

Rossane Mailde Santos

**ESTUDO DA SECAGEM E DO CONSUMO DE GÁS NATURAL  
EM UMA RAMA TÊXTIL DE AQUECIMENTO DIRETO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri

Florianópolis  
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Rossane Mailde

Estudo da secagem e do consumo de gás natural em uma rama têxtil de aquecimento direto. / Rossane Mailde Santos ; orientador, Marinho Bastos Quadri - Florianópolis, SC, 2013.

125 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui referências

1. Engenharia Química. 2. Modelagem e simulação. 3. Secagem de tecidos. 4. Rama. 5. Consumo de gás natural. I. Quadri, Marinho Bastos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

RossaneMailde Santos

**ESTUDO DA SECAGEM E DO CONSUMO DE GÁS NATURAL  
EM UMA RAMA TÊXTIL DE AQUECIMENTO DIRETO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Florianópolis, 26 de julho de 2013.

---

Prof. Ricardo Antônio Francisco Machado, Dr. Sc.  
**Coordenador do CPGENQ**

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Marinho Bastos Quadri, Dr. Sc.  
**Orientador**

---

Prof. Antônio Augusto Ulson de Souza, Dr. Sc.  
**Membro Interno / PosENQ**

---

Prof<sup>ª</sup>. Cíntia Soares, Dr. Sc.  
**Membro Interno / PosENQ**

---

Prof. Bruno Augusto Mattar Carciofi, Dr. Sc.  
**Membro Externo / PPGEAL**



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina pelo acolhimento e recursos para realização do mestrado.

Ao professor Marinho Bastos Quadri, pela oportunidade oferecida, paciência e orientação que possibilitou meu desenvolvimento no meio acadêmico.

Ao pessoal do Laboratório de Sistemas Porosos (LASIPO), pela boa convivência durante este tempo.

Ao engenheiro Ivan Carlos C. da Rocha e à Companhia de Gás de Santa Catarina (SCGÁS) pela contribuição direta para o desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional e incentivo aos estudos. Mesmo distante, agradeço aos meus amigos e em especial ao meu amado pela compreensão e pelas palavras de conforto.



“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”

(Antoine-Laurent Lavoisier, 1743-1794)



## RESUMO

A rama é um equipamento empregado na etapa de beneficiamento de tecidos que tem basicamente as funções de termofixação de acabamentos, de estabilização dimensional e de secagem. O gás natural é utilizado em ramas de aquecimento direto e os secadores tem um elevado consumo de energia por causa da grande quantidade de água removida por evaporação. Medidas que visam melhorar o desempenho desses equipamentos são fundamentais para uma produção mais eficiente. O estudo da secagem de um tecido em uma rama de aquecimento direto utilizando a modelagem matemática e a simulação mostra-se como um ótimo recurso para avaliar o desempenho desse secador operando em diferentes condições. Modelos fenomenológicos de transferência de calor e de massa em meio poroso foram considerados e validados baseando-se na comparação entre os resultados obtidos das simulações e aqueles observados em um processo real. O método dos elementos finitos foi o procedimento numérico adotado para resolução do sistema de equações diferenciais parciais. Quatro estudos de caso foram realizados: no estudo de caso 1 os coeficientes convectivos de transporte de calor e massa foram estimados; o impacto das condições ambientes locais no desempenho da rama foi estudado para a estação quente (no estudo de caso 2) e a estação fria (no estudo de caso 3) do ano; no estudo de caso 4, o reaproveitamento do calor de exaustão por meio do pré-aquecimento do tecido e do ar de secagem foi avaliado como um método para redução do consumo de combustível. O modelo de isoterma de Henderson-Thompson foi utilizado para representar o equilíbrio higroscópico do tecido de algodão e também para determinar o calor isostérico desse material. Os perfis de umidade e de temperatura foram obtidos ao longo do tecido dentro da rama e constatou-se que os modelos representaram o processo real satisfatoriamente. Verificou-se que a operação da rama na estação fria eleva o consumo de gás natural em 5,3 % e que o pré-aquecimento do tecido e também do próprio ar de secagem, reduz o consumo do combustível numa faixa de 19 % a 64 %, dependendo da razão de reciclo. A partir do estudo realizado, concluiu-se que as ramas têxteis são sensíveis às condições do ar ambiente e que procedimentos de recuperação de calor das correntes de exaustão para o pré-aquecimento do ar de secagem e do tecido podem determinar grande economia e assim, o uso mais eficiente dos recursos energéticos.

**Palavras-chave:** Modelagem. Simulação. Rama. Tecido.



## ABSTRACT

The stenter is a machine used in the finishing stage of fabric manufacturing that has the functions of heat setting, drying and providing width control. Natural gas is the fuel used in direct heating systems and these dryers have considerable energy consumption because of the large quantity of water removed by evaporation. In order to achieve energy efficiency, it's essential that process improvements be studied. Mathematical modeling and simulation are great tools to study the fabric drying inside the stenter and to evaluate its performance at different operating conditions. Heat and mass transfer in porous media models were considered and validated based on the comparison between the results obtained in the simulations and observations made in the real process. The finite element method was the numerical procedure adopted for solving the system of partial differential equations. Four case studies were accomplished: the convective heat and mass transfer coefficients were estimated in the case study 1; the effect of ambient conditions on the machine performance was studied for a warm season (in the case study 2) and a cold season (in case study 3); an evaluation of the use of exhaust air to preheat the fabric and the drying medium was done in the case study 4 to predict the effect of heat recovery in the fuel consumption. The Henderson-Thompson model was used to represent the equilibrium moisture of the cotton fabric and also to calculate its isosteric heat. The moisture and temperature profiles were calculated along the fabric inside the stenter and it was found that the models represented the real process adequately. It was found that operating the stenter in cold ambient air increases natural gas consumption by 5.3 % and that the recovery of exhaust heat to preheat the fabric and the drying medium reduces fuel consumption from 19 % to 64 %, depending on the recycle ratio. From this study, it was concluded that textile stenters are sensitive to ambient air conditions and that exhaust heat recovery systems provide a significant reduction of natural gas consumption.

**Keywords:** Modeling. Simulation. Stenter. Fabric.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do processo de secagem e da migração de umidade do interior para a superfície do sólido. ....	34
Figura 2 - Curvas de secagem: (a) mudança do conteúdo de umidade ao longo do tempo e (b) mudança de temperatura no sólido sob condições constantes de secagem.....	35
Figura 3 – Curva de secagem típica, mostrando a taxa de secagem como uma função do conteúdo de umidade do sólido. ....	36
Figura 4 – Tipos de umidade.....	42
Figura 5 – Histerese entre as isotermas de adsorção e de dessorção de umidade na fibra de algodão. ....	44
Figura 6 – Isoterma de dessorção de umidade para algumas fibras têxteis. ....	45
Figura 7 - Etapas de produção de uma cadeia têxtil.....	47
Figura 8 - Desenho esquemático de uma máquina de tear. ....	49
Figura 9 – Malhas feitas por (a) trama e (b) urdimento.....	49
Figura 10 – Estrutura de um não-tecido. ....	50
Figura 11 - Rama utilizada em indústria têxtil. ....	52
Figura 12 - Entrada de um tecido em uma rama. ....	53
Figura 13 - Desenho esquemático de uma câmara de secagem em uma rama de aquecimento direto. ....	54
Figura 14 - Esquema de um secador rama mostrando, em detalhe, os injetores de ar no interior de uma câmara. ....	55
Figura 15 - Diagrama de um sistema de recuperação de calor do ar de exaustão.....	59
Figura 16 – Elementos finitos usados em (a) uma dimensão; (b) duas dimensões e (c) três dimensões. ....	64
Figura 17 – Domínio considerado para simulação de secagem do tecido em rama, mostrando nos detalhes as regiões R1 e R2 sobre a superfície e as fronteiras 1,2 3 e 4. ....	67

Figura 18 – Fluxograma do procedimento adotado para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar.....	79
Figura 19 – Tempo de simulação para cada malha. ....	88
Figura 20 – Taxa de secagem calculada para cada malha. ....	89
Figura 21 – Malha utilizada nas simulações, mostrando nos detalhes a superfície superior e a espessura do domínio.....	90
Figura 22 – Modelo de isoterma de Henderson – Thompson ajustado aos pontos experimentais em várias temperaturas.....	91
Figura 23 – Curvas de $\ln(a_A)$ versus $1/T$ , baseadas na equação de Clausius – Clapeyron, para diferentes teores de umidade do material..	94
Figura 24 – Modelo ajustado aos valores de calor isostérico integral de dessorção em função da umidade de equilíbrio do tecido.....	95
Figura 25 – Perfil de umidade (a) e perfil de temperatura (b) no tecido para o estudo de caso 1 ( $T_{amb}= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $UA_{amb}= 16,87\text{ g/kg}$ ; $T_{ar}= 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $UA_{ar} = 23,95\text{ g/kg}$ ).....	99
Figura 26 – Perfil de umidade (a) e perfil de temperatura (b) no tecido para o estudo de caso 2 ( $T_{amb}= 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $UA_{amb}= 19,20\text{ g/kg}$ ; $T_{ar}= 179,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $UA_{ar} = 26,28\text{ g/kg}$ ). ....	99
Figura 27 – Perfil de umidade (a) e perfil de temperatura (b) no tecido para o estudo de caso 3 ( $T_{amb}= 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $UA_{amb}= 9,02\text{ g/kg}$ ; $T_{ar}= 183\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $UA_{ar} = 16,58\text{ g/kg}$ ).....	100
Figura 28 – Perfil de umidade (a) e perfil de temperatura (b) no tecido para o estudo de caso 4, com razão de reciclo 1:2 ( $T_{p-ar}= 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $UA_{p-ar}= 25,38\text{ g/kg}$ ; $T_{p-ar}= 166,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $UA_{ar} = 30,22\text{ g/kg}$ ). ....	100
Figura 29 – Perfis de umidade e temperatura ao longo da rama para os estudos de caso 1, 2, 3 e 4 (razão de reciclo de 1:2). ....	101
Figura 30 – Cinética de secagem e taxa de aquecimento do tecido para os estudos de caso 1, 2, 3 e 4 (razão de reciclo de 1:2). ....	102
Figura 31 – Distribuição de umidade na saída do secador ao longo da espessura do tecido com duas e quatro camadas de discretização. ....	103
Figura 32 – Linhas de aquecimento do ar utilizado no processo para os estudos de caso 1, 2 e 3. ....	105

Figura 33 – Esquema mostrando as condições do ar antes e depois da combustão do gás natural para o estudo de caso 1. ....	106
Figura 34 – Carta psicrométrica mostrando as condições do ar nos processos sem reciclo (estudo de caso 1) e com diferentes razões de reciclo (estudo de caso 4). ....	108
Figura 35 – Esquema do reaproveitamento do calor de exaustão para pré-aquecimento do tecido e do ar de secagem. ....	108



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Umidade de fibras têxteis para desorção. Dados para umidade relativa do ar de 60 % e temperatura de 21 °C. ....	42
Tabela 2 – Especificações do gás natural comercializado no Brasil. ....	56
Tabela 3 – Entalpia de combustão e volume molar para cada componente do gás natural. ....	76
Tabela 4 – Condições do ar ambiente para os estudos de caso 1, 2 e 3.	81
Tabela 5 – Razões de reciclo utilizadas no estudo de caso 4. ....	82
Tabela 6 – Teor de umidade de equilíbrio do tecido de algodão em função da temperatura e umidade relativa do ar. ....	83
Tabela 7 – Propriedades físicas do tecido de algodão considerado nas simulações. ....	85
Tabela 8 – Dados do ar seco e da água utilizados no cálculo das propriedades do fluido suporte. ....	85
Tabela 9 – Especificação das malhas testadas para as simulações. ....	88
Tabela 10 – Constantes dos modelos de isoterma ajustados com os respectivos coeficientes de determinação e erros médios. ....	91
Tabela 11 – Valores de atividade de água entre temperaturas de 30 e 180 °C e umidade de equilíbrio entre 0,04 e 0,22. ....	92
Tabela 12 – Valor do calor isostérico calculado para o tecido. ....	94
Tabela 13 – Coeficientes convectivos de transferência de massa e de calor estimados no estudo de caso 1 para as regiões R1 e R2. ....	97
Tabela 14 – Resultados dos estudos de caso 1, 2 e 3, mostrando a vazão de ar utilizado, o consumo de gás natural e as taxas de energia envolvidas no processo. ....	106
Tabela 15 – Resultados dos balanços de massa para cada razão de reciclo do estudo de caso 4. ....	109
Tabela 16 – Resultados obtidos dos cálculos de balanço energético para as razões de reciclo do estudo de caso 4 e para o estudo de caso 1. ....	110



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\%Q_p$  – porcentagem de calor perdido, %

$a_A$  – atividade de água, (-)

$a_v$  – fração de volume de gás, (-)

$A_1$  – área referente à região R1, m<sup>2</sup>

$A_2$  – área referente à região R2, m<sup>2</sup>

$c_{\infty}$  – concentração de água no ar de secagem, mol/m<sup>3</sup>

$c_A$  – concentração de água no fluido suporte, mol/m<sup>3</sup>

$c_{A,0}$  – concentração inicial de água, mol/m<sup>3</sup>

$c_A^g$  – concentração de água na camada de ar em contato com a superfície do domínio mol/m<sup>3</sup>

$c_{int}$  – concentração de água no meio de secagem junto à superfície do material, mol/m<sup>3</sup>

$c_{pA}$  – concentração de água adsorvida no tecido, mol de água/ kg de tecido seco

$C_{P,ar}$  – capacidade térmica do ar seco à pressão constante, J/(kg K)

$C_{P,A}$  – capacidade térmica da água à pressão constante, J/(kg K)

$c_{GA}$  – concentração de vapor d'água na fase gasosa, mol de água/m<sup>3</sup> de ar seco

$C_{P,fs}$  – capacidade térmica do fluido suporte à pressão constante, J/(kg K)

$C_{P,p}$  – capacidade térmica do meio poroso à pressão constante, J/(kg K)

$C_{st}$  – constante de integração, (-)

$d_j$  – valores desconhecidos do vetor  $U$

$D_D$  – tensor de dispersão, m<sup>2</sup>/s

$D_{ef}$  – difusividade efetiva do vapor d'água na fase fluida, m<sup>2</sup>/s

$F_j$  – função de interpolação

$G$  – vetor de funções conhecidas de um problema

$Gr$  – gramatura do tecido, g/m<sup>2</sup>

$h_1$  – coeficiente convectivo de transferência de calor na região R1, W/(m<sup>2</sup> K)

$h_2$  – coeficiente convectivo de transferência de calor na região R2, W/(m<sup>2</sup> K)

$J_{ar}$  – fluxo de massa de ar nos injetores, mol/(m<sup>2</sup> s)

$k$  – coeficiente convectivo de transferência de massa, m/s

$k_1$  – coeficiente convectivo de transferência de massa na região R1, m/s

$k_2$  – coeficiente convectivo de transferência de massa na região R2, m/s

$l$  – espessura, m

$\mathcal{L}$  - operador diferencial

$m_A$  – massa de água, kg

$m_{as}$  – massa de ar seco, kg

$m_{ms}$  – massa de material seco, kg

$m_{mu}$  – massa de material úmido, kg

$\dot{m}_A$  – vazão mássica de água, mol/s

$\dot{m}_{ar}$  – vazão mássica total do ar de secagem, kg/s

$\dot{m}_{amb}$  – vazão mássica total do ar fresco, kg/s

$\dot{m}_{ex}$  – vazão mássica do ar de exaustão, kg/s

$\dot{m}_{p-ar}$  – vazão mássica do ar pré-aquecido, kg/s

$\dot{m}_{vap}$  – vazão mássica de vapor removido do tecido, kg/s

$M_A$  – massa molar da água, kg/mol

$MS$  – erro médio estimado

$\mathbf{n}$  – vetor normal

$\dot{n}$  – vazão molar do gás natural, mol/s

$\dot{n}_A$  – vazão molar de água, mol/s

$N$  – fluxo molar de água evaporada, mol/(m<sup>2</sup> s)

$N_A$  – fluxo molar total de água evaporada do tecido, mol/(m<sup>2</sup> s)

$P_{atm}$  – pressão atmosférica, Pa

$P_{sat}$  – pressão vapor d'água na saturação, Pa

$P_v$  – pressão parcial de vapor d'água, Pa

$q_{st}$  – calor isostérico de sorção líquido, J/kg

$\dot{Q}_{ar}$  – taxa total de energia do ar de secagem, J/s

$Q_b^1$  – fluxo convectivo de calor para região R1, J/ (m<sup>2</sup> s)

$Q_b^2$  – fluxo convectivo de calor para região R2, J/(m<sup>2</sup> s)

$\dot{Q}_p$  – calor perdido, J/s

$Q_{proc}$  – quantidade de energia necessária para evaporar água do tecido, kJ/kg

$Q_{st}$  – calor isostérico de sorção integral, J/kg

$\dot{Q}_{tec}$  – fluxo de energia requerido para evaporação de água do tecido, J/s

$r$  – razão de reciclo, (-)

$\mathcal{R}$  - diferença entre uma solução analítica e aproximada de uma equação diferencial parcial

$R$  – constante universal dos gases J/ (mol K)

$R_A$  – taxa de reação, mol/ (m<sup>3</sup> s)

$S_A$  – termo de fonte, mol/ (m<sup>3</sup> s)

