivamente.

O divergente de uma função vetorial em coordenadas cartesianas é da forma:

$$\nabla \cdot \vec{V} = \left[\frac{\partial}{\partial x} (V_x) + \frac{\partial}{\partial y} (V_y) + \frac{\partial}{\partial z} (V_z) \right]. \quad (3.31)$$

Considere um sólido com distribuição de vapor $C = C(\xi, \eta, \gamma)$ e concentração de umidade $M = M(\xi, \eta, \gamma)$ em um sistema de coordenadas ortogonais tridimensional transiente. Assim, pode-se escrever:

$$\nabla C = \frac{\partial C}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial C}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial C}{\partial z} \hat{k}, \quad (3.32)$$

de onde segue,

$$D' \nabla C = D' \frac{\partial C}{\partial x} \hat{i} + D' \frac{\partial C}{\partial y} \hat{j} + D' \frac{\partial C}{\partial z} \hat{k}. \quad (3.33)$$

Logo, pode-se escrever:

$$\varepsilon \nabla \cdot (D' \nabla C) = \varepsilon \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D' \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D' \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D' \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right]. \quad (3.34)$$

Das Equações (3.19) e (3.34), obtém-se:

$$\varepsilon \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D' \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D' \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D' \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] = \varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial M}{\partial t}. \quad (3.35)$$

Considerando a Equação (3.15), segue-se que:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \sigma \frac{\partial C}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3.36)$$

Substituindo a Equação (3.36) na Equação (3.35), obtém-se:

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - \varepsilon) \rho_s \left(\sigma \frac{\partial C}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \varepsilon \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D' \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D' \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D' \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right], \quad (3.37)$$

ou seja,

$$\begin{aligned} [\varepsilon + (1 - \varepsilon) \rho_s \sigma] \frac{\partial C}{\partial t} &= \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon D' \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon D' \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon D' \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] + \\ &+ (1 - \varepsilon) \rho_s \beta \frac{\partial T}{\partial t}. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Considerando $S^C = (1 - \varepsilon)\rho_s \beta \frac{\partial T}{\partial t}$ como sendo o termo fonte da Equação (3.38) e $D = \varepsilon D'$, a equação de difusão de vapor em coordenadas cartesianas será dada por:

$$[\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] \frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] + S^C. \quad (3.39)$$

3.2.5 - Equação de condução de calor em coordenadas cartesianas tridimensional.

Considere um sólido tridimensional com distribuição de temperatura $T = T(x, y, z)$. De modo análogo à Equação (3.39), obtém-se a seguinte equação que descreve difusão de calor em coordenadas cartesianas:

$$\rho c_P \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + h_s \rho \frac{\partial M}{\partial t}. \quad (3.40)$$

Substituindo a Equação (3.36) na Equação (3.40), obtém-se:

$$\rho c_P \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + h_s \rho \left(\sigma \frac{\partial C}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \right), \quad (3.41)$$

ou seja,

$$\rho(c_P + h_s \beta) \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + h_s \rho \sigma \frac{\partial C}{\partial t}. \quad (3.42)$$

Considerando $S^T = h_s \rho \sigma \frac{\partial C}{\partial t}$ como sendo o termo fonte da equação acima, a equação de condução de calor em coordenadas cartesianas tridimensional será dada por:

$$\rho(c_P + h_s \beta) \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + S^T. \quad (3.43)$$

3.3 - Solução numérica da equação de difusão: Geometria na forma de paralelepípedo

Muitas vezes um problema difusivo é tão complexo e contém intensas equações não-lineares, que não é possível resolvê-lo através de soluções analíticas. No entanto, é possível resolvê-lo através de métodos numéricos. O método numérico consiste em substituir um domínio contínuo por um domínio discreto e a equação diferencial parcial é substituída por várias equações algébricas, uma para cada volume de controle. Uma das vantagens principais desse método é a possibilidade de poder encontrar soluções numéricas para a equação de difusão para as mais diversas situações, tais como: meio não-homogêneo e não-isotrópico, volume e difusividade variáveis e geometria qualquer (MALISKA, 2004).

São reportados na literatura vários métodos para solucionar a equação de difusão numericamente, tais como: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Volumes Finitos (MVF), entre outros.

O método dos volumes finitos não apresenta problemas de instabilidade ou convergência, garantindo que em cada volume discretizado, a propriedade em estudo obedeça à lei da conservação, dando uma característica conservativa. Ele é um dos mais utilizados na discretização de equações diferenciais parciais. Neste método trabalha-se com volumes de controle, havendo assim, conservação no nível de volumes finitos. Logo, o MVF é bastante utilizado na resolução de problemas envolvendo transferência de calor e/ou massa, e em mecânica dos fluidos (MALISKA, 2004).

Normalmente quando se utiliza um método numérico para resolver a equação de difusão, é possível estabelecer três formulações, de acordo com o tempo que é definido para representar a grandeza de interesse, ao se expressar as derivadas espaciais. As três possibilidades de interpolação no tempo são representadas pela seguinte expressão (MALISKA, 2004):

$$\Phi^\theta = \theta\Phi + (1 - \theta)\Phi^0, \quad (3.44)$$

onde θ é o fator peso da média ponderada. Se $\theta = 0$, tem-se a Formulação Explícita, se $0 < \theta < 1$ tem-se a Formulação Implícita (Crank-Nicolson) e se $\theta = 1$, tem-se a Formulação Totalmente Implícita.

Na Formulação Totalmente Implícita ($\theta = 1$) a variável de interesse para expressar as derivadas espaciais é avaliada no final do intervalo de tempo, caracterizando o acoplamento das equações. Conseqüentemente, tem-se que resolver um sistema de equações para cada intervalo de tempo. Uma importante vantagem dessa formulação consiste no fato dela ser incondicionalmente estável, para qualquer intervalo de tempo estipulado. Logo, pode-se avançar no tempo em intervalos sem um limite prefixo de magnitude. Assim, pode-se atingir o regime permanente dando um único salto no nível de tempo, atribuindo ao intervalo de tempo um valor suficientemente grande (MALISKA, 2004).

Neste trabalho, as equações que governam o problema, juntamente com suas condições de contorno, são resolvidas pelo método numérico dos volumes finitos. Neste método, qualquer quantidade contínua pode ser aproximada por um modelo discreto composto de um conjunto de funções contínuas em degraus ou lineares, definidas sob um número finito de subdomínios. Os subdomínios são chamados de volumes de controle e os pontos nodais de centróide do volume de controle.

No método de volumes finitos, a equação diferencial parcial que governa o fenômeno é discretizada numericamente através da integração da mesma em volumes elementares e no tempo, obtendo-se assim um sistema de equações algébricas, que devem ser resolvidas através de técnicas específicas. No contexto deste trabalho são apresentadas, a seguir, as soluções numéricas para equações de difusão escrita em coordenadas cartesianas, Equações (3.39) e (3.43), a serem utilizadas para descrever um processo difusivo em um sólido poroso na forma de um paralelepípedo.

- **Hipótese para a obtenção de solução numérica para a equação de difusão**

Para obter-se a solução numérica da equação de difusão para um paralelepípedo, o processo difusivo pressupõe as seguintes hipóteses:

- As propriedades termofísicas e mecânicas são constantes;
- O coeficiente de difusão é constante durante todo o processo de difusão;
- O sólido é homogêneo e isotrópico;
- Existe simetria nos planos centrais do sólido;
- O único mecanismo de transporte de água dentro do sólido é o mecanismo da difusão;

- Condições de contorno convectiva na superfície do sólido, com teor de umidade e temperatura dependendo da posição e do tempo;
- Os parâmetros de processo podem variar durante a difusão;
- O campo do teor de umidade e temperatura no interior do corpo é uniforme no início do processo;
- Os coeficientes de transferência de umidade e de calor convectivos são constantes para todas as faces do sólido.

- **Condições iniciais:**

$$C(x, y, z, t = 0) = C_0; \quad (\text{Transferência de massa}) \quad (3.45)$$

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0. \quad (\text{Transferência de calor}) \quad (3.46)$$

- **Condições de contorno para transferência de massa:**

$$-D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=R_1} = h_m (C - C_{eq}), \quad \forall (x = R_1, y, z, t > 0); \quad (3.47)$$

$$-D \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=R_2} = h_m (C - C_{eq}), \quad \forall (x, y = R_2, z, t > 0); \quad (3.48)$$

$$-D \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=R_3} = h_m (C - C_{eq}), \quad \forall (x, y, z = R_3, t > 0). \quad (3.49)$$

- **Condições de contorno para transferência de calor:**

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=R_1} = h_c (T - T_{eq}), \quad \forall (x = R_1, y, z, t > 0); \quad (3.50)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=R_2} = h_c (T - T_{eq}), \quad \forall (x, y = R_2, z, t > 0); \quad (3.51)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=R_3} = h_c (T - T_{eq}), \quad \forall (x, y, z = R_3, t > 0). \quad (3.52)$$

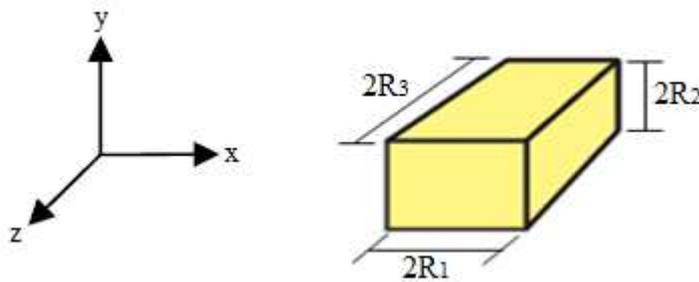
3.3.1 - Solução numérica para a equação de difusão de vapor: Geometria cartesiana tridimensional

A solução numérica da equação de difusão possibilita aproximar o modelo, objeto de estudo, para as condições físicas mais próximas da situação real, ou seja, pode-se eliminar restrições com relação à geometria, às propriedades termo-físicas e às dimensões do sólido.

A solução numérica da equação de difusão para um paralelepípedo foi obtida através do método numérico dos volumes finitos (MALISKA, 2004), considerando uma formulação totalmente implícita. Esta formulação foi escolhida porque não apresenta problemas de instabilidade ou de convergência, como já mencionado.

Com o objetivo de apresentar a solução numérica da equação de difusão de vapor, Equação (3.39), para um meio no qual a geometria é definida por um paralelepípedo, considera-se a representação geometria ilustrada na Figura 3.9.

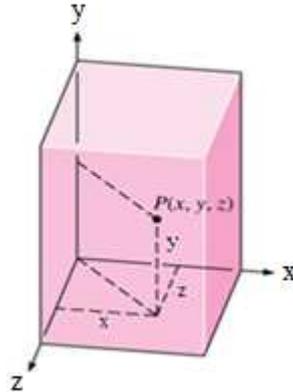
Figura 3.9 - Configuração geométrica do problema físico - Paralelepípedo.



Fonte: Autoria própria.

Para o sólido apresentado na Figura 3.9, com base na Equação (3.39), que representa a equação de difusão tridimensional aplicada à difusão de vapor em coordenadas cartesianas, tem-se que x , y e z definem a posição de um ponto no interior do sólido a ser estudado (Figura 3.10).

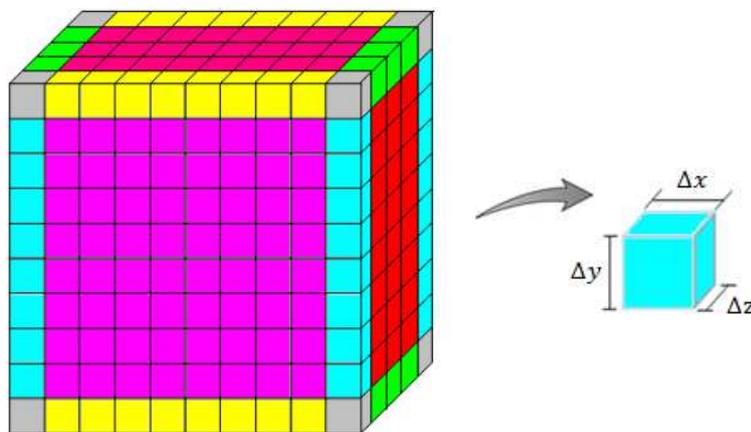
Figura 3.10 - Geometria cartesiana.



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Para resolver numericamente a Equação (3.39), é necessário definir os volumes de controle em que o balanço dos fluxos é expresso. Partindo do domínio contínuo, obtém-se o domínio discreto dividido numa malha com 27 tipos distintos de volume de controle, conforme se observa na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Domínio tridimensional discretizado com 27 tipos de volumes de controle.



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Analisando a Figura 3.11 pode-se observar que, no domínio tridimensional, temos uma malha cujos elementos (volumes de controle) possuem medidas Δx , Δy e Δz .

Aplicando o Método dos Volumes Finitos com uma formulação totalmente implícita para integrar a Equação (3.39) no espaço ($\Delta x \Delta y \Delta z$) e no tempo (Δt), obtém-se o seguinte resultado para um volume de controle P:

$$\begin{aligned}
& [\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] \int_{z_b}^{z_f} \int_{y_s}^{y_n} \int_{x_w}^{x_e} \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) dt dx dy dz = \\
& \int_t^{t+\Delta t} \int_{z_b}^{z_f} \int_{y_s}^{y_n} \int_{x_w}^{x_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) dx dy dz dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{z_b}^{z_f} \int_{x_w}^{x_e} \int_{\phi_b}^{\phi_f} \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right) dy dx dz dt + \\
& + \int_t^{t+\Delta t} \int_{y_s}^{y_n} \int_{x_w}^{x_e} \int_{z_b}^{z_f} \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) dz dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{z_b}^{z_f} \int_{y_s}^{y_n} \int_{x_w}^{x_e} S^C dx dy dz dt. \quad (3.53)
\end{aligned}$$

Logo, resolvendo as integrais, obtém-se

$$\begin{aligned}
& [\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] (C_P - C_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z = \left(D_e^C \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_e - D_w^C \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta y \Delta z \Delta t + \\
& + \left(D_n^C \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_n - D_s^C \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta x \Delta z \Delta t + \left(D_f^C \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_f - D_b^C \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_b \right) \Delta x \Delta y \Delta t + \\
& + S^C \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t. \quad (3.54)
\end{aligned}$$

Dividindo a Equação (3.54) por Δt , obtém-se:

$$\begin{aligned}
& [\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] \frac{(C_P - C_P^0)}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z = \left(D_e^C \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_e - D_w^C \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta y \Delta z + \\
& + \left(D_n^C \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_n - D_s^C \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta x \Delta z + \left(D_f^C \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_f - D_b^C \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_b \right) \Delta x \Delta y + S^C \Delta x \Delta y \Delta z, \quad (3.55)
\end{aligned}$$

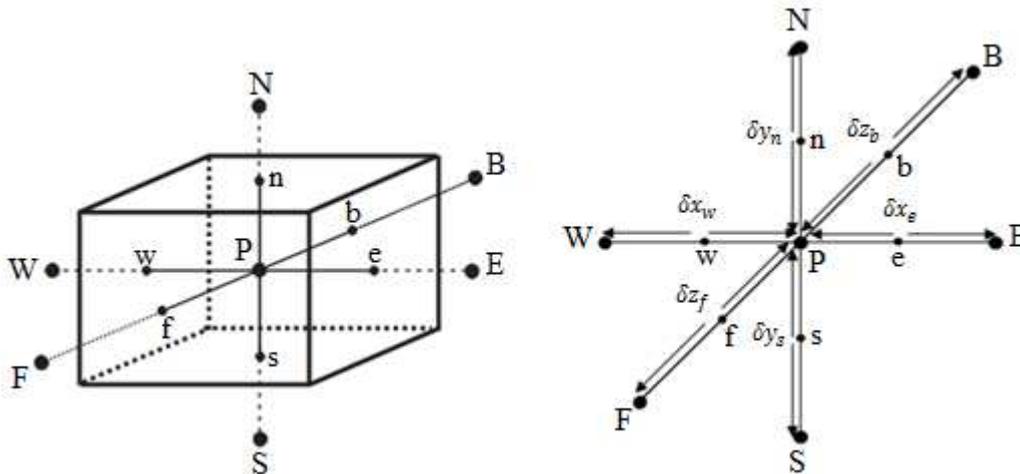
onde o sobrescrito zero significa que o termo deve ser avaliado no tempo t anterior ao tempo de interesse, enquanto que os termos sem sobrescrito são avaliados no tempo de

interesse. Os subscritos “e”, “w”, “n”, “s”, “f” e “b” significam as fronteiras leste, oeste, sul, norte, frente e atrás, respectivamente, de um volume de controle considerado, e P é o ponto nodal deste volume de controle (Figura 3.12).

3.3.1.1 - Discretização: Volumes Internos

Os volumes de controle internos possuem vizinhos ao norte, ao sul, a leste, a oeste, na frente e atrás, em virtude de não terem contato com o meio externo. Na Figura 3.12 é apresentado um volume de controle interno de ponto nodal P e seus vizinhos.

Figura 3.12 - Volume de controle interno de ponto nodal P e seus vizinhos ao norte (N), ao sul (S), a oeste (W), a leste (E), na frente (F) e atrás (B).



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Através de análise da Figura 3.12, obtém-se as seguintes derivadas da Equação (3.55):

$$\frac{\partial C}{\partial x}\Big|_e = \frac{C_E - C_P}{\delta x_e}, \quad \frac{\partial C}{\partial x}\Big|_w = \frac{C_P - C_W}{\delta x_w}, \quad \frac{\partial C}{\partial y}\Big|_n = \frac{C_N - C_P}{\delta y_n}, \quad \frac{\partial C}{\partial y}\Big|_s = \frac{C_P - C_S}{\delta y_s},$$

$$\frac{\partial C}{\partial z}\Big|_b = \frac{C_P - C_B}{\delta z_b} \quad \text{e} \quad \frac{\partial C}{\partial z}\Big|_f = \frac{C_F - C_P}{\delta z_f}. \quad (3.56a - f)$$

Substituindo as Equações de (3.56) na Equação (3.55), obtém-se:

$$\begin{aligned}
[\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] \frac{(C_P - C_P^0)}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z = & \left[D_e^c \left(\frac{C_E - C_P}{\delta x_e} \right) - D_w^c \left(\frac{C_P - C_W}{\delta x_w} \right) \right] \Delta y \Delta z + \\
+ & \left[D_n^c \left(\frac{C_N - C_P}{\delta y_n} \right) - D_s^c \left(\frac{C_P - C_S}{\delta y_s} \right) \right] \Delta x \Delta z + \left[D_f^c \left(\frac{C_F - C_P}{\delta z_f} \right) - D_b^c \left(\frac{C_P - C_B}{\delta z_b} \right) \right] \Delta x \Delta y + \\
& + S^c \Delta x \Delta y \Delta z.
\end{aligned} \tag{3.57}$$

Organizando os termos na Equação (3.57), tem-se para os volumes de controle internos a seguinte equação algébrica:

$$A_p C_P = A_e C_E + A_w C_W + A_n C_N + A_s C_S + A_f C_F + A_b C_B + B, \tag{3.58}$$

onde,

$$\begin{aligned}
A_p = & [\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + D_e^c \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_e} + D_w^c \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_w} + D_n^c \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_n} + \\
& + D_s^c \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_s} + D_f^c \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_f} + D_b^c \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_b},
\end{aligned} \tag{3.59}$$

$$A_e = D_e^c \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_e}, \tag{3.60}$$

$$A_w = D_w^c \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_w}, \tag{3.61}$$

$$A_n = D_n^c \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_n}, \tag{3.62}$$

$$A_s = D_s^c \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_s}, \tag{3.63}$$

$$A_f = D_f^c \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_f}, \tag{3.64}$$

$$A_b = D_b^c \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_b}, \tag{3.65}$$

$$B = [\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} C_p^0 + S^C \Delta x \Delta y \Delta z. \quad (3.66)$$

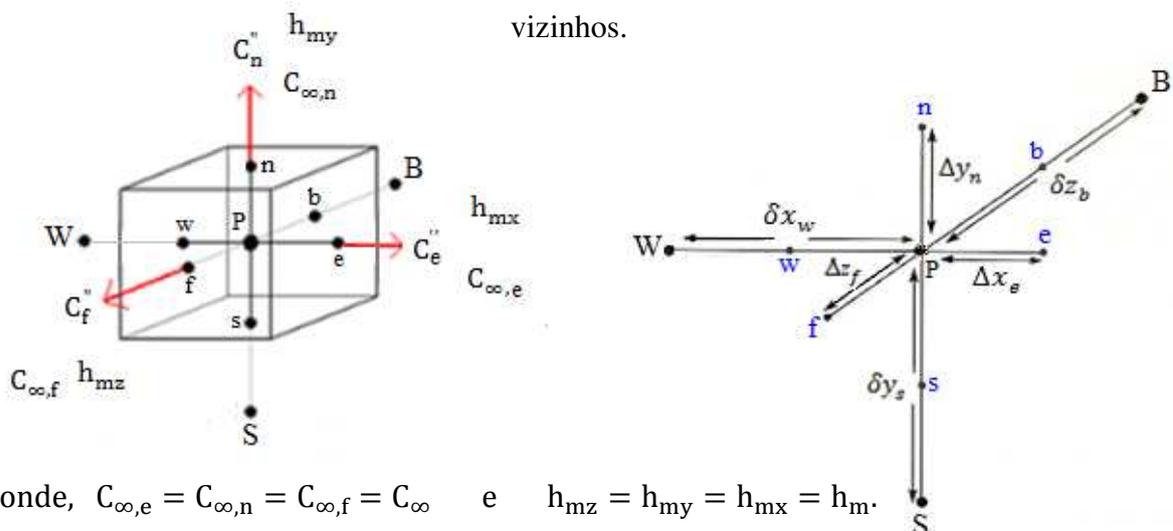
A Equação (3.58) possui importante significado físico. Os coeficientes A_e , A_w , A_n , A_s , A_f e A_b representam a condutância entre o ponto P e seus vizinhos. O termo C_p^0 representa a influência do valor da variável C no tempo anterior, sobre o seu valor no tempo atual. Nesta equação $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$, é o volume do elemento infinitesimal considerado na Figura 3.11.

A Equação (3.58) é aplicada em todos os pontos internos ao domínio computacional, exceto aos pontos de fronteira, onde as condições de contorno devem ser incorporadas na formulação. Neste caso usam-se os volumes adjacentes à superfície do corpo, denominados de volumes de controle de fronteira. Para tais volumes, precede-se a integração da equação de conservação, tal qual descrito anteriormente, considerando-se as condições de contorno existentes.

3.3.1.2 - Volume de controle na fronteira leste-norte-frente: condição de contorno convectiva

Na fronteira oeste-norte-frente, como pode ser observado na Figura 3.13, o volume de controle está em contato com o meio externo ao leste, ao norte e na frente, e com os vizinhos ao sul, ao oeste e atrás.

Figura 3.13 - Volume de controle no contorno leste (E) - norte (N) - frente (F) e seus vizinhos.



Fonte: Autoria própria.

A condição de contorno considerada para a discretização é a condição de contorno convectiva. Esta condição é estabelecida através da igualdade entre o fluxo interno (difusivo) no contorno do paralelepípedo e o fluxo externo (convectivo) nas vizinhanças deste contorno.

- **Condição de contorno leste (E)**

Sendo o fluxo difusivo a leste dado por:

$$C_e'' = -D_e^C \frac{C_e - C_P}{\Delta x_e}, \quad (3.67)$$

onde C_e é o valor de C no contorno leste.

Por outro lado, o fluxo convectivo a leste é expresso por:

$$C_e'' = h_{mx}(C_e - C_\infty), \quad (3.68)$$

onde h_{mx} é o coeficiente de transferência convectiva de massa na direção do eixo x. Considerando a condição de contorno convectiva, pode-se igualar as Equações (3.67) e (3.68) e obter:

$$C_e = \frac{h_{mx}C_\infty + \frac{D_e^C}{\Delta x_e}C_P}{\frac{D_e^C}{\Delta x_e} + h_{mx}}. \quad (3.69)$$

Substituindo a Equação (3.69) na Equação (3.68), obtém-se o seguinte fluxo por unidade de área no contorno leste:

$$C_e'' = \frac{(C_P - C_\infty)}{\frac{1}{h_{mx}} + \frac{\Delta x_e}{D_e^C}}, \quad (3.70)$$

Substituindo agora a Equação (3.70) na Equação (3.67), tem-se:

$$D_e^C \frac{C_e - C_P}{\Delta x_e} = \frac{(C_\infty - C_P)}{\frac{1}{h_{mx}} + \frac{\Delta x_e}{D_e^C}}, \quad (3.71)$$

- **Condição de contorno norte (N)**

Sendo o fluxo difusivo ao norte dado por:

$$C_n'' = -D_n^C \frac{C_n - C_P}{\Delta y_n}, \quad (3.72)$$

onde C_n é o valor de C no contorno norte.

Por outro lado, o fluxo convectivo ao norte é expresso por:

$$C_n'' = h_{my}(C_n - C_\infty), \quad (3.73)$$

onde h_{my} é o coeficiente de transferência convectiva de massa na direção do eixo y . Considerando a condição de contorno convectiva, pode-se igualar as Equações (3.72) e (3.73) e obter:

$$C_n = \frac{h_{my}C_\infty + \frac{D_n^C}{\Delta y_n} C_P}{\frac{D_n^C}{\Delta y_n} + h_{my}}. \quad (3.74)$$

Substituindo a Equação (3.74) na Equação (3.73), obtém-se o seguinte fluxo por unidade de área no contorno norte:

$$C_n'' = \frac{(C_P - C_\infty)}{\frac{1}{h_{my}} + \frac{\Delta y_n}{D_n^C}}. \quad (3.75)$$

Substituindo, agora, a Equação (3.75) na Equação (3.72), tem-se:

$$D_n^C \frac{C_n - C_P}{\Delta y_n} = \frac{(C_\infty - C_P)}{\frac{1}{h_{my}} + \frac{\Delta y_n}{D_n^C}}. \quad (3.76)$$

- **Condição de contorno frente (F)**

Sendo o fluxo difusivo ao norte dado por:

$$C_f'' = -D_f^C \frac{C_f - C_P}{\Delta z_f}, \quad (3.77)$$

onde C_f é o valor de C no contorno na frente.

Por outro lado, o fluxo convectivo na frente é expresso por:

$$C_f'' = h_{mz}(C_f - C_\infty), \quad (3.78)$$

onde h_{mz} é o coeficiente de transferência convectiva de massa na direção do eixo z . Considerando a condição de contorno convectiva, pode-se igualar as Equações (3.77) e (3.78) e obter:

$$C_f = \frac{h_{mz}C_\infty + \frac{D_f^C}{\Delta z_f}C_P}{\frac{D_f^C}{\Delta z_f} + h_{mz}}. \quad (3.79)$$

Substituindo a Equação (3.79) na Equação (3.78), obtém-se o seguinte fluxo por unidade de área no contorno na frente:

$$C_f'' = \frac{(C_P - C_\infty)}{\frac{1}{h_{mz}} + \frac{\Delta z_f}{D_f^C}}, \quad (3.80)$$

Substituindo agora a Equação (3.80) na Equação (3.77), tem-se:

$$D_f^C \frac{C_f - C_P}{\Delta z_f} = \frac{(C_\infty - C_P)}{\frac{1}{h_{mz}} + \frac{\Delta z_f}{D_f^C}}, \quad (3.81)$$

Assim, para esse volume de controle, a equação discretizada, usando a formulação totalmente implícita, pode ser escrita, a partir das Equações (3.55) e (3.56), do seguinte modo:

$$\begin{aligned}
[\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] \frac{(C_P - C_P^0)}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z &= \left[D_e^C \left(\frac{C_e - C_P}{\Delta x_e} \right) - D_w^C \left(\frac{C_P - C_W}{\delta x_w} \right) \right] \Delta y \Delta z + \\
+ \left[D_n^C \left(\frac{C_n - C_P}{\Delta y_n} \right) - D_s^C \left(\frac{C_P - C_S}{\delta y_s} \right) \right] \Delta x \Delta z &+ \left[D_f^C \left(\frac{C_f - C_P}{\Delta z_f} \right) - D_b^C \left(\frac{C_P - C_B}{\delta z_b} \right) \right] \Delta x \Delta y + \\
&+ S^C \Delta x \Delta y \Delta z .
\end{aligned} \tag{3.82}$$

Agora, substituindo as Equações (3.71), (3.76) e (3.81) na Equação (3.82), obtém-se:

$$\begin{aligned}
[\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] \frac{(C_P - C_P^0)}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z &= \left[\frac{(C_\infty - C_P)}{\frac{1}{h_{mx}} + \frac{\Delta x_e}{D_e^C}} - D_w^C \left(\frac{C_P - C_W}{\delta x_w} \right) \right] \Delta y \Delta z + \\
+ \left[\frac{(C_\infty - C_P)}{\frac{1}{h_{my}} + \frac{\Delta y_n}{D_n^C}} - D_s^C \left(\frac{C_P - C_S}{\delta y_s} \right) \right] \Delta x \Delta z &+ \left[\frac{(C_\infty - C_P)}{\frac{1}{h_{mz}} + \frac{\Delta z_f}{D_f^C}} - D_b^C \left(\frac{C_P - C_B}{\delta z_b} \right) \right] \Delta x \Delta y + \\
&+ S^C \Delta x \Delta y \Delta z .
\end{aligned} \tag{3.83}$$

Organizando os termos na Equação (3.83), tem-se para os volumes de controle na fronteira oeste-norte-frente a seguinte equação algébrica:

$$A_p C_P = A_w C_W + A_s C_S + A_b C_B + B, \tag{3.84}$$

onde,

$$\begin{aligned}
A_p &= [\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{\Delta y \Delta z}{\frac{1}{h_{mx}} + \frac{\Delta x_e}{D_e^C}} + D_w^C \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_w} + \frac{\Delta x \Delta z}{\frac{1}{h_{my}} + \frac{\Delta y_n}{D_n^C}} + \\
&+ D_s^C \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_s} + \frac{\Delta x \Delta y}{\frac{1}{h_{mz}} + \frac{\Delta z_f}{D_f^C}} + D_b^C \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_b},
\end{aligned} \tag{3.85}$$

$$A_w = D_w^c \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_w}, \quad (3.86)$$

$$A_s = D_s^c \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_s}, \quad (3.87)$$

$$A_b = D_b^c \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_b}, \quad (3.88)$$

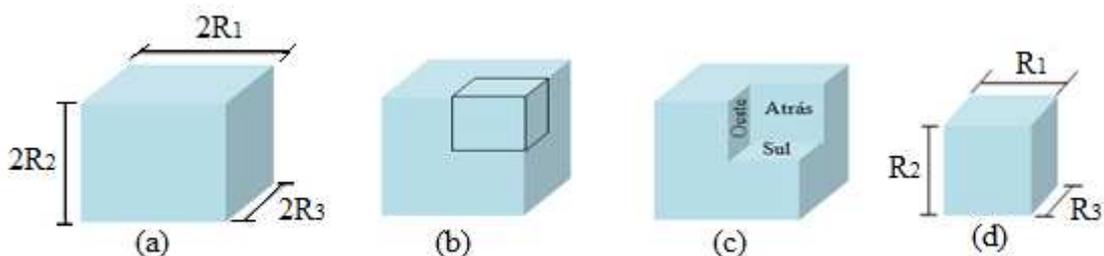
$$B = [\varepsilon + (1 - \varepsilon)\rho_s \sigma] \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} C_P^0 + \frac{\Delta y \Delta z}{\frac{1}{h_{mx}} + \frac{\Delta x_e}{D_e^c}} C_\infty + \frac{\Delta x \Delta z}{\frac{1}{h_{my}} + \frac{\Delta y_n}{D_n^c}} C_\infty + \frac{\Delta x \Delta y}{\frac{1}{h_{mz}} + \frac{\Delta z_f}{D_f^c}} C_\infty + S^c \Delta x \Delta y \Delta z. \quad (3.89)$$

De modo análogo, pode-se determinar as equações discretizadas, na forma algébrica, para os outros volumes de controle.

3.3.1.3 - O uso da simetria

Devido à forma geométrica do paralelepípedo ser regular, pode-se utilizar a condição de simetria e resolver numericamente o problema difusivo apenas para uma parte simétrica da malha, como por exemplo, estudar somente a fatia ilustrada na Figura 3.14 (d) para resolver a equação de difusão.

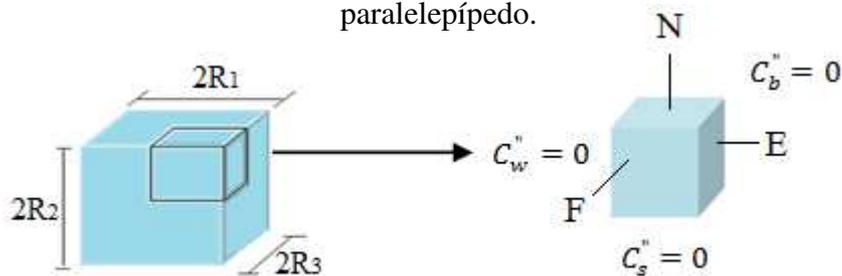
Figura 3.14 - Esquema utilizado para explorar a condição de simetria inerente ao paralelepípedo: (a) domínio; (b) e (c) destaque para 1/8 do paralelepípedo; (d) novo domínio.



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Para o novo domínio em estudo (Figura 3.14 (d)), por exemplo, considerando à condição de simetria, obtém-se que o fluxo nas fronteiras oeste, atrás e ao sul, é igual a zero, ou seja, $C_w'' = 0$, $C_b'' = 0$ e $C_s'' = 0$ (Figura 3.15).

Figura 3.15 - Esquema utilizado para explorar a condição de simetria inerente ao paralelepípedo.



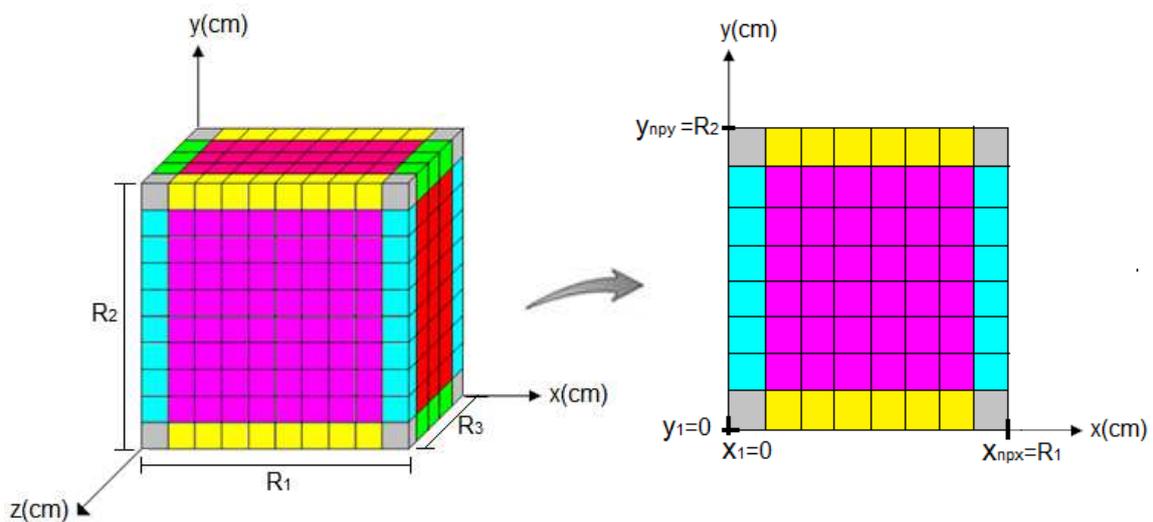
Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Consequentemente, para a discretização proposta, com condição de contorno do terceiro tipo, basta impor $h_{mw} = h_{mb} = h_{ms} = 0$, (onde $h_{mw} = h_{mb} = h_{ms} = h_m$).

3.3.1.4 - Geração da malha

A posição dos pontos nodais no interior do domínio foi obtida a partir das seguintes considerações (Figura 3.16):

Figura 3.16 - Esquema utilizado para simulação.



Fonte: Autoria própria

$$\triangleright x_i = y_j = z_k = 0 \quad \text{para } i = j = k = 1. \quad (3.90)$$

$$\triangleright \begin{cases} x_i = \frac{\Delta x}{2}, & \text{para } i = 2; \\ x_i = x_{i-1} + \Delta x, & \text{para } i = 3, \dots, \text{np}x - 1; \\ x_i = R_1, & \text{para } i = \text{np}x. \end{cases} \quad (3.91a - c)$$

$$\triangleright \begin{cases} y_j = \frac{\Delta y}{2}, & \text{para } j = 2; \\ y_j = y_{j-1} + \Delta y, & \text{para } j = 3, \dots, \text{np}y - 1; \\ y_j = R_2, & \text{para } j = \text{np}y. \end{cases} \quad (3.92a - c)$$

$$\triangleright \begin{cases} z_k = \frac{\Delta z}{2}, & \text{para } k = 2; \\ z_k = x_{k-1} + \Delta x, & \text{para } k = 3, \dots, \text{np}z - 1; \\ z_k = R_1, & \text{para } k = \text{np}z, \end{cases} \quad (3.93a - c)$$

onde $\text{np}x$, $\text{np}y$ e $\text{np}z$ correspondem ao número de partições da malha com relação aos eixos x , y e z , respectivamente.

3.3.1.5 - Parâmetro D^C

A discretização da equação de difusão requer o conhecimento dos valores de D^C não apenas no ponto nodal, mas nas faces leste, oeste, norte, sul, frente e atrás de cada volume de controle. No caso de D^C ser constante, o valor é o mesmo para todas as faces do volume de controle, caso contrário, deve-se determinar seu valor para todas as faces de cada volume de controle.

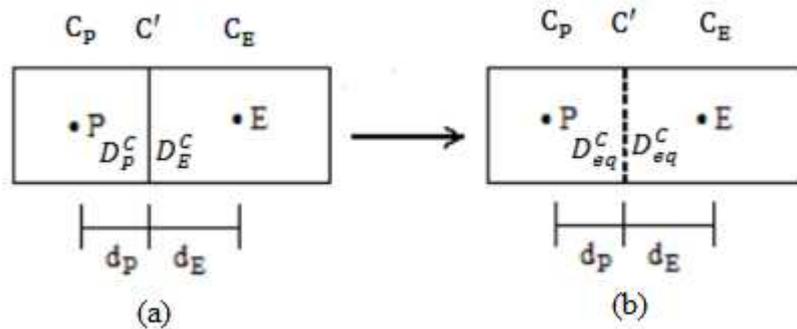
O parâmetro D^C para os pontos nodais, pode ser calculado através de uma relação apropriada entre tal parâmetro e a variável dependente C (SILVA, C., 2010; FARIAS, 2011), da seguinte forma:

$$D^C = f(C, a, b), \quad (3.94)$$

onde “a” e “b” são parâmetros que ajustam a solução numérica aos dados experimentais, sendo determinados por otimização.