$t$  – tempo, s

$T$  – temperatura do tecido, K

$T_{ar}$  – temperatura do ar de secagem, K

$T_{amb}$  – temperatura do ar ambiente, K

$T_{bu}$  – temperatura e bulbo úmido, K

$T_{p-ar}$  – temperatura do ar pré-aquecido, K

$\mathbf{u}$  – campo de velocidade da fase fluida, m/s

$u_{inj}$  – velocidade de injeção do ar de secagem sobre o tecido, m/s

$U$  – vetor das variáveis de um problema

$\tilde{U}$  – solução aproximada de uma equação diferencial parcial

$UA$  - umidade absoluta do ar, kg de água/kg de ar seco

$UA_{p-ar}$  – umidade absoluta do ar pré-aquecido, kg de água/kg de ar seco

$UA_{amb}$  – umidade absoluta do ar ambiente, kg de água/kg de ar seco

$UA_{ar}$  – umidade absoluta do ar de secagem (base seca), kg/kg

$UA_{ex}$  – umidade absoluta do ar de exaustão (base seca), kg/kg

$UA_{sat}$  – umidade absoluta do ar saturado, kg de água/kg de ar seco

$UR$  – umidade relativa do ar, %

$\dot{V}_{GN}$  – vazão volumétrica do gás natural consumida pelo secador, m<sup>3</sup>/s

$x_i$  – fração molar do componente  $i$ , (-)

$X$  – umidade do material em base seca, kg de água/kg de material seco

$X_0$  – umidade inicial do material, kg de água/kg de material seco

$X_{bu}$  – umidade do material em base úmida, kg de água/kg de material úmido

$X_c$  – umidade crítica de um material, kg de água/kg de material seco

$X_e$  – umidade de equilíbrio, kg de água/kg de material seco

$\hat{X}_e$  – umidade de equilíbrio experimental, kg de água/kg de material seco

### **Letras gregas**

$\Gamma_A$  – fluxo difusivo de vapor d'água, mol/(m<sup>2</sup> s)

$\Delta H_c$  – entalpia de combustão, J/mol

$\Delta H_{c,i}^o$  – entalpia de combustão do componente  $i$ , J/mol

$\Delta H_{vap}$  – entalpia de vaporização da água, J/kg

$\varepsilon$  – porosidade do tecido, (-)

$\eta$  – número de dados experimentais, (-)

$\theta$  – fração de fase fluida, (-)

$\kappa_A$  – condutividade térmica da água, W/(m K)

$\kappa_{ar}$  – condutividade térmica do ar seco, W/(m K)

$\kappa_{eq}$  – condutividade térmica equivalente, W/(m K)

$\kappa_{fs}$  – condutividade térmica do fluido suporte, W/(m K)

$\kappa_p$  – condutividade térmica do meio poroso, W/(m K)

$\rho_A$  – massa específica da água, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_{ar}$  – massa específica do ar seco, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_b$  – densidade aparente, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_{fs}$  – massa específica do fluido suporte, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_p$  – massa específica da fibra de tecido, kg/m<sup>3</sup>

$v_c$  – volume molar do combustível, m<sup>3</sup>/mol

$v_i$  – volume molar do componente  $i$ , m<sup>3</sup>/mol

$\Omega$  – fonte de calor, W/m<sup>3</sup>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	27
1.2	OBJETIVOS.....	28
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>28</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>28</b>
1.3	JUSTIFICATIVA .....	29
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	30
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>33</b>
2.1	ASPECTOS BÁSICOS DE SECAGEM.....	33
<b>2.1.1</b>	<b>Comportamento Típico da Secagem.....</b>	<b>34</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Mecanismos de Secagem .....</b>	<b>37</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Condições externas .....</b>	<b>39</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Condições internas.....</b>	<b>41</b>
2.2	A INDÚSTRIA TÊXTIL.....	46
<b>2.2.1</b>	<b>Matérias-primas .....</b>	<b>46</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Etapas de produção .....</b>	<b>47</b>
2.3	SECAGEM EM RAMA .....	52
<b>2.3.1</b>	<b>Consumo energético de um secador rama.....</b>	<b>55</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Melhoria da eficiência energética em ramas .....</b>	<b>56</b>
2.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	59
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>63</b>
3.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	63
3.2	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E CONSTRUÇÃO DA MALHA .....	66
3.3	MODELAGEM FENOMENOLÓGICA.....	68
<b>3.3.1</b>	<b>Transferência de massa em meios porosos.....</b>	<b>69</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Transferência de calor em meios porosos.....</b>	<b>72</b>

<b>3.3.3</b>	<b>Equações utilizadas para estimativa do consumo de gás natural .....</b>	<b>75</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Equações psicrométricas.....</b>	<b>78</b>
<b>3.4</b>	<b>ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>79</b>
<b>3.5</b>	<b>PROPRIEDADES DOS MATERIAIS .....</b>	<b>81</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Condições do ar .....</b>	<b>81</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Determinação do equilíbrio higroscópico entre o tecido e o ar de secagem .....</b>	<b>82</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Propriedades físicas do tecido e do fluido suporte .....</b>	<b>85</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>87</b>
<b>4.1</b>	<b>ESTUDO DE MALHA .....</b>	<b>87</b>
<b>4.2</b>	<b>ISOTERMA DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO.....</b>	<b>90</b>
<b>4.3</b>	<b>CALOR ISOSTÉRICO .....</b>	<b>92</b>
<b>4.4</b>	<b>COEFICIENTES CONVECTIVOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA .....</b>	<b>96</b>
<b>4.5</b>	<b>PERFIS DE UMIDADE E TEMPERATURA NO TECIDO ....</b>	<b>98</b>
<b>4.6</b>	<b>CONSUMO DE GÁS NATURAL E DESEMPENHO DA RAMA .....</b>	<b>104</b>
<b>4.7</b>	<b>REAPROVEITAMENTO DO CALOR DO GÁS DE EXAUSTÃO .....</b>	<b>107</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>111</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES .....</b>	<b>113</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>115</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Diversos bens de produção e de consumo presentes no cotidiano das pessoas são fabricados na indústria têxtil, como materiais técnicos, peças de vestuário e artigos do lar. Este fato coloca este setor como uma das atividades econômicas mais importantes do mundo. Os maiores exportadores mundiais de artigos têxteis são a China, Itália, Alemanha e Estados Unidos (RANGEL; SILVA; COSTA, 2010). O Brasil possui o quarto maior parque produtivo de confecção e é o quinto maior produtor têxtil do mundo. Segundo a Associação Brasileira de Indústrias Têxteis e Confeções (ABIT), em 2011 o número de empresas formais chegava aos 30 mil, que empregaram diretamente cerca de 1,7 milhão de pessoas e faturaram US\$ 67,3 bilhões. A principal cadeia têxtil do país é a do algodão e o Brasil é autossustentável, produzindo em média 1,5 milhão de toneladas para um consumo de 900 mil toneladas (ABIT, 2011). O desafio deste século para a indústria têxtil é atender uma demanda cada vez maior por seus produtos, produzindo de modo eficiente, a baixo custo, e ainda, garantir a preservação do meio ambiente.

O setor têxtil é constituído por uma cadeia de atividades em sequência linear, constituída pelas etapas de fiação de fibras naturais ou sintéticas, de tecelagem, de malharia, de beneficiamento, de acabamento e de confecção de artigos para o consumo final. Equipamentos de secagem são normalmente utilizados na etapa de acabamento do tecido, conferindo as propriedades finais características do mesmo (CHEREM, 2004). A rama é um tipo de secador amplamente utilizado para esta finalidade e geralmente requer um alto consumo de energia para o aquecimento do ar e posterior remoção de umidade no tecido (HASANBEIGI, 2010).

Quando um sólido úmido é submetido à secagem ocorrem basicamente dois fenômenos simultâneos. Um é a transferência de calor do ambiente para evaporar a umidade superficial. Esta transferência depende de condições externas de temperatura, umidade, fluxo e direção do ar, área de exposição do sólido e pressão. O outro é a transferência de umidade, do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. O movimento interno da umidade no material é função da natureza física do sólido, sua temperatura e conteúdo de umidade e pode ocorrer pelos mecanismos de

difusão e capilaridade (FOUST *et al.*, 1980; MCCABE; SMITH; HARRIOT, 2005).

A secagem é uma operação de energia intensiva e possui certa relevância nos países industrializados, uma vez que a energia despendida nesse processo contabiliza cerca de 7 a 15% da energia gerada com finalidade industrial e geralmente com eficiência térmica relativamente baixa (OKTAY; HEPBASLI, 2002). Assim, o uso mais eficiente dos recursos energéticos por equipamentos como a rama implica diretamente na redução dos custos de produção do setor têxtil (OĞULATA, 2004).

O consumo de energia em um secador convectivo pode ser reduzido pela otimização do processo de secagem utilizando uma análise matemática da distribuição de temperatura e umidade no tecido. Então, o desenvolvimento de um modelo adequado para prever o desempenho de um secador de rama precisa é importante para economia de energia do processo (HAGHI, 2001). Nesse contexto, este trabalho propôs um estudo fenomenológico da secagem de tecido em rama, através da modelagem e da simulação desse processo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi modelar e simular a secagem de um tecido de algodão em secador rama utilizado na indústria têxtil.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Estimar os coeficientes convectivos de transferência de calor e de massa que reproduzam os fluxos dessas grandezas associadas ao processo de maneira fidedigna.

- Determinar o modelo de isoterma de desorção do algodão, escolhido como material de teste para a metodologia proposta, utilizando dados da literatura em diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar.

- Obter perfis de umidade e de temperatura ao longo do tecido no interior das câmaras de secagem.

- Verificar o efeito da condição do ar ambiente no desempenho da rama.

- Analisar a viabilidade técnica do uso do gás de exaustão para o pré-aquecimento do ar de secagem e do tecido.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A elevada competitividade do setor têxtil estimula a pesquisa e aplicação de tecnologias em empresas que buscam se diferenciar dos concorrentes e ampliar o mercado, por meio de melhorias nos processos que garantam uma produção eficiente com um produto final de alta qualidade.

O secador rama é um dos equipamentos mais utilizados na indústria têxtil. Uma das fases dos processos desse setor que consome grande quantidade de energia é a secagem, que utiliza aproximadamente 25 % da energia usada no acabamento de tecidos (MUJUMDAR, 2006). A água contida no tecido é um fator que influencia nesta operação, uma vez que quanto maior a quantidade de água nos tecidos processados, maior o tempo de residência nos equipamentos de secagem, o que resulta no aumento da quantidade de energia térmica consumida na secagem total do material têxtil.

A modelagem matemática é um excelente recurso para o desenvolvimento de soluções mais precisas e que permitem o monitoramento, o controle, a otimização e a predição de um processo existente ou ainda em fase de projeto. Através de balanços realizados no secador rama, pode-se identificar e determinar fluxos de massa e energia, normalmente difíceis de serem contabilizados na prática e que podem ser aplicados em cálculos de eficiência produtiva e energética desses equipamentos. Além disso, esses fluxos servem como parâmetros de entrada da modelagem do sistema e fluxos de saída de energia e massa podem ser usados na validação do modelo.

Durante a secagem de um material, diversas condições externas e internas ao sólido influenciam significativamente o processo. As variáveis externas consideradas mais importantes são a temperatura, a umidade, a direção do fluxo do meio de secagem, a forma física do sólido e seu suporte durante a operação.

O conhecimento das condições externas é essencial durante os estágios iniciais da secagem. Os coeficientes convectivos de calor e massa são os parâmetros que controlam a saída de vapor da superfície do sólido para a atmosfera através de uma fina camada de ar em contato com a superfície. A injeção de ar em um secador rama utiliza jatos de ar

em alta velocidade direcionados perpendicularmente à superfície do produto para aumentar os coeficientes de transferência de calor convectivos, reduzindo o tempo de processamento.

Devido às características do escoamento do ar neste sistema, os coeficientes de transferência de calor variam espacialmente na superfície. O local onde o jato de ar atinge o produto é chamado ponto de estagnação. Neste ponto, a velocidade axial diminui drasticamente enquanto a pressão estática e a velocidade radial aumentam. Isto resulta em altas taxas de transferência de calor no ponto de estagnação. A determinação desses coeficientes em sistemas desse tipo é muito complexa, mas de fundamental importância para estudar e avaliar a secagem de materiais.

As condições internas mais importantes são o teor de umidade do sólido e o seu comportamento durante a secagem, bem como o conhecimento das isotermas de dessorção de umidade. Uma vez que a secagem envolve a transferência de massa entre as fases gasosa e líquida, é necessário conhecer também as características de equilíbrio do sólido úmido. A importância de se determinar a isoterma que regula o equilíbrio entre as fases está na possibilidade do uso desta informação para evitar a secagem excessiva do tecido, que pode causar efeitos indesejáveis (como por exemplo, a degradação das fibras devido à exposição excessiva ao calor, o desperdício de energia etc.).

A aplicação de modelos matemáticos que agreguem um maior conhecimento do secador mostra-se como uma estratégia bastante útil. O estudo da modelagem e simulação de sistemas é viabilizado principalmente pelo rápido progresso de computadores com capacidade de processamento cada vez maior e o desenvolvimento de softwares que incorporam a resolução de equações diferenciais parciais por métodos numéricos mais robustos para a obtenção de soluções mais precisas.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos, dos quais o primeiro traz uma breve introdução do tema, contextualizado o assunto abordado, juntamente com os objetivos e a justificativa da realização deste estudo.

No capítulo 2, a fundamentação teórica contempla os princípios básicos de secagem, bem como uma visão geral da estrutura de uma indústria têxtil, destacando o secador rama e o consumo energético associado a este equipamento.

O capítulo 3 é dedicado a toda a metodologia utilizada para o estudo. Ele inclui uma breve descrição do método dos elementos finitos, os modelos matemáticos utilizados e as definições de geometria, malha e propriedades relativas ao domínio estudado.

Os resultados obtidos e as discussões referentes a eles estão no capítulo 4. No capítulo 5, as conclusões do estudo realizado são apresentadas. No capítulo 6, sugestões para trabalhos futuros são apresentadas. Por último, é mostrada a seção de referências bibliográficas que foram utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão apresentados os principais aspectos teóricos referentes ao estudo da modelagem e simulação da secagem de tecido em rama. Os fundamentos incluídos são a teoria de secagem de materiais, uma visão geral das etapas de produção da indústria têxtil e o funcionamento da rama, relacionado ao consumo energético deste equipamento.

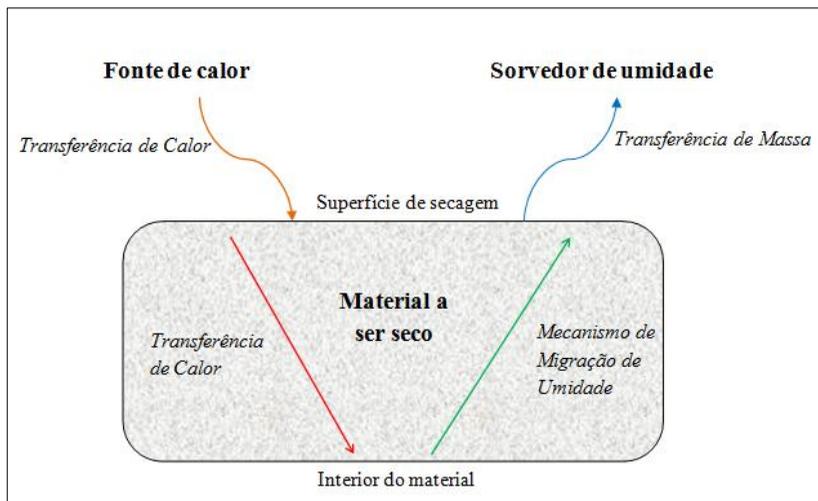
### 2.1 ASPECTOS BÁSICOS DE SECAGEM

Por definição, secagem é o processo de transferência de massa e de calor no qual um material volátil é evaporado de um sólido (PERRY; GREEN, 1999). O objetivo da secagem é a obtenção de um material com um teor de umidade desejado através do uso de equipamentos denominados secadores. O secador fornece calor suficiente para o aumento da pressão de vapor da umidade no material, utilizando um meio de secagem menos úmido, de modo que a migração de umidade do material para o meio seja potencializada. Em geral, este processo requer grande quantidade de energia (TREYBAL, 1980; GEANKOPLIS, 1993).

A secagem é uma operação que envolve simultaneamente as transferências de calor e massa entre o material a ser seco e o meio secante e também recebe influência do escoamento deste meio sobre o sólido. Estes fenômenos dependem das condições de temperatura, umidade, fluxo e direção do fluido de secagem, bem como a natureza e as condições iniciais de umidade e temperatura do material (PARK *et al.* 2008).

A Figura 1 mostra um esquema do processo de secagem. Calor é fornecido para o sólido úmido, promovendo a evaporação da água da superfície do material. A umidade é então transferida do interior para a superfície do sólido por um mecanismo de secagem e evapora. O vapor formado é arrastado por um sorvedor, de modo que a umidade do meio de secagem é reduzida, aumentando a eficiência do processo.

Figura 1 – Esquema do processo de secagem e da migração de umidade do interior para a superfície do sólido.



Fonte: adaptado de Alonso (2001).

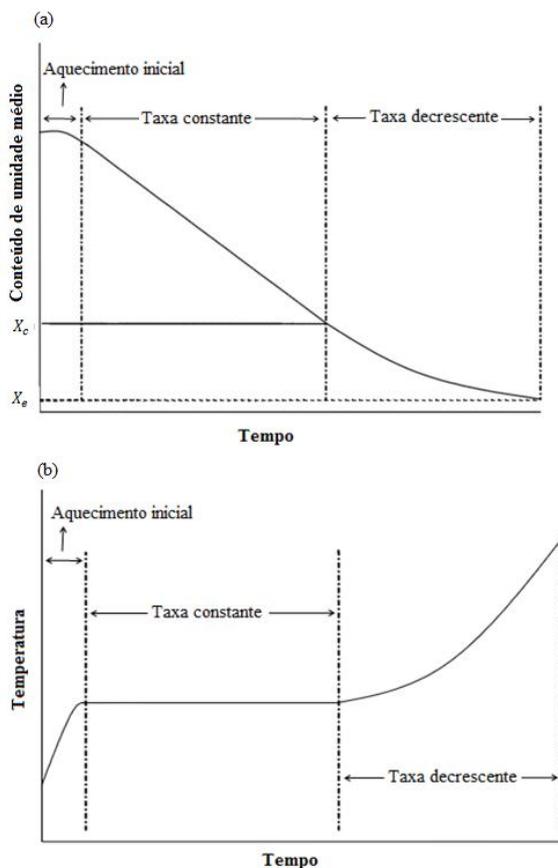
### 2.1.1 Comportamento Típico da Secagem

O processo de secagem pode ser dividido em períodos distintos e é representado por gráficos de teor de umidade *versus* tempo (Figura 2 - a), temperatura *versus* tempo (Figura 2-b) e, tipicamente, de taxa de secagem *versus* teor de umidade (Figura 3). Estes períodos serão descritos a seguir, conforme Perry e Green (1999), Geankoplis (1993) e Foust *et al.* (1980).