Já no caso das interfaces dos volumes de controle, por exemplo, na interface “e”, a estimativa de seu valor em uma face comum a dois volumes de controle pode ser feita tomando como base a Figura 3.17. A parte (a) dessa figura apresenta um volume de controle P e o seu vizinho a leste (E), e cada um dos dois tem um valor específico para o coeficiente de transporte: D_P^C e D_E^C , respectivamente. A parte (b) da Figura 3.11 apresenta um domínio equivalente, com coeficiente de transporte constante e igual a D_{eq}^C para os dois volumes de controle.

Figura 3.17 - Dois volumes de controle com coeficientes de transporte D_P^C e D_E^C .



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

O valor de D_{eq}^C é o valor equivalente da propriedade em todo o domínio da Figura 3.17 (b). Portanto, é o valor de D^C na face comum entre P e E, ou seja, $D_{eq}^C = D_e^C$. Tal valor é dado por:

$$D_{eq}^C = \frac{D_E^C D_P^C}{(1 - f_d)D_P^C + f_d D_E^C}, \quad (3.95)$$

onde,

$$f_d = \frac{d_P}{d_P + d_E}, \quad (3.96)$$

em que d_P e d_E são as distâncias da interface “e” aos pontos nodais P e E, respectivamente.

Considerando uma malha uniforme, temos que $f_d = 1/2$, já que nesse caso $d_P = d_E$, a Equação (3.95) resulta em:

$$D_{eq}^C = \frac{2 D_E^C D_P^C}{D_E^C + D_P^C}, \quad (3.97)$$

onde D_E^C e D_P^C são os valores do parâmetro D^C nos pontos nodais E e P, respectivamente e $D_{eq}^C = D_e^C$ é o valor de D^C na face comum entre P e E.

A importância das Equações (3.94) e (3.97) é decorrente do fato que na discretização da equação de difusão, pode-se considerar a difusividade tanto constante quanto variável. Para as interfaces oeste, norte e sul, expressões similares à expressão da Equação (3.97) são também usadas para cada volume de controle. Também é importante destacar que essa expressão é válida para malha uniforme.

Observa-se que a Equação (3.97) tanto é válida para D^C variável, como também para D^C constante. Neste caso, considerando $D_E^C = D^C$ e $D_P^C = D^C$, a equação resulta em $D_e^C = D^C$. Além disso, nota-se que sendo D^C constante, os coeficientes A_k das Equações (3.58) e (3.84) são calculados somente uma vez. Por outro lado, o coeficiente B é calculado em cada passo de tempo, pois o valor de B depende da concentração C_p^0 , que tem um valor diferente em cada passo de tempo, para cada volume de controle. Já no caso do parâmetro D^C ser variável, os coeficiente A_k devem ser calculados em cada passo de tempo, devido a não-linearidades causadas pela variação no parâmetro D^C . Neste caso, um refinamento adequado no tempo é necessário, de modo que os erros devido às não-linearidades possam ser minimizados.

Para volumes de controle nos contornos, o valor de D^C não pode ser determinado pela Equação (3.97) (ou equações similares). Consequentemente, tal valor pode ser determinado igual ao valor deste parâmetro no ponto nodal do respectivo volume de controle (PATANKAR, 1980; SILVA, W. 2009; SILVA, C., 2010).

3.3.1.6 - Valor médio de C

O valor médio de C pode ser obtido por uma média ponderada, usando o volume de cada volume de controle como o peso da ponderação (Equação 3.22), ou seja:

- **Domínio Contínuo:**

$$\bar{C} = \frac{1}{V} \int_V C \, dV, \quad (3.98)$$

- **Domínio Discretizado:**

$$\bar{C} = \frac{1}{V} \sum_{i=2}^{npx-1} \sum_{j=2}^{npy-1} \sum_{k=2}^{npz-1} C_{ijk} \Delta V'_{ijk}, \quad (3.99)$$

com

$$V = \sum_{i=2}^{npx-1} \sum_{j=2}^{npy-1} \sum_{k=2}^{npz-1} \Delta V'_{ijk} , \quad (3.100)$$

onde V é o volume do sólido, i, j e k definem a posição do ponto nodal do volume de controle, $\Delta V'_{ijk}$ é o valor do volume deste volume elementar, $npx-2, npy-2$ e $npz-2$ definem o número de volumes de controle ao longo das arestas x, y e z , respectivamente. No caso, de uma malha uniforme, tem-se:

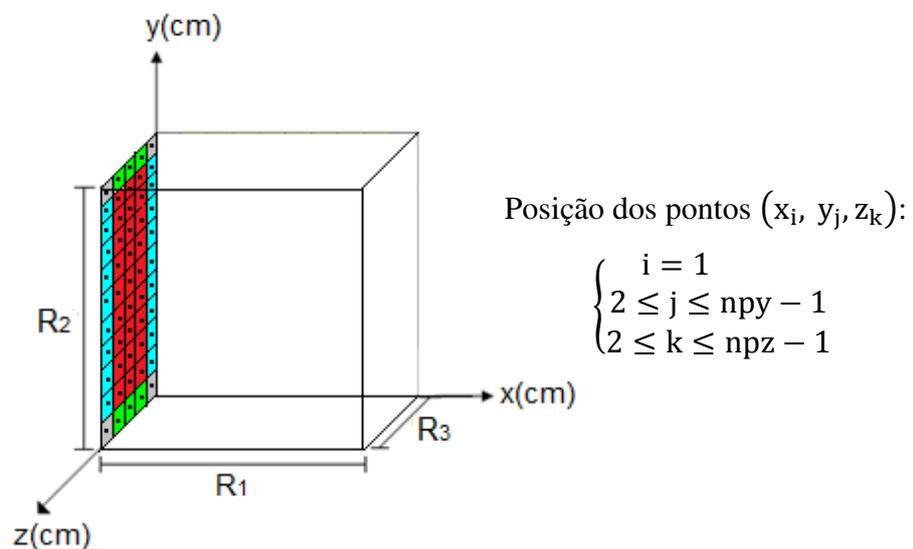
$$\Delta V'_{ijk} = \Delta x \Delta y \Delta z. \quad (3.101)$$

3.3.1.7 - Estimativa dos pontos externos na superfície

Os pontos de simetria não entram no conjunto de equações a serem resolvidos. Após o sistema de equações ter sido resolvido, sua estimativa é feita. Assim, assume-se que o fluxo de C (transferência de massa) que sai do ponto adjacente ao ponto de simetria é igual ao fluxo de C que chega neste ponto. Então pode-se escrever:

- a) Para os pontos situados na face externa esquerda - oeste ($x = 0, y, z$), ($0 < y < R_2$), ($0 < z < R_3$) (Ver Figura 3.18).

Figura 3.18 - Representação do esquema utilizado para simulação da face esquerda.



Fonte: Autoria própria.

Considera-se

$$-D^C \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_w = -D^C \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_e. \quad (3.102)$$

Na forma discretizada, têm-se:

$$-D_w^C \frac{(C_P - C_w)}{\Delta x_w} = -D_e^C \frac{(C_E - C_P)}{\delta x_e}, \quad (3.103)$$

ou ainda:

$$C_w = \left(\frac{D_e^C}{\delta x_e} \cdot \frac{\Delta x_w}{D_w^C} + 1 \right) C_P - \frac{D_e^C}{\delta x_e} \cdot \frac{\Delta x_w}{D_w^C} C_E. \quad (3.104)$$

- b) Para os pontos situados na face externa inferior - sul ($x, y = 0, z$),
($0 < x < R_1$), ($0 < z < R_3$).

$$-D^C \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_s = -D^C \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_n. \quad (3.105)$$

Na forma discretizada, têm-se:

$$-D_s^C \frac{(C_P - C_s)}{\Delta y_s} = -D_n^C \frac{(C_N - C_P)}{\delta y_n}, \quad (3.106)$$

ou ainda:

$$C_s = \left(\frac{D_n^C}{\delta y_n} \cdot \frac{\Delta y_s}{D_s^C} + 1 \right) C_P - \frac{D_n^C}{\delta y_n} \cdot \frac{\Delta y_s}{D_s^C} C_N. \quad (3.107)$$

- c) Para os pontos situados na face externa traseira - atrás ($x, y, z = 0$),
($0 < x < R_1$), ($0 < y < R_2$).

$$-D^C \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_b = -D^C \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_f. \quad (3.108)$$

Na forma discretizada, têm-se:

$$-D_b^C \frac{(C_P - C_b)}{\Delta z_b} = -D_f^C \frac{(C_F - C_P)}{\delta z_f}, \quad (3.109)$$

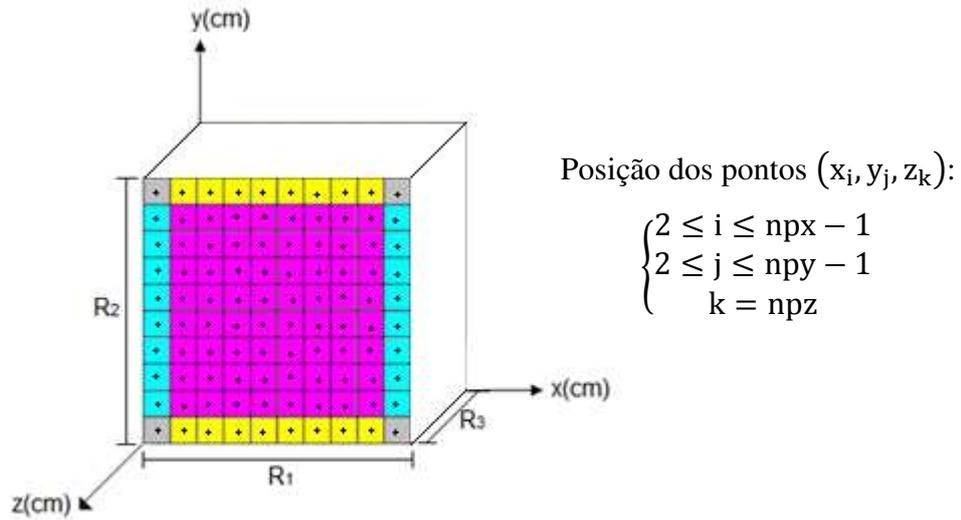
ou ainda:

$$C_b = \left(\frac{D_f^C}{\delta z_f} \cdot \frac{\Delta z_b}{D_b^C} + 1 \right) C_P - \frac{D_f^C}{\delta z_f} \cdot \frac{\Delta z_b}{D_b^C} C_F. \quad (3.110)$$

Para os pontos situados na superfície do material (faces do paralelepípedo), após a discretização da equação da condição de contorno na superfície, o valor da variável de interesse pode ser calculado por:

- a) Para os pontos situados na face externa frontal - frente ($x, y, z = R_3$), ($0 < x < R_1$), ($0 < y < R_2$), (Ver Figura 3.19).

Figura 3.19 - Representação do esquema utilizado para simulação da face frontal.



Fonte: Autoria própria.

Considera-se

$$-D^C \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_f = h_{mz} (C - C_{eq}) \Big|_f \quad (3.111)$$

Na forma discretizada, têm-se:

$$-D_f^C \frac{(C_f - C_p)}{\Delta z_f} = h_{mz}(C_f - C_\infty), \quad (3.112)$$

ou ainda:

$$C_f = \frac{C_p}{1 + h_{mz} \cdot \frac{\Delta z_f}{D_f^C}} + \frac{C_\infty}{1 + \frac{D_f^C}{h_{mz} \cdot \Delta z_f}}. \quad (3.113)$$

b) Para os pontos situados na face externa direita - leste ($x = R_1$, y , z), ($0 < y < R_2$), ($0 < z < R_3$).

$$-D^C \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_e = h_{mx}(C - C_{eq}) \Big|_e \quad (3.114)$$

Na forma discretizada, têm-se:

$$-D_e^C \frac{(C_e - C_p)}{\Delta x_e} = h_{mx}(C_e - C_\infty), \quad (3.115)$$

ou ainda:

$$C_e = \frac{C_p}{1 + h_{mx} \cdot \frac{\Delta x_e}{D_e^C}} + \frac{C_\infty}{1 + \frac{D_e^C}{h_{mx} \cdot \Delta x_e}}. \quad (3.116)$$

c) Para os pontos situados na face externa superior - norte (x , $y = R_2$, z), ($0 < x < R_1$), ($0 < z < R_3$).

$$-D^C \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_n = h_{my}(C - C_{eq}) \Big|_n \quad (3.117)$$

Na forma discretizada, têm-se:

$$-D_n^C \frac{(C_n - C_p)}{\Delta y_n} = h_{my}(C_n - C_\infty), \quad (3.118)$$

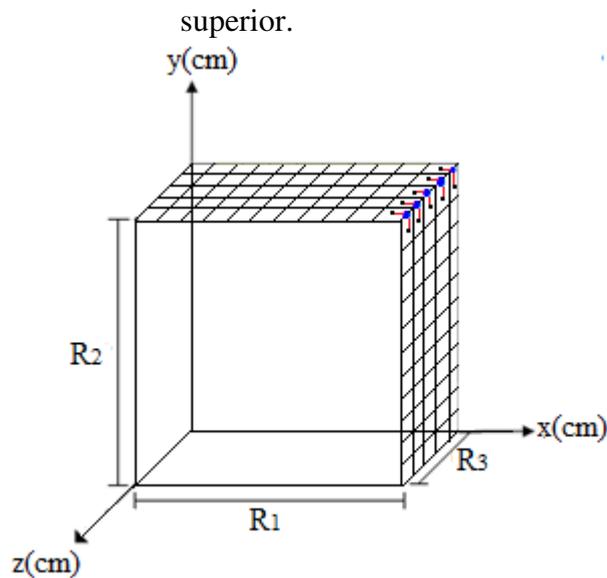
ou ainda:

$$C_n = \frac{C_P}{1 + h_{my} \cdot \frac{\Delta y_n}{D_n^C}} + \frac{C_\infty}{1 + \frac{D_n^C}{h_{my} \cdot \Delta y_n}}. \quad (3.119)$$

Para os pontos situados na superfície do material (arestas do paralelepípedo), o valor da variável de interesse pode ser calculado por:

- a) Para os pontos situados na aresta direita superior ($x = R_1$, $y = R_2$, z), ($0 < z < R_3$), (ver Figura 3.20).

Figura 3.20 - Representação do esquema utilizado para simulação da aresta direita superior.



Fonte: Autoria própria.

Considera-se

$$C_P(np_x, np_y, k) = \frac{C_P(np_x, np_y - 1, k) + C_P(np_x - 1, np_y, k)}{2}, \quad (3.120)$$

onde $2 \leq k \leq np_z - 1$.

- b) Para os pontos situados na aresta direita inferior ($x = R_1$, $y = 0$, z), ($0 < z < R_3$).

$$C_P(np_x, 1, k) = \frac{C_P(np_x, 2, k) + C_P(np_x - 1, 1, k)}{2}, \quad (3.121)$$

onde $2 \leq k \leq npz - 1$.

- c) Para os pontos situados na aresta esquerda superior ($x = 0, y = R_2, z$), ($0 < z < R_3$).

$$C_P(1, npy, k) = \frac{C_P(2, npy, k) + C_P(1, npy - 1, k)}{2}, \quad (3.122)$$

onde $2 \leq k \leq npz - 1$.

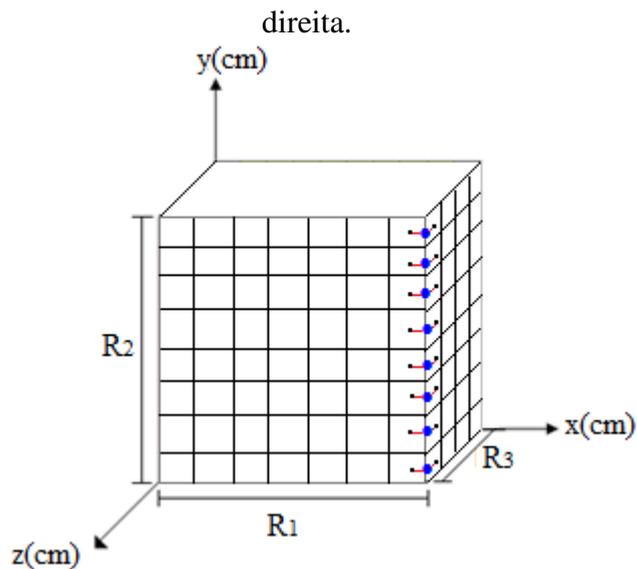
- d) Para os pontos situados na aresta esquerda inferior ($x = 0, y = 0, z$), ($0 < z < R_3$).

$$C_P(1, 1, k) = \frac{C_P(1, 2, k) + C_P(2, 1, k)}{2}, \quad (3.123)$$

onde $2 \leq k \leq npz - 1$.

- e) Para os pontos situados na aresta frontal direita ($x = R_1, y, z = R_3$), ($0 < y < R_2$), (Ver Figura 3.21).

Figura 3.21 - Representação do esquema utilizado para simulação da aresta frontal direita.



Fonte: Autoria própria.

Considera-se

$$C_P(\text{np}x, j, \text{np}z) = \frac{C_P(\text{np}x, j, \text{np}z - 1) + C_P(\text{np}x - 1, j, \text{np}z)}{2}, \quad (3.124)$$

onde $2 \leq j \leq \text{np}y - 1$.

- f) Para os pontos situados na aresta frontal esquerda ($x = 0, y, z = R_3$),
($0 < y < R_2$).

$$C_P(1, j, \text{np}z) = \frac{C_P(1, j, \text{np}z - 1) + C_P(2, j, \text{np}z)}{2}, \quad (3.125)$$

onde $2 \leq j \leq \text{np}y - 1$.

- g) Para os pontos situados na aresta traseira esquerda ($x = 0, y, z = 0$),
($0 < y < R_2$).

$$C_P(1, j, 1) = \frac{C_P(1, j, 2) + C_P(2, j, 1)}{2}, \quad (3.126)$$

onde $2 \leq j \leq \text{np}y - 1$.

- h) Para os pontos situados na aresta traseira direita ($x = R_1, y, z = 0$),
($0 < y < R_2$).

$$C_P(\text{np}x, j, 1) = \frac{C_P(\text{np}x, j, 2) + C_P(\text{np}x - 1, j, 1)}{2}, \quad (3.127)$$

onde $2 \leq j \leq \text{np}y - 1$.

- i) Para os pontos situados na aresta frontal superior $(x, y = R_2, z = R_3)$,
 $(0 < x < R_1)$.

$$C_P(i, npy, npz) = \frac{C_P(i, npy, npz - 1) + C_P(i, npy - 1, npz)}{2}, \quad (3.128)$$

onde $2 \leq i \leq npz - 1$.

- j) Para os pontos situados na aresta frontal inferior $(x, y = 0, z = R_3)$,
 $(0 < x < R_1)$.

$$C_P(i, 1, npz) = \frac{C_P(i, 1, npz - 1) + C_P(i, 2, npz)}{2}, \quad (3.129)$$

onde $2 \leq i \leq npz - 1$.

- k) Para os pontos situados na aresta traseira superior $(x, y = R_2, z = 0)$,
 $(0 < x < R_1)$.

$$C_P(i, npy, 1) = \frac{C_P(i, npy, 2) + C_P(i, npy - 1, 1)}{2}, \quad (3.130)$$

onde $2 \leq i \leq npz - 1$.

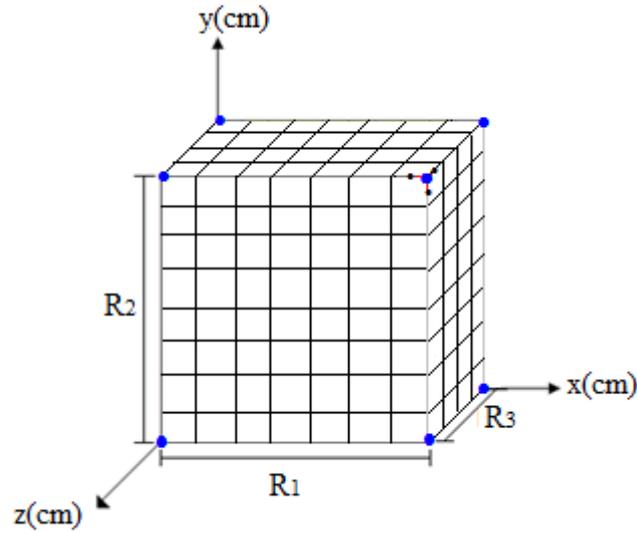
- l) Para os pontos situados na aresta traseira inferior $(x, y = 0, z = 0)$,
 $(0 < x < R_1)$.

$$C_P(i, 1, 1) = \frac{C_P(i, 1, 2) + C_P(i, 2, 1)}{2}, \quad (3.131)$$

onde $2 \leq i \leq npz - 1$.

Para os pontos situados na superfície do material (vértices do paralelepípedo),
(ver Figura 3.22).

Figura 3.22 - Representação do esquema utilizado para simulação dos vértices.



Fonte: Autoria própria.

O valor da variável de interesse pode ser calculado por:

$$a) C_P(np_x, 1, np_z) = \frac{C_P(np_x, 1, np_z - 1) + C_P(np_x - 1, 1, np_z) + C_P(np_x, 2, np_z)}{3},$$

onde $(x = R_1, y = 0, z = R_3)$. (3.132)

$$b) C_P(np_x, 1, 1) = \frac{C_P(np_x, 2, 1) + C_P(np_x - 1, 1, 1) + C_P(np_x, 1, 2)}{3},$$

onde $(x = R_1, y = 0, z = 0)$. (3.133)

$$c) C_P(np_x, np_y, 1) = \frac{C_P(np_x, np_y - 1, 1) + C_P(np_x - 1, np_y, 1) + C_P(np_x, np_y, 2)}{3},$$

onde $(x = R_1, y = R_2, z = 0)$. (3.134)

$$d) C_P(np_x, np_y, np_z) =$$

$$= \frac{C_P(np_x, np_y - 1, np_z) + C_P(np_x - 1, np_y, np_z) + C_P(np_x, np_y, np_z - 1)}{3},$$

onde $(x = R_1, y = R_2, z = R_3)$. (3.135)

Estas equações não entram no sistema de equações a ser resolvido, servindo apenas para determinar o valor de C na superfície do sólido em estudo, uma vez conhecido o seu valor nos pontos de fronteira.

3.3.2 - Solução numérica para a equação de condução de calor: Geometria cartesiana tridimensional.

Com o objetivo de apresentar a solução numérica da Equação de Difusão de Calor, Equação (3.43), para um meio no qual a geometria é definida por um paralelepípedo, a mesma foi integrada no espaço ($\Delta x \Delta y \Delta z$) e no tempo (Δt), obtendo-se o seguinte resultado para um volume de controle P:

$$\int_{z_b}^{z_f} \int_{y_s}^{y_n} \int_{x_w}^{x_e} \int_t^{t+\Delta t} \left(\rho(c_p + h_s \beta) \frac{\partial T}{\partial t} \right) dt dx dy dz =$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{z_b}^{z_f} \int_{y_s}^{y_n} \int_{x_w}^{x_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{z_b}^{z_f} \int_{x_w}^{x_e} \int_{y_s}^{y_n} \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy dx dz dt +$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{y_s}^{y_n} \int_{x_w}^{x_e} \int_{z_b}^{z_f} \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{y_s}^{y_n} \int_{\phi_b}^{z_f} \int_{x_w}^{x_e} S^T dx dy dz dt. \quad (3.136)$$

Logo, o resultado das integrações foi o seguinte:

$$(T_p - T_p^0) \rho(c_p + h_s \beta) \Delta x \Delta y \Delta z = \left(K_e^T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - K_w^T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta y \Delta z \Delta t +$$

$$+ \left(K_n^T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - K_s^T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta x \Delta z \Delta t + \left(K_f^T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_f - K_b^T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_b \right) \Delta x \Delta y \Delta t +$$

$$+ S^T \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t. \quad (3.137)$$

Dividindo a Equação (3.137) por Δt , obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{(T_P - T_P^0)}{\Delta t} \rho(c_p + h_s \beta) \Delta x \Delta y \Delta z = & \left(K_e^T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - K_w^T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta y \Delta z + \\ + & \left(K_n^T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - K_s^T \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta x \Delta z + \left(K_f^T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_f - K_b^T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_b \right) \Delta x \Delta y + S^T \Delta x \Delta y \Delta z. \end{aligned} \quad (3.138)$$

3.3.2.1 - Discretização: Volumes Internos

Através de análise da Figura 3.12, obtém-se as seguintes derivadas da Equação (3.138):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e = \frac{T_E - T_P}{\delta x_e}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w = \frac{T_P - T_W}{\delta x_w}, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n = \frac{T_N - T_P}{\delta y_n}, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s = \frac{T_P - T_S}{\delta y_s}, \\ \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_b = \frac{T_P - T_B}{\delta z_b} \quad \text{e} \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_f = \frac{T_F - T_P}{\delta z_f}. \end{aligned} \quad (3.139a - f)$$

Logo, substituindo as Equações de (3.139) na Equação (3.138), obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{(T_P - T_P^0)}{\Delta t} \rho(c_p + h_s \beta) \Delta x \Delta y \Delta z = & \left[K_e^T \left(\frac{T_E - T_P}{\delta x_e} \right) - K_w^T \left(\frac{T_P - T_W}{\delta x_w} \right) \right] \Delta y \Delta z + \\ + & \left[K_n^T \left(\frac{T_N - T_P}{\delta y_n} \right) - K_s^T \left(\frac{T_P - T_S}{\delta y_s} \right) \right] \Delta x \Delta z + \left[K_f^T \left(\frac{T_F - T_P}{\delta z_f} \right) - K_b^T \left(\frac{T_P - T_B}{\delta z_b} \right) \right] \Delta x \Delta y + \\ & + S^T \Delta x \Delta y \Delta z. \end{aligned} \quad (3.140)$$

Organizando os termos na Equação (3.140), tem-se para os volumes de controle internos a seguinte equação algébrica:

$$A_p T_P = A_e T_E + A_w T_W + A_n T_N + A_s T_S + A_f T_F + A_b T_B + B, \quad (3.141)$$

onde,

$$A_p = \frac{\rho(c_p + h_s\beta)\Delta x\Delta y\Delta z}{\Delta t} + K_e^T \frac{\Delta y\Delta z}{\delta x_e} + K_w^T \frac{\Delta y\Delta z}{\delta x_w} + K_n^T \frac{\Delta x\Delta z}{\delta y_n} + K_b^T \frac{\Delta x\Delta z}{\delta y_s} + K_f^T \frac{\Delta x\Delta y}{\delta z_f} + K_b^T \frac{\Delta x\Delta y}{\delta z_b}, \quad (3.142)$$

$$A_e = K_e^T \frac{\Delta y\Delta z}{\delta x_e}, \quad (3.143)$$

$$A_w = K_w^T \frac{\Delta y\Delta z}{\delta x_w}, \quad (3.144)$$

$$A_n = K_n^T \frac{\Delta x\Delta z}{\delta y_n}, \quad (3.145)$$

$$A_s = K_s^T \frac{\Delta x\Delta z}{\delta y_s}, \quad (3.146)$$

$$A_f = K_f^T \frac{\Delta x\Delta y}{\delta z_f}, \quad (3.147)$$

$$A_b = K_b^T \frac{\Delta x\Delta y}{\delta z_b}, \quad (3.148)$$

$$B = \frac{\rho(c_p + h_s\beta)\Delta x\Delta y\Delta z}{\Delta t} T_p^0 + S^T \Delta x\Delta y\Delta z. \quad (3.149)$$

3.3.2.2 - Volume de controle na fronteira leste-norte-frente: condição de contorno convectiva

A condição de contorno considerada para a discretização é a condição de contorno convectiva. Esta condição é estabelecida através da igualdade entre o fluxo

interno (difusivo) no contorno do paralelepípedo e o fluxo externo (convectivo) nas vizinhanças deste contorno.

- **Condição de contorno leste (E)**

Fluxo difusivo a leste:
$$q_e'' = -K_e^T \frac{T_e - T_P}{\Delta x_e}. \quad (3.150)$$

Fluxo convectivo a leste:
$$q_e'' = h_{cx}(T_e - T_\infty). \quad (3.151)$$

Procedendo de maneira análoga a Seção (3.3.1.2), obtém-se,

$$q_e'' = \frac{(T_P - T_\infty)}{\frac{1}{h_{cx}} + \frac{\Delta x_e}{K_e^T}}, \quad (3.152)$$

de onde segue,

$$K_e^T \frac{T_e - T_P}{\Delta x_e} = \frac{(T_\infty - T_P)}{\frac{1}{h_{cx}} + \frac{\Delta x_e}{K_e^T}}. \quad (3.153)$$

- **Condição de contorno norte (N)**

Procedendo do mesmo modo que para a condição de contorno leste, obtém-se, para condição de contorno norte:

$$q_n'' = \frac{(T_P - T_\infty)}{\frac{1}{h_{cy}} + \frac{\Delta y_n}{K_n^T}}, \quad (3.154)$$

de onde segue,

$$K_n^T \frac{T_n - T_P}{\Delta y_n} = \frac{(T_\infty - T_P)}{\frac{1}{h_{cy}} + \frac{\Delta y_n}{K_n^T}}. \quad (3.155)$$

- **Condição de contorno frente (F)**

Procedendo do mesmo modo que para as condições de contorno anteriores, obtém-se,

$$q_f'' = \frac{(T_P - T_\infty)}{\frac{1}{h_{cz}} + \frac{\Delta z_f}{K_f^T}}, \quad (3.156)$$

de onde segue,

$$K_f^T \frac{T_f - T_P}{\Delta z_f} = \frac{(T_\infty - T_P)}{\frac{1}{h_{cz}} + \frac{\Delta z_f}{K_f^T}}. \quad (3.157)$$

Assim, para esse volume de controle, a equação discretizada, usando a formulação totalmente implícita, pode ser escrita, a partir das Equações (3.138) e (3.139), do seguinte modo:

$$\begin{aligned} \frac{(T_P - T_P^0)}{\Delta t} \rho(c_P + h_s \beta) \Delta x \Delta y \Delta z = & \left[K_e^T \left(\frac{T_e - T_P}{\Delta x_e} \right) - K_w^T \left(\frac{T_P - T_w}{\delta x_w} \right) \right] \Delta y \Delta z + \\ & \left[K_n^T \left(\frac{T_n - T_P}{\Delta y_n} \right) - K_s^T \left(\frac{T_P - T_s}{\delta y_s} \right) \right] \Delta x \Delta z + \left[K_f^T \left(\frac{T_f - T_P}{\Delta z_f} \right) - K_b^T \left(\frac{T_P - T_B}{\delta z_b} \right) \right] \Delta x \Delta y + \\ & + S^T \Delta x \Delta y \Delta z . \end{aligned} \quad (3.158)$$

Agora, substituindo as Equações (3.153), (3.155) e (3.157) na Equação (3.158), obtém-se:

$$\begin{aligned}
\frac{(T_P - T_P^0)}{\Delta t} \rho(c_P + h_s \beta) \Delta x \Delta y \Delta z = & \left[\frac{(T_\infty - T_P)}{\frac{1}{h_{cx}} + \frac{\Delta x_e}{K_e^T}} - K_w^T \left(\frac{T_P - T_W}{\delta x_w} \right) \right] \Delta y \Delta z + \\
& \left[\frac{(T_\infty - T_P)}{\frac{1}{h_{cy}} + \frac{\Delta y_n}{K_n^T}} - K_s^T \left(\frac{T_P - T_S}{\delta y_s} \right) \right] \Delta x \Delta z + \left[\frac{(T_\infty - T_P)}{\frac{1}{h_{cz}} + \frac{\Delta z_f}{K_f^T}} - K_b^T \left(\frac{T_P - T_B}{\delta z_b} \right) \right] \Delta x \Delta y + \\
& + S^T \Delta x \Delta y \Delta z .
\end{aligned} \tag{3.159}$$

Organizando os termos na Equação (3.159), tem-se para os volumes de controle na fronteira oeste-norte-frente a seguinte equação algébrica:

$$A_p T_P = A_w T_W + A_s T_S + A_b T_B + B, \tag{3.160}$$

onde,

$$\begin{aligned}
A_p = & \frac{\rho(c_P + h_s \beta) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{\Delta y \Delta z}{\frac{1}{h_{cx}} + \frac{\Delta x_e}{K_e^T}} + K_w^T \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_w} + \frac{\Delta x \Delta z}{\frac{1}{h_{cy}} + \frac{\Delta y_n}{K_n^T}} + K_s^T \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_s} + \\
& + \frac{\Delta x \Delta y}{\frac{1}{h_{cz}} + \frac{\Delta z_f}{K_f^T}} + K_b^T \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_b},
\end{aligned} \tag{3.161}$$

$$A_w = K_w^T \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_w}, \tag{3.162}$$

$$A_s = K_s^T \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_s}, \tag{3.163}$$

$$A_b = K_b^T \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_b}, \tag{3.164}$$

$$\begin{aligned}
B = & \frac{\rho(c_p + h_s \beta) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} T_P^0 + \frac{\Delta y \Delta z}{\frac{1}{h_{cx}} + \frac{\Delta x_e}{K_e^T}} T_\infty + \frac{\Delta x \Delta z}{\frac{1}{h_{cy}} + \frac{\Delta y_n}{K_n^T}} T_\infty + \\
& + \frac{\Delta x \Delta y}{\frac{1}{h_{cz}} + \frac{\Delta z_f}{K_f^T}} T_\infty + S^T \Delta x \Delta y \Delta z.
\end{aligned} \tag{3.165}$$

De modo análogo ao apresentado para a concentração de vapor, pode-se determinar as equações discretizadas, na forma algébrica, para os outros volumes de controle e estimativa, pontos de simetria e faces dos volumes de controle da fronteira.

3.3.3 - *Software* computacional

Para resolver os sistemas de equações gerados pelas Equações (3.39) e (3.43), um programa computacional, desenvolvido por Silva (2009) utilizando o *software* Mathematica, foi adaptado para este trabalho. Nele, o sistema de equações lineares são resolvidas iterativamente usando o método de Gauss-Seidel.

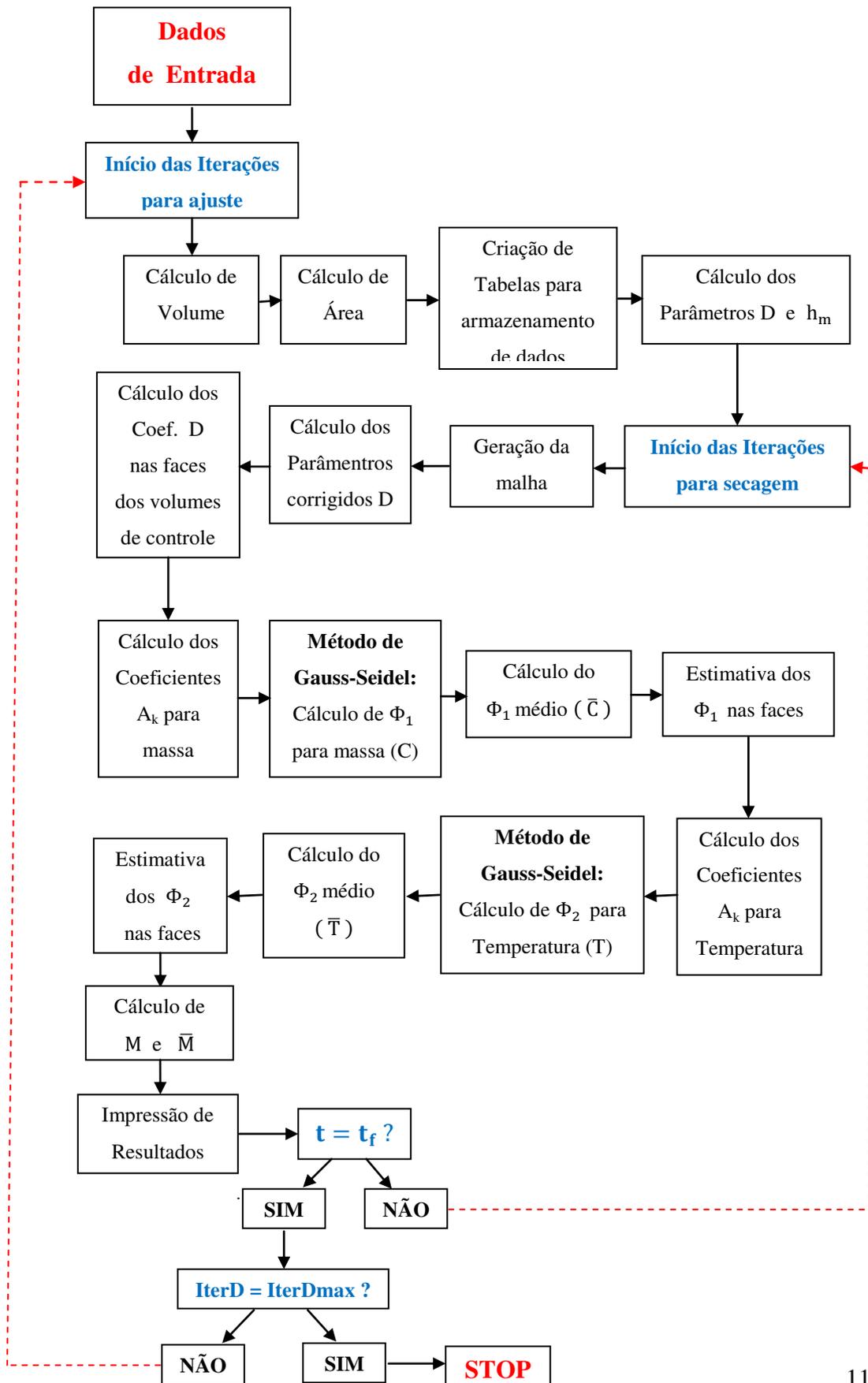
Assumi-se que a solução numérica convergiu quando, partindo de uma condição inicial, o seguinte critério foi satisfeito, em cada ponto do domínio computacional, num certo instante de tempo:

$$|\Phi^{n+1} - \Phi^n| \leq 10^{-8}, \tag{3.166}$$

onde Φ pode ser C ou T, e n representa a n-ésima iteração em cada instante de tempo. Este critério do ponto de vista físico e numérico é suficientemente preciso para garantir o realismo físico das respostas obtidas (Nascimento, 2002). Para obter os resultados foi considerada uma malha numérica de $20 \times 20 \times 20$ pontos nodais e um $\Delta t = 20s$. Estes parâmetros foram obtidos depois que um refino de malha e de tempo foi realizado.

Um fluxograma de operação do programa, na forma de diagrama de blocos, é apresentado na Figura 3.23.

Figura 3.23 - Diagrama do algoritmo computacional.



Neste trabalho utilizou-se o Modelo 4, que corresponde ao estudo acoplado de transferência de calor e umidade em meios fibrosos. Esse acoplamento do teor de umidade e temperatura foi possível a partir da aplicação da equação de equilíbrio (3.15), que possibilitou a relação entre as Equações (3.19) e (3.21).

3.3.4 - Estimativa dos coeficientes de transporte

Com as Equações (3.8) e (3.9) ajustadas, estabeleceram-se instantes de “tomada de dados” ao longo do processo em que o teor de umidade médio e a temperatura pudessem ser determinados, de forma que a distribuição destes pontos ficasse aproximadamente uniforme. Posteriormente, estas equações foram utilizadas no programa computacional, para ajustar os coeficientes de transporte difusivo e convectivo.

Os coeficientes de transporte foram obtidos variando-se seus valores para minimizar a soma dos desvios quadráticos entre os resultados preditos e experimentais. Os desvios entre os valores experimentais, calculados e a variância foram obtidos como segue:

$$\text{ERMQ} = \sum_{i=1}^n (\Phi_{i,\text{Num}} - \Phi_{i,\text{Exp}})^2 \quad (3.167)$$

$$\bar{S}^2 = \frac{\text{ERMQ}}{(n - \hat{n})}, \quad (3.168)$$

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 e os coeficientes de transferência de massa h_m na superfície da amostra.

O valor inicial do coeficiente de transferência de calor convectivo utilizado durante o seu ajuste, foi obtido usando as correlações de Reynolds e Nusselt (INCROPERA e DE WITT, 2002), aplicado a uma placa como segue:

$$h'_c = \frac{\bar{Nu}_c k}{R_3}, \quad (3.169)$$

onde,

$$\bar{Nu}_c = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.170)$$

e

$$Re = \frac{\rho v R_3}{\mu} \quad (\text{com intervalo de validade } 5 \times 10^5 < Re \leq 10^8). \quad (3.171)$$

A equação utilizada para obter o coeficiente inicial de transferência de massa convectivo calculada para o ar, é dada por Incropera e De Witt (2002), como segue:

$$h'_m = \frac{\bar{Nu}_m D_{AB}}{R_3}, \quad (3.172)$$

onde, D_{AB} é a difusividade de vapor de água no ar, e

$$\bar{Nu}_m = 0,664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (3.173)$$

Para obter a densidade das amostras, utilizou-se da seguinte equação:

$$\rho_{\text{amost}} = \frac{M_{\text{fibra}}}{V_{\text{amost}}}. \quad (3.174)$$

As equações utilizadas para obter a condutividade térmica e o calor específico calculado para a amostra, é dada por Incropera e DeWitt (2002), como segue:

$$k_{\text{amost}} = (1 - \varepsilon) k_{(\text{fibra})} + \varepsilon k_{(\text{ar})} \quad (3.175)$$

e

$$c_{p_{\text{amost}}} = (1 - \varepsilon) c_{p_{(\text{fibra})}} + \varepsilon c_{p_{(\text{ar})}} \quad (3.176)$$

onde,

h_m → Coeficiente de transferência de massa (amostra);

h'_m → Coeficiente de transferência de massa (ar);

Re → Número de Reynolds;

Pr → Número de Prandtl;

Sc → Número de Schmidt;

M_{fibra} → Peso inicial das fibras;

ρ_f → Densidade da fibra;

M_o → Teor de umidade inicial da fibra;

M_e → Teor de umidade de equilíbrio da fibra;

h'_c → Coeficiente de transferência de calor;

k_{amost} → Condutividade térmica da amostra.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes aos estudos experimentais e teóricos do processo de transferência de calor e umidade em corpos fibrosos na forma de paralelepípedo. O estudo experimental foi direcionado para secagem de fibras de sisal. Inicialmente, serão apresentados os resultados experimentais de secagem nas temperaturas de 50, 60, 70, 80 e 90°C. Em seguida, os resultados teóricos da simulação.

4.1 - Experimental

4.1.1 - Secagem de fibras de sisal

Nos experimentos foram utilizadas diversas temperaturas e umidades relativas do ambiente de secagem no interior da estufa, conforme ilustram as Tabelas 3.1 e 4.1, com o objetivo de analisar os efeitos das condições do ar de secagem na remoção de umidade e aquecimento das fibras de sisal, e qualidade das mesmas pós-secagem.

Tabela 4.1 - Parâmetros experimentais do ar e das fibras para cada teste de secagem.

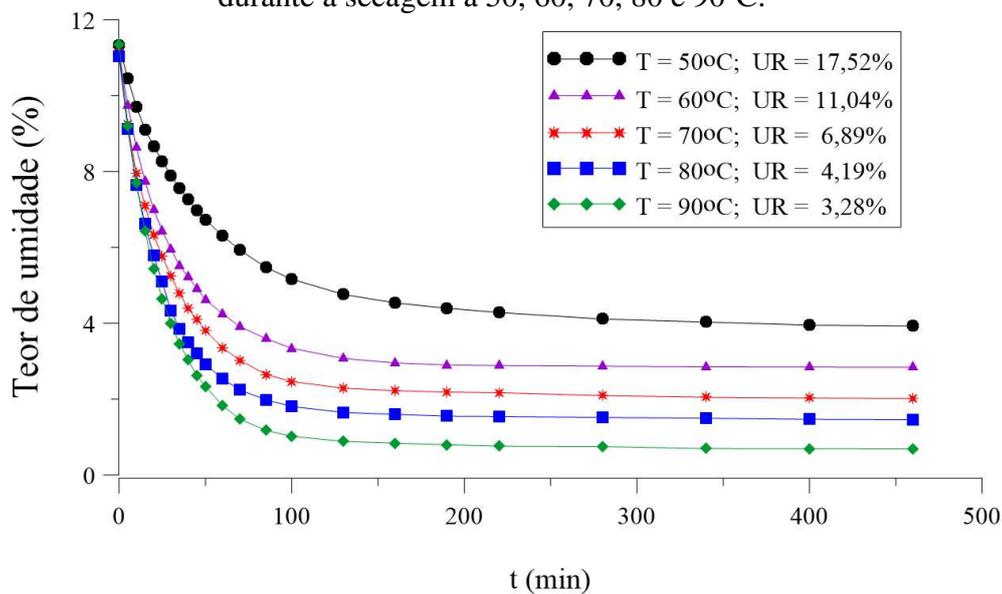
Teste	Ar		Meio Fibroso				t (h)
	T (°C)	UR (%)	M _o (b.s.)	M _{eq} (b.s.)	T _o (°C)	T _f (°C)	
1	50	17,52	0,11327	0,03837	29,8	46,3	7,7
2	60	11,04	0,11118	0,02606	29,8	56,6	6,7
3	70	6,89	0,11148	0,02015	31,5	67,3	5,7
4	80	4,19	0,11030	0,01390	29,6	76,3	5,0
5	90	3,28	0,11342	0,00525	30,4	87,4	4,7

A partir da Tabela 4.1, observa-se que na medida que a temperatura do ar de secagem aumenta, a umidade relativa do ar diminui e conseqüentemente, o teor de umidade de equilíbrio também diminui.

O aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar de secagem aumenta a taxa de secagem e o meio fibroso alcança mais rapidamente a temperatura e sua umidade de equilíbrio. Esta situação pode causar danos as fibras, interferindo na sua qualidade. Não são recomendados altos gradientes térmicos e hídricos ao longo do meio fibroso, porque isto produz uma secagem não uniforme, o que pode causar o surgimento de tensões internas e a proliferação de fungos ao longo do processo de armazenamento dessas fibras, comprometendo a qualidade das fibras para aplicações industriais. Uma secagem prévia, controlada, é de grande importância, contudo, se a secagem for muito lenta, o processo tornar-se antieconômico.

A Figura 4.1 mostra a comparação entre os teores de umidade das fibras de sisal durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C.

Figura 4.1 - Teores de umidade (base seca) das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C.

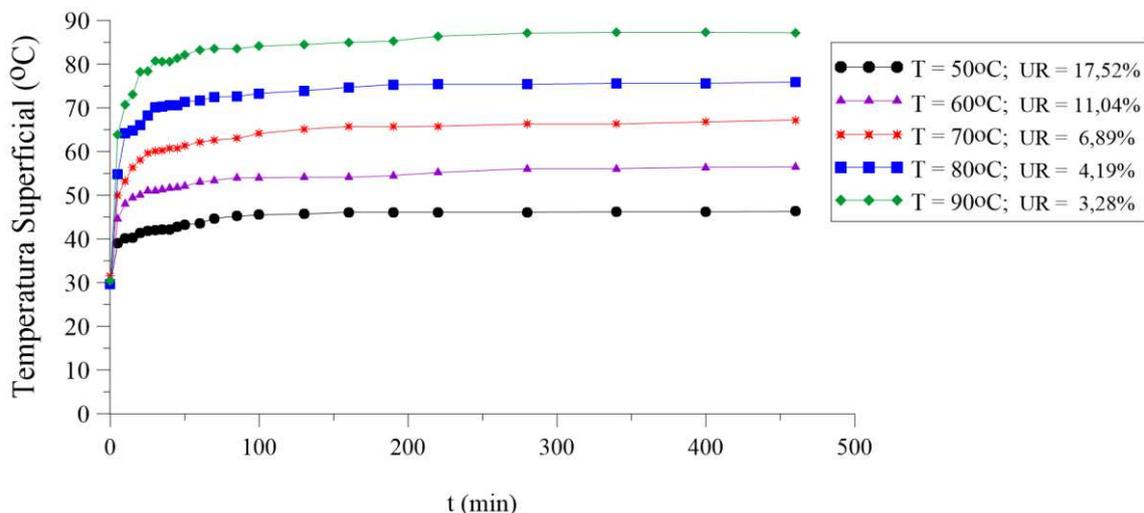


Observa-se na Figuras 4.1 que o teor umidade do meio fibroso decresce ao longo do tempo, tendendo ao seu teor de umidade de equilíbrio para cada condição experimental.

Foi possível constatar na Figura 4.1, que realmente, a medida que a temperatura do ar de secagem aumenta e a umidade relativa do ar diminui, o teor de umidade de equilíbrio também diminui, além do meio fibroso atingir mais rapidamente o equilíbrio hídrico.

A temperatura das fibras em cada instante de pesagem foi medida através de um termômetro infravermelho e os resultados estão apresentados na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Temperaturas superficiais das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C.



Observa-se nas Figuras 4.2 que no início da secagem (primeiros 50 min do processo) há uma forte elevação na temperatura do meio fibroso tendendo a ajustar-se com a temperatura de bulbo úmido do ar aquecido. Neste período, as fibras estão saturadas de água e o ar aquecido promove a evaporação da umidade.

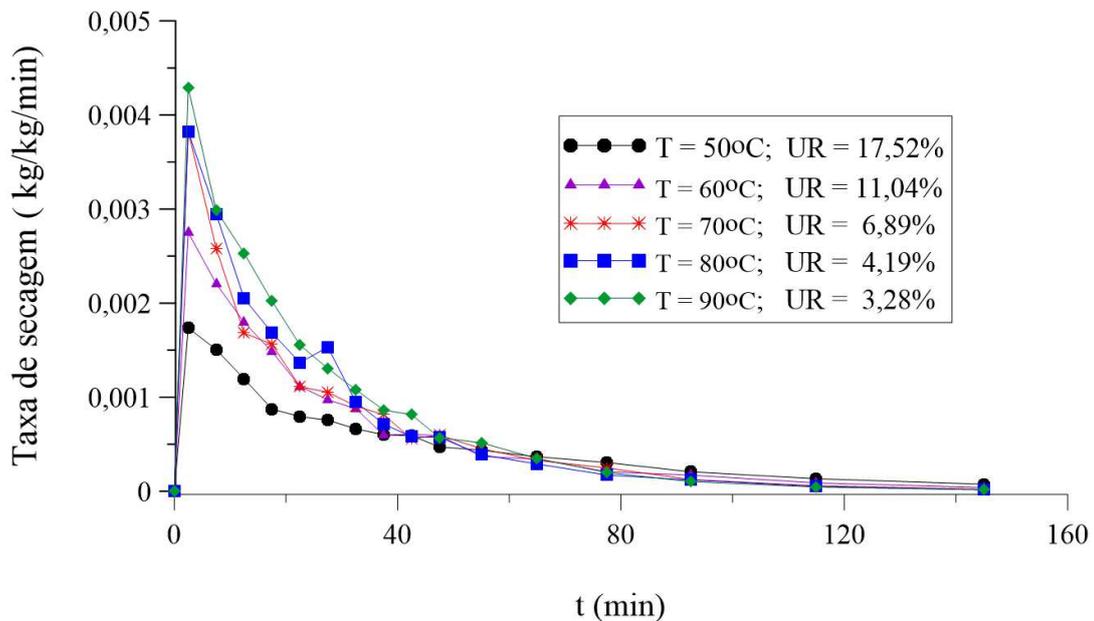
Foi possível constatar na Figura 4.2, que ao longo do processo, a temperatura superficial do meio fibroso cresce tendendo à temperatura do ar de secagem, para cada condição experimental. Observa-se também, que o equilíbrio térmico é atingido mais rapidamente na medida que aumenta-se a temperatura do ar aquecido.

Nas Tabelas A1-A5, do Apêndice, encontram-se todos os dados obtidos experimentalmente. A diferença entre a temperatura ajustada na estufa e a temperatura final das fibras é devido a posição do cesto dentro da estufa e erros de medição.

A taxa de secagem $\frac{\partial \bar{M}}{\partial t}$ foi determinada como sendo igual a $\frac{\Delta M}{\Delta t}$, onde ΔM é a variação do teor de umidade no intervalo de tempo Δt .

A Figura 4.3 apresenta a comparação entre as taxa de secagem das fibras de sisal durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C.

Figura 4.3 - Taxas de secagem das fibras de sisal durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C.



Observa-se através da Figura 4.3 que nos primeiros minutos do processo (em torno de 5 min) há uma elevação da taxa de secagem, é o chamado período de acomodação. Após esse período, o processo ocorre a taxa de secagem decrescente, ou seja, a velocidade de migração da água do interior da fibra até a sua superfície é menor do que a velocidade de retirada de água da superfície através do ar aquecido. A temperatura da fibra cresce na medida em que a taxa de secagem decresce. Resultados semelhantes foram relatados por diferentes pesquisadores (LIMA et al., 2016; SANTOS et al., 2017). Mas é importante resaltar, que para a secagem a temperatura de 80°C, verificou-se um pequeno acréscimo na taxa de secagem em $t = 27,5$ min. Essa alteração no comportamento da taxa de secagem, foi ocasionada provavelmente, por erro no processo de pesagem da amostra durante o experimento. Além disso sabe-se, que na medida que é retirado um material da estufa para pesar, dependendo do tempo, esse material pode absorver umidade.

Percebe-se que no final do processo, a taxa de secagem tende a zero quando a umidade aproxima-se do teor de umidade de equilíbrio e a temperatura da fibra se estabiliza, isto é, a fibra se aproxima de seu equilíbrio térmico (Figura 4.1 à 4.3).

Observa-se que a taxa de secagem atinge valores mais altos quando utiliza-se temperaturas de secagens mais elevadas.

A partir da cinética de secagem foi possível também verificar que a secagem das fibras de sisal ocorreu no período de taxa decrescente, o que indica que a difusão é o principal mecanismo responsável pela perda de umidade, como relatado em outras pesquisas de secagem de fibras vegetais (CRANK, 1975; NORDON e DAVI, 1967; SANTOS, 2017). Desta forma, a cinética de secagem possibilita a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e, conseqüentemente, as equações matemáticas correspondentes para descrever o processo.

Nas Figuras A1-A15, do Apêndice, encontram-se os gráficos individuais da perda de umidade, da temperatura superficial e da taxa de secagem das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 50, 60, 70, 80 e 90°C, respectivamente.

As Figuras 4.4 à 4.8, mostram a evolução do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional em função do tempo quando as fibras estão sendo secas à diferentes temperaturas.

Figura 4.4 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 50°C e UR 17,52%.

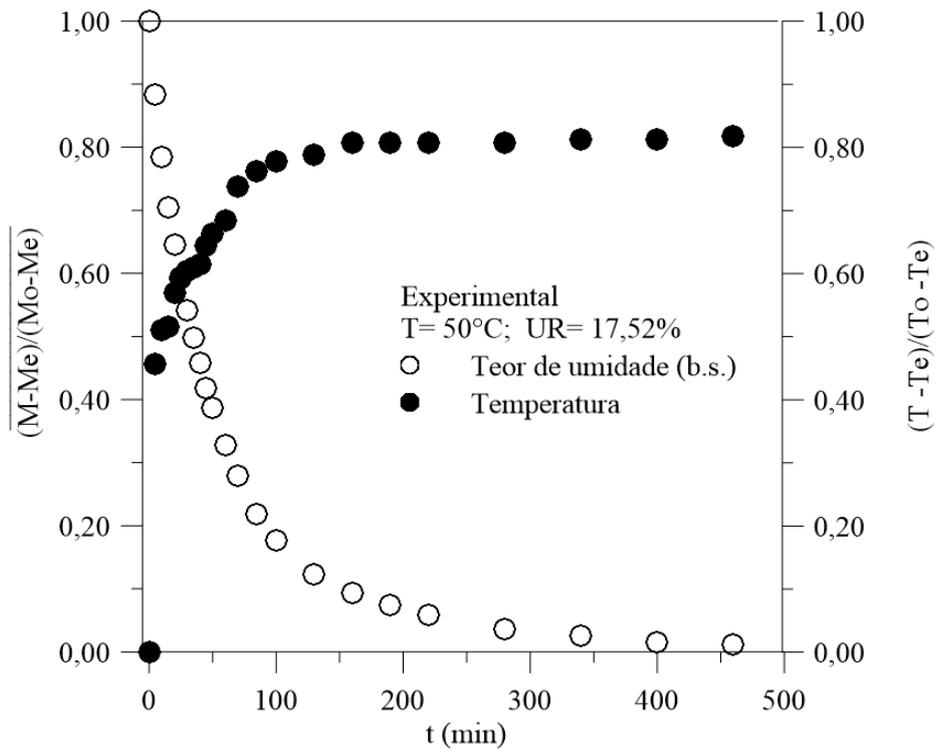


Figura 4.5 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 60°C e UR 11,04%.

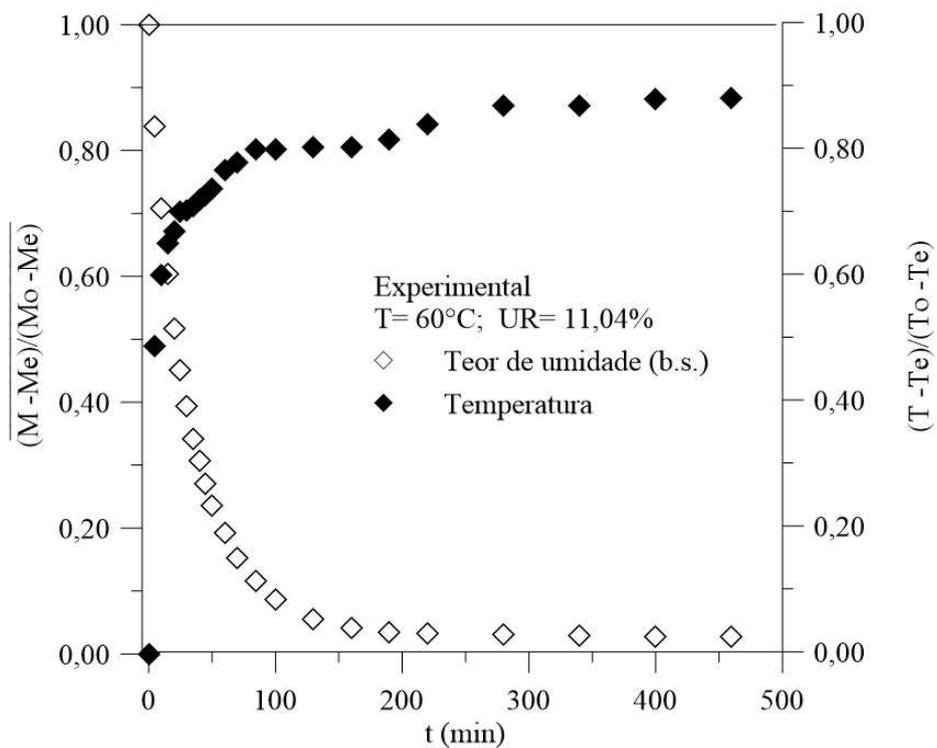


Figura 4.6 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 70°C e UR 6,89%.

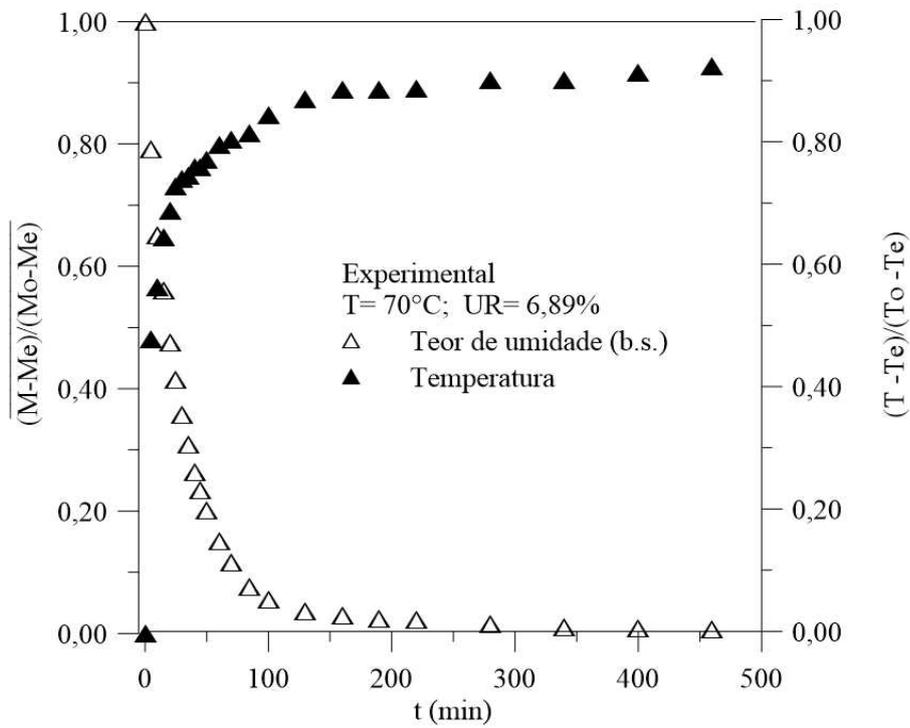


Figura 4.7 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 80°C e UR 4,19%.

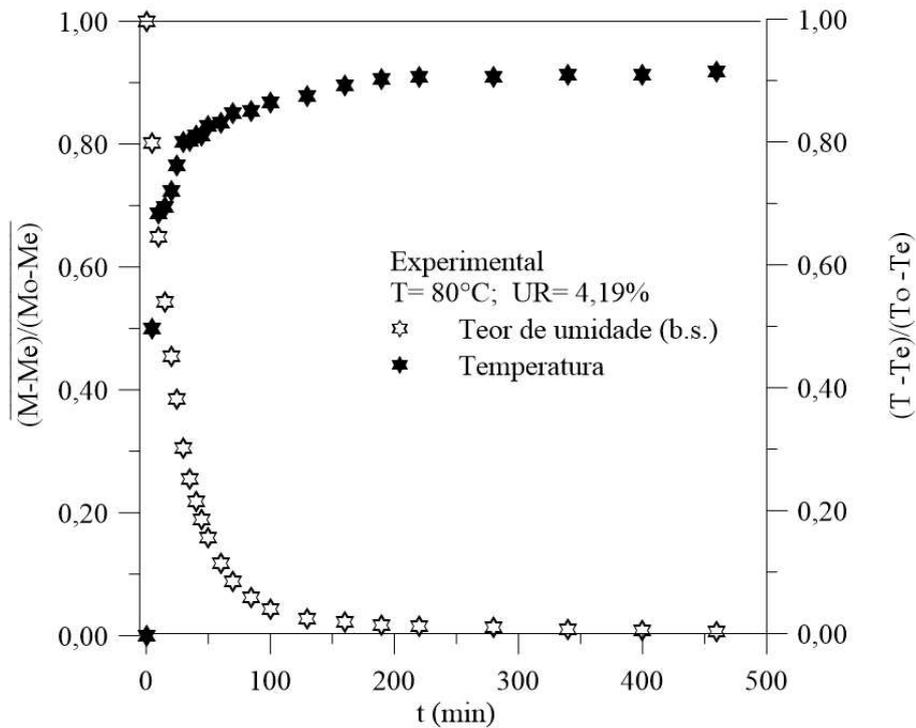
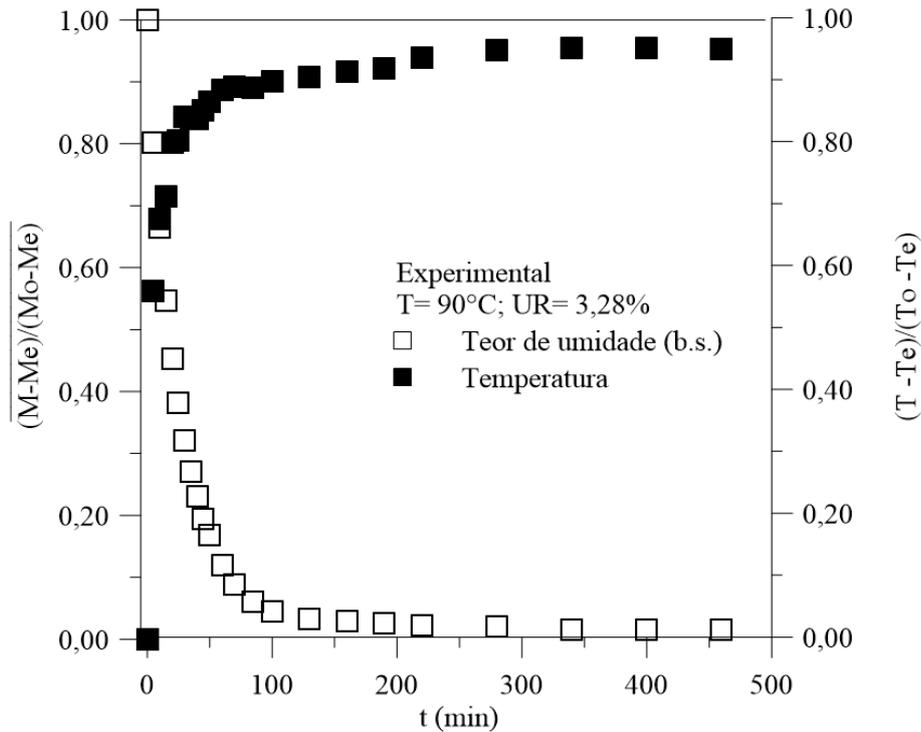


Figura 4.8 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional na superfície da amostra durante a secagem a 90°C e UR 3,28%.



Nos primeiros 200 min de processo, a secagem a temperatura mais baixa (Figura 4.4), apresenta uma variação no teor de umidade e temperatura um pouco mais lenta se comparada a secagem a temperatura mais elevada (Figura 4.8). Após os 200 min iniciais, verifica-se uma variação praticamente constante do teor de umidade e temperatura das fibras em todas as condições de secagem.

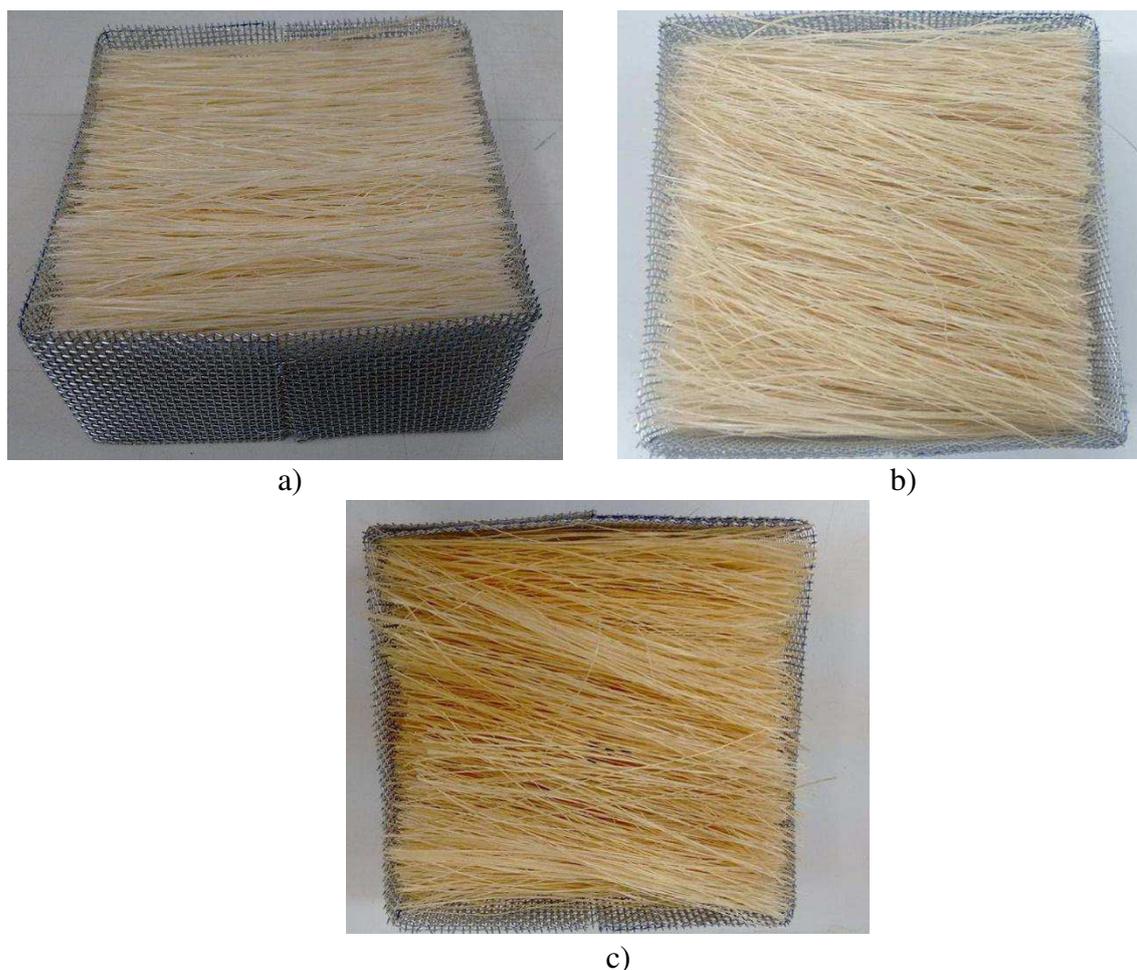
Para secagem a temperatura mais baixa (Figura 4.4), observa-se que a taxa de aquecimento é maior do que a taxa de secagem, tendo em vista, que o meio fibroso atinge o equilíbrio térmico primeiro do que o equilíbrio hídrico. Entretanto, para temperaturas de secagem mais altas (Figuras 4.7 e 4.8), ocorre o inverso, a taxa de secagem é maior do que a taxa de aquecimento.

4.1.2 - Propriedades físicas e parâmetros geométricos das fibras de sisal

Em cada experimento, a temperatura da estufa foi mantida fixa em 50, 60, 70, 80 e 90°C. Nessas temperaturas as fibras perderam umidade até atingir o teor de umidade de equilíbrio, alcançado quando a temperatura da superfície da fibra atingiu 46,3°C, 56,6°C, 67,3°C, 76,3°C e 87,4°C, respectivamente. No entanto, existia ainda

umidade presente nas fibras que pode ser removida através de um maior fornecimento de energia. Dessa forma, a temperatura da estufa foi elevada a 105°C, com o objetivo de atingir a massa seca das fibras, o que foi alcançado. Por outro lado, a temperatura de 105°C provocou uma acentuada alteração na coloração das fibras e perda de massa atribuída à perda de umidade (Figura 4.9).

Figura 4.9 - Aspecto da fibra de sisal: (a) antes; (b) depois da secagem a 50°C e (c) depois de 24h de secagem a 105°C.



Segundo Santos (2017) e Martin et al. (2010), embora tenha-se observado essa alteração na coloração das fibras após a secagem, a degradação da hemicelulose e celulose das fibras de sisal só ocorre a temperaturas superiores a 185°C e 200°C, respectivamente. Nos seus estudos, Santos (2017) verificou que a secagem à 105°C não alterava significativamente as propriedades mecânicas das fibras de sisal, tendo em vista que os valores de resistência mecânica à tração das fibras após a secagem nas temperaturas de 60°C e 80°C permaneceram próximos às de 105°C (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas das fibras de sisal secas.

Temperatura de secagem (°C)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
60 por 24 h	242,93±54,08	12,90±4,32	2,46±0,44
80 por 24 h	239,03±56,99	11,28±4,18	2,17±0,55
60 por 24 h e 105 por 24 h	195,70±52,67	9,63±1,73	2,08±0,40
80 por 24 h e 105 por 24 h	201,05±42,74	8,97±1,96	2,19±0,25
105 por 24 h	196,24±55,36	8,24±0,71	1,88±0,43

Fonte: Santos (2017).

A Figura 4.10 ilustra as fibras de sisal depois da secagem com temperatura constante na estufa de 50°C e 90°C, respectivamente. Estas imagens vem a concordar com o exposto anteriormente que, para temperaturas mais baixas, a secagem é mais controlada garantindo um produto de qualidade, sem fortes alterações na sua pigmentação. Já para a temperatura de secagem a 90°C, observou-se uma alteração significativa na cor das fibras no final do processo de secagem.

Figura 4.10 - Aspecto da fibra de sisal após secagem: (a) 50°C e (b) 90°C.

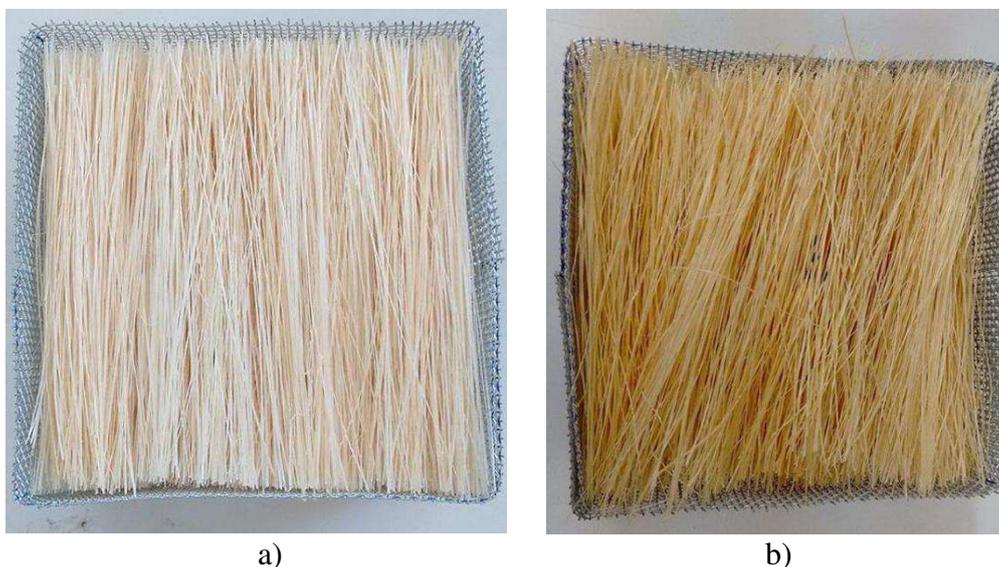


a)

b)

Durante a secagem geram-se, tensões de sentido contrário entre a camada externa e a interna da fibra e, quanto maior a perda de água e aquecimento, maior também será a tensão resultante, fazendo o material deformar-se (Figura 4.11).

Figura 4.11 - Aspecto da fibra de sisal (a) antes e (b) depois da secagem a 90°C.



Para obter-se uma secagem uniforme (gradientes de temperatura e umidade minimizados) é importante moderar adequadamente a intensidade da secagem, pelo controle da velocidade, umidade relativa e temperatura do ar de secagem, forma do corpo, a relação área/volume e a porosidade do material. Isto conduz a um produto de qualidade.

A Tabela 4.3 apresenta alguns parâmetros geométricos da fibra de sisal obtidos antes da secagem.

Tabela 4.3 - Parâmetros físicos da fibra de sisal antes da secagem.

Teste	T (°C)	Comp. (m)	**Diâmetro (µm)	*Volume da fibra (nm ³)	Quant. de fibras	V _f (m ³)	V (m ³)	Porosidade (ε)
1	50	0,1	247	4,789	8539	40,895 x10 ⁻⁶	5x10 ⁻⁴	0,91821
2	60	0,1	247	4,789	8190	39,224 x10 ⁻⁶	5x10 ⁻⁴	0,92155
3	70	0,1	247	4,789	8490	40,660 x10 ⁻⁶	5x10 ⁻⁴	0,91868
4	80	0,1	247	4,789	8627	41,316 x10 ⁻⁶	5x10 ⁻⁴	0,91737
5	90	0,1	247	4,789	8869	42,475 x10 ⁻⁶	5x10 ⁻⁴	0,91505

* Calculado pela Equação (3.7);

** Santos (2017).

4.1.3 - Ajuste das equações e estimativa dos parâmetros

4.1.3.1 - Cinéticas de secagem

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros da Equação (3.8) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade.

Tabela 4.4 - Parâmetros da Equação (3.8) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade.

Experimento	Parâmetros					
	c_1 kg/kg (b.s.)	k_1 (°C ⁻¹)	c_2 kg/kg (b.s.)	k_2 (°C ⁻¹)	c_3 kg/kg (b.s.)	k_3 (°C ⁻¹)
50°C	0,044521	0,000287	0,006052	0,153978	0,062820	0,019823
60°C	0,060180	0,024910	0,028524	0,000006	0,022567	0,073435
70°C	0,779910	0,031757	0,022230	0,000215	0,011298	0,243766
80°C	0,005432	0,242474	0,088221	0,038727	0,016677	0,000323
90°C	0,006208	0,220259	0,008476	0,000490	0,098719	0,037977

Experimento	R	Proporção da variância	Função de perda (obs - pred) ²
50°C	0,99994	0,99989	0,000001245
60°C	0,99998	0,99996	0,000000480
70°C	0,99995	0,99989	0,000001574
80°C	0,99990	0,99981	0,000003106
90°C	0,99997	0,99995	0,000001081

As Figuras 4.12 à 4.16 ilustram as curvas de ajuste do teor de umidade “versus” tempo de secagem.