O período de aquecimento acontece imediatamente após o contato entre o meio de secagem e o material a ser seco e a temperatura deste ajusta-se até o regime permanente ser atingido. Em seguida, o período à taxa constante é iniciado, no qual o movimento de umidade dentro do sólido é rápido o suficiente para manter a condição saturada na superfície. A secagem é controlada pela taxa de transferência de calor e a difusão de vapor da superfície saturada do material através do filme de ar. A taxa de transferência de massa pondera a de calor e a temperatura na superfície permanece constante. O mecanismo de remoção de umidade nesse período é essencialmente independente da natureza do sólido e então, a taxa de transferência de calor aumenta, resultando em maiores taxas de secagem. A magnitude da taxa constante

depende de fatores como os coeficientes de transferência de calor e massa, a área exposta do sólido ao meio de secagem, a diferença de temperatura/umidade entre eles e a temperatura absoluta do sólido e do meio de secagem. Este período termina quando o sólido atinge o teor de umidade crítico, representado pelo ponto  $X_c$  nos gráficos das Figuras 2e 3.

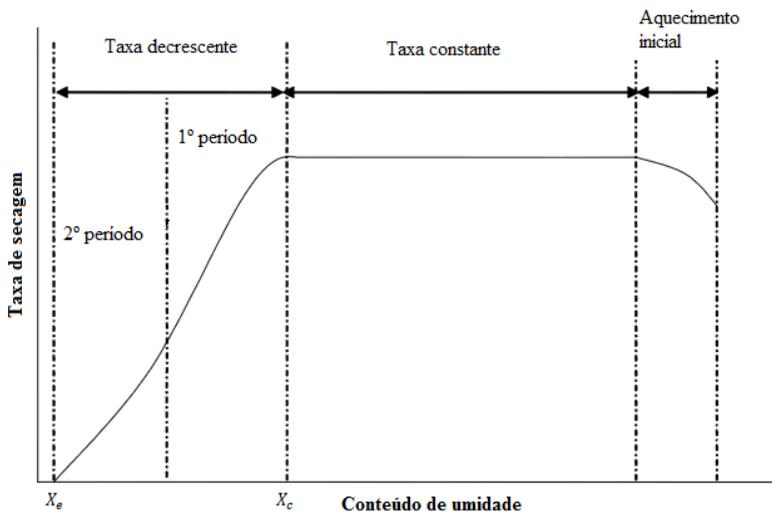
Figura 2 - Curvas de secagem: (a) mudança do conteúdo de umidade ao longo do tempo e (b) mudança de temperatura no sólido sob condições constantes de secagem.



Fonte: Xue (2004).

Aquém do ponto de teor de umidade crítico  $X_c$ , ocorre o período à taxa decrescente, em que a temperatura da superfície eleva-se e a pressão de vapor do líquido é menor que a pressão de saturação, causando uma queda na taxa de secagem rapidamente. Este período tende a ser mais longo e com menor remoção de umidade que o período à taxa constante. Dependendo das características físicas do material, o período à taxa decrescente é dividido em duas regiões. No primeiro período decrescente, mostrado na Figura 3, a superfície fica paulatinamente mais pobre em líquido porque a taxa de transferência de líquido para a superfície é menor que a taxa da transferência de massa de umidade para o meio. Quando a superfície do sólido já não está mais saturada, o segundo período à taxa decrescente é iniciado. Neste período, toda a evaporação ocorre de dentro do sólido e a taxa de secagem é governada pelo movimento do vapor no material. À medida que o teor de umidade continua a cair, a distância a ser percorrida na difusão de calor e massa aumenta até que a secagem cessa no teor de umidade de equilíbrio  $X_e$ .

Figura 3 – Curva de secagem típica, mostrando a taxa de secagem como uma função do conteúdo de umidade do sólido.



Fonte: Xue (2004).

## 2.1.2 Mecanismos de Secagem

Durante o período de secagem a taxa constante, a água é removida de maneira similar à evaporação de um líquido, pois o material está completamente umedecido. A secagem ocorre pela transferência de massa do vapor de água na superfície do material através de um filme de ar para o seio (*bulk*) da fase gasosa. A velocidade do movimento da umidade no interior do sólido é suficiente para manter a superfície saturada.

Assumindo apenas a transferência de calor do meio de secagem para o sólido por convecção e a transferência de massa da superfície do sólido para a fase gasosa, o fluxo molar de água evaporada é calculado pela equação (1):

$$N = k(c_{int} - c_{\infty}) \quad (1)$$

onde  $k$  é o coeficiente de transferência de massa,  $c_{int}$  é a concentração de água na interface sólido-meio de secagem e  $c_{\infty}$  é a concentração de água no meio de secagem.

No período à taxa decrescente, como resultado da transferência de calor em um material úmido, um gradiente de temperatura é desenvolvido dentro do sólido. A superfície não está completamente umedecida e desse modo, a umidade de dentro do sólido migra para a superfície, através de mecanismos, sendo a difusão e a capilaridade os modelos comumente propostos (XUE, 2004).

### a) Mecanismo de difusão

Este mecanismo ocorre durante a secagem de sólidos heterogêneos e meios porosos quando estão sendo secos abaixo do teor de umidade crítico. Neste modelo, a umidade está presa ao material e move-se lentamente por difusão. Neste caso, a resistência à transferência de massa do vapor da superfície do sólido ao ar é normalmente negligenciável e a difusão da água dentro do sólido controla a taxa de secagem. Uma vez que a difusividade aumenta com a temperatura do sólido, a taxa de secagem também aumenta. A expressão matemática deste mecanismo é feita através de um balanço de massa que resulta na segunda lei de Fick, mostrada na equação (2), considerando um sistema unidimensional e em coordenadas cartesianas (CRANK, 1975; GEANKOPLIS, 1993):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D \left( \frac{\partial X}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$

onde  $t$  é o tempo,  $x$  é a distância no sólido,  $X$  representa a umidade do material em base seca (b.s.) e  $D$  é o coeficiente de difusão do líquido através do sólido.

A solução da equação (2) é obtida quando a condição inicial e as condições de contorno são estabelecidas. Algumas hipóteses podem ser consideradas:

- (i) o tecido é homogêneo;
- (ii) as dimensões do tecido permanecem constantes (com espessura  $l$ );
- (iii) o coeficiente de difusão é considerado constante;
- (iv) a superfície do sólido entra imediatamente em equilíbrio com o meio de secagem;
- (v) a umidade limite é a umidade de equilíbrio do material ( $X_e$ ).

Com a condição inicial e as condições de contorno:

$$X(x, 0) = X_0, \text{ para } 0 < x < l \quad (2.a)$$

$$X(0, t) = X_e, \text{ para } t > 0 \quad (2.b)$$

$$X(l, t) = X_e, \text{ para } t > 0 \quad (2.c)$$

e com as hipóteses apresentadas levadas em conta, a solução da equação diferencial parcial apresentada por Crank (1975) é dada pela equação (3):

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\exp \left[ -D \frac{(2j+1)^2 \pi^2 t}{l^2} \right]}{(2j+1)^2} \quad (3)$$

O modelo de difusão molecular despreza os efeitos da transferência de calor devido ao movimento de umidade do sólido (BONTEMPI, 2004). Muitos sólidos alteram as características de seus poros durante a secagem e a distribuição do líquido no meio poroso no teor de umidade crítico dificilmente é uniforme.

## b) Mecanismo de capilaridade

Em sólidos granulados ou com estrutura formada por poros abertos, o movimento do líquido dentro do sólido é consequência das forças resultantes das diferenças entre a pressão hidrostática e os efeitos da tensão interfacial (FOUST *et al.*, 1980).

Um sólido poroso contém poros interconectados e canais de vários tamanhos. Quando a água no interior desses poros é evaporada, um menisco de água líquida é formado dentro dos poros no sólido. No período de secagem a taxas decrescentes, o líquido nos poros maiores é atraído para o interior do sólido pela ação das forças de tensão interfacial e supre a formação de meniscos nos poros menores. Em seguida, o líquido dos poros recua de modo que o desequilíbrio das forças capilares seja anulado pelo equilíbrio das forças gravitacionais. Retirando-se ainda mais umidade, a proporção da superfície total que permanece saturada fica cada vez menor (XUE, 2004).

Nos períodos mais avançados de secagem, a temperatura da superfície do sólido aproxima-se da temperatura do meio secante. As curvas de secagem para sólidos porosos diferem muito entre si, devido às diferenças estruturais de cada um.

Outros mecanismos de movimento de umidade no sólido incluem o movimento da água líquida devido às forças gravitacionais, a difusão de água líquida adsorvida sobre as superfícies internas dos poros vazios (em sólidos com baixo teor de água) e a difusão de vapor sob efeito de um gradiente de pressão parcial de vapor de água (WAANANEN; OKOS, 1994). Esses mecanismos ocorrem simultaneamente e ainda não há uma relação teórica que generalize todos os casos de secagem (ALONSO, 2001).

### 2.1.3 Condições externas

A secagem ocorre pela evaporação do líquido presente na fase sólida quando ele é aquecido por convecção, condução ou radiação. Mais de 85% dos secadores industriais são do tipo convectivo com ar quente como meio de secagem (MUJUMDAR, 2006). As condições externas referem-se às propriedades psicrométricas do ar de secagem. A psicrometria é a ciência que estuda o envolvimento das propriedades do ar úmido, que é uma mistura de ar seco e vapor d' água, e do processo que ele passa na mudança de temperatura ou de conteúdo de vapor d' água na mistura (BRITTO, 2010).

## a) Umidade do ar

A umidade é um importante parâmetro do ar de secagem, pois influencia diretamente no potencial para transferência de umidade do sólido para o meio externo.

A umidade absoluta ou específica é a razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco presente no ar úmido, de acordo com a equação (4).

$$UA = \frac{m_A}{m_{as}} \quad (4)$$

Quando a pressão parcial do vapor de água em uma dada temperatura for igual à pressão de vapor de equilíbrio, o ar está saturado e a umidade nestas condições denomina-se umidade de saturação.

Pode-se definir a umidade relativa como a relação entre a fração molar do vapor d'água no ar e a sua fração correspondente se ele estivesse saturado, à mesma pressão e temperatura (PARK *et al.*, 2007). Considerando que o comportamento da mistura seja dos gases perfeitos, a umidade relativa pode ser calculada como a razão entre a pressão parcial do vapor d'água ( $P_v$ ) e a pressão de vapor d'água na saturação ( $P_{sat}$ ), conforme a equação (5).

$$UR = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (5)$$

## b) Temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido

As condições do ar de secagem podem ser especificadas pelas temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido.

A temperatura é uma grandeza física relacionada à energia cinética das partículas, indicando o estado térmico do sistema. A temperatura de bulbo seco é medida com um termômetro comum. Em geral, é comum medir a temperatura com um tubo de vidro parcialmente cheio de líquido que se expande quando aquecido (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2005).

A temperatura de bulbo úmido é indicada por um termômetro cujo bulbo é coberto por uma mecha de algodão embebida em água deionizada ou pura. Faz-se passar uma corrente de ar pelo termômetro e quando ela atinge a mecha de algodão, calor e massa são transferidos

simultaneamente. Então, parte da água presente no algodão evapora e a temperatura no termômetro é reduzida. A temperatura estabilizada é denominada temperatura de bulbo úmido (BONTEMPI, 2004). Com as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido, podem-se determinar outros parâmetros psicrométricos como a pressão parcial do vapor d'água, o ponto de orvalho e a umidade específica.

#### 2.1.4 Condições internas

##### a) Teor de umidade do sólido

O teor de umidade é a relação direta entre a massa de água presente no material e a massa do mesmo. Esse parâmetro pode ser expresso de duas maneiras (PARK *et al.*, 2007):

- Base seca: em relação à massa seca do produto, dado pela equação (6).

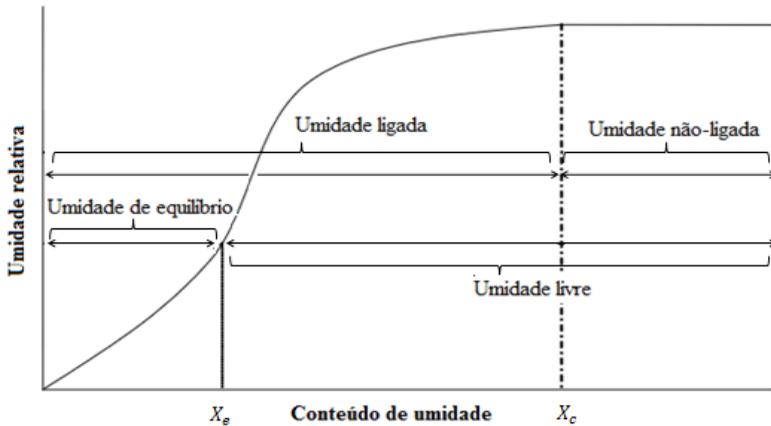
$$X = \frac{m_A}{m_{ms}} \quad (6)$$

- Base úmida: em relação à massa total do produto (massa do material seco mais a massa de água contida nele), dado pela equação (7).

$$X_{bu} = \frac{m_A}{m_{mu}} \quad (7)$$

O tecido é um meio poroso higroscópico, pois certa quantidade de líquido permanece fisicamente vinculada ao sólido, como umidade ligada (MUJUMDAR, 2006). A umidade ligada se refere à água contida em um sólido que exerce uma pressão de vapor no equilíbrio menor que a do líquido puro a mesma temperatura. Umidade não ligada refere-se à água contida no sólido que exerce pressão de vapor de equilíbrio igual a do líquido puro a mesma temperatura. A umidade livre é o excesso de umidade contida no sólido em relação à umidade de equilíbrio (TREYBAL, 1980). O gráfico da Figura 4 mostra os tipos de umidade envolvidos durante a secagem de sólidos porosos.

Figura 4 – Tipos de umidade.



Fonte: adaptado de Treybal (1980).

A umidade de equilíbrio corresponde àquela que permanece no meio sólido, depois de manter contato com o ar por um longo tempo, a uma dada temperatura. Ela depende essencialmente da natureza do material e é função da temperatura e da umidade do ar. A determinação da umidade de equilíbrio é importante para a secagem porque ela representa o limite máximo que o material pode ser seco ou armazenado de forma segura, para as condições de operação, temperatura e umidade relativa (CERON, 2008). A Tabela 1 mostra a umidade de equilíbrio para algumas fibras têxteis.

Tabela 1 – Umidade de fibras têxteis para dessorção. Dados para umidade relativa do ar de 60 % e temperatura de 21 °C.

Fibra	Umidade absorvida (%)
Acetato	7,81
Algodão	8,36
Seda	11,51
Lã	16,08

Fonte: Mujumdar (2005).

## b) Isotermas de adsorção e dessorção de umidade

A evaporação superficial é controlada pela difusão do vapor da superfície do sólido para o meio de secagem através de uma fina camada de ar em contato com a superfície. Uma vez que a secagem envolve a transferência de massa entre as fases sólida e gasosa, é essencial conhecer as características de equilíbrio do sólido úmido.

Modelos matemáticos empíricos são normalmente utilizados para representar essa relação de equilíbrio. Estes modelos diferem entre si na base teórica ou empírica e na quantidade de parâmetros envolvidos (MULET *et al.*, 2002).

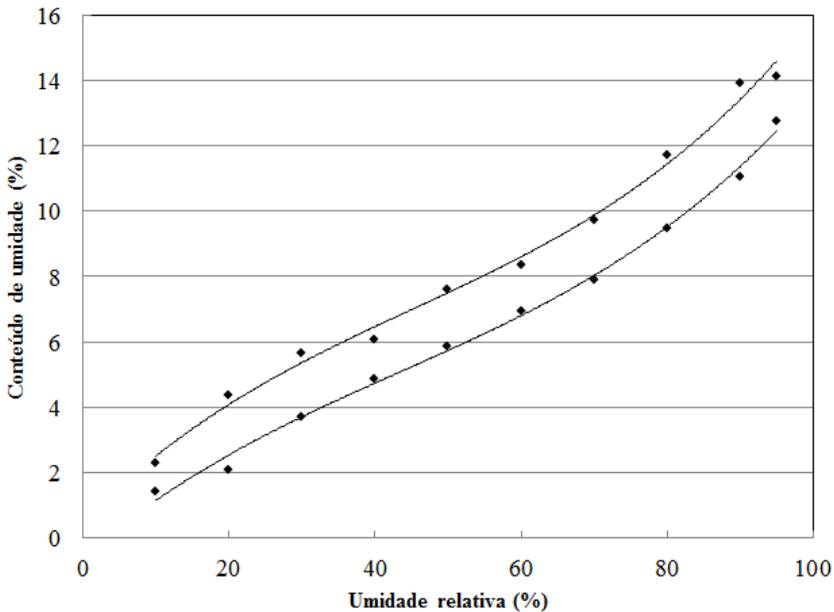
As isotermas de adsorção e dessorção de umidade são importantes para definir limites de desidratação do produto, estimar as mudanças do teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente e para definir os teores de água adequados ao início de atividade de microrganismos que podem provocar a deterioração de um produto. Além disso, através das isotermas de equilíbrio higroscópico, pode-se determinar o requerimento de energia necessário ao processo de secagem (CORRÊA; ALMEIDA, 1999).