Figura 4.12 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

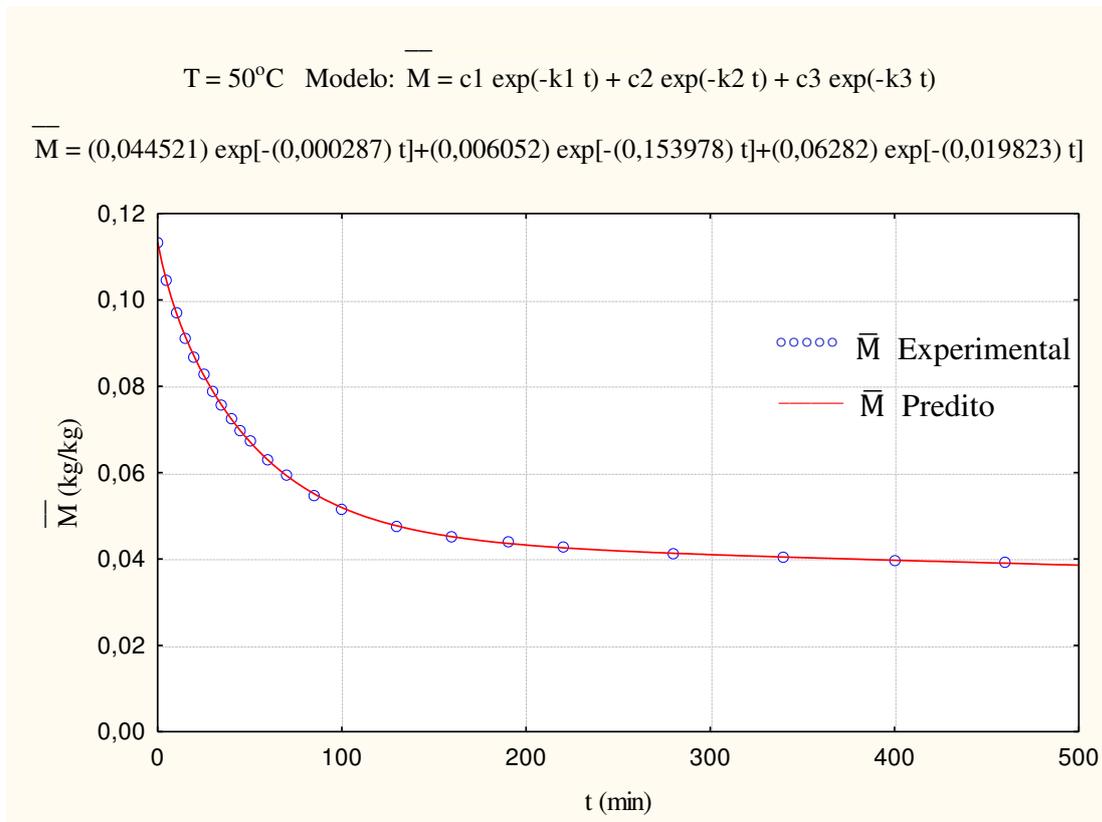


Figura 4.13 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

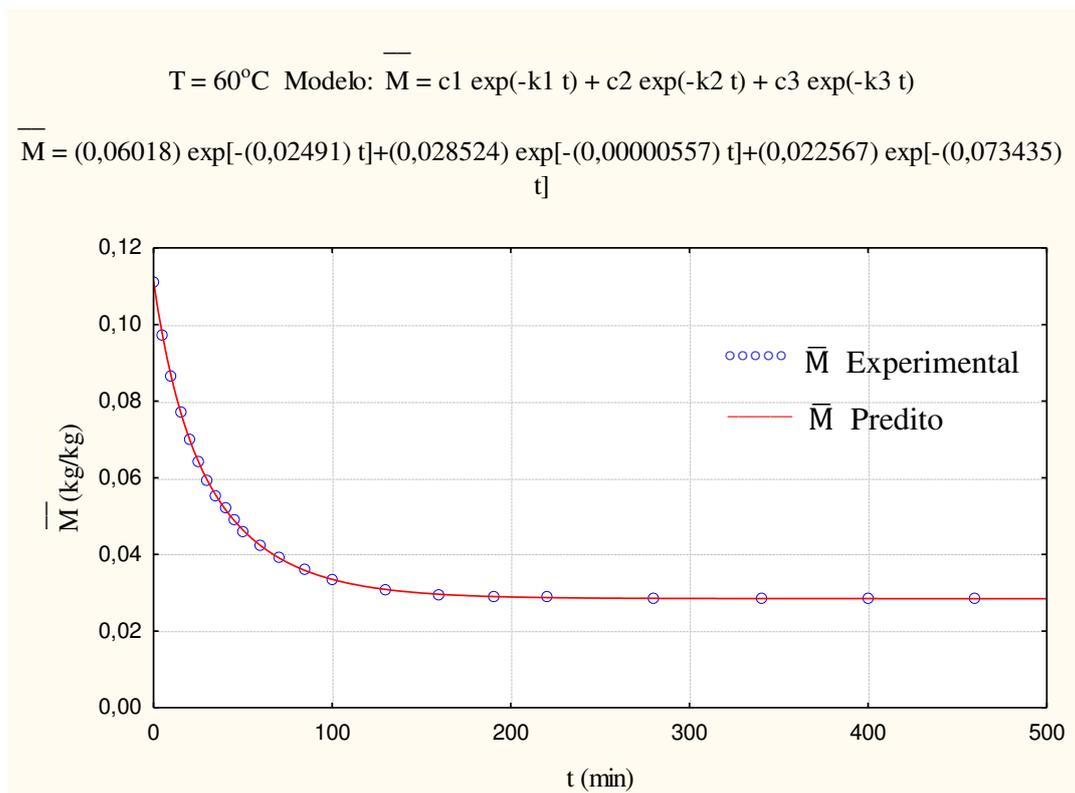


Figura 4.14 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

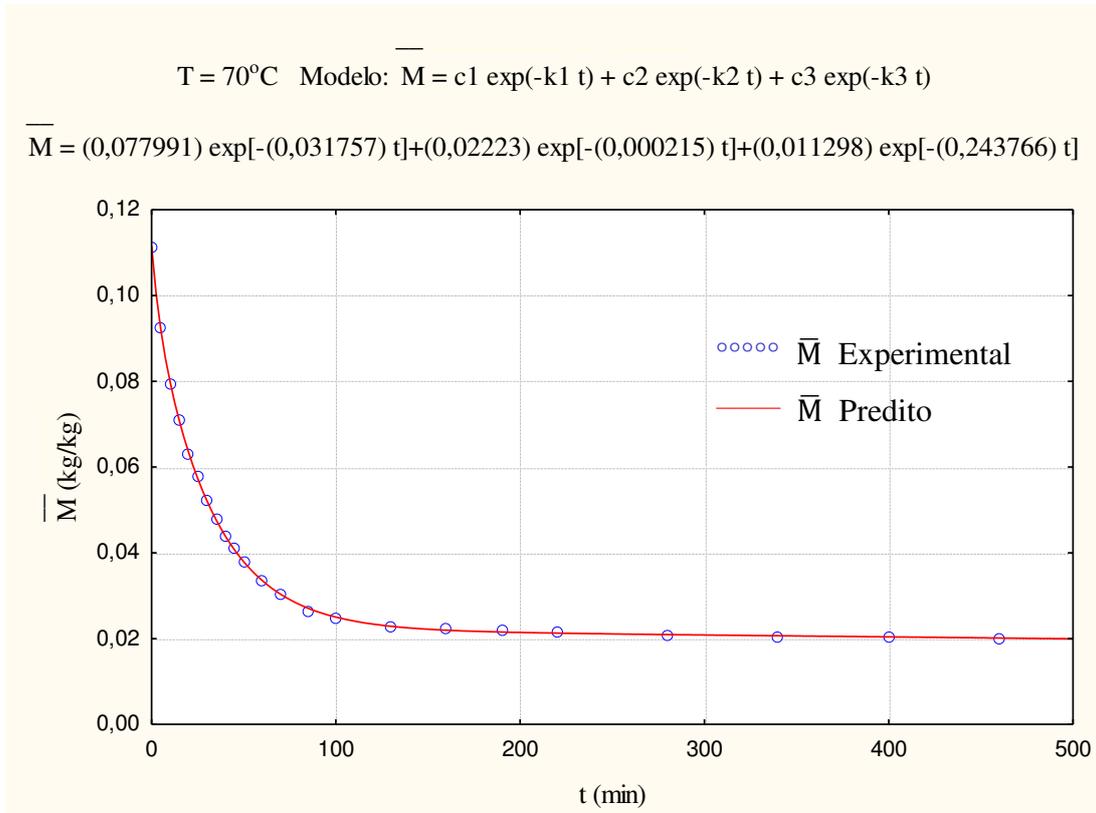


Figura 4.15 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 80°C.

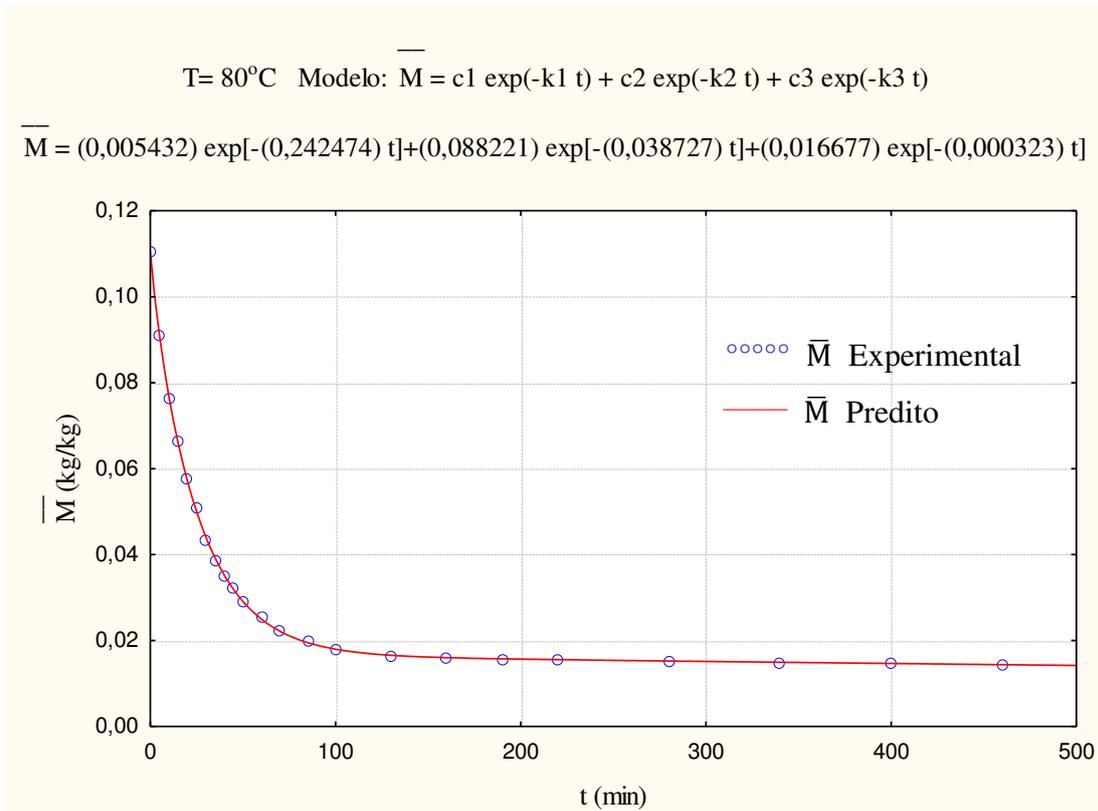
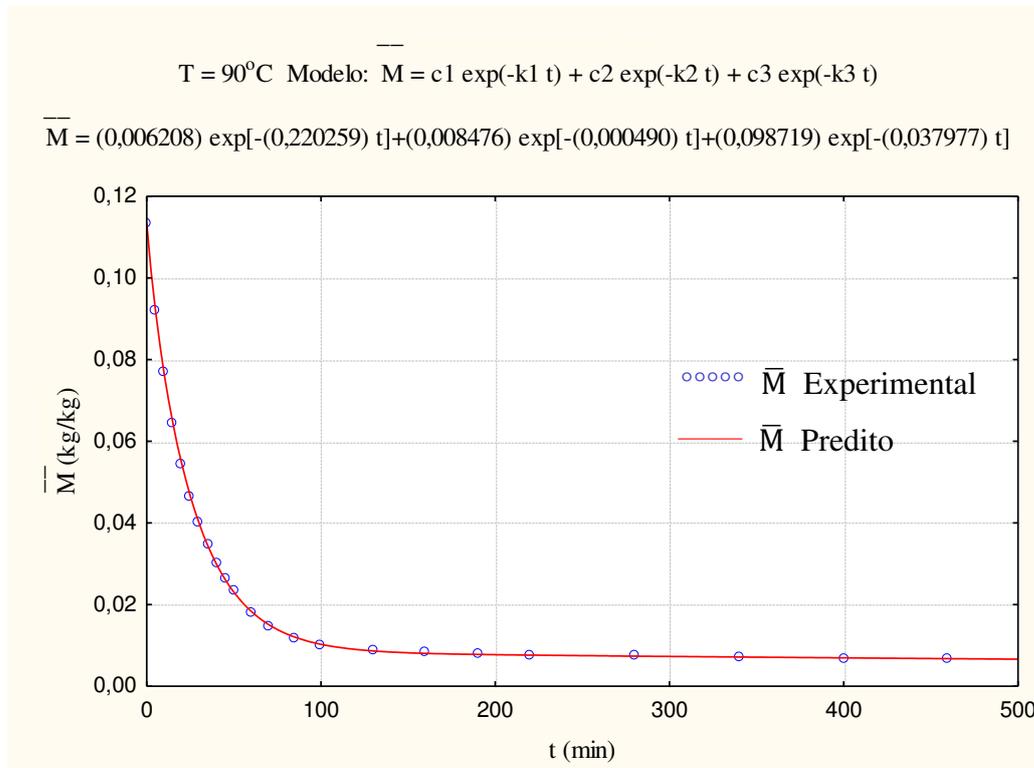


Figura 4.16 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 90°C.



É evidenciado na Tabela 4.4 e nos gráficos apresentados nas Figuras 4.12 à 4.16, uma boa concordância entre os valores preditos e experimentais, caracterizados por coeficientes de correlação próximos de 1,0. Conseqüentemente, pode-se afirmar que o modelo proposto descreve adequadamente o processo de secagem das fibras de sisal. Apesar disso, verifica-se que os parâmetros da equação proposta não apresentam um comportamento coerente com a temperatura de secagem.

4.1.3.2 - Cinéticas de aquecimento

A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros da Equação (3.9) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura.

Tabela 4.5 - Parâmetros da Equação (3.9) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura.

Experi- mento	Parâmetros						
	c ₁ (°C)	k ₁ (°C ⁻¹)	k ₂ (...)	c ₂ (...)	k ₃ (°C ⁻¹)	k ₄ (...)	c ₃ (...)
50°C	2,088806	59,13998	36,98447	1,728715	0,011778	0,046578	-1,19132
60°C	2,770573	30,58093	54,94132	39,62808	23,53380	47,35824	-39,2218
70°C	0,536510	0,000406	0,006903	-5,85983	13,39565	3,234171	8,947182
80°C	68,89534	732,1602	2461,262	-5,64276	816,8746	2552,429	5,654512
90°C	0,737719	0,961179	10,15929	-18,8663	45,79376	38,34649	19,82850

Experi- mento	R	Proporção da variância	Função de perda (obs - pred) ²
50°C	0,98807	0,97627	7,220055570
60°C	0,99861	0,99722	1,898513473
70°C	0,99737	0,99474	6,887782641
80°C	0,99819	0,99637	7,903952131
90°C	0,99866	0,99733	8,623793049

As Figuras 4.17 à 4.21 ilustram as curvas de ajuste da temperatura superficial da fibra “versus” tempo de secagem.

Figura 4.17 - Comparação entre as temperaturas da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

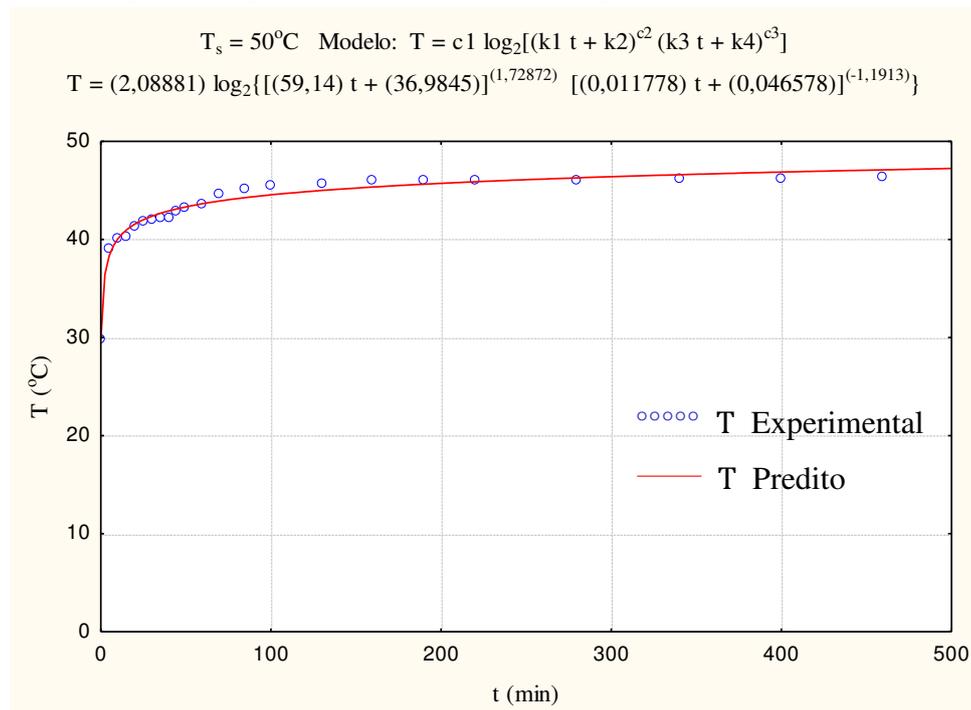


Figura 4.18 - Comparação entre as temperaturas da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

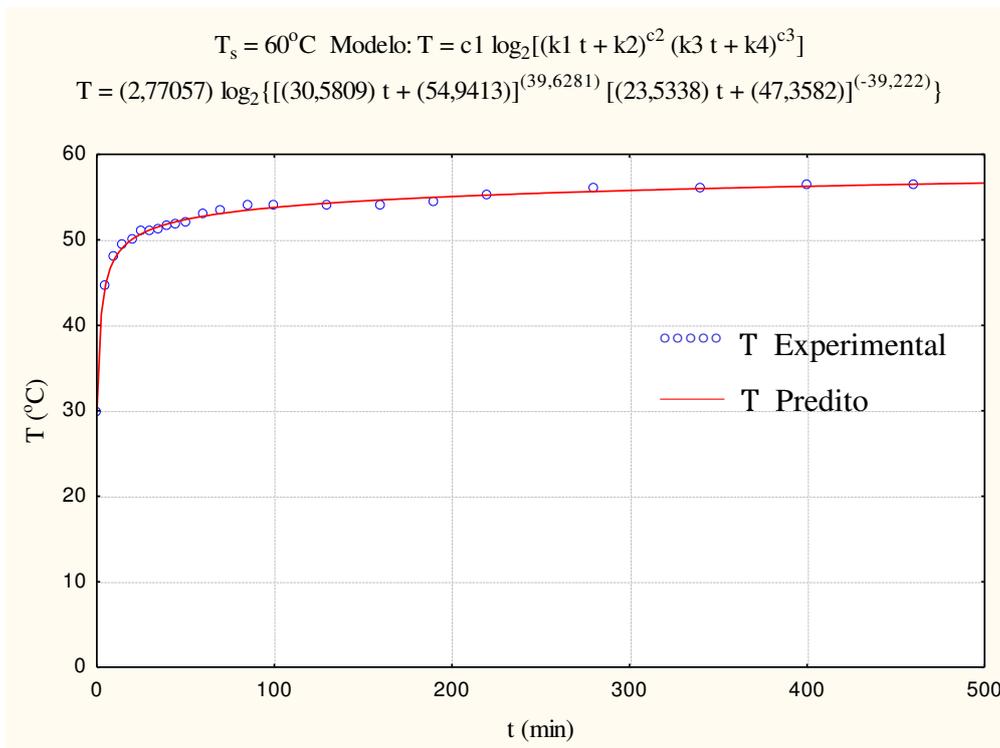


Figura 4.19 - Comparação entre as temperaturas da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

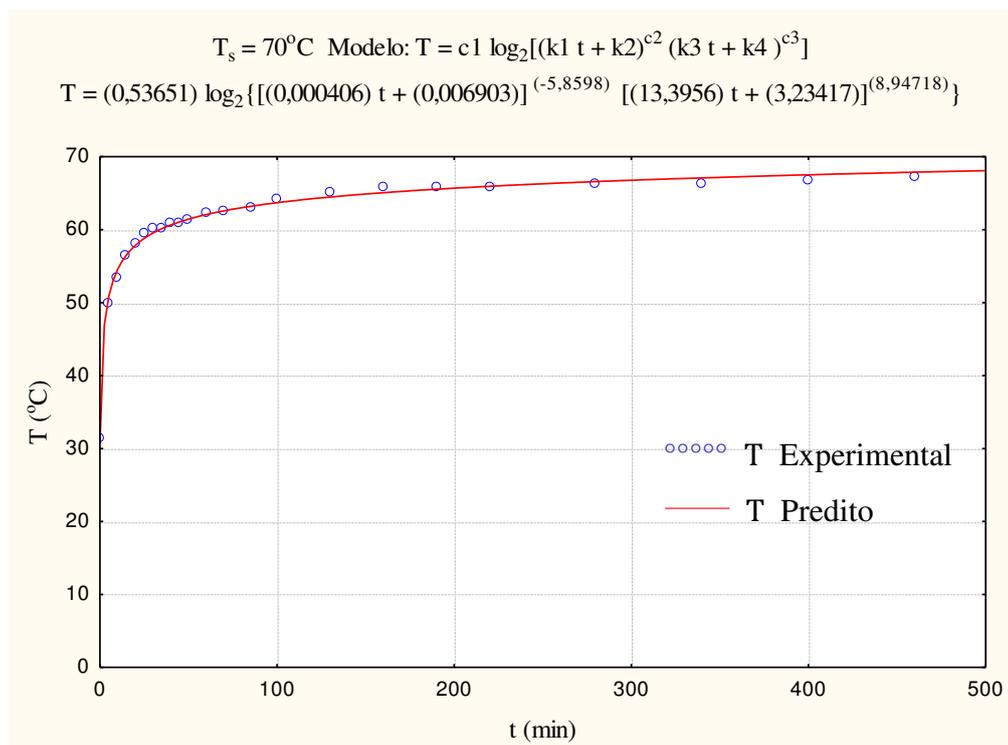


Figura 4.20 - Comparação entre as temperaturas da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 80°C.

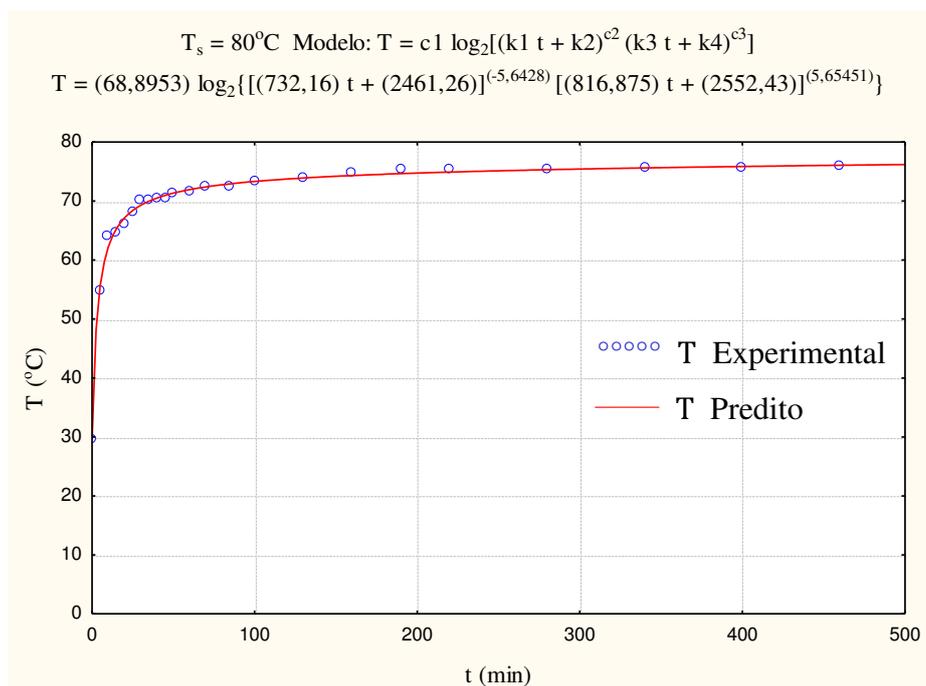
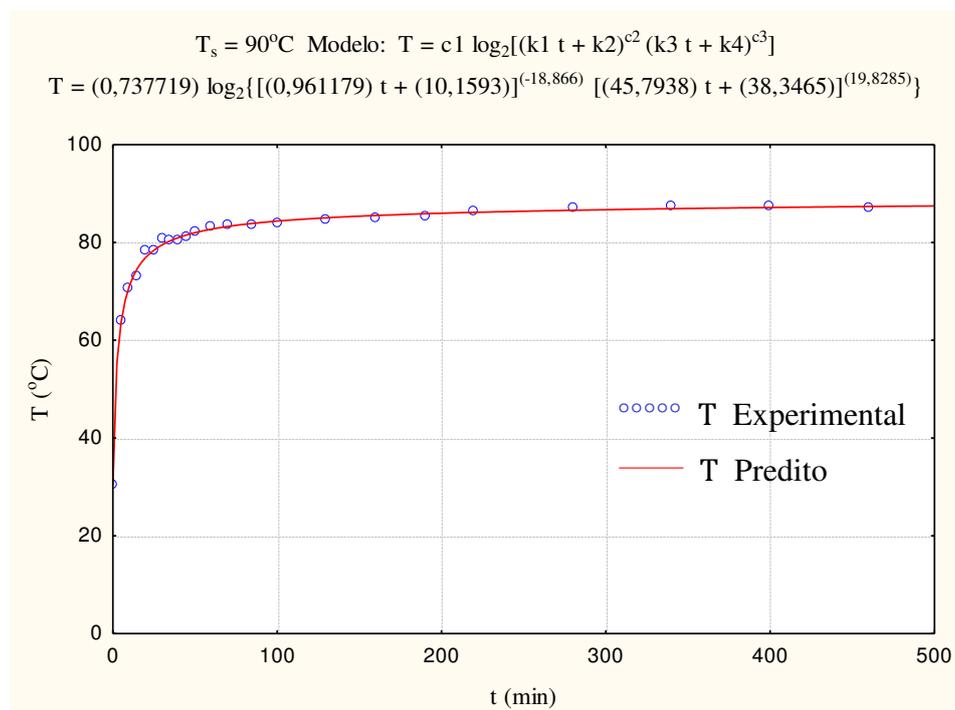


Figura 4.21 - Comparação entre as temperaturas da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 90°C.



É evidenciado na Tabela 4.5 e nos gráficos apresentados nas Figuras 4.17 à 4.21, uma boa concordância entre os valores preditos e experimentais, caracterizados por coeficientes de correlação próximos de 1,0. Conseqüentemente, pode-se afirmar que o

modelo proposto descreve adequadamente o processo de aquecimento das fibras, no entanto, similarmente ao teor de umidade, os parâmetros da equação não apresentam comportamento tendencioso com as condições do ar de secagem.

4.1.3.3 - Equação de equilíbrio

A Tabela 4.6 apresenta as condições do ar e teor de umidade de equilíbrio das fibras para cada condição de secagem.

Tabela 4.6 - Parâmetros experimentais do ar e das fibras para cada teste de secagem.

Teste	Ar			Meio Fibroso
	T (°C)	UR (%)	UA (kg vapor / kg ar seco)	M _{eq} kg/kg (b.s.)
1	50	17,52	0,01357	0,03837
2	60	11,04	0,01382	0,02606
3	70	6,89	0,01348	0,02015
4	80	4,19	0,01242	0,01390
5	90	3,28	0,01443	0,00525

A Figura 4.22 a seguir, ilustra a curva de ajuste do teor de umidade de equilíbrio (M_{eq}) “versus” temperatura de secagem, após ajuste aos dados experimentais da umidade de equilíbrio das amostras. Já a Tabela 4.7, mostra os parâmetros da Equação 3.11 obtidos. Em ambas é evidenciado a boa concordância entre os valores preditos e experimentais, caracterizados por coeficientes de correlação próximos de 1,0.

Figura 4.22 - Comparação dos teores de umidade de equilíbrio das amostras, experimental e predito para os experimentos realizado nas temperaturas de 50°C, 60°C,

70°C, 80°C e 90°C .

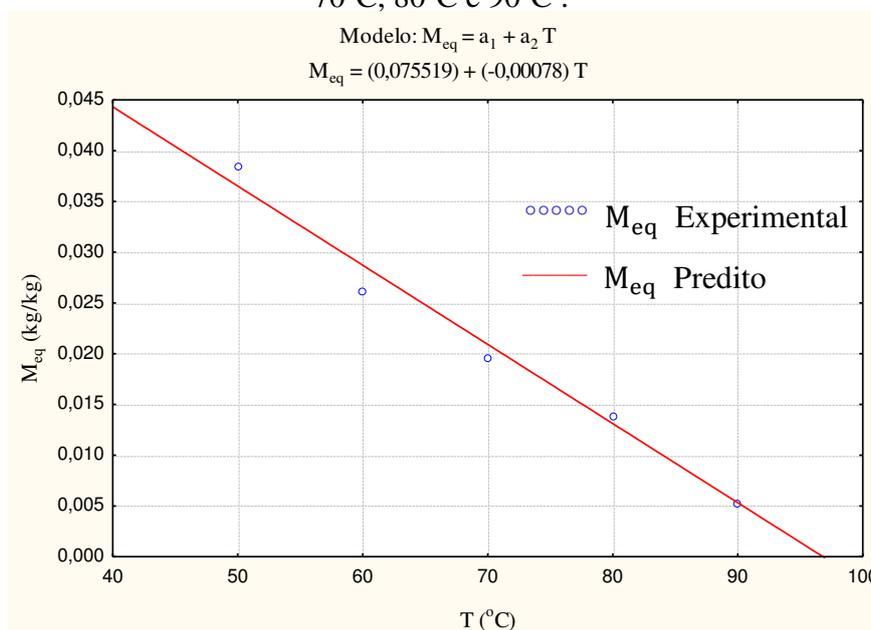


Tabela 4.7 - Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da umidade de equilíbrio das amostras.

a_1 (kg _{vapor} /kg _{m.s.})	a_2 (kg _{vapor} /kg _{m.s.} /°C)	R	Proporção da variância	Função de perda (obs - pred) ²
0,075519	-0,00078	0,98999	0,98009	0,00001249

A partir das Equações (3.13) e (3.14), obtém-se os seguintes resultados apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Parâmetros experimentais do ar e das fibras para as temperaturas de 50°C e 90°C .

T (K)	\bar{R} (kJ/kmol/K)	P (kPa)	* ρ_{ar} (kg _{ar seco} / m ³)	UA (kg _{vapor} / kg _{ar seco})	** C_{eq} (kg _{vapor} / m ³)
50+273,15	0,287	101,325	1,092523	0,01357	0,014825
90+273,15	0,287	101,325	0,972184	0,01443	0,014029

*Calculado pela Equação (3.13);

**Calculado pela Equação (3.14).

Substituindo os dados da Tabela 4.6 e 4.8 na Equação (3.10) e desde que $-a_2 = \beta = 0,000784 \text{ kg}_{vapor}/\text{kg}_{m.s.}/^\circ\text{C}$, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} 0,005249 = \alpha + \sigma \cdot 0,014029 - 0,000784 \cdot 90 \\ 0,038374 = \alpha + \sigma \cdot 0,014825 - 0,000784 \cdot 50. \end{cases} \quad (4.1)$$

Resolvendo o sistema (4.1), encontra-se os seguintes resultados: $\alpha = 0,044702 \text{ kg}_{vapor}/\text{kg}_{m.s.}$ e $\sigma = 2,217337 \text{ m}_3/\text{kg}_{m.s.}$. Nota-se que os valores de α e σ estão coerentes, visto que considerando: $C_{eq} = 0,014029 \text{ kg}_{vapor}/\text{m}^3$, (para $T = 90^\circ\text{C}$), obtém-se: $\alpha + \sigma \cdot C_{eq} = 0,075809 \approx a_1$.

Dessa forma, obtém-se a seguinte equação de equilíbrio:

$$M = 0,044702 + 2,217337 C - 0,000784 T. \quad (4.2)$$

A Equação (4.2) descreve a dependência linear da temperatura (T), concentração de vapor de água (C) e do teor de umidade (M). Essa equação foi de fundamental importância para realização dessa pesquisa, tendo em vista, que o acoplamento do teor de umidade e temperatura foi possível a partir da aplicação da mesma, que estabeleceu uma relação entre a Equação de Difusão de Vapor e a Equação de Condução de Calor.

4.2 - Numérico

Os resultados obtidos com a modelagem matemática dependem das condições de contorno, das propriedades termo-físicas e da geometria analisada. Para resolver os sistemas de equações gerados pelas Equações (3.39) e (3.43), um programa computacional, desenvolvido por Silva (2009) utilizando o “software” Mathematica, foi adaptado para este trabalho. Nele, o sistema de equações lineares são resolvidas iterativamente usando o método de Gauss-Seidel com a condição de contorno de terceira espécie (condição de contorno convectiva), que pressupõe uma possível resistência ao fluxo de massa (água) na superfície do meio. Nesse caso, o processo é governado não só pela difusividade de massa efetiva (D), mas também pelo coeficiente de transferência de massa convectivo (h_m), na superfície do material.

Neste trabalho utilizou-se um modelo que possibilitou o estudo acoplado de transferência de calor e umidade em meios fibrosos. Esse acoplamento do teor de umidade e temperatura foi possível a partir da aplicação da Equação (4.2), a equação de equilíbrio que estabelece uma relação entre as Equações (3.39) e (3.43). Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir de dados experimentais da secagem de fibras de sisal nas temperaturas 50, 60, 70, 80 e 90°C.

A Tabela 4.9 apresenta algumas propriedades termofísicas do meio fibroso para cada experimento de secagem. Esses dados foram utilizados na simulação.

Tabela 4.9 - Propriedades termofísicas das amostras utilizadas na simulação.

Experimento Parâmetros	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
M_o (kg/kg (b.s.))	0,11327	0,11118	0,11148	0,11030	0,11342
M_{eq} (kg/kg (b.s.))	0,03837	0,02606	0,02015	0,01390	0,00525
C_o (kg _{vapor} /m ³)	0,04146	0,04052	0,04125	0,04005	0,04174
C_{eq} (kg _{vapor} /m ³)	0,01482	0,01458	0,01381	0,01439	0,01403
T_o (°C)	29,8	29,8	31,5	29,6	30,4
T_{eq} (°C)	50	60	70	80	90
UR (%)	17,52	11,04	6,89	4,19	3,28
UA (kg vapor / kg ar seco)	0,01363009	0,01387474	0,01353746	0,01247158	0,01448916
UA _{sat} (kg vapor/kg ar seco)	0,08631	0,1524	0,2765	0,5464	1,399
$\rho_{(amost.)}$ (kg/m ³)	83,088	74,96	81,956	85,138	90,782
$c_{p(amost.)}$ (J/kg·K)	960,845379	964,200673	961,617968	959,846415	959,621148
$k_{(amost.)}$ (W/m·K)	0,03016876	0,03066697	0,03141034	0,03209132	0,03277896
$\rho_{(fibra)}$ (kg/m ³)	1450	1450	1450	1450	1450
$c_{p(fibra)}$ (J/kg·K)	149,65	149,65	149,65	149,65	149,65
$k_{(fibra)}$ (W/m·K)	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
h_s (kJ/kg)	2382,90	2358,34	2333,26	2307,62	2281,39

A Tabela 4.10 apresenta algumas propriedades termofísicas do ar de secagem na pressão atmosférica para cada experimento. Esses dados foram utilizados para obter os parâmetros da Tabela 4.11 e os coeficientes de transporte da Tabela 4.12.

Tabela 4.10 - Propriedades termofísicas do ar de secagem na pressão atmosférica.

Teste Propr.	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
v (m/s)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
ρ_{ar} (kg/m ³)	1,083506	1,050832	1,020411	0,992138	0,963675
k (W/m·K)	0,026888	0,027574	0,028260	0,028947	0,029602
μ (N·s/m ²)	$19,054 \times 10^{-6}$	$19,50871 \times 10^{-6}$	$19,96557 \times 10^{-6}$	$20,42738 \times 10^{-6}$	$20,84744 \times 10^{-6}$
D_{AB} (m ² /s)	$28,06 \times 10^{-6}$	$29,597 \times 10^{-6}$	$31,1693 \times 10^{-6}$	$32,77623 \times 10^{-6}$	$34,41763 \times 10^{-6}$
c_p (kJ/kg K)	1,033103	1,033542	1,033492	1,032823	1,034816
ν (m ² /s)	$17,58550 \times 10^{-6}$	$18,56501 \times 10^{-6}$	$19,56620 \times 10^{-6}$	$20,58925 \times 10^{-6}$	$21,63327 \times 10^{-6}$

A Tabela 4.11 apresenta alguns parâmetros de transporte calculados para cada teste experimental. Esses dados foram utilizados para determinar os coeficientes de transporte da Tabela 4.12.

Tabela 4.11 - Parâmetros de transporte calculados para cada teste experimental.

Teste Parâmetro	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
Pr	$732,1015 \times 10^{-3}$	$731,2349 \times 10^{-3}$	$730,1577 \times 10^{-3}$	$728,8447 \times 10^{-3}$	$728,7772 \times 10^{-3}$
Sc	0,626711	0,627260	0,627739	0,628176	0,628552
Le	0,844543	0,846054	0,848236	0,851272	0,850171
Re _x	142,1625	134,6619	127,7713	121,4225	115,5627
Re _y	71,0812	67,3309	63,8856	60,7112	57,7813
Re _z	142,1625	134,6619	127,7713	121,4225	115,5627
\bar{Nu}_{cx}	7,13539	6,94186	6,75860	6,58460	6,42355
\bar{Nu}_{cy}	5,04548	4,90864	4,77905	4,65601	4,54213
\bar{Nu}_{cz}	7,13539	6,94186	6,75860	6,58460	6,42355
\bar{Nu}_{mx}	6,77511	6,59588	6,42655	6,26630	6,11445
\bar{Nu}_{my}	4,79072	4,66399	4,54425	4,43094	4,32357
\bar{Nu}_{mz}	6,77511	6,59588	6,42655	6,26630	6,11445

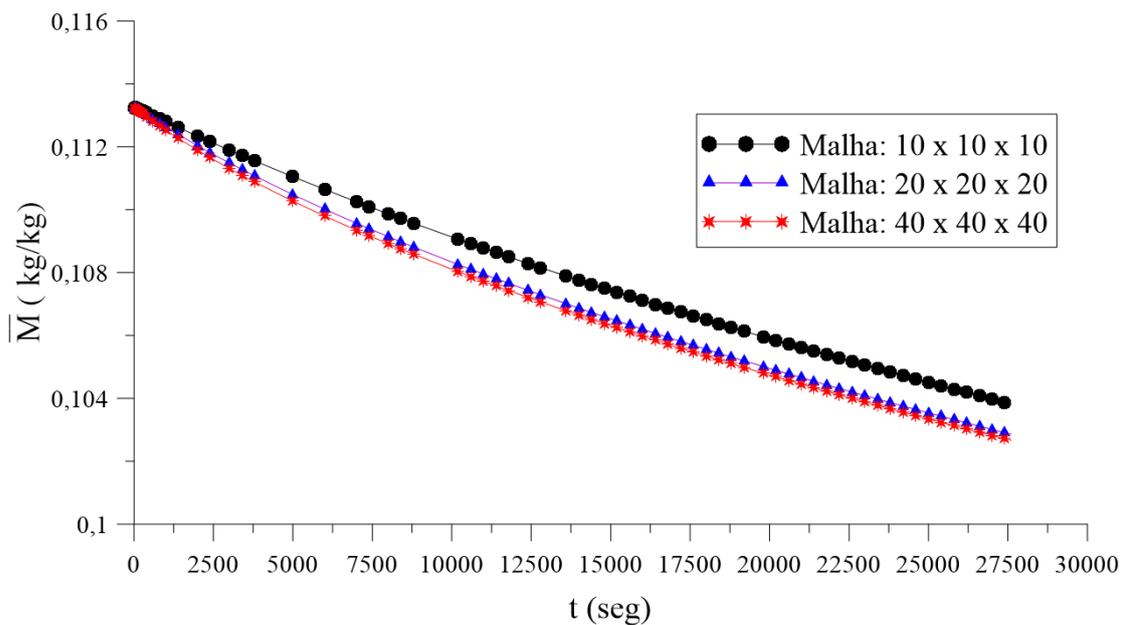
Posteriormente na Tabela 4.12 foram apresentados e discutidos os valores dos coeficientes de transporte difusivo e convectivo obtidos após comparação dos dados preditos com os dados experimentais, para cada experimento realizado.

4.2.1 - Validação da malha e do passo de tempo

Com a finalidade de escolher a malha adequada para simulação, foi realizado três testes considerando malhas de $(10 \times 10 \times 10)$, $(20 \times 20 \times 20)$ e $(40 \times 40 \times 40)$ pontos nodais, respectivamente. Utilizou-se nas simulações $\Delta t = 20$ s e temperatura de secagem de 50°C .

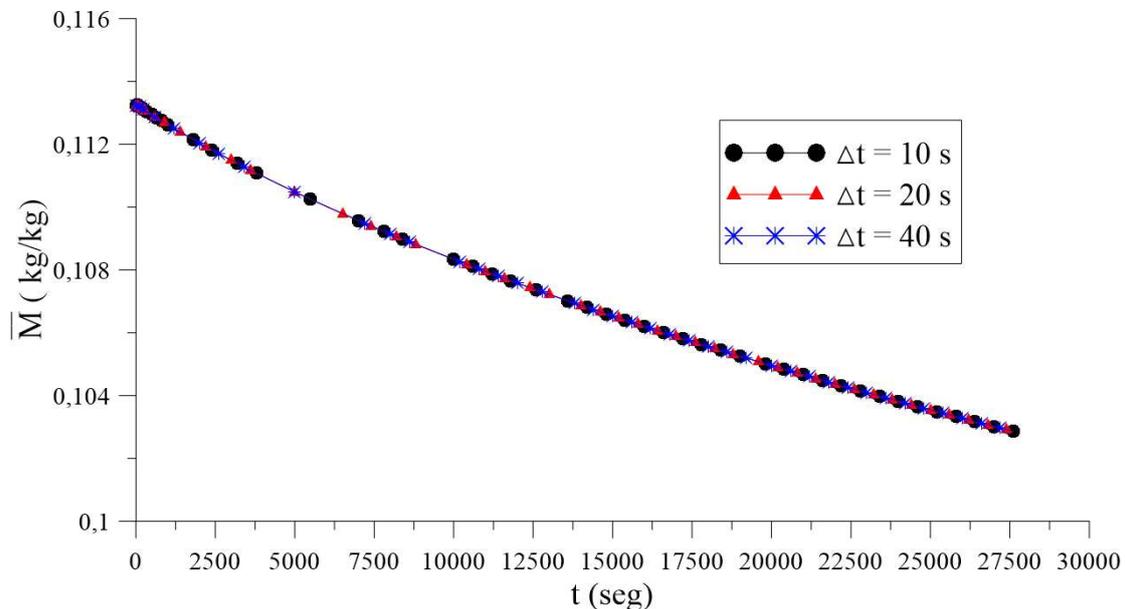
De acordo com os resultados obtidos na Figura 4.23, verifica-se que a malha que melhor representa o objeto em estudo seria a $20 \times 20 \times 20$, devido à aproximação dos resultados e por constituir um número satisfatório de ponto nodais, além da otimização do tempo de processamento.

Figura 4.23 - Comparação entre os resultados numéricos dos teores de umidade média das fibras de sisal em função do tempo para malhas de $(10 \times 10 \times 10)$, $(20 \times 20 \times 20)$ e $(40 \times 40 \times 40)$ pontos nodais, temperatura de 50°C e $\Delta t = 20$ s.



Uma vez definida a malha $20 \times 20 \times 20$, o refino do intervalo de tempo Δt foi feito para isso, três simulações com $\Delta t = 10$ s, 20 s e 40 s foram realizadas. Para fins de validação, os resultados obtidos foram comparados, como mostra a Figura 4.24.

Figura 4.24 - Comparação entre os resultados numéricos dos teores de umidade média das fibras de sisal em função do tempo para intervalos de tempo de 10 s, 20 s e 40 s, temperatura de 50°C e malhas de 20 × 20 × 20 pontos nodais.



A análise da Figura 4.24 possibilita constatar a concordância entre os resultados oriundos dos três testes. Assim, escolheu-se, que o intervalo de tempo $\Delta t = 20$ s seria o mais adequado devido a três fatores: a) coerência com os dados experimentais, tendo em vista que nos instantes iniciais de processo, a perda de umidade é muito mais intensa; b) uma precisão numérica desejável se comparado com $\Delta t = 10$ s; e c) a otimização no tempo de processamento do programa em relação a $\Delta t = 40$ s.

Portanto, para todas as simulações subsequentes, considerou-se uma malha numérica de 20 × 20 × 20 pontos nodais e um $\Delta t = 20$ s.

4.2.2 - Análise da secagem e aquecimento do sólido

Neste tópico serão apresentados os resultados das cinéticas de secagem e aquecimento, e distribuição de umidade e temperatura no interior do meio fibroso, para cada condição de secagem.

As Figuras 4.25 à 4.29, apresentam a comparação dos valores numéricos e experimentais do teor de umidade médio (em base seca) do meio fibroso em função do tempo para as temperaturas de 50°C à 90°C. Verifica-se uma boa concordância entre os

teores de umidades médios numéricos e experimentais, em todas as condições de secagem.

Figura 4.25 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais do teor de umidade médio do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 50°C.

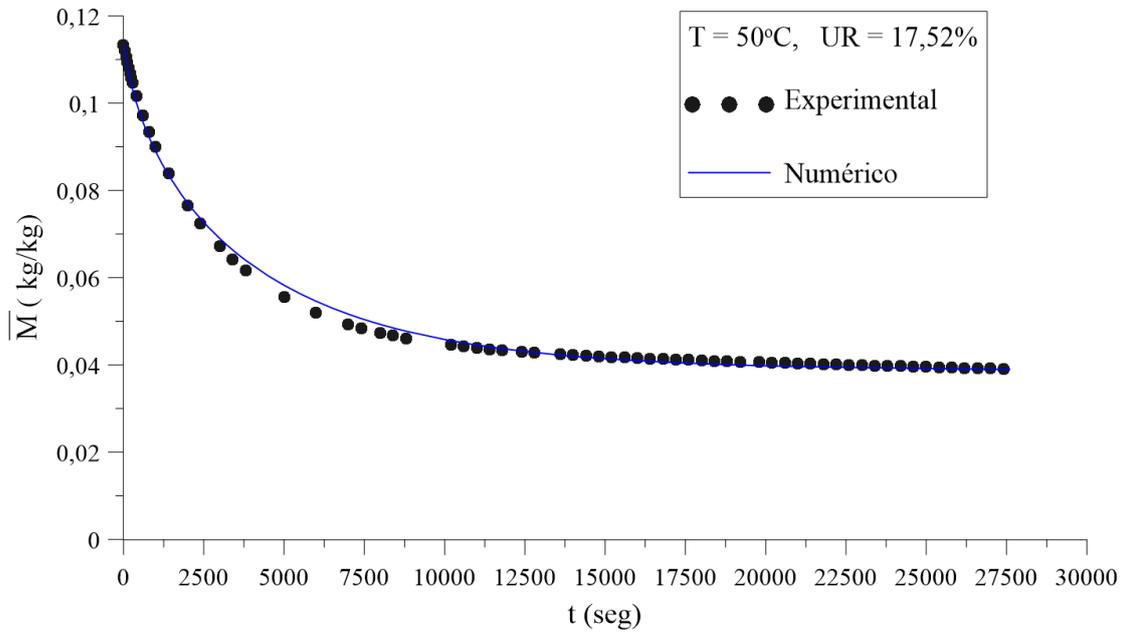


Figura 4.26 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais do teor de umidade médio do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 60°C.

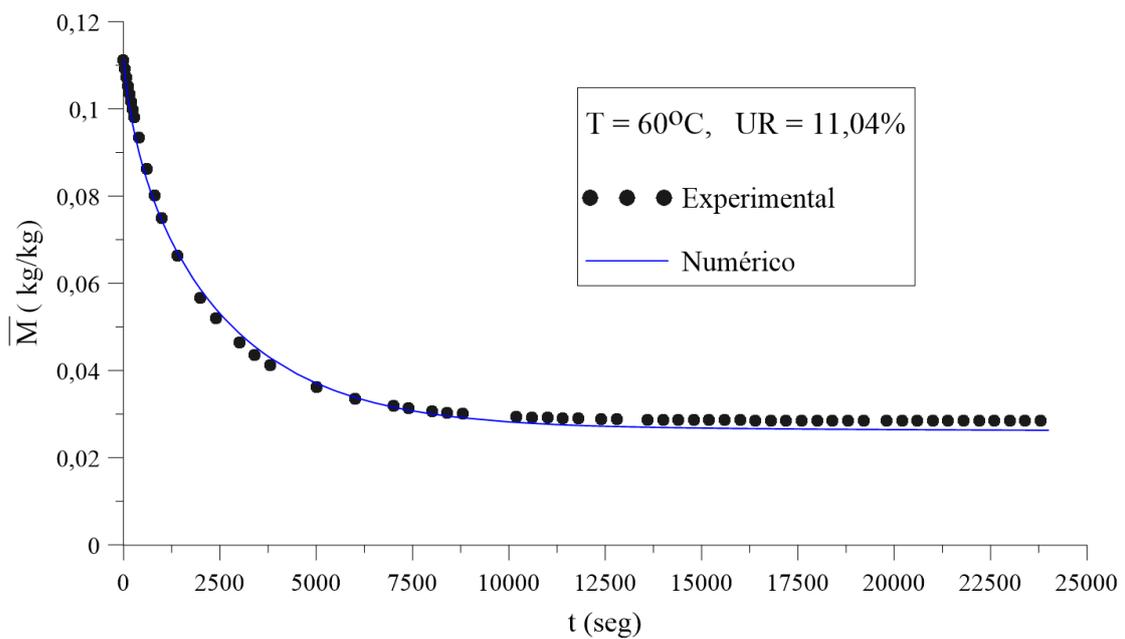


Figura 4.30 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais da temperatura superficial do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 50°C.

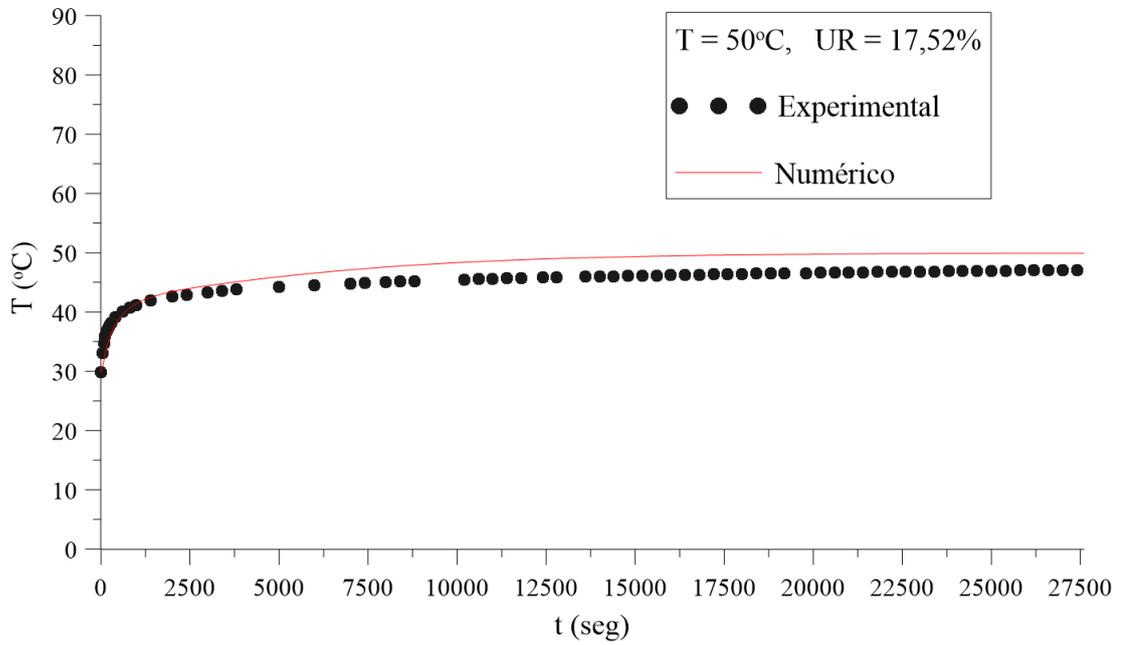


Figura 4.31 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais da temperatura superficial do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 60°C.

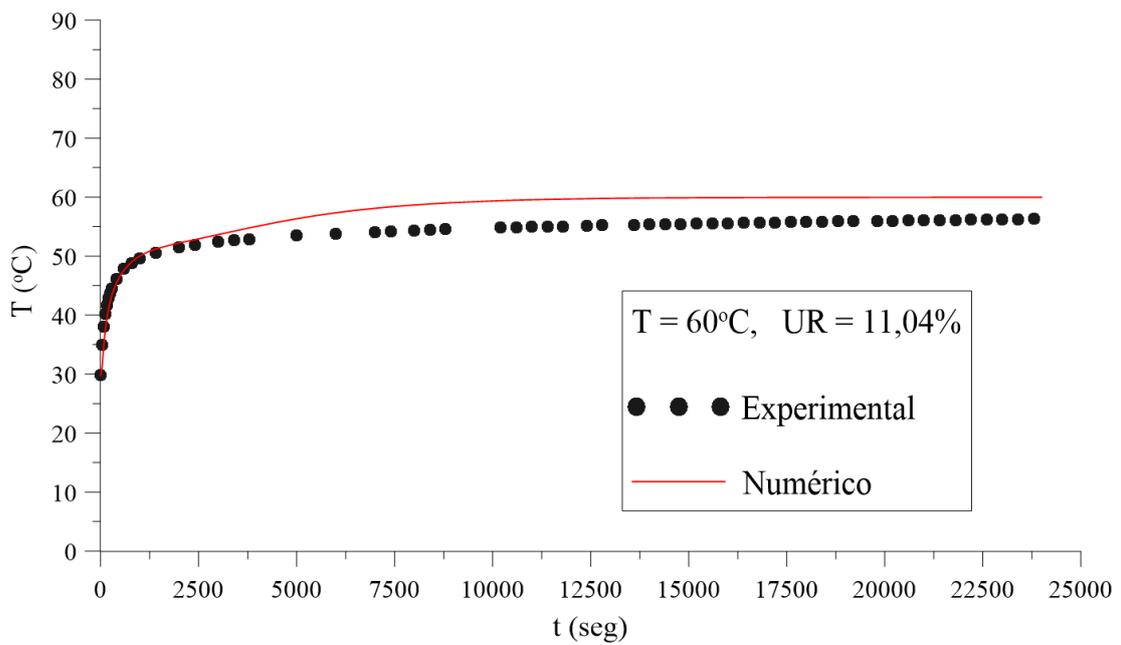


Figura 4.32 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais da temperatura superficial do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 70°C.

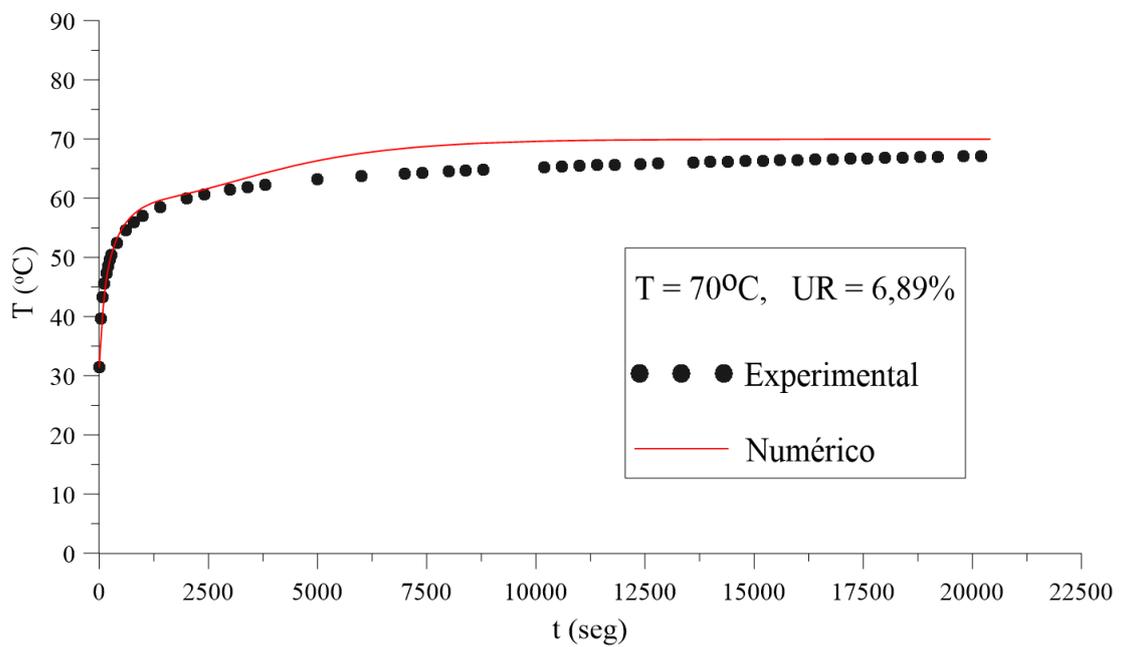


Figura 4.33 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais da temperatura superficial do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 80°C.

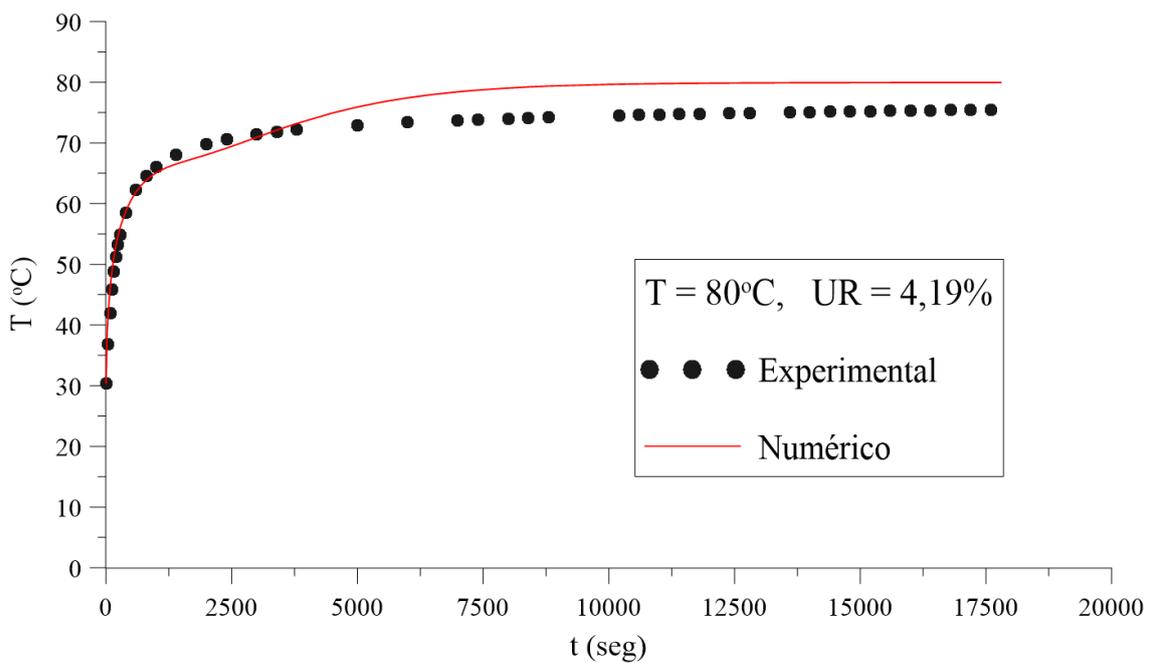
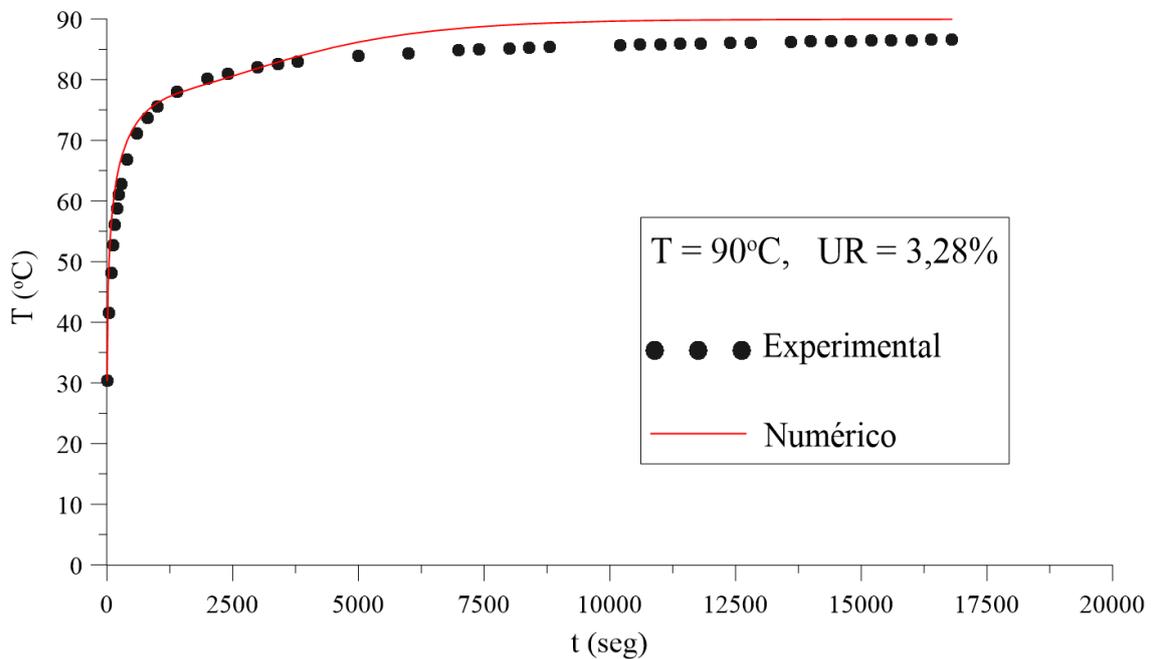


Figura 4.34 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais da temperatura superficial do meio fibroso em função do tempo para uma temperatura de 90°C.

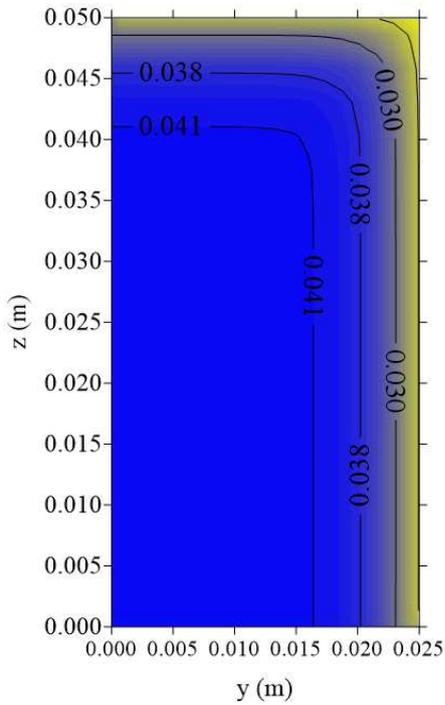


Analisando os resultados, através de uma inspeção das Figuras 4.30 à 4.34, é possível afirmar que o modelo empregado para descrever a cinética de aquecimento do meio fibroso, considerando volume e parâmetros de transporte constantes, pode ser considerado satisfatório, mesmo sendo percebido uma discrepância entre os resultados simulados e os dados experimentais a partir de $t = 4000$ s. Essa discrepância pode ter sido ocasionada por erros no processo de medição da temperatura durante os experimentos, ou até mesmo, do próprio aparelho de medição.

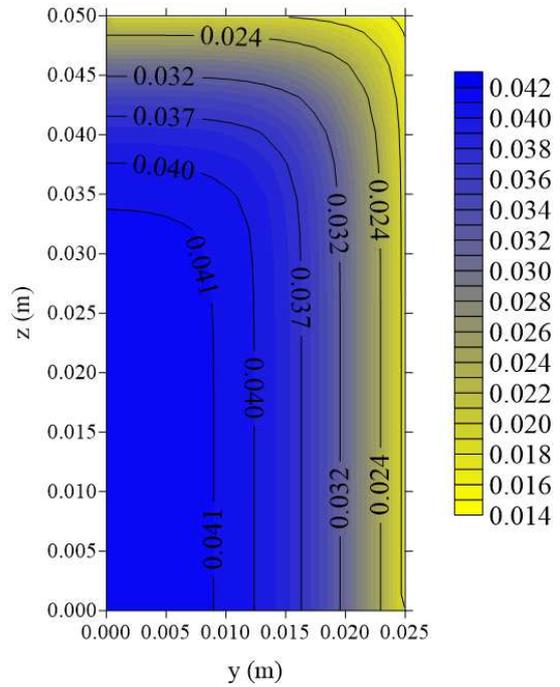
Essas diferenças observadas entre os resultados simulados e os dados experimentais da temperatura após os 4000 s de processo, pode também indicar que o coeficiente convectivo de calor h_c neste intervalo de tempo deveria ter um valor menor do que nos instantes iniciais. Nesse caso, a hipótese de h_c variável ao longo do processo, seria uma escolha mais adequada.

As Figuras 4.35 à 4.40 apresentam a distribuição da concentração de vapor de água no interior do meio fibroso, analisados nos planos $x = 0,025$ m ($R_1/2$), $y = 0,0125$ m ($R_2/2$) e $z = 0,025$ m ($R_3/2$) para os tempos 200 s, 700 s e 8000 s, respectivamente. É importante, lembrar que, todos os resultados estão plotados para 1/8 do volume do corpo fibroso, devido a simetria que existe no problema físico e na geometria do meio.

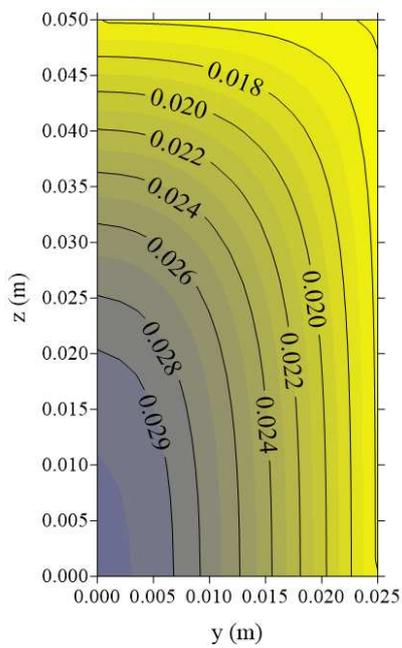
Figura 4.35 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano yz em $x = 0,025 \text{ m}$ ($R_1/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C .



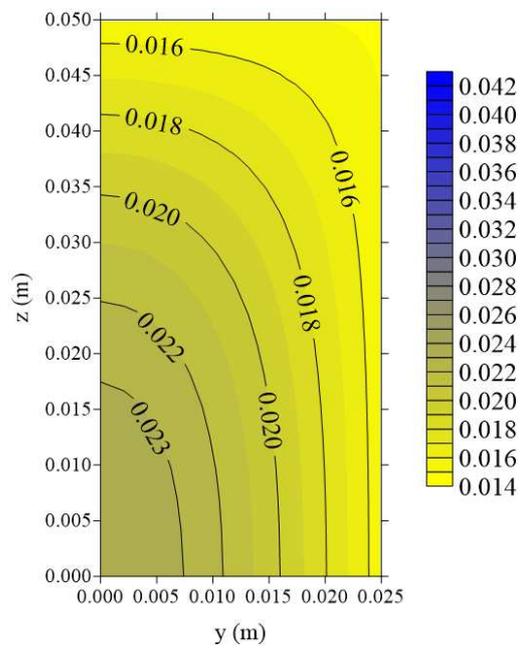
a)



b)



c)



d)

Figura 4.36 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano xz em $y = 0,0125 \text{ m}$ ($R_2/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C .

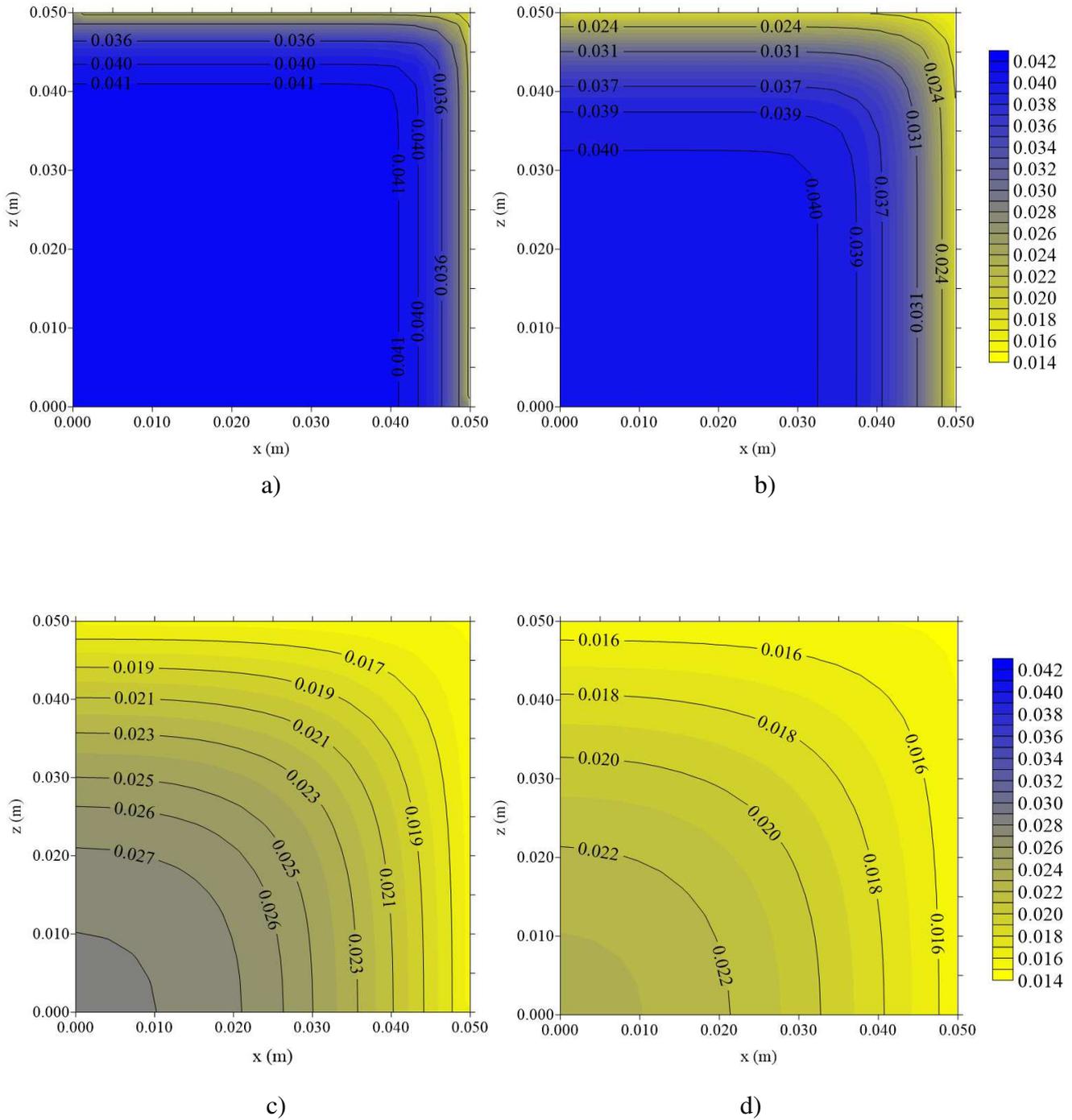
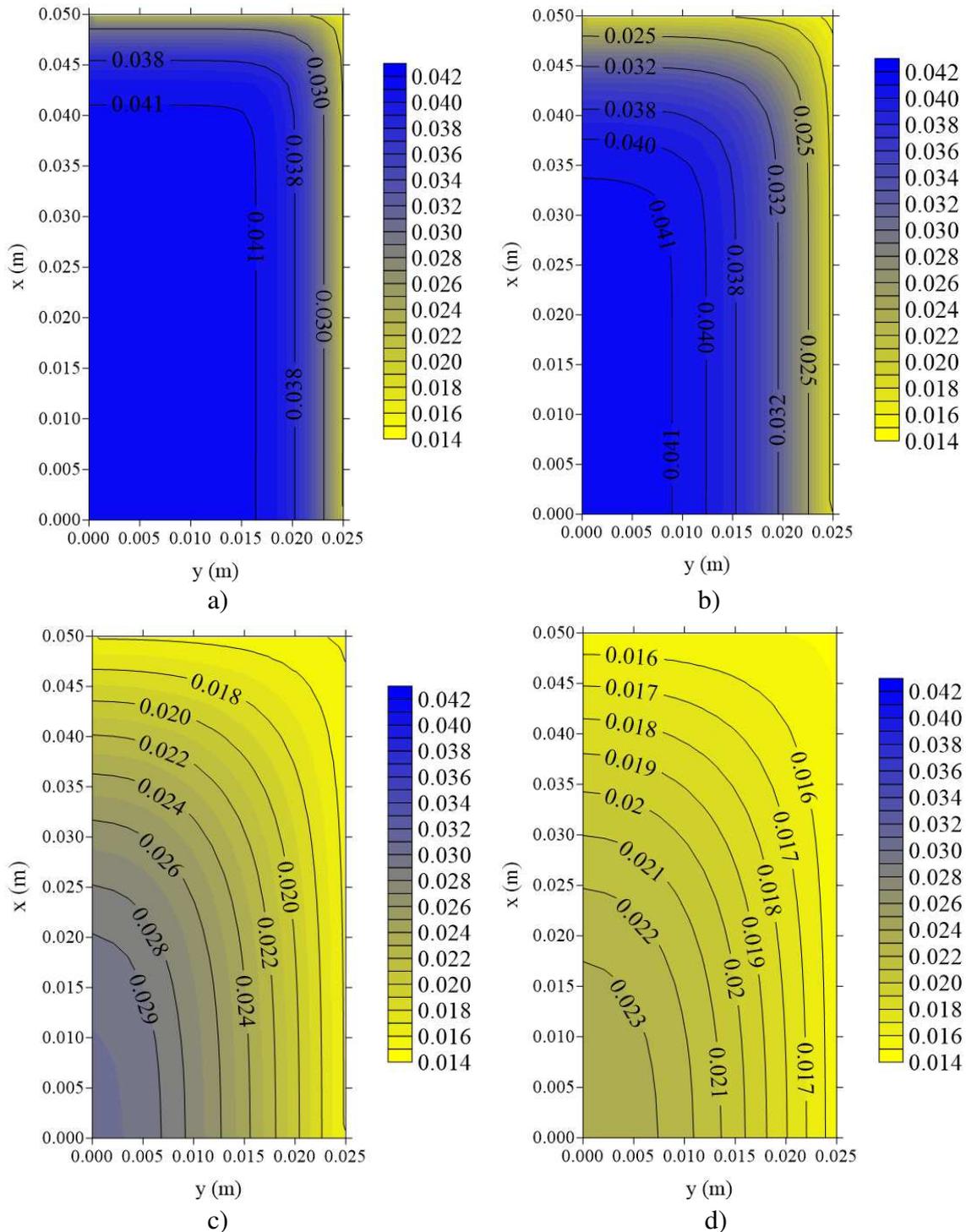


Figura 4.37 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano xy em $z = 0,025 \text{ m}$ ($R_3/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C .



A partir das Figuras 4.35 à 4.37, observa-se que, para a temperatura de secagem a 50°C , não foi possível eliminar totalmente os gradientes de concentração de vapor de água no interior do corpo em $t = 8000 \text{ s}$. No entanto, é possível verificar nas Figuras

4.38 à 4.40 que, para temperatura de secagem a 90°C , esses gradientes de concentração de vapor de água foram praticamente eliminados em $t = 8000$ s.

Nas Figuras 4.38 à 4.40, a concentração de vapor de água no interior do corpo apresenta um comportamento semelhante às Figuras 4.35 à 4.37, embora se perceba que a velocidade de secagem seja maior.

Figura 4.38 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano yz em $x = 0,025$ m ($R_1/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C .