A curva de uma isoterma se apresenta de duas formas: isoterma de adsorção, obtida quando o material seco é colocado em ambiente com incremento de umidade relativa, medindo-se o ganho do peso do material devido à hidratação; e isoterma de dessorção, obtida quando o material inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições atmosféricas criadas para a adsorção, medindo-se neste caso a diminuição do peso, devido à perda de água. Estas curvas não são coincidentes, e a diferença entre elas é conhecida como histerese (PARK *et al.*, 2008). A Figura 5 mostra as curvas de adsorção e dessorção de umidade para a fibra de algodão.

Uma das hipóteses usadas para explicar o fenômeno da histerese é considerar um poro conectado aos seus arredores por um capilar. Durante a adsorção, como a umidade relativa aumenta, o capilar começa a encher enquanto o poro está vazio. Somente quando a pressão de vapor no ar é maior que a pressão de vapor do líquido no capilar, a mistura irá se mover para dentro do poro. Na saturação, o poro está cheio de líquido. Ele só poderá sair quando a pressão parcial do ar nos arredores seja menor que a pressão de vapor do líquido no capilar. Uma vez que o sistema de poros tem geralmente um grande intervalo de diâmetro do capilar, as diferenças entre adsorção e dessorção serão observadas. Esta teoria assume que os poros são constituídos de uma

estrutura rígida (MUJUMDAR, 2006). Embora também apresentem histerese, essa teoria não se aplica a materiais sintéticos ou alimentos. Greg e Sing (1982) apresentam algumas explicações teóricas da histerese durante a adsorção/dessorção. Uma explicação para esses casos é que a contração e o aumento de volume se sobrepõem aos processos de secagem e umidificação, produzindo estados de tensão no interior desses produtos e ocasionando a variação do equilíbrio de umidade caso a dessorção ou adsorção esteja em progresso.

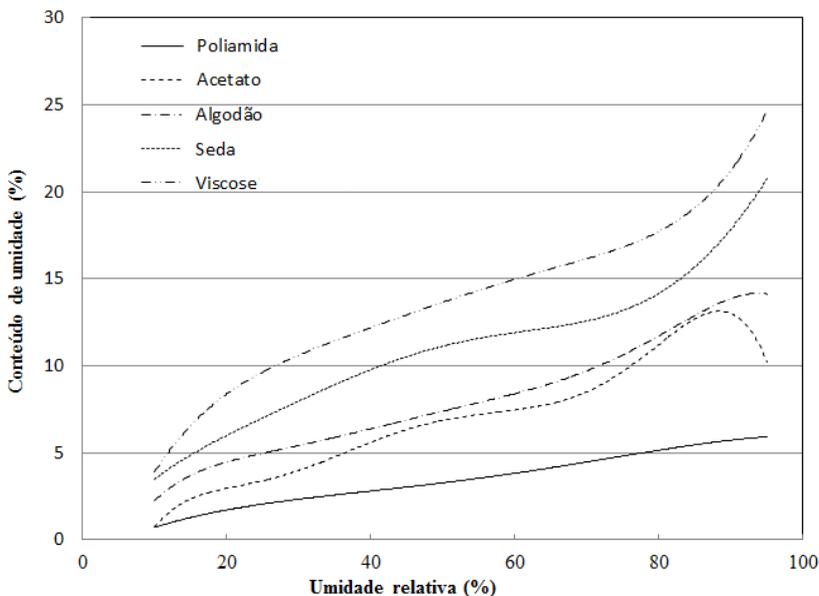
Figura 5 – Histerese entre as isotermas de adsorção e de dessorção de umidade na fibra de algodão.



Fonte: Mujumdar (2005). Dados obtidos a 21 °C.

No caso de sólidos porosos compostos por fibras higroscópicas, como o algodão, o comportamento de sorção/dessorção de umidade é complexo, devido à interação da água com o material. Esse fenômeno também está associado à histerese, efeitos térmicos e mudanças dimensionais do meio (CHATTERJEE; GUPTA, 2002). A Figura 6 mostra curvas de dessorção de umidade para alguns tipos de fibras que constituem os tecidos.

Figura 6 – Isoterma de desorção de umidade para algumas fibras têxteis.



Fonte: Mujumdar (2005). Dados obtidos a 21 °C.

### c) Calor Isostérico

Outro fator importante na determinação da isoterma de sorção de umidade é que através dela, o calor de sorção de umidade pode ser determinado. O calor isostérico é definido termodinamicamente como a diferença entre a entalpia na fase de vapor e a entalpia da água líquida adsorvida no sólido (SILVA *et al.*, 2002).

O conhecimento do calor isostérico de sorção é de grande importância nos projetos de equipamentos de secagem, devido ao fato que o calor de vaporização da água sorvida é mais alto que o calor de vaporização da água pura, isto é, ele representa a quantidade de energia necessária para evaporar a água adsorvida na fase sólida do produto (RESENDE *et al.*, 2006).

O conhecimento da teoria básica de secagem apresentada até aqui é fundamental para que a operação deste processo na prática seja realizada de modo mais eficiente. A secagem é largamente utilizada em diversos tipos de indústrias, que variam do setor de alimentos até o têxtil. Devido ao alto consumo de energia, a secagem torna-se

essencialmente um processo central nas operações industriais (DINCER, 2011). Diante do escopo deste estudo e da aplicabilidade dele para a indústria têxtil, uma visão geral deste setor é mostrada a seguir, destacando a utilização da rama no processo de beneficiamento de tecidos.

## 2.2 A INDÚSTRIA TÊXTEL

Os subtópicos a seguir caracterizam de maneira geral as matérias-primas utilizadas e as principais etapas de produção da cadeia têxtil, incluindo a operação de secagem realizada durante o acabamento dos produtos.

### 2.2.1 Matérias-primas

O tipo de material utilizado na indústria têxtil está, de certo modo, limitado devido ao fato de características especiais serem exigidas para que uma matéria possa ser considerada útil como matéria-prima têxtil. Assim, esses materiais devem apresentar um conjunto de propriedades e características para que possam ser aceitos como matérias-primas têxteis. Segundo Zupin e Dimitrovski (2010), algumas destas propriedades são:

- (i) o material deve ser delicado, sob o ponto de vista de toque agradável, suavidade, flexibilidade e na generalidade de todos os aspectos que suscitem a ideia de conforto que deverá ser obtido nos artigos finais;
- (ii) esses materiais devem ser minimamente resistentes, para que seja possível trabalhá-los e que possam ser depois usadas pelo homem;
- (iii) sob o ponto de vista técnico, uma matéria têxtil deve ser suficientemente comprido relativamente à sua espessura.

O complexo têxtil utiliza diversos tipos de fibras, classificadas como naturais e químicas, estas últimas divididas em artificiais e sintéticas. As fibras naturais têm duas origens: animal, como a lã e a seda; e vegetal, como o linho, a juta, o sisal e o algodão. As fibras químicas são produzidas a partir de materiais de origem vegetal ou petroquímicos e são classificadas em artificiais, que são produzidas a partir da celulose, sendo as principais o raio viscose e o acetato; e sintéticas, originárias da petroquímica, sendo as principais o poliéster, a poliamida, o acrílico, o elastano e o polipropileno (BASTIAN, 2009).

O algodão é usado como fibra têxtil há 7000 anos e está ligado à origem mais remota do vestuário e à evolução da produção de artigos têxteis. Nas fibras de algodão, a celulose aparece em longas cadeias de moléculas unidas pelo grupo OH. Estas longas cadeias estão dispostas nas fibras paralelamente formando uma espiral. Este arranjo estrutural confere às fibras de algodão grande resistência à tração e estabilidade dimensional.

O alto número de grupos hidróxidos presentes são os responsáveis por algumas das propriedades mais assinaláveis do algodão, como a grande capacidade de absorver água e a facilidade de tingimento e lavagem em meio aquoso. O algodão amarelece se for submetido a temperaturas acima de 200 °C. Resiste bem aos ácidos em concentrações médias e as bases em baixas concentrações provocam o inchamento das fibras (REBENFELD, 2002).

### 2.2.2 Etapas de produção

Tipicamente, a indústria têxtil é caracterizada por um processo de manufatura dividido em várias etapas, e cada uma delas com múltiplas unidades de produção. A relação entre as diferentes etapas da cadeia têxtil é linear e a interdependência entre elas torna o gerenciamento bastante complexo (KARACAPILIDIS; PAPPIS, 1996). A Figura 7 mostra as principais etapas da cadeia têxtil e uma breve descrição será feita a seguir.

Figura 7 - Etapas de produção de uma cadeia têxtil.



Fonte: Karacapilidis; Pappis (1996).

#### a) Fiação

A fiação é a primeira etapa da produção de artigos têxteis, em que a matéria-prima é transformada em fio, com massa por unidade de comprimento desejado. Esse processo consiste em estirar e torcer as fibras, juntando-as firmemente para a obtenção de um fio contínuo, com o nível correto de torção, coesão, resistência e aspecto (CHEREM, 2004).

A fiação de fibras naturais compreende diversas operações através das quais as fibras são orientadas em uma mesma direção, utilizando diversas passagens de estiramentos e torcidas de modo a prenderem-se umas às outras por atrito. A fiação de fibras artificiais é composta pelas etapas de extrusão, operação na qual uma substância pastosa é pressionada através da fiação, resultando em filamentos que são endurecidos por meio da solidificação. Alguns tipos de fibras ainda passam pela texturização, que torna os fios mais opacos, melhora a aparência e a textura, aumentando a absorção, a elasticidade e o volume. Um dos grandes desenvolvimentos desse segmento é a fiação por compactação e a fiação a jato de ar. Esses processos aumentam a velocidade de produção, permitem a redução de torção e melhor estiragem, conferindo maior resistência dos fios (MALDONADO; BRUNO, 2005). As propriedades finais do fio produzido dependem do tipo da fibra utilizada e suas características.

#### b) Tecelagem

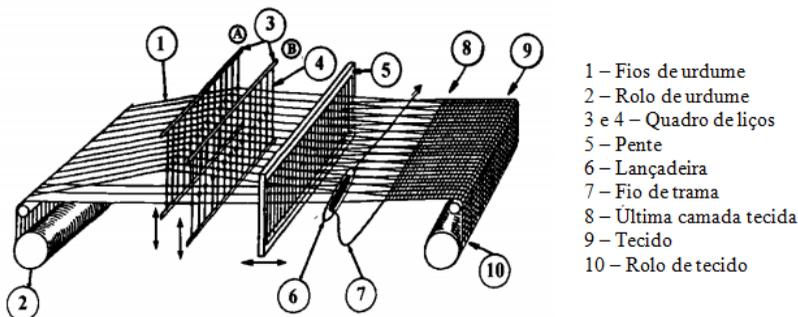
Existem vários tipos de tecidos, de acordo com o processo de tecelagem: o tecido plano, a malha e o não-tecido. Os fios produzidos na etapa de fiação são utilizados para a formação do tecido cru. O tecido plano é a junção dos fios de urdume (fios dispostos na direção do comprimento) e de trama (fios dispostos na direção da largura) através do tear, e são acondicionados em rolos (PEREIRA, 2007).

Para que os fios de urdume suportem a tensão a que são submetidos nos teares durante a tecelagem, eles são reforçados em um processo de engomagem. Este processo, que antecede a tecelagem, consiste na impregnação e revestimento dos fios de urdume com substâncias adesivas e formadoras de um filme sobre suas superfícies, aumentando a resistência mecânica.

A tecelagem se caracteriza, tradicionalmente, pelo cruzamento de dois sistemas de fios paralelos em uma máquina chamada tear (Figura 8). O primeiro sistema é composto pelos fios de urdume que entram já paralelizados no tear. Os fios de urdume saem do rolo e passam pelas agulhas dos quadros de liços. O abaixar e levantar alternados desses quadros de liços faz com que se abra um espaço entre as duas camadas de fios, chamado de cala, por onde são inseridos os fios de trama através de uma lançadeira. Após a passagem do fio de trama, o pente se desloca fortemente, batendo os fios de trama de forma a aproximar este último fio dos anteriores. Este processo se repete a velocidades que podem

chegar a 1000 batidas por minuto, produzindo o tecido que é enrolado em um rolo (ALCÂNTARA; DALTIM, 1996).

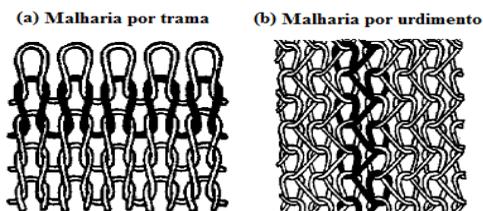
Figura 8 - Desenho esquemático de uma máquina de teer.



Fonte: Alcântara e Daltin (1996).

Os tecidos de malha são resultantes de processos técnicos de laçadas de um só fio ou de um agrupamento de fios que se movem em uma única direção, interpenetrando-se, como é mostrado na Figura 9. O fio simples de malharia é laçado através dele mesmo, fazendo uma espécie de correntes de pontos (CHEREM, 2004). A malha pode ser feita por trama, quando o fio corre horizontalmente; ou por urdume, onde o fio corre longitudinalmente, assumindo a forma de laçadas, de formas curvas, que se sustentam entre si. As laçadas são livres para se movimentar quando submetidas a alguma tensão, tornando o tecido de malha capaz de se adaptar a diversos tipos de formas, retornando à sua forma original ao fim da tensão (SCHAEFER; OLIVEIRA, 2010).

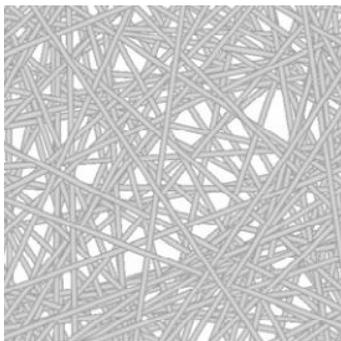
Figura 9 – Malhas feitas por (a) trama e (b) urdimento.



Fonte: Spencer (2001).

Basicamente, o não-tecido é um têxtil produzido sem um entrelaçamento ordenado e homogêneo dos fios, mas sim com distribuição aleatória das fibras (Figura 10). O não-tecido é uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ao acaso e são consolidados por processo mecânico (fricção), químico (adesão), térmico (coesão) ou combinações destes (MORONI *et al.*, 2005).

Figura 10 – Estrutura de um não-tecido.



Fonte: Pourdeyhimi; Mazé; Tafreshi (2006).

### c) Beneficiamento

O beneficiamento é a última etapa do processo produtivo têxtil, em que o tecido é submetido a um conjunto de operações físicas, químicas e bioquímicas até estar apto para as fases de manufatura e confecção. Esta etapa pode ser dividida em três fases: acabamento primário, secundário e terciário.

O acabamento primário corresponde à preparação do tecido para o tingimento e estampagem. Esta operação tem o objetivo de eliminar todos os óleos e aditivos que foram utilizados no processo de tecelagem/malharia para obtenção de um tecido limpo, hidrofílico e com melhor aspecto final (GONÇALVES, 2007).

No acabamento secundário ocorrem os processos de tingimento e estampagem do tecido. Os materiais têxteis são tingidos usando uma grande variedade de corantes, técnicas e equipamentos. Os corantes são transferidos ao material em meio aquoso e a adsorção e retenção do corante na fibra podem ser química, físicas ou ambas, dependendo do tipo da fibra e do corante. A estamparia tem a finalidade de imprimir um

desenho à superfície do tecido, adicionando uma camada colorida com figuras específicas. Das numerosas técnicas de estampar, a mais comum é a tela rotativa. Os pigmentos usados nesta fase são normalmente insolúveis e não possuem afinidade pelas fibras, sendo usadas resinas ligantes para aderir os pigmentos ao substrato (FREITAS, 2002).

O acabamento terciário é o conjunto de operações que dão ao tecido suas características finais, tais como aspecto físico, textura, brilho, maciez, caimento, resistência e estabilidade dimensional. Ele ainda pode ser subdividido no acabamento químico e mecânico.

O acabamento químico baseia-se na aplicação de substâncias que reagem com as fibras, de modo a atuar sobre as propriedades dos mesmos, como nos processos de amaciamento, impermeabilização e acabamento anti-chama. Já o mecânico altera as propriedades dos tecidos apenas por ações físicas, por meio dos processos de secagem, compactação, flanelagem, calandragem entre outros (FRANCESCHI *et al.*, 2000).

A hidroextração é o processo que elimina o excesso de água do material, proporcionando ao tecido uma pré-secagem. Depois da secagem, o produto passa pela etapa de relaxamento, que consiste basicamente no encolhimento do material têxtil, promovido pelo processo de compactação devido à remoção de água. Finalmente, o tecido passa pela fase de enobrecimento final, responsável pelo melhoramento de características como a textura, a maciez, o brilho, a resistência, entre outros aspectos, garantindo maior valor agregado ao produto (CHEREM, 2004).

#### d) Confeção

Na etapa de confeção, o produto pode tomar forma de vestuário, de artigos para o lar (cama, mesa, banho, decoração e limpeza) ou para a indústria (filtros de algodão, componentes para o interior de automóveis, embalagens etc). Os processos envolvidos nessa etapa são o desenho, a confeção de moldes, gradeamento, encaixe, corte e costura (MALDONADO; BRUNO, 2005).

O grau de concorrência no setor de confeções é elevadíssimo, mas a presença de milhares de empresas é uma necessidade da própria estrutura da demanda que depende das preferências, da faixa etária, do sexo e do nível de renda dos consumidores. Esse grande número de fatores dá origem a vários produtos diferenciados.

Como decorrência, milhares de empresas se habilitam para atender essa imensa diversidade de demanda. O principal segmento da

indústria de confecções é o de vestuário que responde por 80,5% do valor total da produção. Os segmentos de cama, mesa, banho e cozinha participam com 12,6% e artigos técnicos com 6,9%.

Quanto ao vestuário, predomina a roupa de algodão com uma participação de 70%. A participação das roupas de tecidos artificiais e sintéticos é de 20% e, de outras fibras, 10% (RANGEL; SILVA; COSTA, 2010).