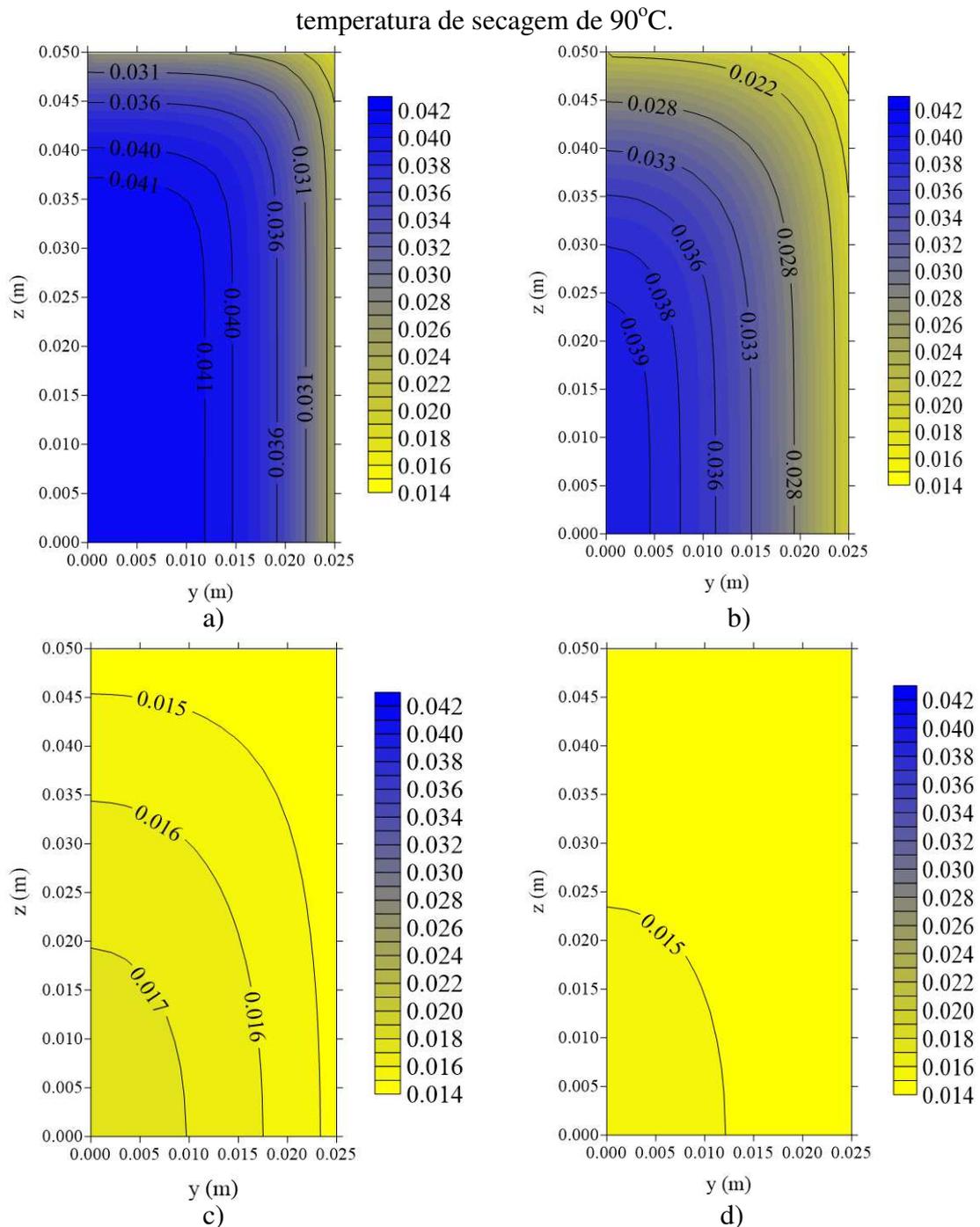


Figura 4.39 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano xz em $y = 0,0125 \text{ m}$ ($R_2/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C .

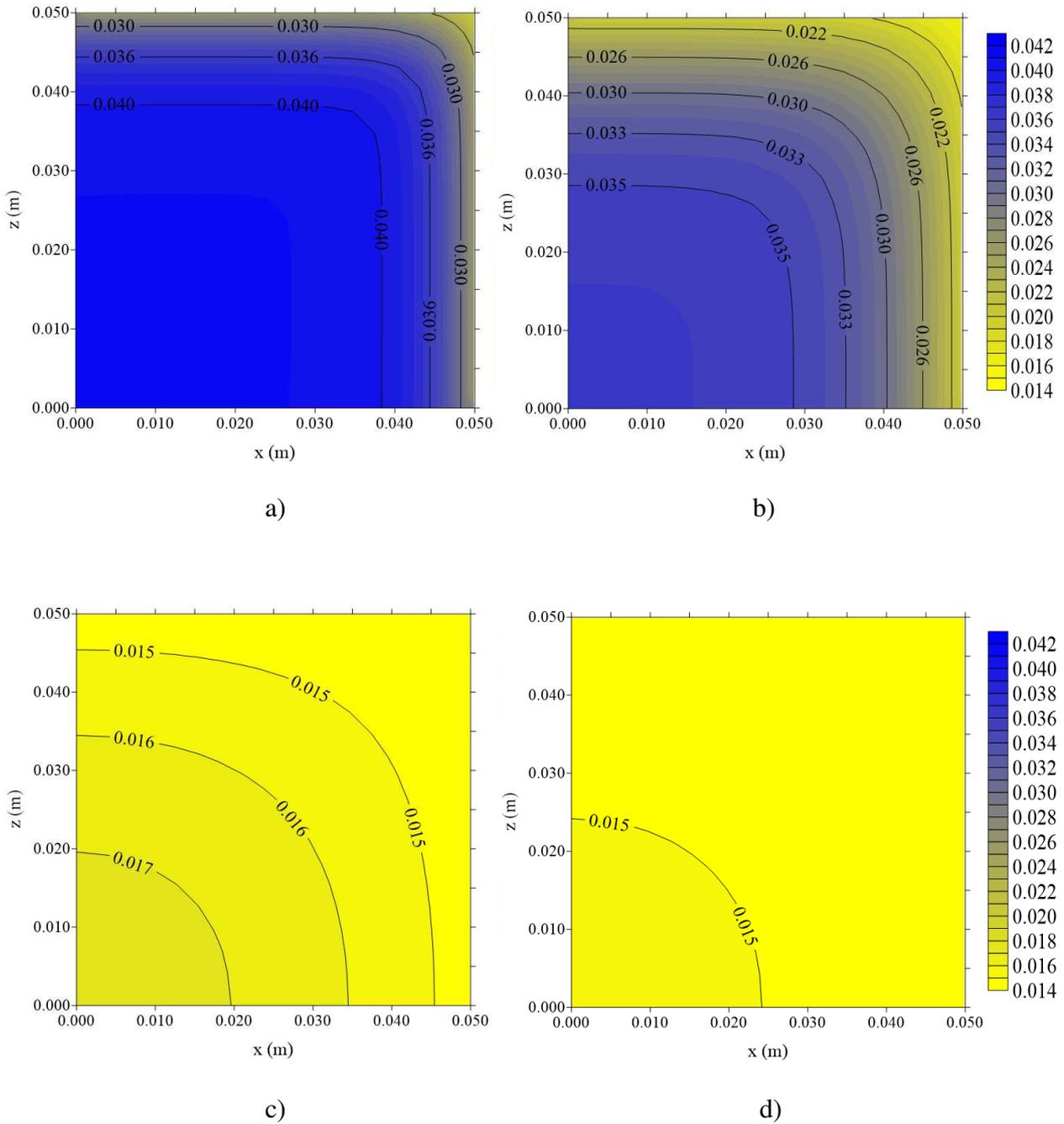
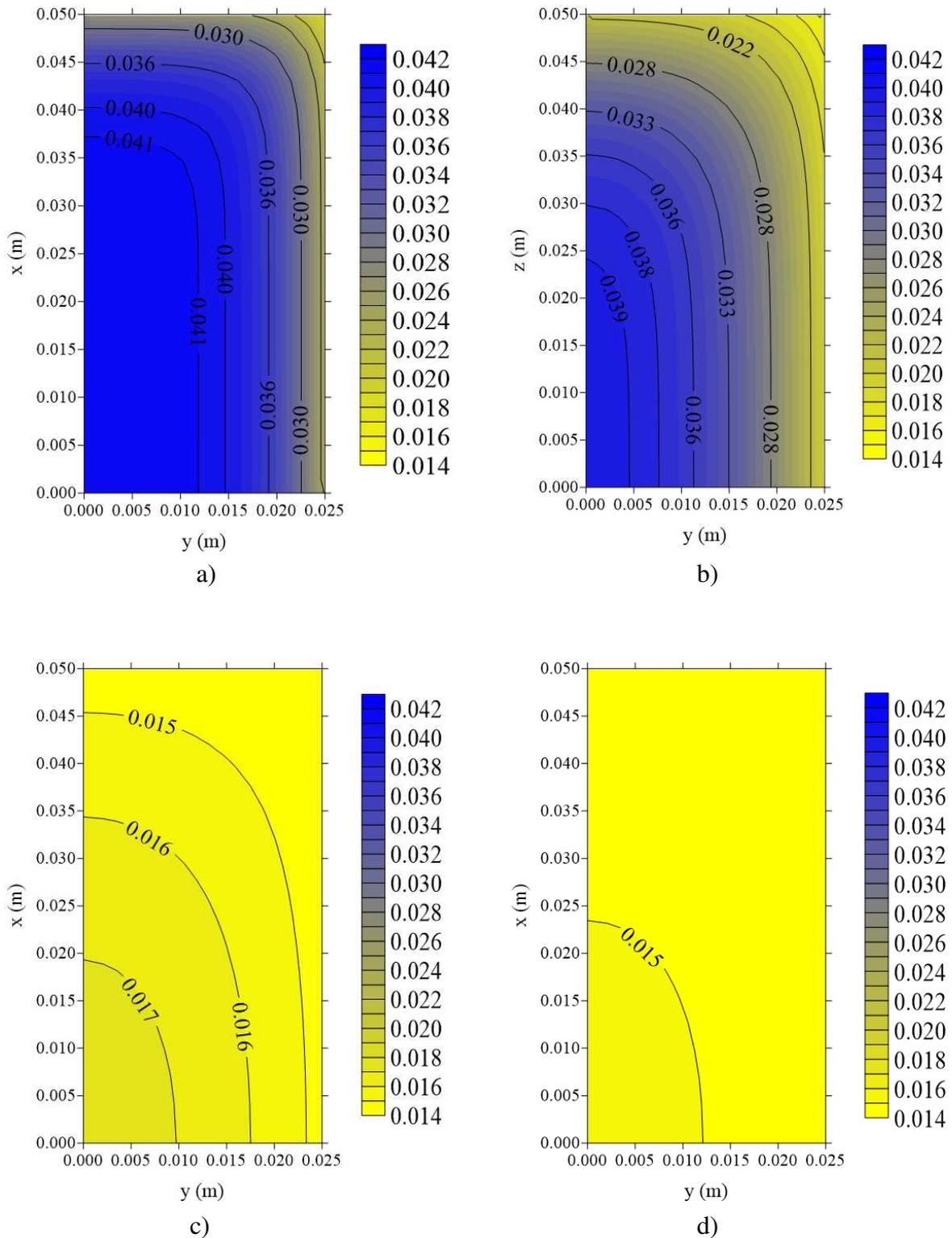


Figura 4.40 - Distribuição da concentração de vapor de água ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$) no plano xy em $z = 0,025 \text{ m}$ ($R_3/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C .



Através das Figuras 4.35 à 4.40, pode-se verificar que, como esperado, o meio fibroso seca mais rapidamente à medida que a temperatura do ar de secagem cresce. Para $T = 50^{\circ}\text{C}$, por exemplo, praticamente nenhum elemento da malha atingiu a concentração de vapor de água de equilíbrio em $t = 200$ s, enquanto que para a temperatura de 90°C , alguns elementos próximo ao vértice do paralelepípedo atingiram o valor de equilíbrio para a concentração de vapor em $t = 200$ s.

A partir das Figuras 4.35 à 4.40, observa-se que os gradientes de concentração de vapor de água tendem a diminuir lentamente em direção a zero para tempos longos de processo. Verificou-se também que, ao final dos dois testes considerados, a secagem a maior temperatura apresentou menor quantidade de vapor de água no centro, ao término da secagem. Isto indica que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor será o tempo necessário para o nivelamento de umidade em seu interior, diminuindo, portanto, o tempo de operação total do processo.

A concentração de vapor de água apresenta os maiores resultados nas regiões centrais do corpo em qualquer tempo. Percebe-se também o decréscimo da concentração de vapor ao longo do tempo, em qualquer posição, tendendo para o seu valor de equilíbrio, para tempos de secagem suficientemente longos.

Nas Figuras 4.35 à 4.40, observa-se também nos dois testes, a existência de altos gradientes de vapor de água próximo a superfície do corpo, no início do processo de secagem, em $t = 200$ s. As áreas onde os gradientes de vapor de água são elevados são as áreas com maior perda de água. Estas áreas também apresentam altos gradientes de temperatura. Estes efeitos elevam as tensões térmicas, hídricas e mecânicas e, conseqüentemente, o surgimento de deformações nas fibras, comprometendo a sua qualidade final. Efeitos semelhantes foram observados por Santos (2017).

As Figuras 4.41 à 4.46 apresentam a distribuição da temperatura no interior do meio fibroso, analisados nos planos $x = 0,025$ m ($R_1/2$), $y = 0,0125$ m ($R_2/2$), $z = 0,025$ m ($R_3/2$) para os tempos e 200 s, 700 s e 8000 s, respectivamente.

Figura 4.41 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) no plano yz em $x = 0,025\text{ m}$ ($R_1/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C .

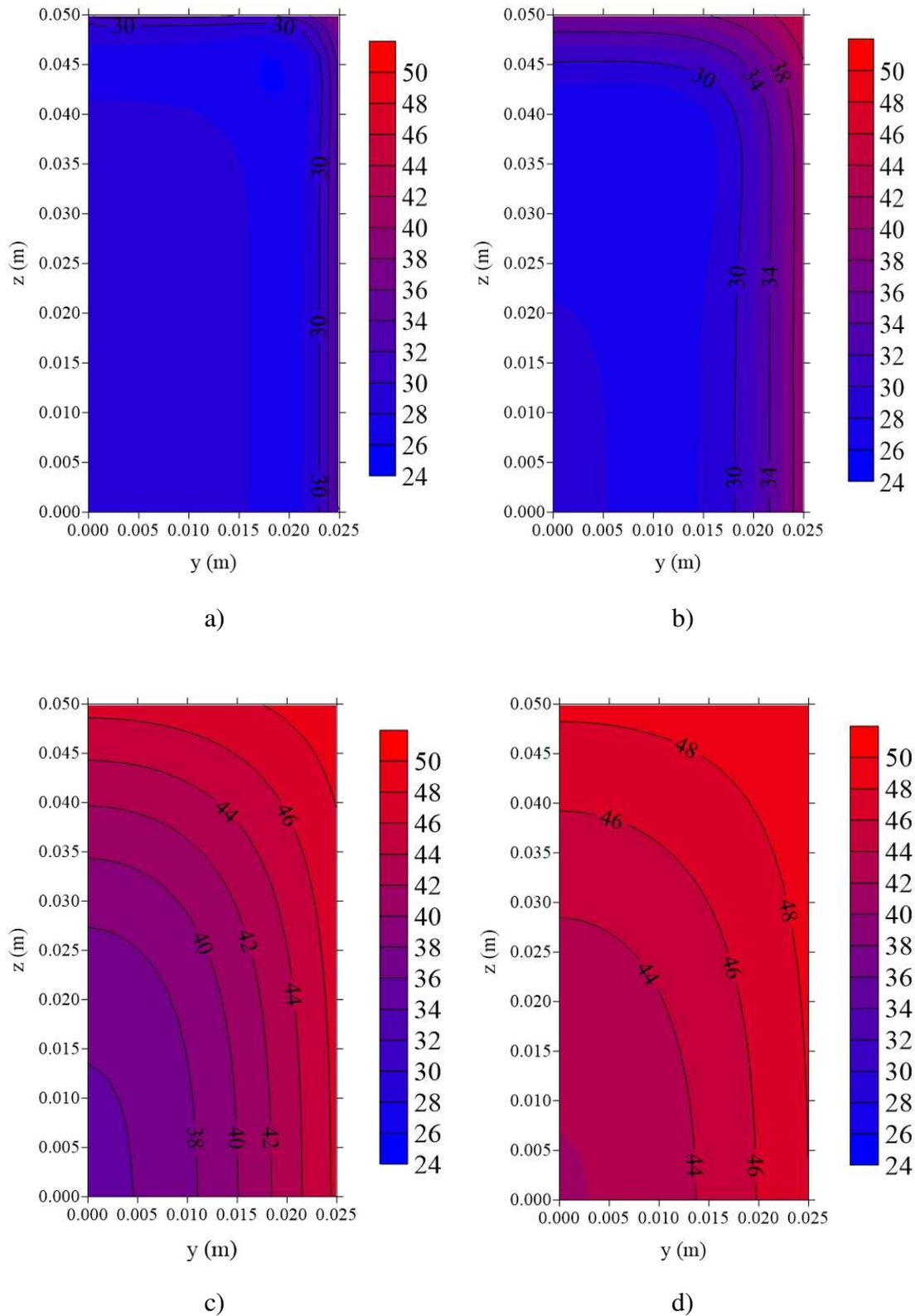


Figura 4.42 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) no plano xz em $y = 0,0125\text{ m}$ ($R_2/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C .

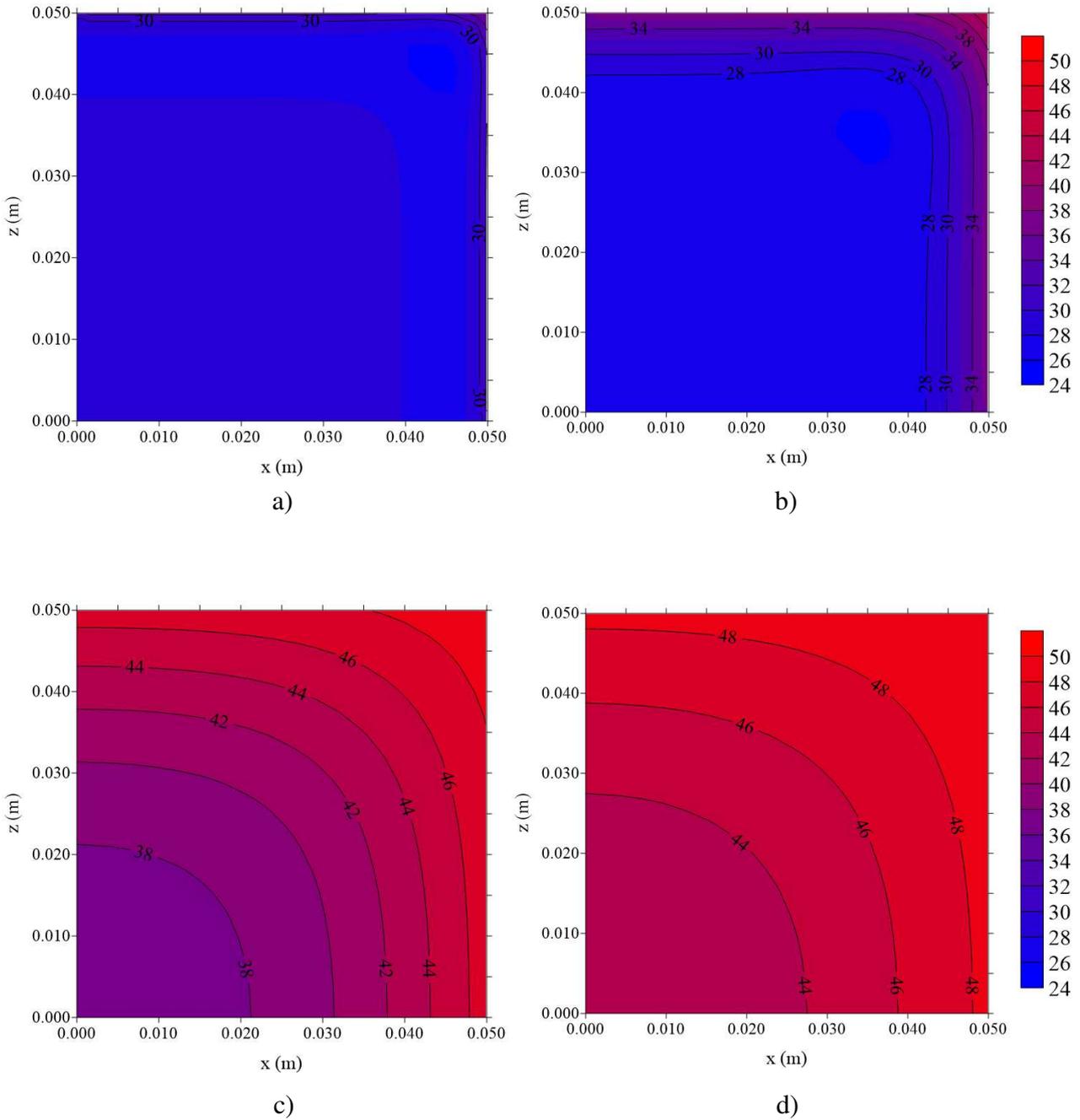
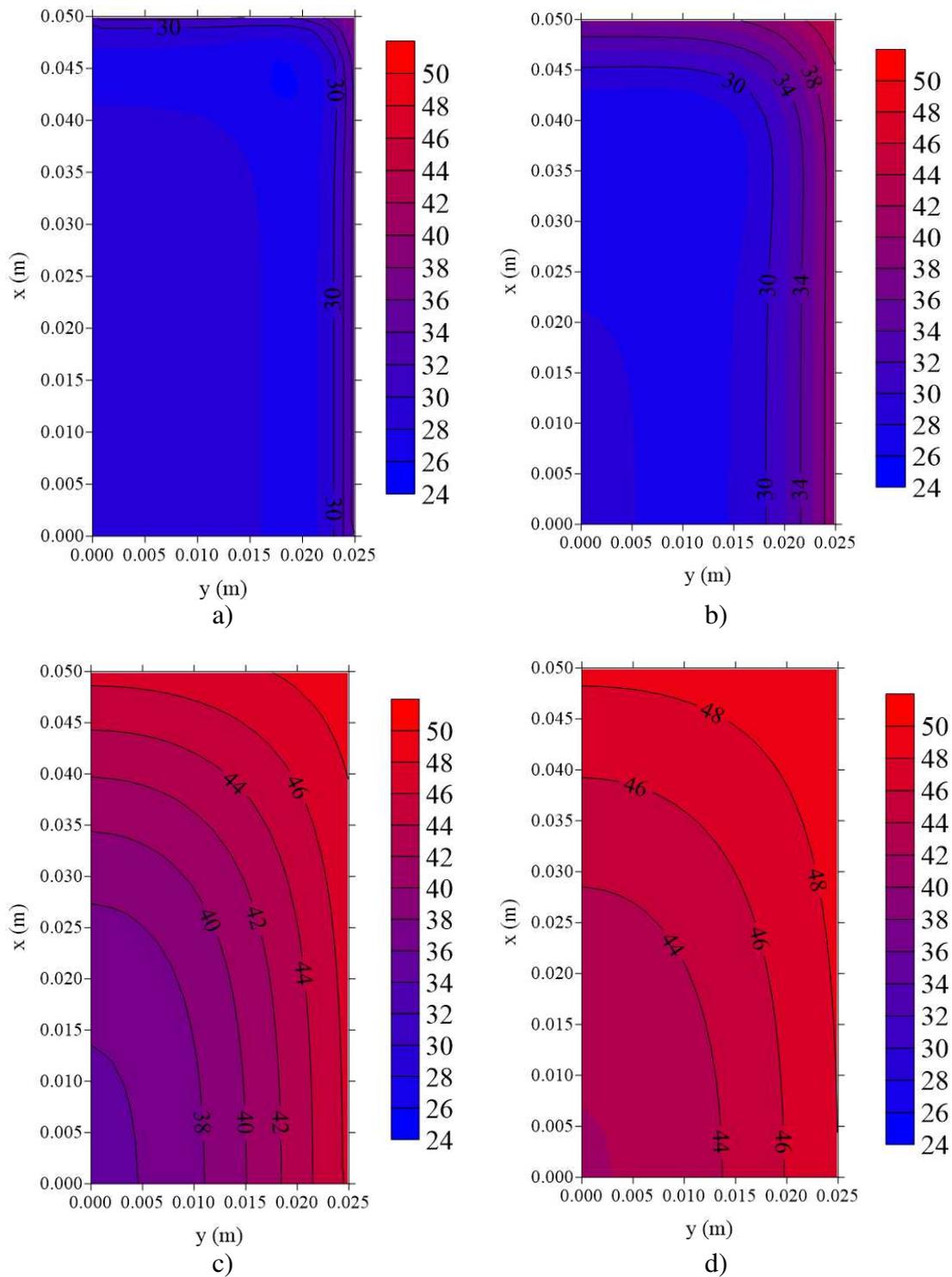


Figura 4.43 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) no plano xy em $z = 0,025\text{ m}$ ($R_3/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 50°C .



A temperatura apresenta os menores resultados nas regiões centrais do corpo em qualquer tempo. Percebe-se também o acréscimo da temperatura ao longo do tempo, em qualquer posição, tendendo para o seu valor de equilíbrio, para tempos de secagem

suficientemente longos. Comprova-se assim, que o fluxo de calor se dá da superfície para o centro do material.

Figura 4.44 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) no plano yz em $x = 0,025\text{ m}$ ($R_1/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C .

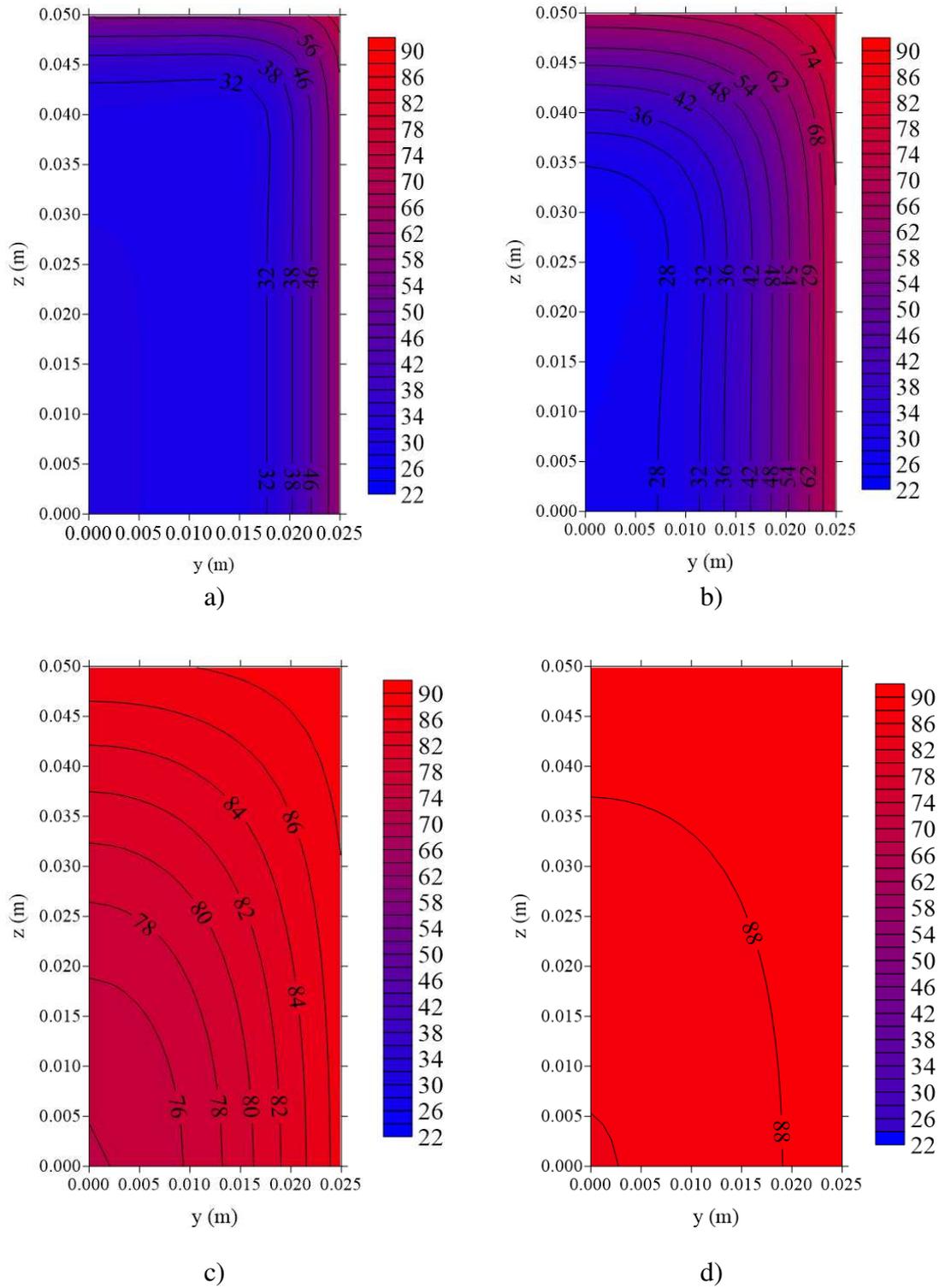


Figura 4.45 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) no plano xz em $y = 0,0125 \text{ m}$ ($R_2/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C .

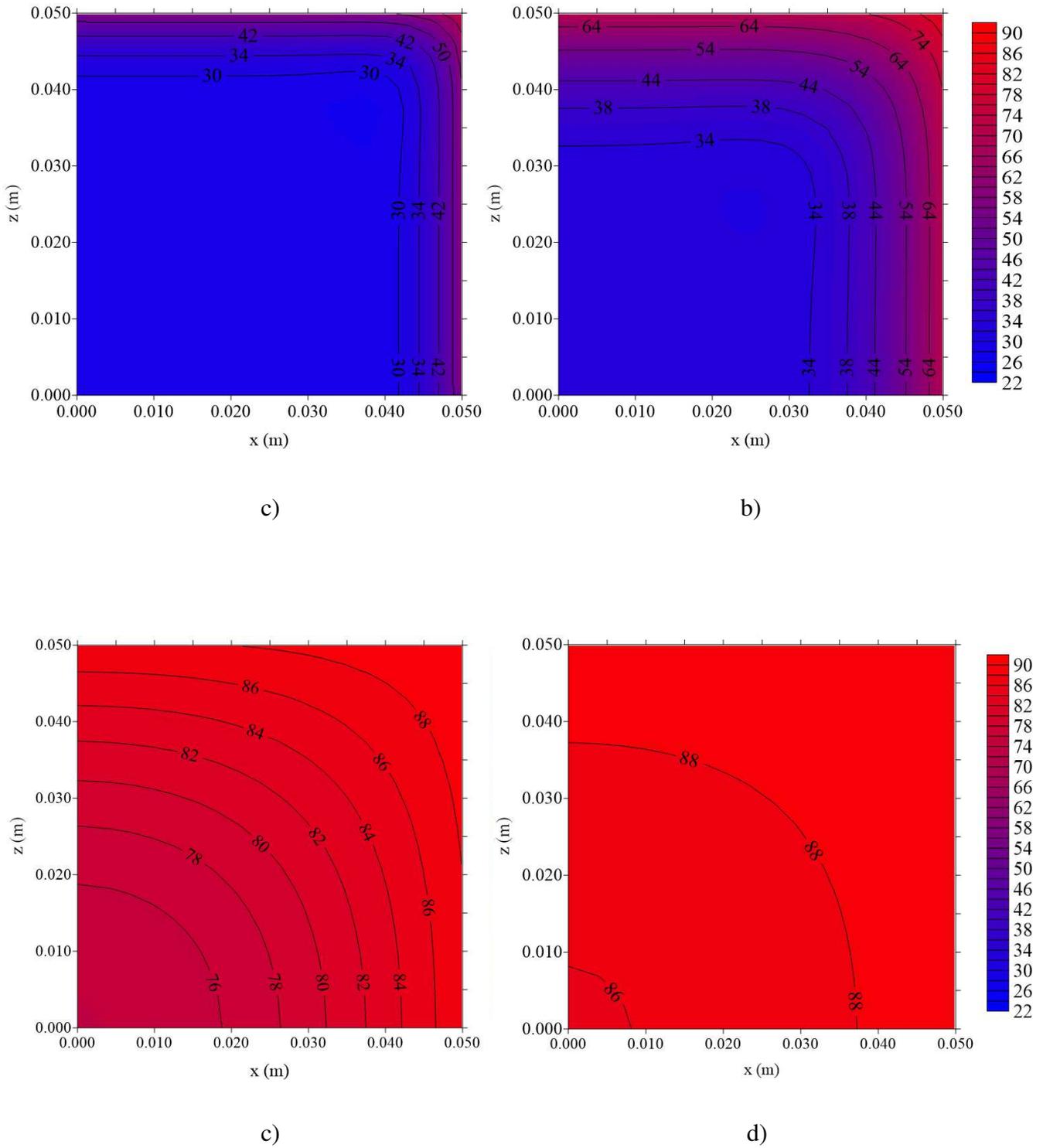
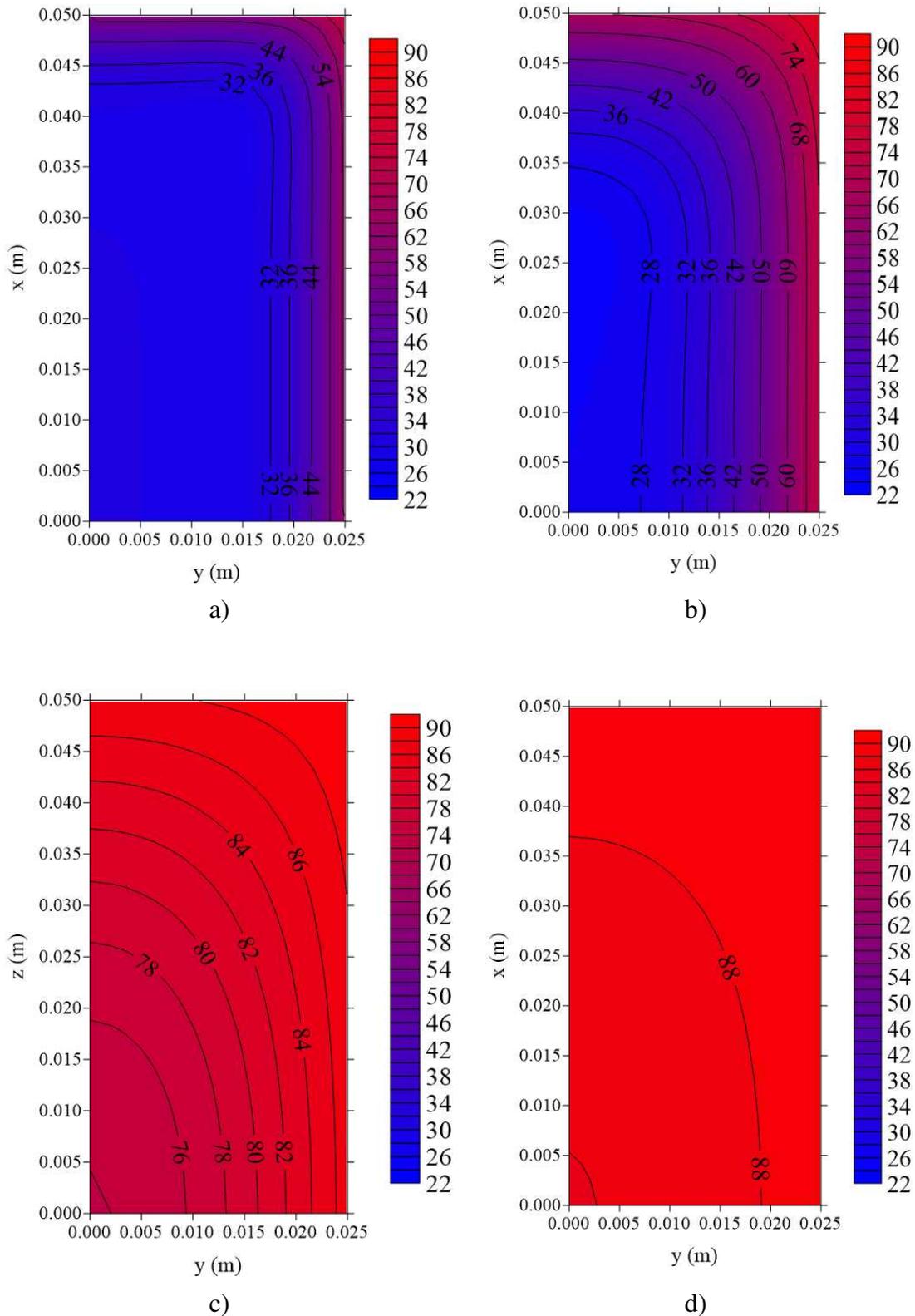


Figura 4.46 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) no plano xy em $z = 0,025\text{ m}$ ($R_3/2$) nos tempos: (a) 200 s, (b) 700 s, (c) 5000 s e (d) 8000 s para uma temperatura de secagem de 90°C .



Através de uma inspeção nas Figuras 4.41 à 4.46, verifica-se que para a temperatura de secagem a 90°C, no instante $t = 8000$ s, praticamente todos os volumes de controle atingiram o equilíbrio térmico. No entanto, para temperatura a 50°C, apenas os volumes de controle próximos a superfície do corpo atingiram o equilíbrio.

Fazendo uma análise geral para todas as temperaturas investigadas, analisando as Figuras 4.35 à 4.46, verificou-se a existência de uma diferença da concentração de vapor de água e da temperatura entre as regiões centrais e o vértice do paralelepípedo (meio fibroso). Observou-se ainda que os maiores gradientes de vapor de água e de temperatura estão localizados nas regiões próximas aos vértices do paralelepípedo, uma vez que estas regiões estão em contato mais intenso com o ar de secagem e, com isso as fibras localizadas nessas regiões são mais susceptíveis ao aparecimento de deformações. Fisicamente, isto é esperado, pois, estando o corpo mais exposto a uma atmosfera envolvente, tende a variar mais rapidamente o valor de C e T nessas regiões em todos os planos e em qualquer tempo.

Analisando as Figuras 4.35 à 4.46, as melhorias na qualidade do material seco no que diz respeito a uniformidade e redução de deformações (Figura 4.10), podem ser atribuídas à distribuição de umidade e temperatura durante a secagem, obtidas em temperaturas mais baixas, visto que, diminuindo a temperatura do ar de secagem reduz-se as tensões internas dentro do meio fibroso. Os experimentos de secagem realizados nesta pesquisa mostraram que é possível chegar ao teor de umidade de equilíbrio reduzindo o tempo efetivo de secagem, mas conservando a qualidade do material. Assim, reduz-se o tempo de permanência das fibras no secador e ganha-se em energia, otimizando o processo de secagem.