### 2.3 SECAGEM EM RAMA

O complexo têxtil inclui muitos processos a úmido, tais como o tingimento, a estampagem, o alvejamento, a desengomagem, entre outros. Em muitos desses processos, a secagem é necessária para remover o excesso de umidade nos materiais para fabricar um determinado produto com a qualidade desejada.

A rama é um dos equipamentos mais utilizados durante a etapa de beneficiamento de tecidos (Figura 11). Ela tem a função de conferir as propriedades finais características do produto por meio da termofixação de acabamentos como amaciantes e resinas, além de uniformizar a largura do tecido, garantindo a estabilidade dimensional e, ao mesmo tempo, promovendo a remoção de umidade (HAGHI, 2001; CHEREM, 2004).

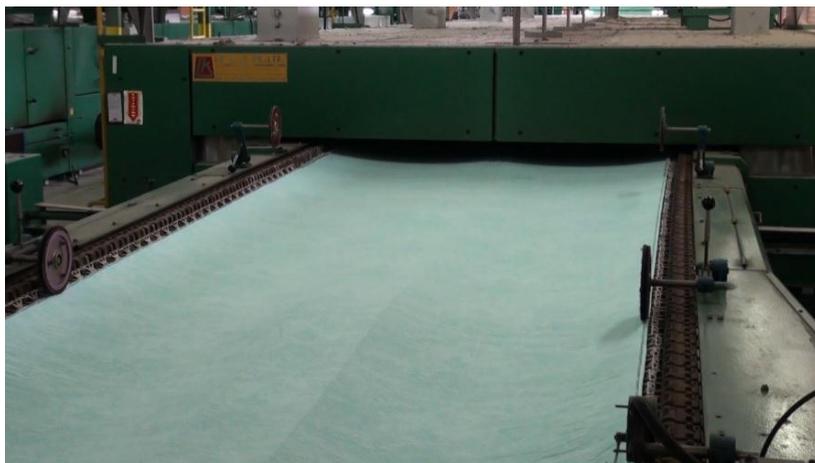
Figura 11 - Rama utilizada em indústria têxtil.



Fonte: BrücknerTextil (2013).

Na rama, o tecido é preso nas bordas por ourelas, sendo tensionado transversalmente, e passa pela câmara de secagem a velocidades que variam entre 10 e 100 m/min. A Figura 12 mostra a entrada do tecido no secador. Ar quente é injetado diretamente sobre as superfícies inferior e superior do tecido por uma série de bicos posicionados de modo a remover a umidade pelo princípio da convecção forçada (FERRAZ *et al.*, 2010). Os injetores devem ser projetados para garantir uma distribuição de ar quente mais uniforme possível ao longo da largura do tecido, principalmente por causa do processo de termofixação dos acabamentos aplicados no material. Depois de ser injetado sobre a superfície do tecido, o ar quente passa para as laterais da rama, onde é recirculado. No topo da câmara, um *damp*er regula a vazão na qual os gases (ar quente e vapor d'água) são removidos para o duto de exaustão (CHOUDHURY, 2006).

Figura 12 - Entrada de um tecido em uma rama.

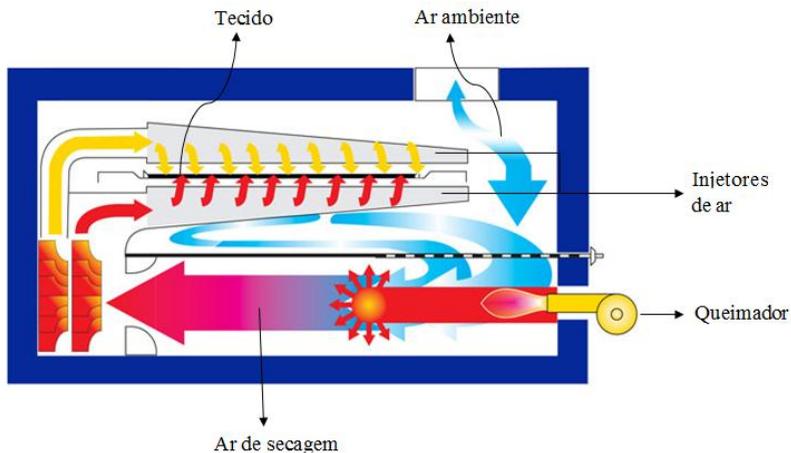


Fonte: elaborada pelo autor.

A rama geralmente possui de 5 a 10 câmaras de secagem com variações térmicas em cada uma, com temperaturas ajustadas em painel de controle. Cada câmara possui injetores que distribuem ar quente na parte superior e inferior do tecido a velocidades de 10 a 100 m/s e temperaturas que variam de 100 a 350 °C (MUJUMDAR, 2006). O ajuste de temperatura e velocidade deve ser cuidadosamente monitorado e controlado para assegurar as propriedades finais desejadas para cada tipo de tecido.

A classificação do secador rama pode ser feita com base no método de aquecimento do ar utilizado para secagem. Em sistemas de aquecimento indireto, óleo térmico aquecido troca calor com ar, que é posteriormente enviado ao interior da rama. Nas ramas de aquecimento direto, o combustível é queimado dentro da câmara e a temperatura do meio de secagem é regulada pela injeção de ar à temperatura ambiente. As ramas de aquecimento direto apresentam a vantagem de serem mais eficientes que as de aquecimento indireto, além de serem versáteis quanto à variação e controle de temperaturas do processo (HASANBEIGI, 2010). A Figura 13 mostra um esquema de um campo de secagem típico de uma rama de aquecimento direto.

Figura 13 - Desenho esquemático de uma câmara de secagem em uma rama de aquecimento direto.



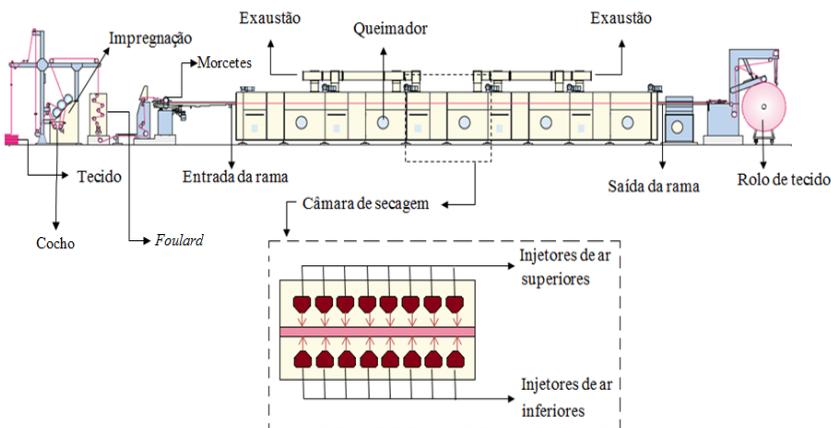
Fonte: adaptado de Inspiron (2013).

Para fins de estudo de funcionamento, a rama pode ser dividida em algumas partes, que possuem diferentes funções, como pode ser visto na Figura 14. Inicialmente o tecido é acondicionado em cavalete na entrada da rama. No cocho, a manta é imersa no banho de solução impregnante. O excesso dessa solução é então removido no *Foulard*, que tem a finalidade de realizar uma pré-secagem e um amaciamento por esprememagem entre cilindros. Os morcetes fixam as laterais do tecido, que segue por uma esteira rolante até a entrada na câmara de secagem.

Na saída da rama, ocorre o relaxamento mecânico do tecido, devido à perda de umidade para o ar na câmara de secagem. Depois de

sair do secador, a manta passa por outro conjunto de *Foulard* e as laterais são cortadas em um cortador de ourelas devido ao desgaste causado pelos morcetes, obtendo tiras como rejeito (CERON, 2008).

Figura 14 - Esquema de um secador rama mostrando, em detalhe, os injetores de ar no interior de uma câmara.



Fonte: adaptado de SwastikTextile (2013).

### 2.3.1 Consumo energético de um secador rama

A secagem é um dos processos que mais consome energia principalmente por causa do elevado calor de vaporização da água. Desse modo, a quantidade de água nos tecidos é um dos principais fatores que influenciam nesta operação, uma vez que quanto maior a umidade do material, maior o tempo de permanência dele nas câmaras aquecidas, aumentando a quantidade de calor necessária para remover a água. Por esse motivo, a maior parte da energia necessária para a secagem em rama é gasta na evaporação da água contida no material têxtil e no aquecimento do ar usado como meio de secagem. Estima-se que mais de 40 % da energia total necessária para operar uma rama típica é utilizada para evaporação (BEE, 2010).

Devido às características físico-químicas, mostradas na Tabela 2, o gás natural é o combustível usado para a produção de energia térmica durante esta etapa. O principal resultado obtido pelo consumo de gás no setor têxtil é a redução dos custos de produção, pois o preço é mais

baixo comparado a outras fontes energéticas, como por exemplo, a elétrica (GOULART, 2008).

Tabela 2 – Especificações do gás natural comercializado no Brasil.

Característica	Unidade	Limite
Poder calorífico superior a 0°C e 1 atm	kJ/m <sup>3</sup>	35000 a
		43000
		46500 a
Índice de Wobbe	kJ/m <sup>3</sup>	53500
Número de metano (mínimo)	% mol	65
Metano (mínimo)	% mol	85,0
Etano (máximo)	% mol	12,0
Propano (máximo)	% mol	6,0
Butano e mais pesados (máximo)	% mol	3,0
Oxigênio (máximo)	% mol	0,5
Inertes (máximo)	% mol	8,0
CO <sub>2</sub> (máximo)	% mol	3,0
Enxofre total (máximo)	mg/m <sup>3</sup>	70
Gás sulfídrico (máximo)	mg/m <sup>3</sup>	10
Ponto de orvalho de água a 1atm (máximo)	°C	-45
Ponto de orvalho de hidrocarbonetos a 4,5 MPa (máximo)	°C	0

Fonte: Agência Nacional do Petróleo (2008).

### 2.3.2 Melhoria da eficiência energética em ramas

Em uma operação com gasto de energia tão intensivo como a secagem de tecidos em rama, é desejável que esse equipamento tenha alto aproveitamento energético para a redução do consumo de combustível e também a própria melhoria do processo. Estudos de caso, com balanços de matéria e de energia encontrados na literatura, indicam

procedimentos técnicos que podem ser realizados para o aumento da eficiência de ramas e são listados a seguir.

a) Utilização de ramas de aquecimento direto

O sistema de aquecimento direto apresenta várias vantagens em relação ao de aquecimento por fluido térmico. Primeiramente, o consumo de combustível é diminuído por causa da redução das perdas de calor. O aquecimento do ar de secagem é mais rápido, reduzindo as perdas por tempo de parada do processo. A energia requerida para bombear o fluido térmico e os riscos envolvidos na circulação de um fluido quente são eliminados. Além do mais, a temperatura do processo pode ser ajustada quase que instantaneamente e não há dependência de um sistema de aquecimento centralizado, melhorando o controle do processo (HASANBEIGI, 2010). Na análise realizada por Ferraz *et al.* (2010), a maior eficiência de ramas de aquecimento direto foi constatada através de balanços de massa e de energia.

b) Introdução de um sistema de pré-secagem do tecido

Grande parte da energia despendida na secagem do material têxtil é gasta para evaporar a água contida nele. A remoção da umidade antes da entrada do tecido na rama é, portanto, um procedimento adequado para reduzir o consumo de combustível pela rama. Os métodos normalmente recomendados para a pré-secagem são a remoção mecânica da água, o uso de equipamentos por contato direto ou de técnicas mais modernas como a pré-secagem por infravermelho e radiofrequência (MUJUMDAR, 2006; HAGHI, 2011).

c) Evitar secagem excessiva do tecido

Além do desperdício de energia, a secagem excessiva pode danificar o tecido, gerando um produto com menor qualidade. O conhecimento do comportamento de equilíbrio entre a umidade do material e do ar, por meio das isotermas de sorção, é indispensável para evitar este aspecto durante o processo (ALONSO, 2001).

d) Isolamento das paredes do secador

O isolamento apropriado da rama reduz consideravelmente as perdas de calor. A economia no consumo de energia pode chegar a 20%

se a espessura do material isolante aumentasse de 120 para 150 mm (EUROPEAN COMMISSION, 2003).

e) Otimização da umidade do gás de exaustão

O controle adequado da quantidade de água no ar no interior da rama é um fator determinante para a melhoria da eficiência da secagem do tecido, já que o ar recebe toda a umidade que sai do material. Na rama, os *dampers* são os dispositivos que controlam o fluxo de saída do ar para a exaustão em cada câmara do secador. *Dampers* demasiadamente abertos elevam o consumo de energia, porque mais ar aquecido será necessário para circular no interior da rama; por outro lado, *dampers* totalmente fechados diminuem o rendimento da evaporação, pois o ar pode saturar com o vapor d'água.

A maior taxa de evaporação ocorre nas primeiras câmaras do secador. Por isso recomenda-se que altas temperaturas do ar de secagem sejam empregadas e que os *dampers* sejam totalmente abertos para levar a umidade retirada do produto para fora do sistema, evitando a saturação do ar. Nas câmaras seguintes, os *dampers* podem permanecer parcialmente abertos (entre 50 % e 75 %), devido à redução gradual da quantidade de água. Na última câmara, o *dampers* deve permanecer fechado para reduzir a perda de energia térmica pela saída do túnel do secador. Este tipo de controle evita o uso excessivo de ar de secagem e conseqüentemente o gasto de energia associado para aquecer este excesso (XUE, 2004; CERON, 2008).

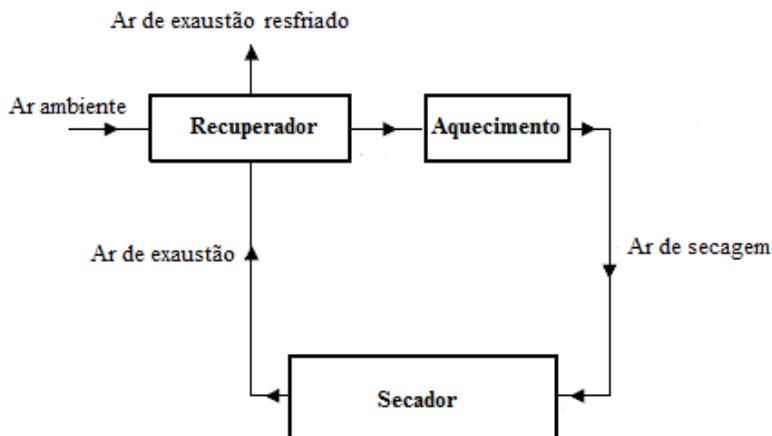
f) Instalação de equipamentos de recuperação de calor

Em escala nacional, 15 % da demanda de energia para o processo de secagem poderia ser economizada por recuperação do calor do ar de exaustão (BONTEMPI, 2004). Segundo Perim (1994), mais de 50% da quantidade de calor do ar de secagem é descartada para o ambiente junto com o ar de exaustão. Este calor pode ser reaproveitado para pré-aquecer o ar ambiente que será utilizado como meio de secagem. A Figura 15 mostra um diagrama de um sistema de pré-aquecimento do ar reaproveitando o calor de exaustão da rama.

Existem várias técnicas para recuperar calor de exaustão de um secador convectivo. A mais comum para a indústria têxtil é utilizar trocadores de calor de placas com fluxo cruzado. O ar de exaustão vindo da rama é enviado ao trocador e a transferência de calor via pratos é realizada com o ar ambiente. Então, o ar ambiente já pré-aquecido passa

por outro processo de aquecimento que o levará a temperatura de processo do ar de secagem. O processo de aquecimento varia de acordo com o tipo de rama que, como visto, pode ser de aquecimento direto ou indireto (OGULATA, 2004).

Figura 15 - Diagrama de um sistema de recuperação de calor do ar de exaustão.



Fonte: elaborada pelo autor.

A minimização do consumo de energia em ramas, especialmente quando sistemas de recuperação de calor estão instalados, requer uma manutenção adequada, incluindo a limpeza das máquinas, verificação dos dispositivos de controle, ajuste dos queimadores etc. A utilização de procedimentos técnicos para aumentar a eficiência da rama é uma das medidas que incrementam a produtividade do equipamento, promovendo a redução de custos com combustíveis e, ao mesmo tempo, garantindo uma produção ambientalmente mais limpa.

## 2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo da rama no âmbito do setor têxtil deve ser mais explorado, visto que este processo é muito importante durante a etapa de beneficiamento de tecidos (sendo crucial para estabelecer a qualidade do produto final) e também devido aos benefícios econômicos e ambientais

que a melhoria do desempenho da rama traz para o setor. As pesquisas desenvolvidas buscam medidas para redução do consumo de combustível ou propõem métodos para recuperação de calor nestes equipamentos, baseando-se em balanços globais de massa e energia na rama ou medidas *in loco*.

Mujumdar (2006) mostrou os conceitos básicos da secagem de tecidos, bem como os diferentes secadores utilizados na indústria têxtil. Foi incluída uma revisão dos parâmetros de *design* de secadores como a rama e das correlações para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor e massa. Os efeitos de fluxo cruzado, movimento do tecido dentro da rama, grande diferença de temperatura entre o tecido e o ar de secagem, elevada taxa de secagem e turbulência artificial são os parâmetros mais importantes a serem considerados durante o projeto de um secador rama.

Ceron(2008) estudou a secagem em rama de um não-tecido de poliéster utilizado na indústria de calçados. Dois perfis térmicos foram testados na rama: o perfil econômico (menor temperatura do ar de secagem e menor velocidade do não-tecido) e o perfil avançado (maior temperatura do ar de secagem e maior velocidade do não tecido dentro do secador). Concluiu-se que o consumo de gás natural no perfil econômico foi reduzido em 19,4 %, enquanto que o perfil avançado aumentou o consumo do combustível em 31,1 %. O autor também investigou a influencia da umidade relativa do ar ambiente no consumo energético da rama. Através de observação do processo real, verificou-se que o consumo de gás natural aumentou em 5,0 % quando a rama operava em um ar ambiente mais úmido.

O uso de modelos fenomenológicos para estudar a secagem de tecido dentro da rama não é muito comum, possivelmente por causa da dificuldade de determinar todos os parâmetros envolvidos, principalmente os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa. Neste sentido, muitos trabalhos publicados relacionam o escoamento do ar de secagem nos injetores para calcular os coeficientes de transferência de calor, utilizando correlações, como a de Chilton-Colburn (CHIN; HSUEH, 1986) para determinar os coeficientes de transferência de massa. Vários autores estudaram o efeito de diferentes fatores (geometria dos bicos de injeção, temperatura do ar, influência do escoamento externo, velocidade do ar etc.) nos coeficientes de transferência (COLUCCI; VISKANTA, 1996; FRANCIS; WEPFER, 1996; LEE *et al*, 2002; GAO, 2003; FRANCESCHI; PEREZ; MAGARELLI, 2010). Em geral, durante o projeto de injetores para um secador como a rama, a configuração geométrica dos bicos deve

favorecer o aumento dos coeficientes convectivos. Zuckerman e Lior (2006) realizaram uma revisão sobre este assunto contemplando as correlações empíricas disponíveis e técnicas de simulação numérica e os modelos associados.

Haghi (2001) revisou as relações matemáticas da secagem convectiva e por micro-ondas de tapetes. Apesar de outros materiais como acabamentos químicos serem removidos durante a secagem, a perda de massa é insignificante comparada à remoção de água. No *design* do secador, a remoção do excesso de água do tecido deve ser otimizada. Neste aspecto, Xue (2004) desenvolveu um modelo matemático para simular a secagem de tapetes incorporando parâmetros físicos observados experimentalmente e também no processo industrial. Medidas quantitativas do ar em excesso utilizado no secador e do consumo de energia foram realizadas e foram utilizadas para o desenvolvimento de protocolos para melhoria do processo. Xue recomenda que ar em excesso seja utilizado nas zonas iniciais do secador industrial. Por outro lado, não é necessário utilizar excesso de ar nas seções finais da rama, uma vez que menos água é removida nestas regiões.

De acordo com Hasanbeigi e Price (2012), existe um grande número de medidas para melhorar a eficiência energética das ramas e a maioria delas tem um curto período de *payback* simples. Os autores resumiram informações referentes ao uso de energia, tecnologias mais eficientes e medidas aplicáveis com os relativos custos para o setor têxtil, incluindo estudos de caso de indústrias.

Borges, Pickler e Mantelli (2011) propuseram um modelo para o *design* de trocadores de calor para recuperar os gases de exaustão, baseando-se nos balanços de massa e energia em uma rama de aquecimento indireto. Ferraz *et al.* (2010) compararam o desempenho energético entre as ramas de aquecimento direto e indireto e constataram que os sistemas de aquecimento direto são mais eficientes. Foi estimado que 34,8 % da energia térmica produzida no equipamento podem ser recuperados, demonstrando o potencial que a corrente de exaustão de ar tem para ser reutilizada.



### 3 METODOLOGIA

Este capítulo trata da metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho e a obtenção de resultados. O foco deste estudo foi a modelagem matemática e simulação de um tecido de algodão movendo-se no interior de uma rama de aquecimento direto com dez câmaras de secagem.

Os modelos de transferência de calor e de massa foram aplicados para representar o fenômeno da secagem do tecido na rama, que é um problema multifísico. As simulações foram realizadas no COMSOL *Multiphysics*® 4.3a, um software de modelagem e simulação de sistemas. O COMSOL *Multiphysics*® possui uma interface gráfica de usuário para criar a geometria do domínio, um gerador de malha automático ou controlado pelo usuário e também um pós-processamento integrado com capacidade de plotar, interpolar e integrar os resultados da simulação. O conjunto de equações que descrevem o modelo é compilado internamente pelo próprio *software* e, quando necessário, modelos são acoplados. O COMSOL *Multiphysics*® utiliza o método dos elementos finitos (MEF) para a resolução dos modelos.

#### 3.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

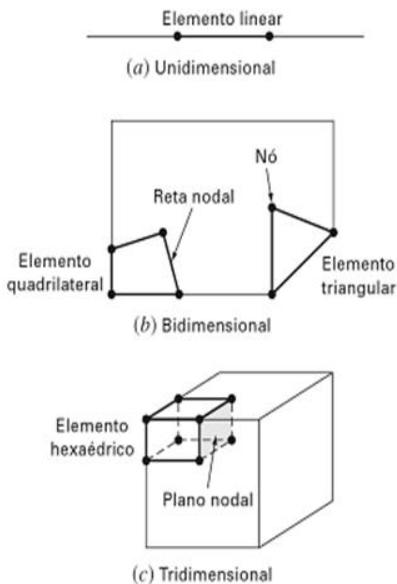
O método dos elementos finitos (MEF) é um procedimento numérico utilizado para resolução de sistemas de equações diferenciais parciais (EDP). O método consiste na divisão do domínio da solução em regiões de forma simples ou elementos. Uma solução aproximada para a EDP pode, então, ser obtida para cada um desses elementos. A solução total é gerada juntando as soluções individuais e, ao mesmo tempo, garantindo a continuidade nas fronteiras entre os elementos (CHAPRA; CANALE, 2008).

A aplicabilidade generalizada do método dos elementos finitos pode ser vista ao observar as semelhanças que existem entre vários tipos de problemas de engenharia. Este método tem sido aplicado com sucesso para resolver diversos problemas, tais como a condução de calor, a dinâmica dos fluidos, campos elétricos e magnéticos, distribuição de tensão em sólidos etc. (RAO, 2005). Duas formas para a resolução de equações diferenciais pelo MEF se desenvolveram: a forma forte e a forma fraca. Enquanto que na forma forte as equações são

resolvidas diretamente com suas condições de contorno, na forma fraca, métodos numéricos são utilizados para aproximar os resultados.

De maneira geral, a implementação do MEF ocorre em cinco passos. O primeiro deles consiste em discretizar o domínio de solução em  $n$  elementos finitos. Os nodos são os pontos de intersecção das linhas ou planos que formam o elemento, chamadas de linhas ou de planos nodais (Figura 16). A divisão de um domínio em elementos deve satisfazer essencialmente duas regras: dois elementos distintos não devem ser sobrepostos; a malha (conjunto de elementos) deve ser construída na forma mais próxima possível do domínio do problema.

Figura 16– Elementos finitos usados em (a) uma dimensão; (b) duas dimensões e (c) três dimensões.



Fonte: Chapra e Canale (2008).

A construção da malha é um passo fundamental para obtenção de soluções mais precisas. O erro de discretização pode ser reduzido diminuindo o tamanho dos elementos finitos ou utilizando elementos com fronteiras curvadas (DHATT; TOUZOUT; LEFRANÇOIS, 2012). Uma malha muito grosseira (com elementos grandes) leva a resultados

imprecisos ou até mesmo a não convergência para a solução do problema. No entanto, uma malha extremamente refinada tende a aumentar bastante o tempo de processamento computacional. O ideal é construir a malha mais grosseira possível, mas que represente os fenômenos físicos de uma maneira adequada. Normalmente, a malha é refinada nas regiões onde erros muito grandes são encontrados ou onde gradientes elevados são esperados (STATEN; JONES, 1997).

Seja uma equação diferencial linear na forma representada pela equação (8), onde  $\mathcal{L}$  é um operador diferencial,  $u$  é o vetor das variáveis do problema (dependente das coordenadas) e  $G$  é um vetor das funções conhecidas do problema.

$$\mathcal{L}U + G = 0 \quad (8)$$

O segundo passo do método consiste em aproximar a solução do problema por funções de interpolação  $F_j$  em cada elemento. A solução aproximada  $\tilde{U}$  é representada por:

$$U \sim \tilde{U} = \sum_{j=1}^m F_j d_j \quad (9)$$

Na equação (9),  $m$  é o número de nós da malha e  $d_j$  representa os valores desconhecidos da variável do problema nos nós e  $F_j$  são funções de interpolação que normalmente é um polinômio de Lagrange (SERENO, 1989).

Desse modo, a solução  $\tilde{U}$  obtida pelo método dos elementos finitos representa uma aproximação da solução analítica e, assim, não satisfaz a equação diferencial, onde  $\mathcal{R}$  é o resíduo, diferente de zero:

$$\mathcal{L}U + G = \mathcal{R} \quad (10)$$

O resíduo  $\mathcal{R}$  é, então, minimizado com o objetivo de realizar um ajuste ótimo da função de interpolação. Para isso, métodos numéricos são utilizados, sendo os mais comuns o método de aproximação direta, o método de resíduos ponderados e técnicas variacionais.

O terceiro passo do MEF corresponde à montagem, no qual as equações dos elementos individuais são acopladas para caracterizar o comportamento contínuo do sistema. As equações de cada elemento consistem, matematicamente, de um conjunto de equações algébricas. Esse processo é caracterizado pelo conceito de continuidade, isto é, as

soluções para elementos contínuos são combinadas, de modo que os valores desconhecidos nos nodos em comum são equivalentes. Em seguida, as condições de fronteira do sistema são incorporadas e a solução do sistema de equações pode ser obtida com técnicas de resolução de sistemas algébricos.

A etapa final do MEF é o pós-processamento, no qual as soluções obtidas são expressas por meio de tabelas e gráficos ou variáveis secundárias são determinadas, obtendo-se valores médios, derivadas ou integrais (HUTTON, 2004; CHAPRA; CANALE, 2008).

### 3.2 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E CONSTRUÇÃO DA MALHA

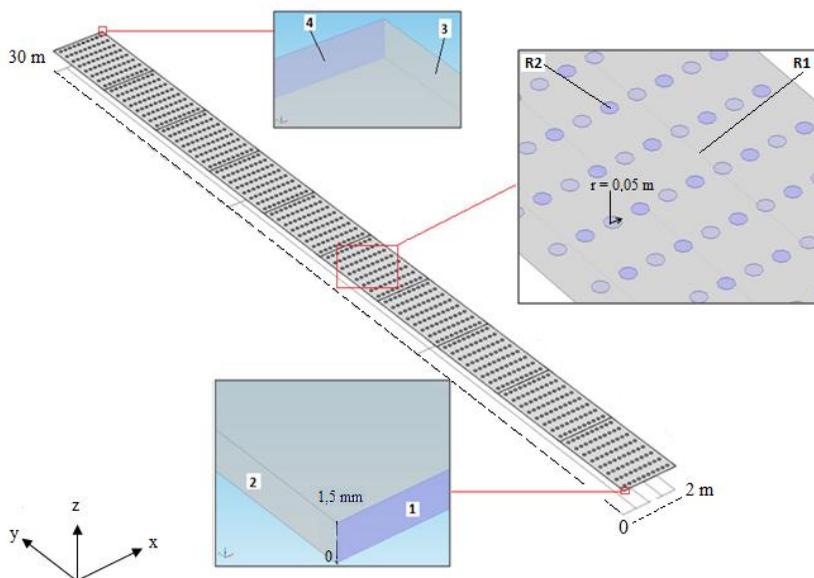
O objeto de estudo deste trabalho foi um tecido plano com fios compostos de fibras 100% de algodão, com gramatura de 250 g/m<sup>2</sup> passando a uma velocidade de 0,4 m/s no interior de uma rama de aquecimento direto com 10 câmaras de secagem. O domínio considerado para a simulação, mostrado na Figura 17, tem 30 m de comprimento (subdivididos em 10 seções de 3 m), 2,0 m de largura e 1,5 mm de espessura.

As áreas superficiais das faces superior e inferior do domínio foram divididas segundo regiões denominadas R1 e R2. Essa distinção deve-se ao fato que o escoamento perpendicular do ar sobre o tecido produz um aumento significativo dos coeficientes convectivos próximos ao ponto de estagnação (ponto central no plano de incidência do jato). Hansen e Webb (1993), Colucci e Viskanta (1996), Ekkad e Kontrovitz (2002), Gao (2003), Anderson e Singh (2006), Abdel-Fattah (2007) e Buchlin (2011) comprovaram experimentalmente a existência de coeficientes convectivos máximos no ponto de estagnação que diminuem com o aumento da distância radial e que a região de influência do escoamento perpendicular tem raio algumas vezes maior que o raio do injetor, dependendo da altura do bico em relação ao tecido.

Baseando-se nos resultados apresentados nestas referências e considerando o bico injetor com diâmetro de 2,54 cm, a área do tecido influenciada pela incidência perpendicular do ar de secagem foi considerada neste modelo segundo uma região circular (para cada injetor) com raio igual a 0,05 m (região R2). Para cada seção de 3 m, foram considerados 80 injetores para a face superior e mais 80 para a face inferior, totalizando 160 injetores por seção e 1600 injetores

distribuídos por todo o domínio. A região R1 corresponde à área menos influenciada pelo escoamento perpendicular do ar. Devido às dificuldades práticas de medir esses coeficientes locais em todos os pontos de estagnação da rama em operação, é comum determinar coeficientes médios para a superfície.

Figura 17–Domínio considerado para simulação de secagem do tecido em rama, mostrando nos detalhes as regiões R1 e R2 sobre a superfície e as fronteiras 1,2 3 e 4.



Fonte: elaborada pelo autor.

O domínio foi discretizado após um estudo de malha ter sido realizado para determinar qual a malha mais adequada para a resolução do problema. Polinômios de Lagrange de primeira ordem foram utilizados como função de aproximação. A resolução numérica do problema multifísico foi realizada de maneira segregada, ou seja, a partir de uma condição inicial, a cada passo calculava-se primeiramente o modelo de transferência de massa e com o resultado, calculava-se o modelo de transferência de calor até a solução convergir. Para o modelo de transferência de massa, foi utilizado um *solver* direto, o

*MultifrontalMassivelyParallelSparseDirect Solver* (MUMPS). Esse pacote resolve sistemas lineares do tipo  $Ax = b$ , onde  $A$  é uma matriz esparsa quadrada, utilizando um método direto baseado em uma aproximação multifrontal (AMESTOY; DUFF; L'EXCELLENT, 2000). Para o modelo de transferência de calor, utilizou-se o solver iterativo *GeneralizedMinimal Residual Method* (GMRES), que resolve numericamente sistemas de equações lineares não-simétricas (SAAD, SCHULTZ, 1986). O critério de parada *default* do COMSOL *Multiphysics*® foi utilizado, no qual a solução converge quando o erro calculado é menor que a tolerância, que é igual a 0,001 (COMSOL, 2012).

### 3.3 MODELAGEM FENOMENOLÓGICA

As hipóteses básicas adotadas para a modelagem do processo de secagem de tecido em rama foram:

- i. o efeito de encolhimento do tecido devido à secagem não foi considerado;
- ii. assumiu-se a existência de um fluido inerte de suporte como uma maneira de adaptar para os estudos modelos de transferência de calor e massa em meio poroso que tratam a umidade como um soluto. O fluido suporte é uma fase fluida virtual que transporta a umidade dentro do sólido. As propriedades físicas do fluido suporte variam linearmente com a umidade entre dois extremos: o meio poroso saturado com água e o meio poroso totalmente seco, situação essa em que os espaços vazios estariam preenchidos com ar;
- iii. não há movimento do fluido suporte relativo às fibras do meio poroso, de forma que o termo de dispersão na equação de massa é nulo;
- iv. não há geração ou consumo de umidade no meio poroso;
- v. o ar de secagem em contato com o tecido é sempre renovado, e assim as condições de umidade e temperatura do ar não se alteram devido à troca de calor e massa com o tecido;
- vi. o fluido suporte satura o meio poroso;
- vii. o secador foi assumido adiabático.

### 3.3.1 Transferência de massa em meios porosos

A equação geral para o transporte de umidade em meio poroso é apresentada como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\theta c_A) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_b c_{pA}) + \frac{\partial}{\partial t}(a_v c_{GA}) + \nabla \cdot (c_A \mathbf{u}) \\ = \nabla \cdot [(D_D + D_{ef})] \nabla c_A + R_A + S_A \end{aligned} \quad (11)$$

Na equação (11), os três primeiros termos referem-se ao acúmulo de massa da espécie química nas fases líquida, sólida e gasosa.  $c_A$  é a concentração de água no fluido suporte,  $c_{pA}$  é a quantidade de água adsorvida no tecido e  $c_{GA}$  é a concentração de água na fase gasosa devido à evaporação.  $\theta$ ,  $\rho_b$  e  $a_v$  são, respectivamente, a fração de líquido no meio poroso, a densidade aparente do tecido e a fração da fase gasosa no meio poroso, onde:

$$\rho_b = (1 - \varepsilon)\rho_p \quad (12)$$

$$a_v = \varepsilon - \theta \quad (13)$$

Nas equações (12) e (13),  $\varepsilon$  corresponde à porosidade do tecido e  $\rho_p$  é a densidade das fibras que o compõe. A hipótese (vi) implica que a fração da fase gasosa no meio poroso é igual a zero e assim,  $\varepsilon = \theta$ . A adsorção/dessorção da água pelas fibras do tecido é expressa como uma função da umidade relativa do ar de secagem e da temperatura, chamada de isoterma de dessorção. A isoterma foi considerada uma condição de contorno que contabiliza o fluxo de saída de água para o meio de secagem. Dentro do meio poroso, considerou-se que  $c_{pi} = 0$ .

Na equação (11),  $\nabla(c_A \mathbf{u})$  é o termo convectivo devido ao escoamento da fase líquida ocasionado pelo movimento do tecido no interior da rama a uma velocidade  $\mathbf{u}$ . O primeiro termo do lado direito da equação (11) representa a dispersão do soluto devido à mistura mecânica mais a difusão da espécie. De acordo com a suposição (iii), o tensor de dispersão, denotado como  $D_D$  foi considerado desprezível.  $D_{ef}$  é a difusividade efetiva da umidade no fluido suporte.