4.2.3 - Estimativa dos coeficientes de transporte (D , h_m e h_c)

O coeficiente de difusão mede a tendência que as moléculas apresentam de migrar de uma região de concentração elevada para outra de concentração mais baixa. Quanto maior o coeficiente de difusão, mais rápido é a difusividade de uma espécie em relação à outra. Esse coeficiente está diretamente relacionado com a temperatura do meio e o teor de umidade.

Os coeficientes de transporte convectivos iniciais h'_c e h'_m foram obtidos utilizando as Equações (3.169) e (3.172), respectivamente. A partir destes valores iniciais, foi realizado um processo de otimização para se obter os valores ideais dos coeficientes convectivos, como descrito na seção 3.3.4.

Tabela 4.12 - Valores iniciais dos coeficientes de transporte utilizados durante os ajustes para cada teste experimental.

Teste \ Parâmetro	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
h'_{mx} (m/s)	$3,80219 \times 10^{-3}$	$3,90436 \times 10^{-3}$	$4,00622 \times 10^{-3}$	$4,10771 \times 10^{-3}$	$4,20890 \times 10^{-3}$
h'_{my} (m/s)	$5,37710 \times 10^{-3}$	$5,52160 \times 10^{-3}$	$5,66564 \times 10^{-3}$	$5,80918 \times 10^{-3}$	$5,95228 \times 10^{-3}$
h'_{mz} (m/s)	$3,80219 \times 10^{-3}$	$3,90436 \times 10^{-3}$	$4,00622 \times 10^{-3}$	$4,10771 \times 10^{-3}$	$4,20890 \times 10^{-3}$
h'_{cx} (W/m ² K)	3,83713	3,82830	3,81996	3,81209	3,80300
h'_{cy} (W/m ² K)	5,42651	5,41403	5,40224	5,39110	5,37824
h'_{cz} (W/m ² K)	3,83713	3,82830	3,81996	3,81209	3,80300

As estimativas dos coeficientes de transporte h_c , D e h_m foram feitas pela minimização da soma dos quadrados dos resíduos, como mencionado anteriormente. A Tabela 4.13 sumariza os valores dos coeficientes de transporte, bem como do erro relativo e variância, para cada teste experimental.

Tabela 4.13 - Coeficientes de transporte estimados para cada teste experimental.

Teste / Parâmetro	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
D' (m ² /s)	0,612 x10 ⁻⁶	1,012 x10 ⁻⁶	1,612 x10 ⁻⁶	2,212 x10 ⁻⁶	2,312 x10 ⁻⁶
h_{mx} (m/s)	3,80219x10 ⁻⁴	4, 0436x10 ⁻⁴	5,0622x10 ⁻⁴	7,610771x10 ⁻⁴	4,2089x10 ⁻⁴
h_{my} (m/s)	5,37710x10 ⁻⁴	20, 216x10 ⁻⁴	21,6564x10 ⁻⁴	7,780918x10 ⁻⁴	5,95228x10 ⁻⁴
h_{mz} (m/s)	3,80219x10 ⁻⁴	4, 0436x10 ⁻⁴	5,0622x10 ⁻⁴	7,610771x10 ⁻⁴	4,2089x10 ⁻⁴
h_{cx} (W/m ² K)	4,220843	4,97679	5,538942	5,1463215	6,65525
h_{cy} (W/m ² K)	5,969161	7,0382239	7,833248	7,277985	9,41192
h_{cz} (W/m ² K)	4,220843	4,97679	5,538942	5,1463215	6,65525
α (m ² /s)	3,778903x10 ⁻⁷	4,243008x10 ⁻⁷	3,9855592x10 ⁻⁷	3,9270133x10 ⁻⁷	3,7626655x10 ⁻⁷
ERM _{Q_M}	0,0001576	0,000456179	0,0000722468	0,00025729	0,000380498
\bar{S}^2_M	1,1939 x10 ⁻⁶	4,0015 x10 ⁻⁶	7,525708 x10 ⁻⁷	3,0629 x10 ⁻⁶	4,8164 x10 ⁻⁶
ERM _{Q_T}	989,60261	1516,8398	967,74872	1324,225	1273,651
\bar{S}^2_T	7,440621	13,189911	9,976791	15,579118	15,920637

Na Tabela 4.13 verifica-se que o coeficiente difusivo de massa aumenta com a elevação da temperatura de secagem, como reportado por vários autores em diversos trabalhos científicos (NOBREGA, 2007; SANTOS, 2017).

Com o aumento da temperatura, a velocidade de difusão das moléculas também aumenta e, com isso, tem-se um aumento na energia cinética das moléculas de água no interior das amostras.

Na Tabela 4.13 verifica-se que, na maioria dos casos, os coeficientes de transporte aumentam com a elevação da temperatura de secagem, exceto o h_m na temperatura de 80°C e 90°C, e o h_c na temperatura de 80°C. Isso ocorre por se tratar de um modelo acoplado de umidade e temperatura, onde o ajuste desses parâmetros se torna muito flexível.

Especificamente com relação ao coeficiente de difusão de massa (D) pode-se dizer que ele é uma multiplicação do coeficiente de difusão de vapor no interior do meio fibroso pela porosidade desse meio, isto é, $D = \varepsilon D'$. Tendo em vista que a porosidade do meio $\varepsilon > 0,91$, pode-se dizer que a secagem do meio fibroso se assemelha a secagem de fibras individuais. Isto de fato é quase verdade e pode ser comprovado pelo valor do D' que está um pouco menor do D_{AB} (Tabela 4.10) para cada teste experimental. O que indica que o fluxo de vapor no interior do meio é mais difícil que no ar externo ao meio fibroso, como esperado.

Com relação aos indicadores estatísticos referentes aos ajustes, tanto o erro ERMQ como a variância \bar{S}^2 , apresentaram bons resultados e os valores estão também apresentados na Tabela 4.13. Com relação a variância \bar{S}_M^2 , por exemplo, conseguiu-se reduzi-las para valores próximos a 10^{-6} . Isto refletiu-se numa perfeita concordância das curvas simuladas com os dados experimentais durante todo o processo difusivo, conforme Figuras 4.25 a 4.29.

Comparação entre as difusividades de massa de materiais porosos reportadas na literatura se torna difícil em virtude da escassez de estudos específicos desses materiais. De forma geral, é importante ressaltar que diferenças no coeficiente de difusão de massa podem ser atribuídas aos seguintes fatores: Considerações geométrica diferentes; Método de cálculo; Teores de umidade inicial e de equilíbrio diferentes; Variação na estrutura física do material utilizado; Porosidade do material; bem como condições de contorno.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Foram apresentadas, neste capítulo, as conclusões relativas às pesquisas realizadas neste trabalho. Esperando-se que as mesmas sejam úteis aos pesquisadores que trabalham com secagem de materiais porosos na forma de paralelepípedo, com a utilização do programa desenvolvido para este fim.

5.1 - Conclusões

A partir do conjunto de experimentos de secagem de fibras de sisal nas temperaturas 50, 60, 70, 80 e 90°C, pode-se concluir que:

a) Experimental

- A temperatura do ar de secagem e o teor de umidade inicial têm influência na cinética de secagem. Quanto maior o valor da temperatura e do teor de umidade inicial, maior é a velocidade de secagem, e portanto o material seca e se aquece mais rápido;

- Para os experimentos de secagem de fibras de sisal nas temperaturas de 80 e 90°C, houve redução do tempo de operação efetiva, quando comparada com a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C;
- Para as temperaturas de 50 e 60°C, a secagem foi mais controlada, a velocidade de secagem é menor, diminuindo os riscos de deformações, e garantindo um produto de qualidade, sem forte alteração na sua pigmentação;
- Durante a secagem à 90°C, houve uma alteração significativa na cor das fibras;
- O meio fibroso tem um processo de secagem mais prolongado à medida que o coeficiente de transferência de calor e/ou massa diminui. Portanto as condições do ar de secagem (velocidade, umidade, etc.) são características importantes de serem observadas e controladas;
- As equações propostas para o teor de umidade médio e temperatura das fibras de sisal, mostraram um bom ajuste, onde são evidenciados uma boa concordância entre os valores experimentais e preditos, caracterizados por coeficiente de correlação próximos de 1,0.

b) Numérico

- O tratamento matemático utilizado para se obter a solução numérica da equação de difusão em coordenadas cartesianas com condição de contorno convectiva na superfície, demonstrou ser o mais adequado. A partir da solução, foi possível obter a distribuição interna da grandeza requerida (por exemplo, teor de umidade, concentração de vapor de água, ou temperatura), como também a sua cinética de difusão, em corpos com geometria na forma de paralelepípedo;
- O método de volumes finitos demonstrou ser adequado para discretizar a equação de difusão no sistema de coordenadas cartesianas, que possibilitou prever o fenômeno de transferência de calor e massa no interior do meio fibroso;

- Os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais do teor de umidade e temperatura das fibras de sisal submetidas à secagem, mostrando assim que a metodologia usada para estimar os coeficientes de transporte é satisfatória;
- O meio fibroso seca mais rapidamente à medida que a temperatura do ar de secagem cresce. Para $T = 50^{\circ}\text{C}$, por exemplo, nenhum elemento da malha atingiu a concentração de vapor de água de equilíbrio em $t = 200$ s, enquanto que para a temperatura de 90°C , alguns elementos próximo ao vértice do paralelepípedo já atingiram o valor de equilíbrio para a concentração de vapor em $t = 200$ s;
- Durante o processo de secagem, os gradientes de concentração de vapor de água tendem a diminuir lentamente em direção a zero. Para a temperatura de secagem a 90°C , foi possível eliminar quase que totalmente os gradientes de concentração de vapor de água no interior do corpo em $t = 8000$ s, que corresponde aproximadamente metade do tempo de processamento;
- Durante a secagem a temperatura de 50°C , não foi possível eliminar totalmente os gradientes de concentração de vapor de água no interior do corpo em $t = 8000$ s;
- A concentração de vapor de água, apresentou os maiores resultados nas regiões centrais do corpo em qualquer tempo. Percebeu-se também o decréscimo da concentração de vapor ao longo do tempo, em qualquer posição, tendendo para o seu valor de equilíbrio, para tempos de secagem suficientemente longos;
- O meio fibroso submetido a secagem com temperatura de 90°C , apresentou menor quantidade de vapor de água no centro. Isto indica que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor será o tempo necessário para o nivelamento de umidade em seu interior, diminuindo, portanto, o tempo de operação total do processo;
- As áreas onde os gradientes de vapor de água são elevados são as regiões com maior perda de água. Estas regiões, também apresentam altos gradientes de

temperatura. Estes efeitos elevam as tensões térmicas, hídricas e mecânicas e, conseqüentemente, o surgimento de deformações nas fibras, comprometendo a sua qualidade final;

- A temperatura do meio fibroso apresenta os menores resultados nas regiões centrais do corpo em qualquer tempo de processamento. Percebeu-se também o acréscimo da temperatura ao longo do tempo, em qualquer posição, tendendo para o seu valor de equilíbrio, para tempos de secagem suficientemente longos;
- Durante a secagem com temperatura de 90°C, no instante $t = 8000$ s, praticamente todos os volumes de controle atingiram o equilíbrio térmico. No entanto, para temperatura a 50°C, apenas os volumes de controle próximos a superfície do corpo atingiram seu equilíbrio;
- Foi possível constatar que os maiores gradientes de vapor de água e de temperatura estão localizados nas regiões próximas aos vértices do paralelepípedo, uma vez que estas regiões estão em contato mais intenso com o ar de secagem, com isso as fibras localizadas nessas regiões são mais susceptíveis ao aparecimento de deformações. Fisicamente, isto é esperado, pois, estando o corpo mais exposto a uma atmosfera envolvente, tende a variar mais rapidamente o valor de C e T nessas regiões em todos os planos e em qualquer tempo;
- As melhorias na qualidade das fibras secas no que diz respeito a uniformidade e redução de deformações, podem ser atribuídas à distribuição de umidade e temperatura durante a secagem à temperaturas mais baixas, visto que diminuindo a temperatura do ar de secagem ajuda-se a reduzir a temperatura e os gradientes de umidade e, portanto, as tensões internas dentro do meio fibroso;
- Os experimentos de secagem realizados nesta pesquisa mostraram que é possível chegar ao teor de umidade de equilíbrio reduzindo o tempo efetivo de secagem, mas conservando a qualidade do material. Assim, reduz-se o tempo de permanência das fibras no secador e ganha-se em energia;

- O coeficiente de difusão de massa mostrou-se dependente da temperatura do ar de secagem, variando de $0,612 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ na temperatura de 50°C até $2,312 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ na temperatura de 90°C tendendo a aumentar com o acréscimo da mesma;
- Os modelos apresentados são versáteis, podendo considerar a condição de contorno constante ou do tipo convectiva, e também com outras condições de contorno sob pequenas modificações;
- A metodologia apresentada tem um grande potencial (versatilidade de utilização e precisão) e pode ser aplicada em fenômenos de difusão transiente (secagem, umidificação, aquecimento e resfriamento) de diferentes materiais, sem restrição a natureza dos mesmos.

5.2 - Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestões para futuras pesquisas pode-se citar:

- Aplicar os modelos apresentados neste trabalho a secagem de outras fibras vegetais;
- Realizar estudo sobre a qualidade da fibra de sisal quanto à composição química e resistência após o processo de secagem;
- Desenvolver novos modelos para descrever a secagem de corpos fibrosos na forma de paralelepípedo, considerando-se difusividade variável e utilizar os dados desta pesquisa para validá-los;
- Realizar testes de simulação de secagem de meios fibrosos com geometria arbitrária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. S.; LEMOS, A. M.; VILELA, A.; SOUSA, J. M.; NUNES, F. M. Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins. **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 91, n. 4, p. 481-494, 2013.

ALVARENGA, L. C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J. B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Vol. 5, n. 1, p. 5-18, 1980.

ALVES, C.; FERRÃO, P. M. C.; SILVA, A. J.; REIS, L. G.; FREITAS, M.; RODRIGUES, L. B.; ALVES, D. E. Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 18, p. 313-327, 2010.

AMENDOLA, M.; QUEIROZ, M. R. Mathematical methodologies for calculating the mass diffusion coefficient of bananas during drying. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Vol. 11, n. 6, p. 623-627, 2007.

ANGRIZANI, C. A.; VIEIRA, C. A. B.; ZATTERA, A. J.; FREIRE, E.; SANTANA, R. M. C.; AMICO, S. C. Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de Compósitos com Poliéster. **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2006.

APPELUZ - Associação dos Pequenos Produtores de Sisal de Santaluz/BA - **Homenagem à Faustino, criador da máquina de sisal**. Disponível em: <<http://blogdojaziel.blogspot.com.br/2011/03/homenagem-faustino-criador-da-maquina.html>>. Acesso em: 08/12/2014.

ARBALLO, J. R.; BAMBICHA, R. R.; CAMPANONE, L. A. AGNELLI, M. E.; MASCHERONI, R. H. Mass transfer kinetics and regressional-desirability optimisation

during osmotic dehydration of pumpkin, kiwi and pear. **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 47, p. 306-314, 2012b.

BAINI, R.; LANGRISH, T. A. G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. **Journal of Food Engineering**, Vol. 79, p. 330-343, 2007.

BARBOSA JÚNIO, J.L.; MANCINI, M.C.; HUBINGER, M. D. Mass transfer kinetics and mathematical modelling of the osmotic dehydration of orange-fleshed honeydew melon in corn syrup and sucrose solutions. **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 48, 2463-2473, 2013.

BARONAS, R.; IVANAUSKAS, F.; SAPAGOVAS, M. Modelling of Wood drying and na influence of lumber geometry on drying dynamics. **Nonlinear Analysis: Modelling and Control, Vilnius, IMI**, n. 4, p. 11-22, 1999.

BARRETO, A. C. H.; ROSA, D. S.; FECHINE, P. B. A. et al. Properties of sisal fibers treated by alkali solution and their application into cardanol-based biocomposites. **Composites: Part A**, 2011.

BAUMER, J. E.; MARIANI, V. C. Investigação da condução de calor unidimensional e bidimensional em regime permanente. **Anais do XXVIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional**, 119, São Paulo, 2005.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena. 2nd Ed. New York: **John Wiley & Sons, Inc.**, 912 p, 2001.

BISANDA, E. T. N. The Effect of Alkali Treatment on the Adhesion Characteristics of Sisal Fibres. **Applied Composite Materials**, Vol. 7, p. 331-339, 2000.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composite reinforced with cellulose based fiber. **Progress in Polymer Science**, Vol.24, p.221-274, 1999.

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

CARLESSO, V. D.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, Vol. 29, n. 2, p. 28-37, 2007.

CARMO, J. E. F. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais oblato, Estudo do caso: Secagem de lentilhas**. 2004. 140 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processo, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

CAVALCANTI, W. S., CARVALHO, L.H., ALSINA, O.L.S. LIMA, A.G.B. DE. Sorção de Água de Compósito Poliéster Insaturado Reforçados por Tecido de Juta e Tecido Híbrido Juta/Vidro. **XVI CBECIMAT**, Porto Alegre, 2004.

CHAND, N.; JAIN, D. Effect of Sisal fibre orientation on electrical properties of Sisal fibre reinforced epoxy composites. **Composites: Part A**, Vol. 36, p. 594-602, 2005.

CHAVAMI, K. et al. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. **Cement & Concrete Composites**, Essex, Vol. 21, n. 1, p. 39-48, Feb, 1999.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; ANDRÉ, L. D.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Vol. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.

CRANK, J. The mathematics of diffusion. **London: Oxford University Press**, 1975.

CRUZ, V. C. A.; NÓBREGA, M. M. S.; SILVA, W. P.; CARVALHO, L. H.; LIMA, A. G. B. Um estudo experimental de absorção de água em compósitos de poliéster reforçado com fibra natural Macambira. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol. 42 (11), p. 979-984, 2011.

D'ALMEIDA, A. L. F. S.; CARVALHO, L. H.; D'ALMEIDA, J. R. M. Characterization of caroá (*Neoglaziovia variegata*) fibers. **World Polymer Congress – 41st International Symposium on Macromolecules. Anais.** Rio de Janeiro – Brazil, 2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa do Algodão. **Principais tecnologias desenvolvidas pela Embrapa no período de 1976 a 1996, e algumas tecnologias em desenvolvimento.** Campina Grande, 1997.

ESPERT, A.; VILAPLANA, F.; KARLSSON, S. Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. **Composites: Part A**, Vol. 35, p. 1267-1276, 2004.

FABBRI, C.; MARSANO, A.; ALBANI, D.; CHIERCHIA, A.; CALATI, R.; DRAGO, A.; et al. PPP3CC gene: a putative modulator of antidepressant response through the B-cell receptor signaling pathway. **Pharmacogenomics J**, 2014.

FARIAS, S. N. **Secagem de sólidos esferoidais usando o método de Galerkin.** 2002. 60 p. (Dissertação Mestrado) Mestrado em Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

FARIAS, R. P. **Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos.** 2011. 136 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

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

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: chemistry ultrastructure reactions. **Berlin: Walter de Gruyter**, 1989.

FERREIRA, S. R.; LIMA, P. R. L.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência de ciclos molhados-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Revista Matéria**, Vol. 17, n. 2, p. 1024-1034, 2012.

FIGLIOLA, R.; BEASLEY, D. Theory and design for mechanical measurement. New York. **Ed. John Wiley and Son**, 1995.

FIOREZE, R. Princípios de secagem de produtos biológicos. **Editora Universitária da UFPB**, João Pessoa, PB, 229p, 2003.

FORTES, M.; OKOS, M. R. **Advances in drying**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation. Chapter Five: Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains, Vol.1, p.119-154, 1980.

GANJOLLO, A.; RAHMAN, R. A.; BAKAR, J.; OSMAN, A.; BIMAKD, M. Kinetics modeling of mass transfer using Peleg's equation during osmotic dehydration of seedless guava (*Psidium guajava* L.): Effect of process parameters. **Food Bioprocess Technol**, Vol. 5, p. 2151-2159, 2011.

GHOSH, P.; SAMANTA, A. K.; DEV, D. Simultaneous free radical polymerization and acidic polycondensation of acrylamide formaldehyde de resin in jute fabric, **Journal Applied Polymer Science**, Vol. 64, p. 2473-2489, 1997.

GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; FARIAS, E. S.; SILVA, M.; CHAVES, M. C. V.; REIS, L. S. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Vol. especial, n. 1, p. 65-68, 2003.

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

HAGHI, A. K. Simultaneous Moisture and Heat Transfer in Porous Systems. **Journal of Computational and Applied Mechanics**, Vol. 2, p. 195-204, 2001.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Connecticut: AVI publishing company, 381p, Inc. 1980.

HENRY, P. S. H. Diffusion in absorbing media, **Proc. R. Soc,171A**, p. 215, 1939.

IBRAHIM, M. H.; DAUD, W. R. W.; TALIB, M. Z. M. Drying characteristics of oil palm kernels. **Drying Technology**, Vol. 15, n. 3-4, p. 1103-1117, 1997.

INCROPERA, F. P.; DE WIIT, D. P. Fundamentals of heat and mass transfer. New York. **Ed. John Wiley and Son**, 2002.

ISHIZAKI, M.H.; LEILA L. Y. VISCONTE; CRISTINA R. G. FURTADO; MÁRCIA C.A. M.; LEITE JEAN L. LEBLANC. Caracterização Mecânica e Morfológica de Compósitos de Polipropileno e Fibras de Coco Verde: Influência do Teor de Fibra e das Condições de Mistura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Vol. 16, n 3, p. 182-186, 2006.

JOSEPH, K.; VARGHESE, S.; KALAPRASAD, G.; THOMAS, S.; PRASANNAKUMARI, L.; KOSHYH, P.; PAVITHRAN, C. Influence of Interfacial Adhesion on The Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Short Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites. **European Polymer Journal**, Vol. 32, n. 10, p. 1243-1250, 1996.

KEEY, R. B. **Drying of Loose and Particulate Materials**. 502p. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1992.

KIRAN, C. U.; REDDY, G. R.; DABADE, B. M.; RAJESHAM, S. Tensile Properties of Sun Hemp, Banana and Sisal Fiber Reinforced Polyester Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Vol. 26, n. 10, 2007.

KING, G.; GASSIE, A. B. D. *Trans. Faraday Soc.*, 36, p. 445, 1940.

KOPRIVICA, G.; MISLJENOVIC, N.; BERA, O.; LEVIC´ L.. Modeling of water loss during osmotic dehydration of apple cubes in sugar beet molasses. **Journal of Food Processing and Preservation**, ISSN 1745-4549, 2013.

LI, Y.; MAI, Y-W.; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, Vol. 60, p. 2037-2055, 2000.

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

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

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

LIMA, A.G.B.; SILVA, J.B.; ALMEIDA, G.S.; NASCIMENTO, J.J.S.; TAVARES, F.V.S; SILVA, V.S. *Drying and Energy Technologies*, J.M.P.Q. Delgado and A.G. Barbosa de Lima, Eds., Springer, Heidelberg, Vol. 63, p. 43-70, 2016.

LIMA, D. R.; FARIAS, S. N.; LIMA, A. G. B. Heat and mass transfer inside oblate and prolate spheroids: an exact solution. **Proceedings of the 14th International Drying Symposium**, (IDS 2004) São Paulo, Brasil, August 22-25, p. 493-500, 2004a.

LIMA JÚNIOR, U. M. **Fibras da semente do açazeiro (Euterpe Oleracea Mart.): Avaliação quanto ao uso como reforço de compósitos fibrocimentícios.** 2007.

(Dissertação Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LOPES, F. F. M.; ARAÚJO, G. T.; NASCIMENTO, J. W. B.; GADELHA, T. S.; SILVA, V. R. Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Vol. 14, n. 7, p. 783-788, 2010.

LÓPEZ, C. M.; IDIART, A.; CAROL, I. Mesomechanical analysis of concrete deterioration including time dependence. **VIII International Conference on Computational Plasticity COMPLAS VIII**, p. 1- 4, Barcelona, 2005.

LÓPEZ, I. I.; ALVARADO, M. A. G. Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. **Journal of Food Engineering**, Vol. 79, p. 208-216, 2007.

MALISKA, C. R.; Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, 453 p. LTC, Rio de Janeiro, 2004.

MARIZ, T. F. **Secagem da casca de caroço de algodão em leito fixo**. 1986. 139p. (Dissertação Mestrado) Mestrado em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; SILVA, O. R. R. F. Caracterização Química e Estrutural de Fibra de Sisal da Variedade Agave Sisalana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Vol. 19, nº 1, p. 40-46, 2009.

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; SILVA, O. R. R. F.; MATTOSO, L. H. C. Studies on the thermal properties of sisal fiber and its constituents. **Thermochimica Acta**, Vol. 506, p. 14-19, 2010.

MEDEIROS, E.S.; AGNELLI, J.A.M.; JOSEPH, K.; CARVALHO, L.H.; MATTOSO, L.H.C.; **Journal Applied Polymer Science.**, 90, p.1678, 2003.

MELO FILHO, J. A. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal**. 2012. 184 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MELO FILHO, J. A.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Degradation Kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. **Cement & Concrete Composites**, Vol. 40, p. 30-39, 2013.

MENEGHETTI, V. L.; AOSANI, E.; ROCHA, J. C.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M. C.; POHNORF, R. S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Vol. 16, n. 10, p. 1115-1120, 2012.

MERCALI, G. D. et al. Estudo da transferência de massa durante a desidratação osmótica de mirtilo. **Brazilian Journal of Food Technology**, Vol. 13, n. 2, p. 91-97, 2011.

MISHIRA, S.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. A. Review on pineapple leaf fibers, sisal fibers and their biocompositers. **Macromolecular Materials and Engineering**, Vol. 289, p. 955-974, 2004.

MOTHÉ, C. G.; ARAUJO, C. R. Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de curauá. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Vol. 14, n. 4, p. 274-278, 2004.

NABI SAHEB, D.; JOG, J. P. Natural fiber polymer composites: A review. **Advances in Polymer Technology**, Vol. 18, n. 4, p. 351-363, 1999.

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudos de caso: secagem de materiais cerâmicos**. 2002. 181p.

(Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB.

NASCIMENTO, J. J. S.; MEDEIROS, B. J. T.; BELO, F. A.; LIMA, A. G. B. Transporte de matéria com redução de volume em El interior de sólidos paralelepípedos, **Información Tecnológica**, Vol. 16, p. 35-41, 2005.

NÓBREGA, M. M. S.; CAVALCANTI, W. S.; CARVALHO, L. H. ; LIMA, A. G. B. Absorção de água em compósitos de poliéster insaturado reforçados com tecidos de fibras caroá: modelagem e simulação. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, Vol. 41(5), p. 300-305, 2010.

NÓBREGA, M. M. S. **Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá neoglaziovia variegata: caracterização mecânica e sorção de água**. 2007. 123 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

NÓBREGA, M. M. S.; FONSECA, V.M.; CARVALHO, L.H. Uso de fibras de caroá e macambira em compósitos de matriz poliéster. **8º Congresso Brasileiro de Polímeros, Anais...** p. 1231-1232. Águas de Lindóia – São Paulo, 2005.

NORDON, P.; DAVID, H. G. Coupled diffusion of moisture and heat in hygroscopic textile materials, **Int. J. Heat Mass Transfer**, Vol. 10, p. 853-899, 1967.

OLIVEIRA, V. A. B. **Transferência de calor e massa no interior de sólidos com formas esferoidal prolata via termodinâmica dos processos irreversíveis**. 2006. 132 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

OLIVEIRA, V. A. B.; LIMA, A. G. B. Mass diffusion inside prolate spherical solids: an analytical solution, **Revista de Produtos Agroindustrial**, Vol. 4, n. 1, p. 41-50, 2002.

PAIVA, J. M. F.; FROLLINI, E. Unmodified and modified surface sisal fibers as reinforcement of phenolic and lignophenolic matrices composites: Thermal analyses of fibers and composites. **Macromolecular Materials Engineering**, Vol. 291, p. 405-417, 2006.

PASSOS, P. R. A. **Destinação sustentável de cascas de coco (cocos nucifera) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas**. 2005. (Tese Doutorado) Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

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

PAUL, A.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. Effect of surface treatments on the electrical properties of low-density polyethylene composites reinforced with short sisal fibers. **Composites Science and Technology**, Vol. 51, p. 67-79, 1997.

PERRÉ, P.; TURNER, I. W. A heterogeneous wood drying computational model that accounts for material property variation across growth rings. **Chemical Engineering Journal**, Vol. 86, n. 117-131, 2002.

PERUSSELLO, C. A.; KUMAR, C.; CASTILHOS, F., KARIM, M. A. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). **Applied Thermal Engineering**, Vol. 63, p. 23-32, 2014.

PORCIUNCULA, B. D. A.; ZOTARELLI, M. F.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (Prata variety) during osmotic dehydration and its use in predictive models. **Journal of Food Engineering**, Vol. 119, n. 3, p. 490-496, 2013.

QUEIROZ, M. R.; NEBRA, S. A. Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. **Journal of Food Engineering**, Vol. 47, n. 2, p. 127-132, 2001.

RAFIEE, S.; OMID, M.; YADOLLAHINIA, A. Finite element simulation of rough (Oryza sativa L.) cv. Fajer drying. **Chemical Product and Process Modeling**, Vol. 3, n. 8, p. 1-11, 2008.

ROMERO, L. L.; VIEIRA, J. O. W. M.; MARTINS, R. A.; MEDEIROS, L. A. R. Fibras artificiais e sintéticas. Relato setorial. Rio de Janeiro: BNDES, p. 55-66, 1995.

RONG, M. Z.; ZHANG, M. Q.; YANG, G. C.; ZENG, M. H. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional Sisal-reinforced epoxy composites. **Composites Science and Technology**, Vol. 61, p. 1437-1447, 2001.

ROSÁRIO, F.; PACHEKOSKI, W. M.; SILVEIRA, A. P. J.; SANTOS, S. F. D.; JÚNIOR, H. S.; CASARIN, S. A. Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. **Polímeros**, Vol. 21, p. 90-97, 2011.

SANTOS, D. G. **Estudo termo-hídrico e caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibra vegetal: Simulação 3D e experimentação**. 2017. 168 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

SANTOS, D. G.; LIMA, A.G. B.; COSTA, P. S. Def. Diff. Forum, 380, 66-71, 2017.

SILVA, C. M. D. P. S. **Difusão de massa em corpos cilíndricos: modelagem, soluções analíticas e numéricas e aplicação na secagem de bananas**. 2010. 129 p. (Dissertação Mestrado) Mestrado em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande.

SILVA, J. B. **Simulação e Experimentação de Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados**. 2009. 173p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processo, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

SILVA, J. S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 560p, 2008.

SILVA, L. J.; PANZERA T. H.; CHRISTOFORO A. L.; RUBIO, J. C. C.; SCARPA F. Micromechanical analysis of hybrid composites reinforced with unidirectional natural fibres, silica microparticles and maleic anhydride. **Mat. Res.**, São Carlos, Vol. 15, n. 6, Dec. 2012.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretana derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 139p. (Tese Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, R. V.; FROLLINI, E. Propriedades de Compósitos de Matriz Termorrígido Fenólica Reforçada com Material de Origem Natural. **8º Congresso Brasileiro de Polímeros, Anais...** Águas de Lindóia - São Paulo, 2005.

SILVA, W. P. **Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. 2007. 263 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

SILVA, W. P. **Discretizações em fenômenos de transporte computacional, Cursos 1 e 2** (2009). Apresentação em Powerpoint, online, disponível no endereço eletrônico: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/TCMFC.htm>, data de acesso: julho/2015.

SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, D. D. P. S. Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: **Application to drying of cowpea. Journal of Food Engineering**, Vol. 95, n. 2, p. 298–304, 2009a.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, D. D. P. S.; SILVA, C. D. P. S. Influence of the geometry on the numerical simulation of isothermal drying kinetics of banana. **World Applied Sciences Journal**, Vol. 7, n. 7, p. 846-855, 2009b.

SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. S.; GOMES, J. P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: application to the drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, Vol. 98, n. 3, p. 302-308, 2010b.

SILVA, W. P.; AMARAL, D. S.; DUARTE, M. E. M.; MATA, M. E. R. M. C.; SILVA, C. M. D. P. S.; PINHEIRO, R. M. M.; PESSOA, T.. Description of the osmotic dehydration and convective drying of coconut (*Cocos nucifera* L.) pieces: A three-dimensional approach. **Journal of Food Engineering**. Vol. 115, p. 121-131, 2013.

SILVA, W. P.; SILVA, C.M. D. P. S.; LINS, M.A.A.; GOMES, J.P.. Osmotic dehydration of pineapple (*Ananas comosus*) pieces in cubical shape described by diffusion models. **Food Science and Technology**, Vol. 55, p. 1-8, 2014a.

SILVA, W. P.; SILVA, C.M.D.P.S.; AIRES, K.L.C.A.F.. Description of Guava Osmotic Dehydration Using a Three-Dimensional Analytical Diffusion Model. **Journal of Food Processing**, ID 157427, 2014b.

SILVA, W. P.; AIRES, J. E. F.; CASTRO, D. S.; SILVA, C.M. D. P. S.; GOMES, J. P.. Numerical description of guava osmotic dehydration including shrinkage and variable effective mass diffusivity. **Food Science and Technology**, Vol. 59, p. 859-866, 2014c.

SILVA, W. P., SILVA, D. P. P. S.; SILVA, C. M. D. P.; SILVA, C. D. P. S. Numerical simulation of the water diffusion in cylindrical solids. **International Journal of Food Engineering**, Vol. 4, n. 2, article 6, doi: 10.2202/1556-3758.1394, 2008a.

SILVEIRA, S. Manual de Matérias primas têxteis. CILAN – Centro de Formação Profissional para a Indústria de Lanifícios, 105p, 2015.

SLATTERY, J. C. **Advanced transport phenomena**. Cambridge University Press, 709 p, 1999.

SOURAKI, B. A.; GHAVAMI, M.; TONDRO, H. Correction of moisture and sucrose effective diffusivities for shrinkage during osmotic dehydration of apple in sucrose solution. **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 92, p. 1-8, 2014.

SPINACÉ, M. A. S.; JANEIRO, L. G.; BERNARDINO, F. C. E; PAOLI, M. A. Caracterização das Fibras de Sisal e de Curauá visando Aplicação em Compósitos Poliméricos. **32ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química**, 2009.

SRREKALA, M. S.; KUMARAN, M. G.; THOMAS, S. Water sorption in ail palm fiber reinforced phenol formaldehyde composites, Composites Part A: **Applied Science and Manufacturing**, Vol. 33, p. 763-777, 2002.

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

TOWO, A. N.; ANSELL, M. P. Fatigue evaluation and dynamic mechanical thermal analysis of Sisal fibre-thermosetting resin composites. **Composites Science and Techonology**, Vol. 68, p. 925-932, 2008.

WEI, J.; MEYER, C. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment. **Applied Surface Science**, Vol. 289, p. 511-523, 2014.

WHITAKER, S. Heat and mass transfer in granular porous media, Chapter Two, In *Advances in drying*, Editora Arun S. Mujumdar, **Hemisphere Publishing Corporation**, Vol. 1, New York, 1980.

WU, B.; YANG, W.; JIA, C. A three-dimensional numerical simulation of transient heat and mass transfer inside a single rice kernel during the drying process. **Biosystems Engineering**, Vol. 87, n. 2, p. 191-299, 2004.

YADAV, A. K.; SINGH, S. V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of Food Science and Technology**. Vol. 51, n. 9, p. 1654-1673, 2012.

ZHOU, F.; CHENG, G.; JIANG, B. Effect of silane treatment on microstructure of sisal fibers. **Applied Surface Science**, Vol. 292, p. 806-812, 2014.

ZÚNIGA, R. N.; PEDRESCHI, F. Study of the pseudo-equilibrium during osmotic dehydration of apples and its effect on the estimation of water and sucrose effective diffusivity coefficients. **Food and Bioprocess Technology**, Vol. 5, n. 7, p. 2717-2727, 2011.

APÊNDICE

Tabela A1 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem de fibras de sisal a 50°C.

Tempo (min)	Massa bandeja (g)	Massa Bandeja com amostra (g)	Massa amostra (g)	Teor de umidade (kg/kg) (b.s.)	Temp. Fibra (°C)	Temp. Estufa (°C)	Temp. meio externo (°C)	Umidade relativa Ar externo (%)
0	57,907	99,451	41,544	0,113272771	29,8	50	27,6	59
5	57,907	99,127	41,22	0,104590401	39	50	27,6	59
10	57,907	98,846	40,939	0,097060321	40,1	50	27,6	59
15	57,907	98,623	40,716	0,091084492	40,2	50	27,6	59
20	57,907	98,46	40,553	0,08671651	41,3	50	27,6	59
25	57,907	98,312	40,405	0,082750489	41,8	50	27,6	59
30	57,907	98,171	40,264	0,07897205	42	50	27,6	58
35	57,907	98,047	40,14	0,075649168	42,1	50	27,6	58
40	57,907	97,935	40,028	0,072647855	42,2	50	27,6	58
45	57,907	97,825	39,918	0,069700137	42,8	50	27,6	58
50	57,907	97,737	39,83	0,067341962	43,2	50	27,8	58
60	57,907	97,574	39,667	0,06297398	43,6	50	27,8	58
70	57,907	97,437	39,53	0,059302731	44,7	50	27,9	57
85	57,907	97,266	39,359	0,054720369	45,2	50	27,9	57
100	57,907	97,15	39,243	0,051611866	45,5	50	27,9	57
130	57,907	97	39,093	0,04759225	45,7	50	27,9	58
160	57,907	96,916	39,009	0,045341265	46,1	50	27,8	59
190	57,907	96,864	38,957	0,043947799	46,1	50	27,8	59
220	57,907	96,822	38,915	0,042822306	46,1	50	27,6	59
280	57,907	96,758	38,851	0,04110727	46,1	50	27,6	58
340	57,907	96,728	38,821	0,040303347	46,2	50	27,6	58
400	57,907	96,698	38,791	0,039499424	46,2	50	27,1	60
460	57,907	96,69	38,783	0,039285044	46,3	50	27,1	60
1900	57,907	96,656	38,749	0,038373931	46,3	50	27	60
3340	57,907	95,224	37,317	0	95	105	27,3	59

Temperatura ambiente (27,6°C), $M_{eq} = 0,03837$ kg/kg e UR = 17,52%

24 horas a 50°C e posteriormente 24 horas a 105°C

Início das leituras às 08:50 h da manhã do dia 05/01/2017

Tabela A2 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem de fibras de sisal a 60°C.