Os últimos dois termos do lado direito da equação (11) descrevem a geração ou consumo da umidade, devido a reações químicas ou a presença de fontes externas. De acordo com as hipóteses assumidas para a modelagem da secagem de tecido em rama,  $R_A$  e  $S_A$  são nulos.

Dessa forma, a equação do modelo de transferência de umidade no tecido durante a secagem em rama é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta c_A) + \nabla \cdot (c_A \mathbf{u}) = \nabla \cdot D_{ef} \nabla c_A \quad (14)$$

O tecido está inicialmente submetido a uma umidade ( $X_0$ ) de 70% em base seca (condição inicial 14-a) e passa pela rama a uma velocidade de 0,4 m/s. Isso significa que tecido úmido entra e sai do secador continuamente, de forma que essa situação é representada no modelo como uma umidade constante na posição de entrada do tecido na rama (condição de contorno 14-b e parede 1 na Figura 17) e como o movimento das fases fluida e sólida a uma velocidade ( $\mathbf{u}$ ) igual a 0,4 m/s no sentido positivo do eixo  $y$ . Nas bordas laterais do tecido (paredes 2 e 3 na Figura 17), não há fluxo de entrada ou saída de umidade (condições de contorno 14-c e 14-d). Na posição de saída do tecido na rama (parede 4 na Figura 17) assumiu-se que a convecção é o efeito dominante, ou seja, o fluxo molar devido à difusão é igual a zero (condição de contorno 14-e). O fluxo de água evaporada no tecido é contabilizado nas condições de fronteira 14-f e 14-g.

$$c_A = c_{A,0}, \text{ para } t = 0 \text{ e } \begin{cases} 0 \leq x \leq 2 \\ 0 \leq y \leq 30 \\ 0 \leq z \leq 0,0015 \end{cases} \quad (14-a)$$

$$c_A = c_{A,0}, \text{ para } t > 0 \text{ e } \begin{cases} 0 \leq x \leq 2 \\ y = 0 \\ 0 \leq z \leq 0,0015 \end{cases} \quad (14-b)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_A = 0, \text{ para } t > 0 \text{ e } \begin{cases} x = 0 \\ 0 \leq y \leq 30 \\ 0 \leq z \leq 0,0015 \end{cases} \quad (14-c)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_A = 0, \text{ para } t > 0 \text{ e } \begin{cases} x = 2 \\ 0 \leq y \leq 30 \\ 0 \leq z \leq 0,0015 \end{cases} \quad (14-d)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_A = 0, \text{ para } t > 0 \text{ e } \begin{cases} 0 \leq x \leq 2 \\ y = 30 \\ 0 \leq z \leq 0,0015 \end{cases} \quad (14-e)$$

$$\text{R1} \quad -\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_A = k_1(c_\infty - c_A^g), \text{ para } t > 0 \text{ e região} \quad (14-f)$$

$$\text{região R2, onde:} \quad -\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_A = k_2(c_\infty - c_A^g), \quad \text{para } t > 0 \text{ e} \quad (14-g)$$

$$c_{A,0} = X_0 \frac{\rho_b}{M_{\acute{a}g}} \quad (15)$$

$$\mathbf{\Gamma}_A = -D_{ef} \nabla c_A \quad (16)$$

$$\mathbf{N}_A = c_A \mathbf{u} - D_{ef} \nabla c_A \quad (17)$$

$\mathbf{en}$  é a normal à fronteira apontando para fora do domínio.  $\mathbf{N}_A$  é o fluxo total (fluxo difusivo mais o fluxo convectivo) de água que sai do tecido enquanto  $\mathbf{\Gamma}_A$  é o fluxo difusivo de água.  $c_A^g$  é a concentração de água na fase gasosa junto à superfície do tecido, calculada pelo modelo de isoterma como umidade relativa em função da temperatura e teor de umidade no material.  $c_\infty$  é a concentração de água no ar de secagem e  $c_{A,0}$  é a concentração inicial da água no tecido.

$$c_A^g = \frac{UR}{R T} P_{sat} \quad (18)$$

Na equação (18), a conversão de umidade relativa do ar para unidades de concentração ( $\text{mol/m}^3$ ) fica em função da temperatura  $T$  em K e da umidade no material poroso (dado pelo modelo de isoterma). Nessa equação,  $R$  é a constante dos gases ideais, igual a  $8,314 \text{ Pa m}^3/(\text{mol K})$  e  $P_{sat}$  é a pressão de vapor saturado do ar, calculada em Pascal pela equação empírica de Tetens (1930), com a temperatura  $T$  em K:

$$P_{sat} = 610,8 \exp\left(\frac{17,3T - 4725,5}{T - 35,85}\right) \quad (19)$$

### 3.3.2 Transferência de calor em meios porosos

A equação de calor aplicada para um meio poroso é escrita como:

$$(\rho C_P)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{fs} C_{P,fs} \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\kappa_{eq} \nabla T) + \Omega \quad (20)$$

Na equação (20),  $\rho_{fs}$  é a massa específica do fluido suporte e  $C_{P,fs}$  é a capacidade calorífica do fluido suporte a pressão constante. O conjunto  $(\rho C_P)_{eq}$  representa a capacidade calorífica equivalente e  $\kappa_{eq}$  é a condutividade térmica equivalente. Essas propriedades estão relacionadas com as propriedades do meio poroso e do fluido suporte, de acordo com as equações:

$$\kappa_{eq} = (1 - \theta) \kappa_p + \theta \kappa_{fs} \quad (21)$$

$$(\rho C_P)_{eq} = (1 - \theta) \rho_p C_{P,p} + \theta \rho_{fs} C_{P,fs} \quad (22)$$

onde  $\kappa_p$ ,  $\rho_p$  e  $C_{P,p}$  são respectivamente, a condutividade térmica, a massa específica e a capacidade calorífica do meio poroso e, para o fluido suporte:

$$\kappa_{fs} = \kappa_A - (\kappa_A - \kappa_{ar}) \frac{c_{A,0} - c_A}{c_{A,0}} \quad (23)$$

$$C_{P,fs} = C_{P,A} - (C_{P,A} - C_{P,ar}) \frac{c_{A,0} - c_A}{c_{A,0}} \quad (24)$$

$$\rho_{fs} = \rho_A - (\rho_A - \rho_{ar}) \frac{c_{A,0} - c_A}{c_{A,0}} \quad (25)$$

A geração ou consumo de calor é representada no modelo como o termo  $\Omega$ , que para o modelo proposto é nulo. A parcela de calor associada à mudança de fase da água é incluída como uma condição de contorno. Então, a equação do modelo de transferência de calor no tecido durante a secagem em rama é:

$$(\rho C_P)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{fs} C_{P,fs} \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\kappa_{eq} \nabla T) \quad (26)$$

Inicialmente, o tecido está submetido à temperatura ambiente igual a  $T_{amb}$  (26-a). A temperatura na posição de entrada do tecido (parede 1) na rama também é igual a  $T_{amb}$  (26-b), já que o tecido está exposto às condições ambientes do ar. As bordas laterais do tecido (paredes 2 e 3) estão isoladas e, portanto, o fluxo de calor é igual a zero (26-c e 26-d). O mecanismo de transferência de calor na posição de saída do tecido na rama é a convecção, ou seja, o gradiente de temperatura na direção normal à parede 4 é igual a zero (26-e). O aquecimento do meio poroso por meio da convecção devido ao escoamento do ar e a consequente evaporação da água contida no tecido são contabilizados pela condição de contorno (26-f e 26-g), considerando os diferentes coeficientes convectivos para as regiões R1 e R2.

$$T = T_{amb}, \text{ para } t = 0 \text{ e } \begin{cases} 0 \leq x \leq 2 \\ 0 \leq y \leq 30 \\ 0 \leq z \leq 0,0015 \end{cases} \quad (26-a)$$

$$T = T_{amb}, \text{ para } t > 0 \text{ e } \begin{cases} 0 \leq x \leq 2 \\ y = 0 \\ 0 \leq z \leq 0,0015 \end{cases} \quad (26-b)$$

$$- \mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = 0, \text{ para } t > 0 \text{ e } \begin{cases} x = 0 \\ 0 \leq y \leq 30 \\ 0 \leq z \leq 0,0015 \end{cases} \quad (26-c)$$

$$- \mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = 0, \text{ para } t > 0 \text{ e } \begin{cases} x = 2 \\ 0 \leq y \leq 30 \\ 0 \leq z \leq 0,0015 \end{cases} \quad (26-d)$$

$$- \mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = 0, \text{ para } t > 0 \text{ e } \begin{cases} 0 \leq x \leq 2 \\ y = 30 \\ 0 \leq z \leq 0,0015 \end{cases} \quad (26-e)$$

$$Q_b^1 = h_1(T_{ar} - T), \text{ para } t > 0 \text{ e região R1} \quad (26-f)$$

$$Q_b^2 = h_2(T_{ar} - T), \text{ para } t > 0 \text{ e região R2} \quad (26-g)$$

onde:

$$Q_b^1 = M_A Q_{st} k_1 (c_\infty - c_A^g) \quad (27)$$

$$Q_b^2 = M_A Q_{st} k_2 (c_\infty - c_A^g) \quad (28)$$

$\mathbf{n}$  é a normal à fronteira apontando para fora do domínio.  $Q_{st}$  representa o calor isostérico integral, um parâmetro que estima a quantidade mínima de calor requerida para remover uma quantidade de água adsorvida na fase sólida:

$$Q_{st} = q_{st} + \Delta H_{vap} \quad (29)$$

Na equação (29),  $\Delta H_{vap}$  é o calor de vaporização da água pura, que é função da temperatura, calculado em J/kg pela equação (30).

$$\Delta H_{vap} = -4,35T^2 + 452,05T + 2,69 \times 10^6 \quad (30)$$

Um método largamente usado para se calcular o calor isostérico líquido  $q_{st}$  baseia-se na aplicação da equação de Clausius–Clapeyron às isotermas de sorção (WANG; BRENNAN, 1991; SILVA *et. al.*, 2002; SILVA *et. al.*, 2006; RESENDE *et. al.*, 2006; CAMPOS *et. al.*, 2009). Para a água pura, a equação de Clausius–Clapeyron é:

$$\frac{\partial \ln(P_{sat})}{\partial T} = \frac{\Delta H_{vap}}{RT^2} \quad (31)$$

e, para a água adsorvida no tecido:

$$\frac{\partial \ln(P_v)}{\partial T} = \frac{Q_{st}}{RT^2} \quad (32)$$

onde  $P_v$  é a pressão parcial de equilíbrio do vapor d'água. Diminuindo a equação (31) da (32) tem-se que:

$$\frac{\partial \ln(a_A)}{\partial T} = \frac{q_{st}}{RT^2} \quad (33)$$

Na equação (33),  $a_A$  é a atividade de água, que é a razão entre a pressão parcial de equilíbrio e a pressão de saturação da água. O calor

isostérico líquido  $q_{st}$  é calculado fazendo-se a integral da equação (33), assumindo que o calor isostérico não varia com a temperatura:

$$\ln(a_A) = -\left(\frac{q_{st}}{R}\right)\frac{1}{T} + C_{st} \quad (34)$$

Desse modo, o calor isostérico líquido é obtido pela uma regressão linear dos dados de logaritmo neperiano da atividade de água com a temperatura correspondente a diferentes umidades de equilíbrio, onde  $C_{st}$  é a constante de integração e  $R$  é a constante dos gases ideais. Estes dados são provenientes do modelo de isoterma de sorção selecionado para representar o equilíbrio do vapor d'água no tecido e no ar. Em seguida, testou-se o modelo exponencial de Sopade, Ajisegiri e Abass (1994), a equação (35), que prediz o comportamento do calor isostérico de sorção em função do conteúdo de umidade de equilíbrio, com coeficientes de ajuste  $A$  e  $B$ .

$$q_{st} = A \exp(-BX_e) \quad (35)$$

### 3.3.3 Equações utilizadas para estimativa do consumo de gás natural

Para que o desempenho energético da rama seja avaliado, é necessário quantificar os fluxos de energia associados ao aquecimento do tecido úmido e à remoção da umidade na forma de vapor, bem como determinar a quantidade de ar de secagem e a energia contida nele. Através da soma das integrais de área das equações (14-f) e (14-g), é possível obter a quantidade de água removida como vapor no processo de secagem ( $\dot{m}_{vap}$ ):

$$\dot{m}_{vap} = M_A \left( \iint_{A_1} k_1 (c_\infty - c_A^g) dx dy + \iint_{A_2} k_2 (c_\infty - c_A^g) dx dy \right) \quad (36)$$

Pelo balanço de massa e a partir do conhecimento da quantidade de água evaporada na secagem do tecido, a vazão mássica de ar de secagem necessária para o processo ( $\dot{m}_{ar}$ ) pode então ser calculada pela equação (37).

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\dot{m}_{vap}}{(UA_{ex} - UA_{ar})} \quad (37)$$

$UA_{ex}$  é a umidade absoluta do ar de secagem na saída do processo (ar de exaustão) e  $UA_{ar}$  representa a umidade absoluta inicial do ar de secagem. O valor da  $UA_{ex}$  foi calculado utilizando equações psicrométricas e considerando que o ar de exaustão sai do processo em equilíbrio térmico como o tecido, situação essa que corresponderia à máxima troca térmica entre o ar de secagem e o tecido.

Com a vazão mássica do ar de secagem, a energia térmica contida nele foi calculada por meio da equação (38).

$$\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_{ar} C_{p,ar} (T_{ar} - T_{amb}) \quad (38)$$

Considerando que a energia térmica do ar de secagem é igual a energia cedida pela queima do combustível, pode-se calcular a vazão molar de gás natural  $\dot{n}$  necessária para fornecer energia ao ar de secagem, utilizando a equação (39):

$$\dot{n} = \frac{\dot{Q}_{ar}}{(-\Delta H_c)} \quad (39)$$

onde  $\Delta H_c$  é a entalpia de combustão do gás natural, calculada pela equação (40), tomando como base o gás natural com composição molar 90 % de metano, 8,0 % de etano e 2,0 % de propano e o calor de combustão de cada componente mostrado na Tabela 3.

$$\Delta H_c = \sum_{i=1}^3 x_i \Delta H_{c,i} \quad (40)$$

Tabela 3 – Entalpia de combustão e volume molar para cada componente do gás natural.

$i$	Componente	$x_i$	$\Delta H_{c,i}^\circ$	$v_i$
1	Metano	0,90	-802,33	0,024901
2	Etano	0,08	-1427,85	0,024760
3	Propano	0,02	-2044,01	0,024554

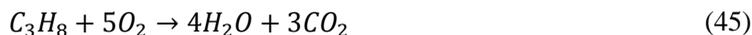
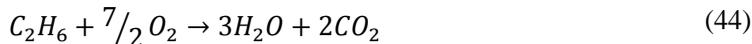
Fonte: elaborada pelo autor.

A vazão molar de gás natural foi convertida à vazão volumétrica pela equação (41). Nesta equação,  $v_c$  é o volume molar do gás natural, calculado pela equação (42), onde  $v_i$  é o volume molar de cada componente, a 0,1 MPa e 300 K (PERRY; GREEN, 1999).

$$\dot{V}_{GN} = \dot{n}v_c \quad (41)$$

$$v_c = \sum_{i=1}^3 x_i v_i \quad (42)$$

A combustão de gás natural nos queimadores dentro da rama produz água e, portanto, aumenta a umidade do meio de secagem. A quantidade de água produzida pela queima do combustível é calculada de acordo com a estequiometria da reação de combustão completa de cada componente do gás natural:



A estimativa de energia perdida no ar de exaustão pode ser feita calculando-se a taxa de energia efetivamente utilizada para aquecer o tecido e ainda evaporar a água contida nele ( $\dot{Q}_{tec}$ ), valor obtido através dos resultados provenientes da simulação, pela equação (46).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{tec} = & \iint_{A_1} h_1(T_{ar} - T) dx dy \\ & + \iint_{A_2} h_2(T_{ar} - T) dx dy \end{aligned} \quad (46)$$

E assim, a parcela de energia térmica do ar de secagem que não é utilizada para a remoção de umidade no tecido é dada por:

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{ar} - \dot{Q}_{tec} \quad (47)$$

Ou, em termos percentuais:

$$\%Q_p = \frac{\dot{Q}_p}{\dot{Q}_{ar}} \times 100 \quad (48)$$

### 3.3.4 Equações psicrométricas

O cálculo das propriedades do ar utilizado no processo de secagem foi realizado por meio das equações psicrométricas obtidos em ASHRAE (2009). A partir do pressuposto de que o ar de secagem está inicialmente em equilíbrio térmico com o tecido e de que o ar de exaustão está em equilíbrio térmico com o tecido aquecido pelo processo, foi possível obter valores de umidade absoluta do ar utilizando as temperaturas estimadas nas simulações e as equações psicrométricas mostradas a seguir. O passo a passo para o cálculo dessas propriedades é mostrado no fluxograma da Figura 18.