Tempo (min)	Massa bandeja (g)	Massa Bandeja com amostra (g)	Massa amostra (g)	Teor de umidade (kg/kg) (b.s.)	Temp. Fibra (°C)	Temp. Estufa (°C)	Temp. meio externo (°C)	Umidade relativa Ar externo (%)
0	57,907	95,387	37,48	0,111176994	29,8	60	28,6	57
5	57,907	94,923	37,016	0,097420694	44,6	60	28	57
10	57,907	94,551	36,644	0,086391936	48	60	28	57
15	57,907	94,248	36,341	0,077408835	49,5	60	28,1	57
20	57,907	93,998	36,091	0,069997035	50,1	60	28,1	57
25	57,907	93,81	35,903	0,064423362	51	60	28,1	57
30	57,907	93,646	35,739	0,059561221	51,1	60	28,1	57
35	57,907	93,498	35,591	0,055173436	51,3	60	28,1	57
40	57,907	93,397	35,49	0,052179069	51,6	60	28,1	57
45	57,907	93,295	35,388	0,049155055	51,8	60	28,1	57
50	57,907	93,195	35,288	0,046190335	52,1	60	28,1	57
60	57,907	93,07	35,163	0,042484435	53	60	28,1	56
70	57,907	92,955	35,048	0,039075007	53,4	60	28,1	57
85	57,907	92,85	34,943	0,035962052	54	60	28,1	56
100	57,907	92,763	34,856	0,033382745	54	60	28,1	56
130	57,907	92,673	34,766	0,030714497	54,1	60	28,3	56
160	57,907	92,633	34,726	0,02952861	54,1	60	28,4	56
190	57,907	92,615	34,708	0,02899496	54,5	60	28,5	57
220	57,907	92,609	34,702	0,028817077	55,2	60	28,6	57
280	57,907	92,604	34,697	0,028668841	56,1	60	28,6	59
340	57,907	92,599	34,692	0,028520605	56,1	60	28,6	60
400	57,907	92,597	34,69	0,02846131	56,4	60	28,6	61
460	57,907	92,595	34,688	0,028402016	56,5	60	28,6	61
1900	57,907	92,516	34,609	0,026059887	56,6	60	28	58
3340	57,907	91,637	33,73	0	98,1	105	28,9	56

Temperatura ambiente (28,6°C), $M_{eq} = 0,02606$ kg/kg e UR = 11,04%

24 horas a 60°C e posteriormente 24 horas a 105°C

Início das leituras às 09:00 h da manhã do dia 09/01/2017

Tabela A3 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem de fibras de sisal a 70°C.

Tempo (min)	Massa bandeja (g)	Massa Bandeja com amostra (g)	Massa amostra (g)	Teor de umidade (kg/kg) (b.s.)	Temp. meio (°C)	Temp. Estufa (°C)	Temp. meio externo (°C)	Umidade relativa Ar externo (%)
0	57,907	98,885	40,978	0,111478789	29,5	70	31,5	54
5	57,907	98,18	40,273	0,092356515	29,5	70	50	54
10	57,907	97,704	39,797	0,07944559	29,5	70	53,3	54
15	57,907	97,394	39,487	0,071037214	29,6	70	56,4	53
20	57,907	97,106	39,199	0,063225561	29,6	70	58,1	53
25	57,907	96,901	38,994	0,057665184	29,5	70	59,6	53
30	57,907	96,707	38,8	0,052403168	29,5	70	60,1	53
35	57,907	96,54	38,633	0,047873495	29,6	70	60,3	53
40	57,907	96,39	38,483	0,043804926	29,6	70	60,8	53
45	57,907	96,287	38,38	0,041011175	29,8	70	60,8	53
50	57,907	96,177	38,27	0,038027558	29,8	70	61,3	53
60	57,907	96,01	38,103	0,033497884	29,6	70	62,2	52
70	57,907	95,889	37,982	0,030215905	29,5	70	62,6	52
85	57,907	95,752	37,845	0,026499946	29,5	70	63	52
100	57,907	95,683	37,776	0,024628404	29,6	70	4,1	52
130	57,907	95,618	37,711	0,022865357	29,6	70	65,1	51
160	57,907	95,594	37,687	0,022214386	29,9	70	65,7	50
190	57,907	95,58	37,673	0,021834653	29,9	70	65,7	49
220	57,907	95,574	37,667	0,021671911	29,9	70	65,8	49
280	57,907	95,546	37,639	0,020912444	29,9	70	66,3	47
340	57,907	95,53	37,623	0,020478464	29,9	70	66,3	48
400	57,907	95,523	37,616	0,020288597	29,9	70	66,8	49
460	57,907	95,518	37,611	0,020152978	29,9	70	67,2	49
1900	57,907	95,497	37,59	0,019583379	28,1	70	67,3	52
3340	57,907	94,775	36,868	0	28,4	105	92,6	55

Temperatura ambiente (29,5°C), $M_{eq} = 0,02015$ kg/kg e UR = 6,89%

24 horas a 70°C e posteriormente 24 horas a 105°C

Início das leituras às 09:30 h da manhã do dia 12/01/2017

Tabela A4 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem de fibras de sisal a 80°C.

Tempo (min)	Massa bandeja (g)	Massa Bandeja com amostra (g)	Massa amostra (g)	Teor de umidade (kg/kg) (b.s.)	Temp. Fibra (°C)	Temp. Estufa (°C)	Temp. meio externo (°C)	Umidade relativa Ar externo (%)
0	57,907	100,476	42,569	0,110302556	29,6	80	27,6	54
5	57,907	99,743	41,836	0,091184142	54,8	80	27,6	54
10	57,907	99,178	41,271	0,076447574	64,2	80	27,6	54
15	57,907	98,785	40,878	0,066197183	64,8	80	27,6	54
20	57,907	98,462	40,555	0,057772561	66,1	80	27,6	54
25	57,907	98,2	40,293	0,050938967	68,2	80	27,6	54
30	57,907	97,906	39,999	0,043270736	70,1	80	27,9	53
35	57,907	97,724	39,817	0,038523735	70,2	80	27,9	53
40	57,907	97,587	39,68	0,034950443	70,6	80	27,9	53
45	57,907	97,476	39,569	0,032055295	70,6	80	27,9	53
50	57,907	97,366	39,459	0,029186228	71,4	80	27,9	53
60	57,907	97,217	39,31	0,025299948	71,7	80	27,9	53
70	57,907	97,106	39,199	0,022404799	72,5	80	27,9	52
85	57,907	97,007	39,1	0,01982264	72,6	80	28	52
100	57,907	96,938	39,031	0,018022953	73,3	80	28,1	52
130	57,907	96,879	38,972	0,01648409	73,9	80	28,1	51
160	57,907	96,859	38,952	0,015962441	74,7	80	28,1	51
190	57,907	96,841	38,934	0,015492958	75,3	80	28,1	51
220	57,907	96,838	38,931	0,01541471	75,4	80	28,4	51
280	57,907	96,828	38,921	0,015153886	75,4	80	28,6	52
340	57,907	96,82	38,913	0,014945227	75,6	80	28,6	51
400	57,907	96,809	38,902	0,01465832	75,6	80	28,8	50
460	57,907	96,805	38,898	0,014553991	75,9	80	28,8	50
1900	57,907	96,78	38,873	0,01390193	76,3	80	27,9	55
3340	57,907	96,247	38,34	0	98,4	105	27,9	58

Temperatura ambiente (27,6°C), $M_{eq} = 0,01390$ kg/kg e UR = 4,19%

24 horas a 80°C e posteriormente 24 horas a 105°C

Início das leituras às 09:00 h da manhã do dia 20/01/2017

Tabela A5 - Dados obtidos experimentalmente durante a secagem de fibras de sisal a 90°C.

Tempo (min)	Massa bandeja (g)	Massa Bandeja com amostra (g)	Massa amostra (g)	Teor de umidade (kg/kg) (b.s.)	Temp. Fibra (°C)	Temp. Estufa (°C)	Temp. meio externo (°C)	Umidade relativa Ar externo (%)
0	57,907	103,298	45,391	0,113425074	30,4	90	27,9	64
5	57,907	102,424	44,517	0,091986165	63,9	90	27,9	64
10	57,907	101,815	43,908	0,077047612	70,8	90	27,9	63
15	57,907	101,299	43,392	0,064390316	73	90	27,9	63
20	57,907	100,887	42,98	0,054284102	78,2	90	27,9	63
25	57,907	100,57	42,663	0,046508205	78,4	90	27,9	62
30	57,907	100,304	42,397	0,03998332	80,7	90	27,9	62
35	57,907	100,084	42,177	0,034586798	80,5	90	27,9	62
40	57,907	99,908	42,001	0,030269581	80,5	90	27,9	62
45	57,907	99,742	41,835	0,02619766	81,3	90	28	62
50	57,907	99,626	41,719	0,023352221	82,1	90	28	62
60	57,907	99,416	41,509	0,018200996	83,3	90	28	62
70	57,907	99,274	41,367	0,014717786	83,6	90	28,1	62
85	57,907	99,152	41,245	0,01172517	83,5	90	28,1	61
100	57,907	99,089	41,182	0,010179802	84,1	90	28,1	60
130	57,907	99,034	41,127	0,008830672	84,5	90	28,1	60
160	57,907	99,015	41,108	0,008364609	85	90	28,1	59
190	57,907	98,998	41,091	0,007947605	85,3	90	28,5	58
220	57,907	98,983	41,076	0,00757966	86,4	90	28,4	58
280	57,907	98,978	41,071	0,007457012	87,1	90	28,4	55
340	57,907	98,957	41,05	0,006941889	87,3	90	28,4	55
400	57,907	98,955	41,048	0,00689283	87,3	90	28,5	55
460	57,907	98,954	41,047	0,0068683	87,2	90	28,5	55
1900	57,907	98,888	40,981	0,005249344	87,4	90	27,9	54
3340	57,907	98,674	40,767	0	104,3	105	31,1	43

Temperatura ambiente (27,9°C), $M_{eq} = 0,00525$ kg/kg e UR = 3,28%

24 horas a 90°C e posteriormente 24 horas a 105°C

Início das leituras às 09:00 h da manhã do dia 23/01/2017

Figura A1 - Teor de umidade (base seca) das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 50°C.

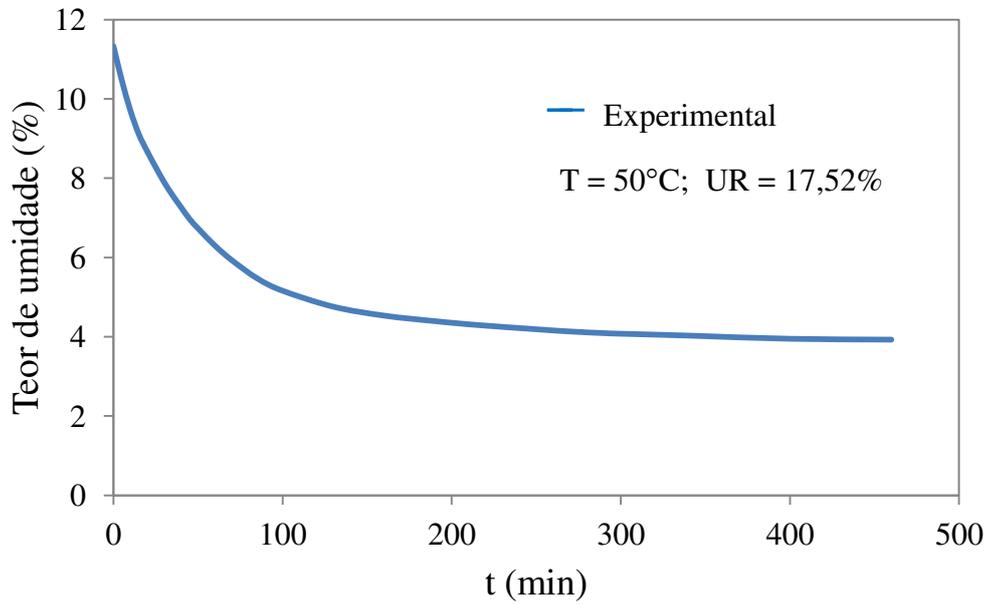


Figura A2 - Teor de umidade (base seca) das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 60°C.

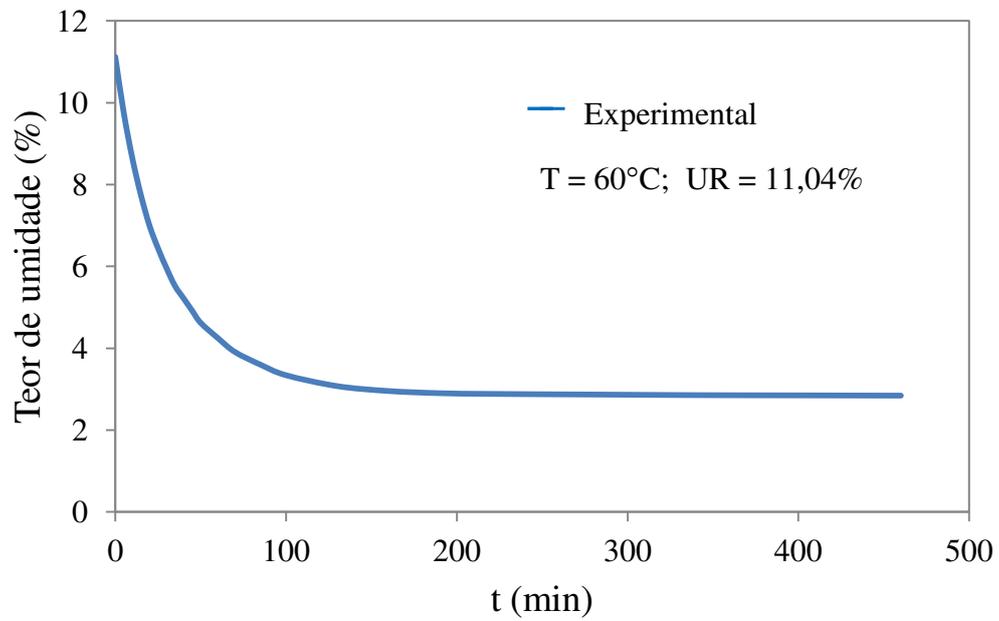


Figura A3 - Teor de umidade (base seca) das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 70°C.

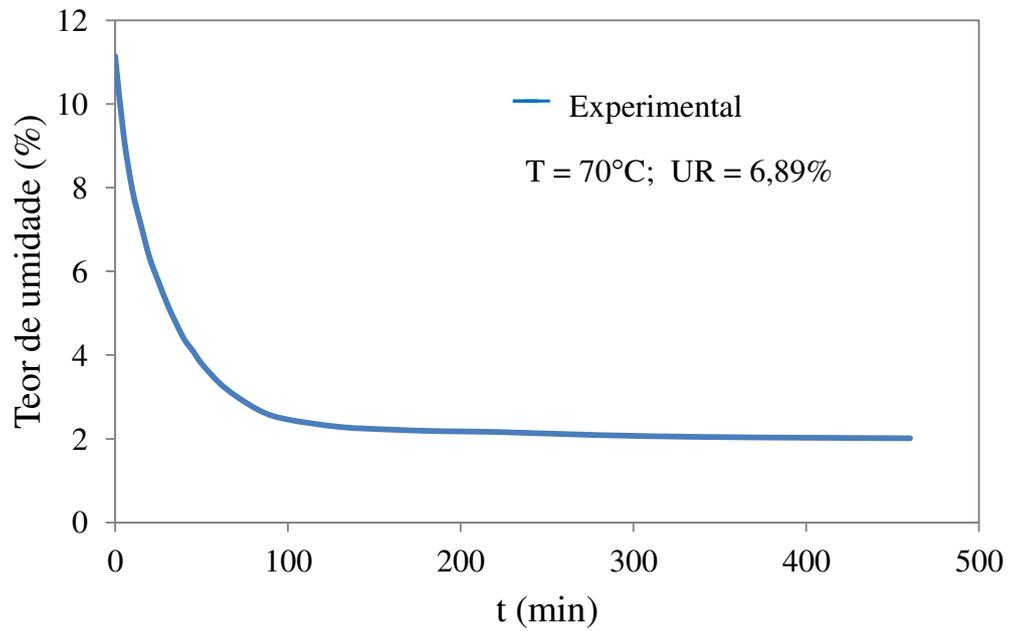


Figura A4 - Teor de umidade (base seca) das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 80°C.

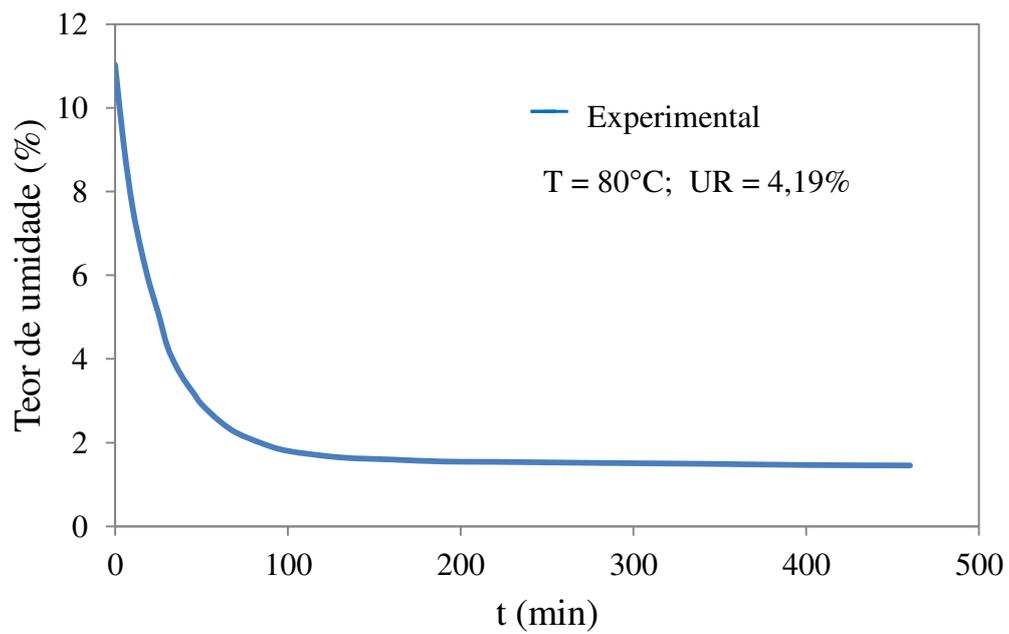


Figura A5 - Teor de umidade (base seca) das fibras de sisal em função do tempo durante a secagem a 90°C.

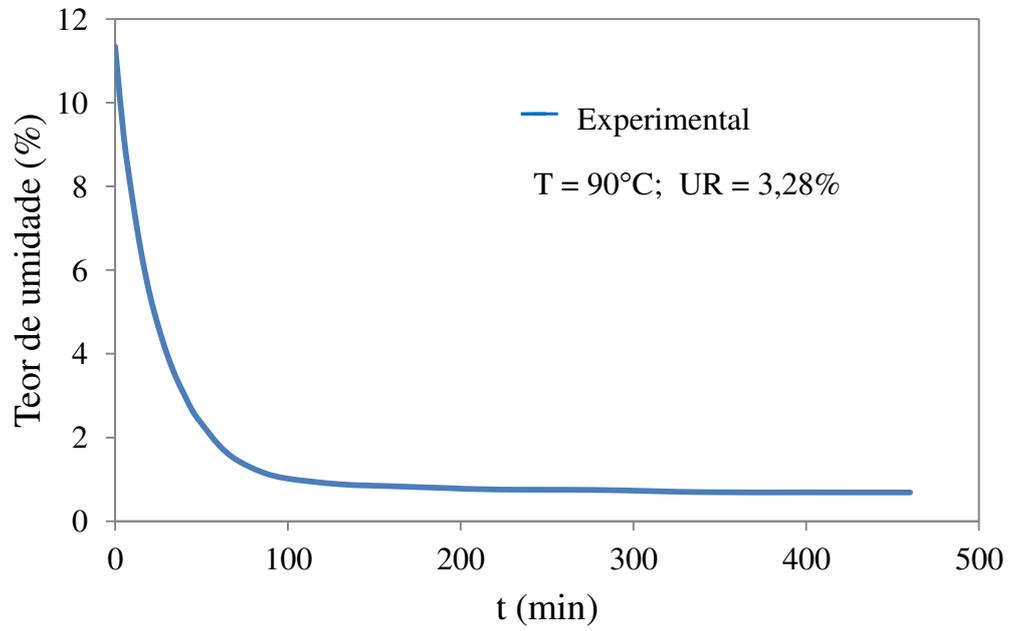


Figura A6 - Temperatura superficial das fibras de sisal durante a secagem a 50°C.

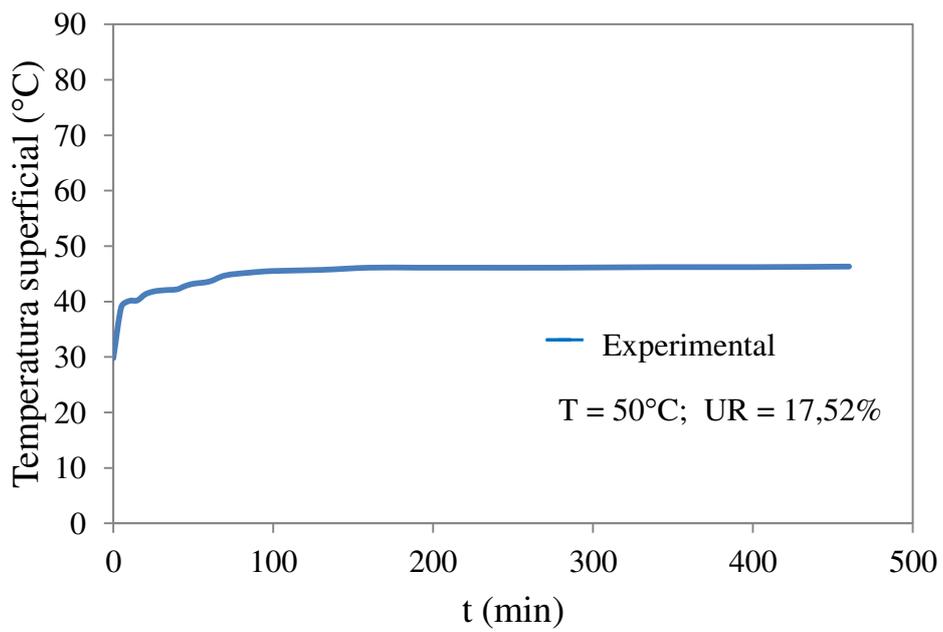


Figura A7 - Temperatura superficial das fibras de sisal durante a secagem a 60°C.

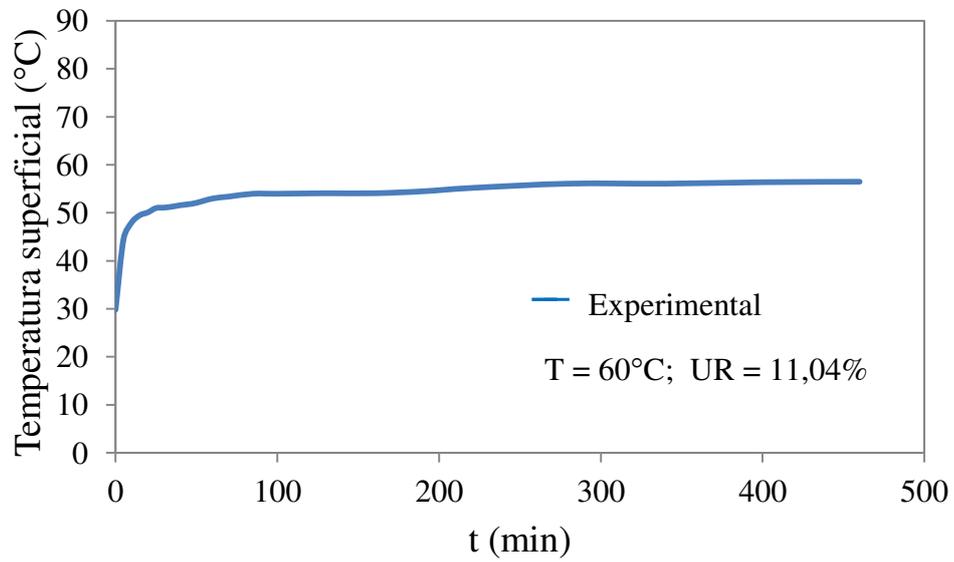


Figura A8 - Temperatura superficial das fibras de sisal durante a secagem a 70°C.

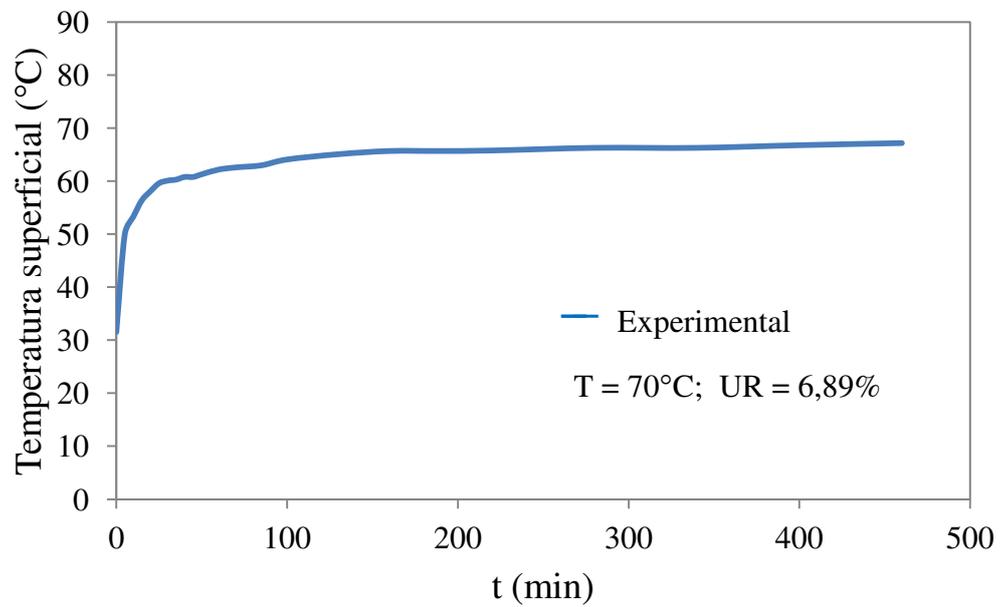


Figura A9 - Temperatura superficial das fibras de sisal durante a secagem a 80°C.

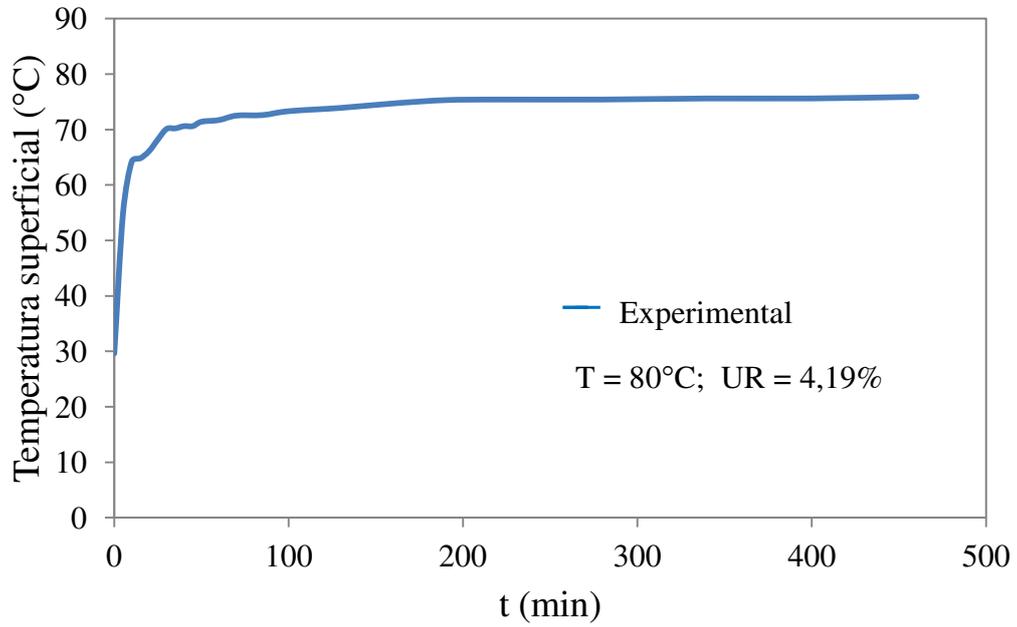


Figura A10 - Temperatura superficial das fibras de sisal durante a secagem a 90°C.

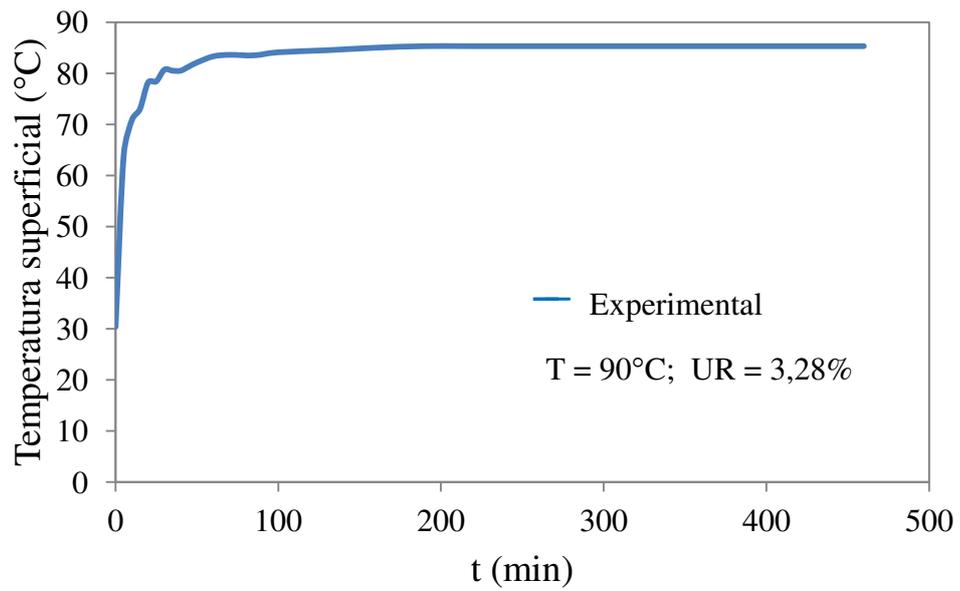


Figura A11 - Taxa de secagem das fibras de sisal durante a secagem a 50°C.

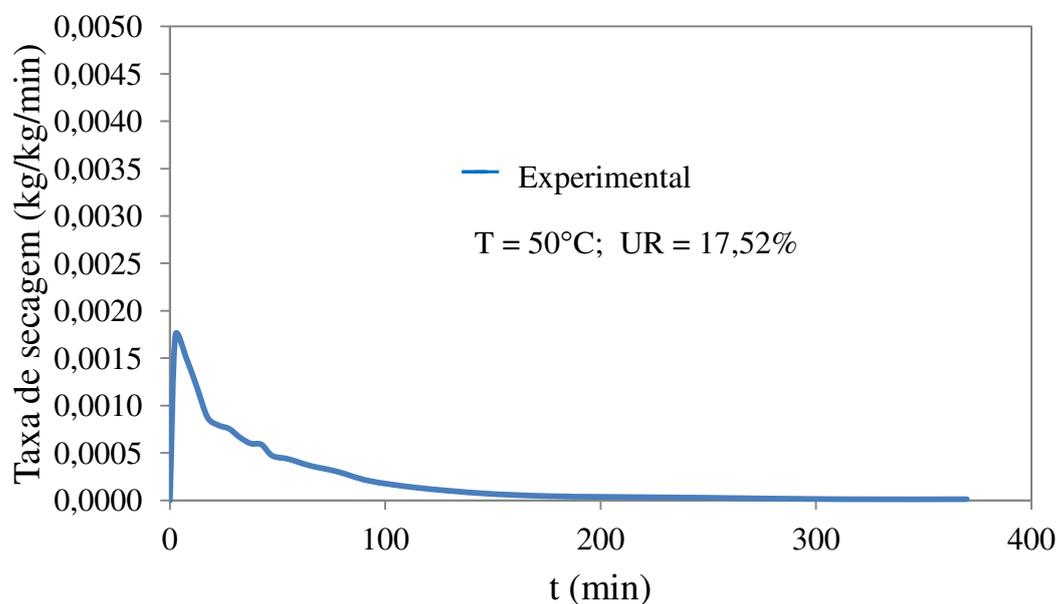


Figura A12 - Taxa de secagem das fibras de sisal durante a secagem a 60°C.

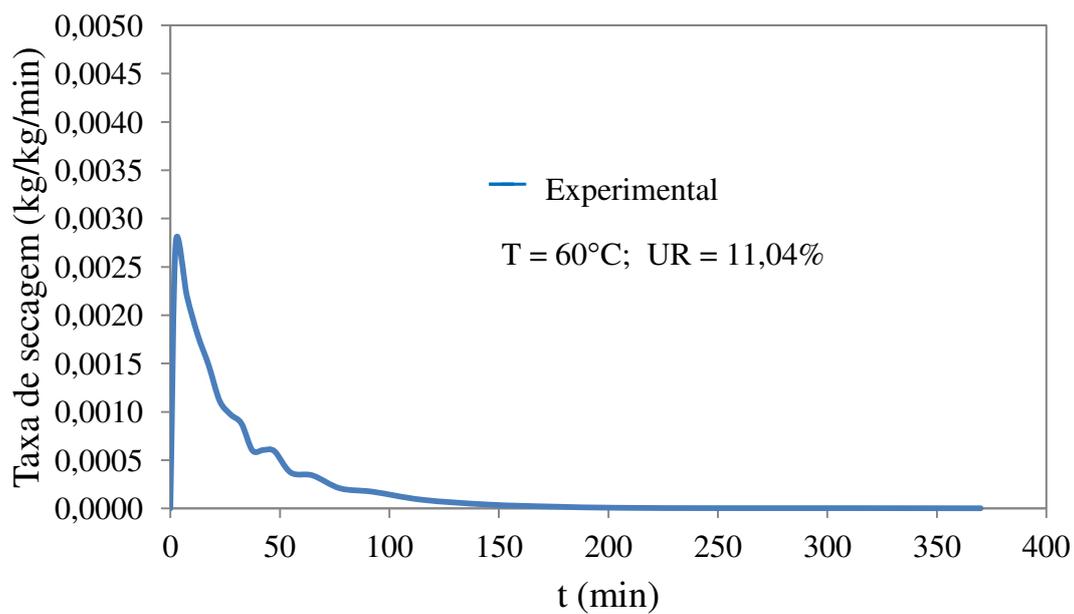


Figura A13 - Taxa de secagem das fibras de sisal durante a secagem a 70°C.

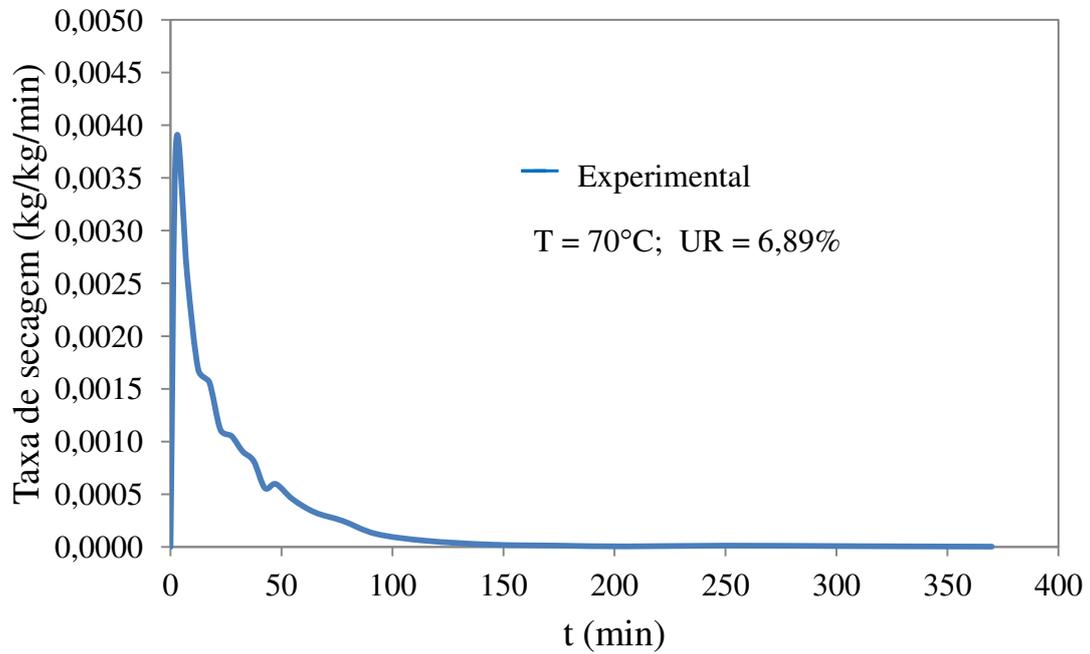


Figura A14 - Taxa de secagem das fibras de sisal durante a secagem a 80°C.

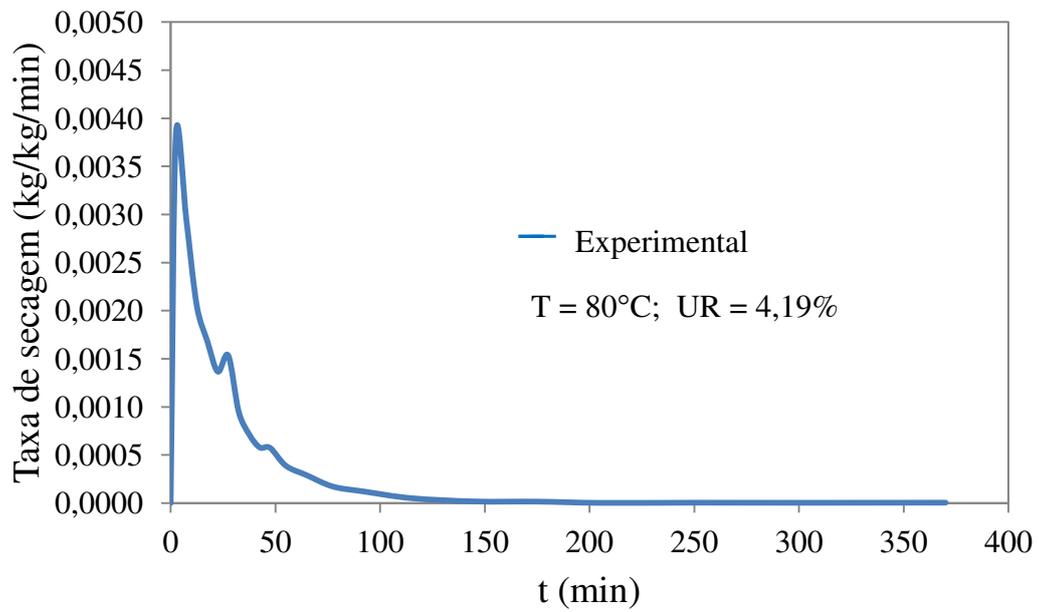


Figura A15 - Taxa de secagem das fibras de sisal durante a secagem a 90°C.