As equações a seguir foram aplicadas para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar ambiente. Elas também foram aplicadas para o cálculo das propriedades do ar de secagem e do ar de exaustão, utilizando as temperaturas  $T_{ar}$  e  $T_{ex}$ , respectivamente. A pressão de saturação do vapor de água ( $P_{sat}$ ) é utilizada para determinar algumas propriedades do ar úmido. Ela é calculada como uma função da temperatura de bulbo seco, em K, pela equação (49).

$$\ln P_{sat} = \frac{-5800,22}{T_{amb}} + 1,39 - 4,86 \times 10^{-2} T_{amb} + 4,18 \times 10^{-5} T_{amb}^2 - 1,44 \times 10^{-8} T_{amb}^3 + 6,55 \ln T_{amb} \quad (49)$$

A umidade absoluta do ar, em kg de H<sub>2</sub>O/kg de ar seco, foi determinada em função da pressão de saturação e umidade relativa. Para o ar ambiente:

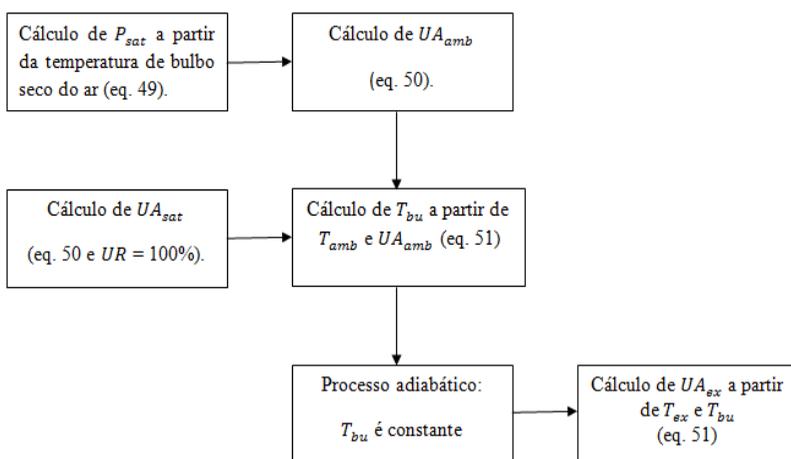
$$UA_{amb} = \frac{0,622 \times \left(\frac{UR}{100}\right) \times P_{sat}}{P_{atm} - \left(\frac{UR}{100}\right) \times P_{sat}} \quad (50)$$

A temperatura de bulbo úmido ( $T_{bu}$ ) foi determinada por aproximação sucessiva, utilizando a equação (51). Nessa equação,

$UA_{sat}$  é a umidade absoluta do ar saturado à temperatura de bulbo úmido do ar, que é calculada pela equação (50) fazendo  $UA_{amb} = 100\% \cdot T_{bu} e T_{amb}$  devem ser inseridos em °C.

$$UA_{amb} = \frac{(2501 - 2,381T_{bu})UA_{sat} - 1,006(T_{amb} - T_{bu})}{2501 + 1,805T_{amb} - 4,186T_{bu}} \quad (51)$$

Figura 18– Fluxograma do procedimento adotado para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar.



Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.4 ESTUDOS DE CASO

Quatro estudos de caso foram desenvolvidos para analisar a secagem do tecido de algodão na rama de aquecimento direto. Em todos os estudos de caso realizados, simulações foram efetuadas para atender a demanda de remoção de água do tecido, que estava inicialmente com 70 % de umidade em base seca, de modo que saísse com 7,0 % b.s., valor praticado no processo real (FERRAZ *et al.*, 2010; BORGES; PICKLER; MANTELLI, 2011).

As diferenças entre cada caso estavam relacionadas ao tipo de estudo focado. O estudo de caso 1 foi realizado para a estimativa dos coeficientes convectivos médios de transferência de calor e de massa para as regiões R1 e R2 do tecido. Baseando-se nos resultados obtidos

por Sharif e Barnejee (2009), que investigaram numericamente coeficientes de transferência de calor em uma placa em movimento submetida ao escoamento perpendicular do ar, assumiu-se que os coeficientes convectivos na região R2 valiam o dobro daqueles da região R1.

Para o estudo de caso 1, considerou-se que o ar ambiente está a uma temperatura de 25 °C e umidade relativa de 85 %, valor médio anual para a região do Vale do Itajaí, no estado de Santa Catarina, que é um dos polos têxteis do país e, portanto, uma área de interesse para a aplicação do estudo (SANTA CATARINA, 1999). Este caso foi considerado como a situação padrão, de forma que fosse possível estabelecer uma base comparativa de resultados obtidos em relação aos outros estudos de caso.

Os coeficientes convectivos estimados foram utilizados nas simulações subsequentes. Para avaliar a influência das condições do ar ambiente no desempenho da rama, dois estudos de caso foram desenvolvidos utilizando os dados médios do clima do local de interesse durante a época mais quente e mais fria do ano (SANTA CATARINA, 1999). No estudo de caso 2, o ar ambiente estava a uma temperatura de 27 °C e umidade relativa de 85 %, enquanto que no estudo de caso 3, o ar ambiente estava a uma temperatura de 15 °C e umidade relativa de 85 %. Nas duas situações o parâmetro operacional ajustado foia temperatura do ar de secagem, para que o tecido fosse seco até 7,0 % de umidade em base seca.

No estudo de caso 4 o reaproveitamento do calor de exaustão foi levado em conta nos balanços de massa e energia. Nesse caso, o tecido e o ar de secagem entram pré-aquecidos na rama pelo ar misturado, que corresponde à mistura de uma parcela dos gases de exaustão da situação padrão (estudo de caso 1) com o ar fresco (a uma temperatura de 25 °C e umidade relativa de 85 %). Para esse estudo de caso, cinco razões de reciclo foram testadas e assim, os resultados de consumo de energia e desempenho da rama foram comparados com o caso sem reaproveitamento energético. Da mesma forma que nos estudos de caso 2 e 3, neste também se ajustou a temperatura do ar de secagem, para que o tecido fosse seco até 7,0% b.s.

### 3.5 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

#### 3.5.1 Condições do ar

As condições do ar foram obtidas por meio das equações psicrométricas apresentadas no tópico de modelagem fenomenológica. Nos cálculos de umidade do ar de secagem, considerou-se a água liberada na combustão do gás natural como uma parcela de acréscimo. Para o cálculo dessa parcela utilizou-se as proporções estequiométricas da reação de combustão do gás natural composto de 90% de metano, 8,0 % de etano e 2,0% de propano. A Tabela 4 mostra as condições do ar ambiente para os estudos de caso 1, 2 e 3.

Tabela 4– Condições do ar ambiente para os estudos de caso 1, 2 e 3.

Estudo de caso	Ar ambiente	
	$T_{amb}(^{\circ}\text{C})$	$UA_{amb}$ (g de água/kg de ar seco)
1	25,0	16,87
2	27,0	19,20
3	15,0	9,02

Fonte: elaborada pelo autor.

A razão de reciclo avaliada no estudo de caso 4 é definida na equação (52).

$$r = \frac{\dot{m}_{ex}}{\dot{m}_{amb}} \quad (52)$$

Na equação (52),  $\dot{m}_{ex}$  é a vazão mássica do ar de exaustão e  $\dot{m}_{amb}$  é a vazão mássica do ar fresco. A mistura entre o ar fresco e o ar de exaustão resulta no ar de secagem pré-aquecido. Assim, o balanço de massa resulta na equação (53).

$$\dot{m}_{ex} + \dot{m}_{amb} = \dot{m}_{ar} \quad (53)$$

As razões de reciclo utilizadas no estudo de caso 4 são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 – Razões de reciclo utilizadas no estudo de caso 4.

Razões de reciclo				
1:5	1:2	1:1	3:2	2:1

Fonte: elaborada pelo autor

### 3.5.2 Determinação do equilíbrio higroscópico entre o tecido e o ar de secagem

A relação de equilíbrio entre a umidade relativa do ar ( $UR$ ) e do material têxtil ( $X_e$ ) foi obtida ajustando os modelos de isotermas aos dados experimentais de Foust *et al.* (1980). Esses dados referem-se à secagem de algodão em temperaturas que variaram de 35 a 150 °C e umidades relativas do ar entre aproximadamente 10 e 90%, mostrados na Tabela 6.

Dentre as equações mais comuns para expressar a umidade de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar estão as de Henderson – Thompson, Chung – Pfof, Sabbah e Oswin modificada. Estes modelos foram escolhidos porque foram utilizados em trabalhos experimentais para determinação de isotermas de materiais têxteis e são apresentados no Quadro 1.(THOMPSON; PEART; FOSTER, 1968; PFOST *et al.*, 1976; CORRÊA; ALMEIDA, 1999; SANTOS *et al.*, 2008).

Os modelos foram ajustados aos dados da Tabela 6 pelo método de mínimos quadrados. O modelo matemático que melhor representou os dados foi incorporado às equações fenomenológicas de transferência de umidade do tecido para o ar de secagem na interface. A escolha do modelo foi baseada no coeficiente de determinação e também no erro médio estimado, calculado pela equação (54), em que  $\hat{X}_e$  é o valor experimental (Tabela 6),  $X_e$  é o valor calculado pelo modelo e  $\eta$  é o número de dados experimentais.

$$MS = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^{\eta} (X_e - \hat{X}_e)^2}{\eta - 1}} \quad (54)$$

Quadro 1– Modelos matemáticos utilizados para determinar a relação de equilíbrio higroscópico entre o tecido de algodão e o ar.

Modelo	Equação
Henderson-Thompson	$X_e = \left( \frac{\ln[1 - UR]}{-(aT + b)} \right)^c$
Oswin modificada	$X_e = (aT + b) \left( \frac{UR}{1 - UR} \right)^c$
Chung-Pfost	$X_e = a - b \ln[-(T + c) \ln(UR)]$
Sabbah	$X_e = a \left( \frac{UR^b}{T^c} \right)$

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 6– Teor de umidade de equilíbrio do tecido de algodão em função da temperatura e umidade relativa do ar.

Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)	Umidade no material (kg de água/ kg de material seco)
35,56	0,1000	0,0280
35,56	0,1974	0,0395
35,56	0,3987	0,0615
35,56	0,5963	0,0900
35,56	0,7982	0,1340
35,56	0,9000	0,1690
45,00	0,0987	0,0240
45,00	0,2003	0,0360
45,00	0,3988	0,0560
45,00	0,5982	0,0825
45,00	0,8018	0,1245
45,00	0,8980	0,1600

(continua)

(conclusão)

Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)	Umidade no material (kg de água/ kg de material seco)
57,78	0,1006	0,0215
57,78	0,2007	0,0340
57,78	0,4010	0,0525
57,78	0,6021	0,0775
57,78	0,8022	0,1160
57,78	0,9030	0,1455
73,89	0,1031	0,0195
73,89	0,2015	0,0315
73,89	0,3992	0,0495
73,89	0,6059	0,0715
73,89	0,8946	0,1330
88,89	0,1000	0,0170
88,89	0,2065	0,0280
88,89	0,4044	0,0460
88,89	0,6027	0,0665
88,89	0,8002	0,0955
88,89	0,8987	0,1200
103,89	0,0979	0,0135
103,89	0,2000	0,0215
103,89	0,4009	0,0385
103,89	0,5997	0,0580
120,00	0,0997	0,0095
120,00	0,1979	0,0195
120,00	0,4009	0,0330
136,11	0,0997	0,0070
136,11	0,2005	0,0150
136,11	0,2995	0,0200
150,00	0,0997	0,0060
150,00	0,2001	0,0130

Fonte: Foustet *al.*(1980).

### 3.5.3 Propriedades físicas do tecido e do fluido suporte

O tecido composto de 100% algodão foi considerado no modelo, com uma gramatura ( $Gr$ ) de 250 g/m<sup>2</sup>, que é um valor médio entre os tecidos processados nesse tipo de secador (FERRAZ *et al.*, 2010). As propriedades físicas utilizadas (Tabela 7), condutividade térmica ( $\kappa_p$ ), massa específica da fibra ( $\rho_p$ ) e capacidade calorífica ( $C_{p,p}$ ) foram obtidas de Mujumdar (2006). A porosidade ( $\epsilon$ ) do tecido utilizada no modelo foi a mesma determinada por Haghi (2001). A difusividade efetiva da água no meio foi obtida de Gibson e Charmchi (1997), que calcularam esse valor para vários tipos de tecidos e, para o algodão, foi igual a  $7,6 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

Tabela 7– Propriedades físicas do tecido de algodão considerado nas simulações.

$Gr$	$\epsilon$	$\kappa_p$	$\rho_p$	$C_{p,p}$
250	0,89	0,029	1500	1339,78

Fonte: elaborada pelo autor.

Como foi visto no tópico de modelagem fenomenológica, o fluido suporte foi utilizado para adaptar o modelo de transferência de massa, no qual a umidade é tratada como um soluto presente em uma fase fluida que está no meio poroso. A fase fluida, chamada de fluido suporte, possui as propriedades definidas pelas equações (23), (24) e (25). A condutividade térmica ( $\kappa_{fs}$ ), a capacidade térmica ( $C_{p,fs}$ ) e a massa específica ( $\rho_{fs}$ ) do fluido suporte variam com a quantidade de água no meio poroso. No meio poroso saturado com água, as propriedades físicas do fluido suporte assumiriam o valor das propriedades da água, enquanto que no meio poroso totalmente seco, o fluido suporte assumiria as propriedades do ar seco. As propriedades físicas da água e do ar utilizadas foram consideradas constantes e são mostradas na Tabela 8. Estes dados foram obtidos de Perry e Green (1999) para uma temperatura de 25 °C.

Tabela 8 – Dados do ar seco e da água utilizados no cálculo das propriedades do fluido suporte.

$\kappa_{ar}$	$C_{p,ar}$	$\rho_{ar}$	$\kappa_A$	$C_{p,A}$	$\rho_A$
W/(m K)	kJ/(kg K)	kg/m <sup>3</sup>	W/(m K)	kJ/(kg K)	kg/m <sup>3</sup>
0,023	1,012	1,0	0,61	4,178	1000

Fonte: elaborada pelo autor.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do estudo realizado divididos em sete subtópicos. Primeiramente, os resultados do estudo de malha realizado são mostrados. Na sequência, o ajuste dos modelos de isoterma de adsorção aos dados da Tabela 6 é mostrado e em seguida, os resultados do ajuste do modelo de calor isostérico são apresentados. O quarto subtópico mostra os coeficientes convectivos de transferência de massa e de calor estimados comparados aos valores determinados por outros trabalhos encontrados na literatura da área.

Os perfis de umidade e de temperatura obtidos nas simulações são mostrados no quinto subtópico. O penúltimo subtópico do capítulo destaca os resultados referentes ao consumo de gás natural da rama de aquecimento direto na secagem do tecido e o desempenho energético desse equipamento, baseando-se nas simulações realizadas para os diferentes estudos de caso. Finalmente, o último subtópico trata dos resultados obtidos da simulação que representa a proposta de reaproveitamento energético do gás de exaustão da rama para pré-aquecimento do ar de secagem e do tecido.

### 4.1 ESTUDO DE MALHA

Devido à importância do processo de geração de malha para a resolução numérica de um sistema de equações diferenciais, foi realizado um estudo de malha para determinar a mais adequada para resolução do problema proposto. Com este objetivo, quatro malhas diferentes foram testadas nas condições do estudo de caso 1, observando o comportamento da curva de taxa de secagem para cada malha utilizada.

Primeiramente, construiu-se a malha do tipo triangular na superfície superior do domínio. Em seguida, a malha foi gerada com um determinado número de camadas ao longo da espessura (direção do eixo  $z$ ) até alcançar a superfície inferior do domínio.

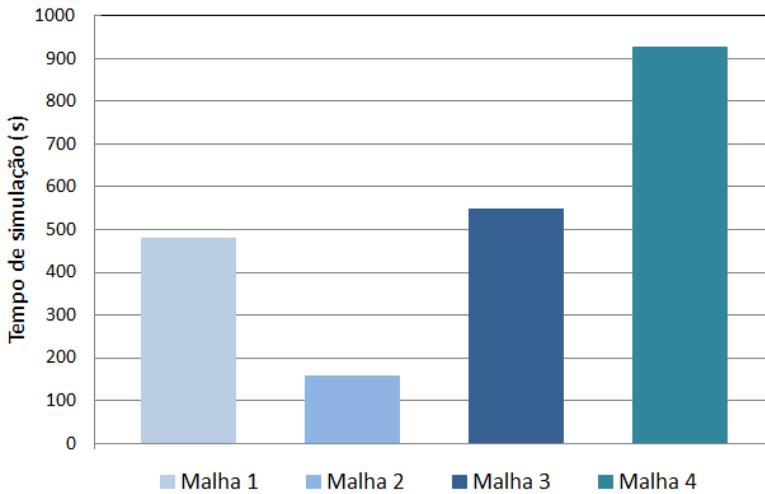
A Tabela 9 mostra as especificações das malhas testadas. O tempo de simulação para cada malha é apresentado na Figura 19. Nota-se que o maior refinamento da malha aumenta consideravelmente o tempo de simulação. Este é um parâmetro importante a ser considerado para a escolha da malha. No entanto, também é preciso levar em conta que uma malha demasiadamente grosseira pode gerar resultados inadequados.

Tabela 9– Especificação das malhas testadas para as simulações.

Malha	N° de elementos	N° de camadas
1	326742	1
2	170196	1
3	792728	2
4	1585456	4

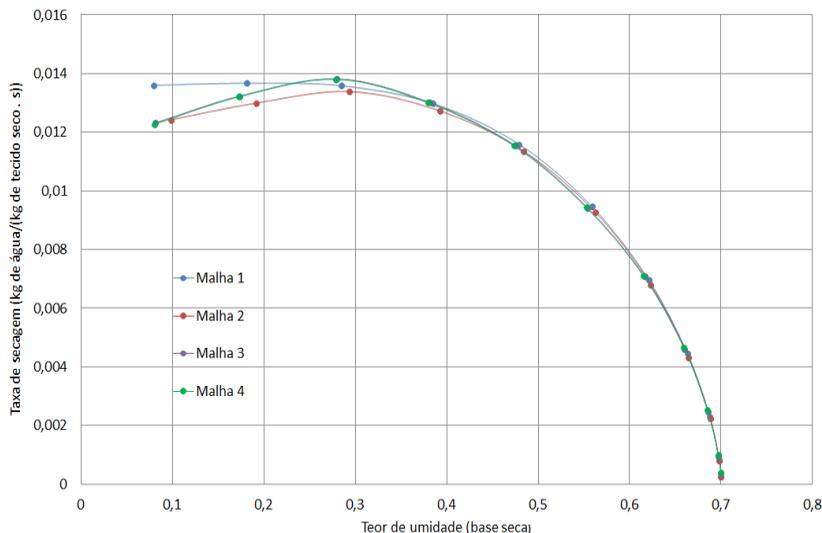
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 19– Tempo de simulação para cada malha.



Fonte: elaborada pelo autor.

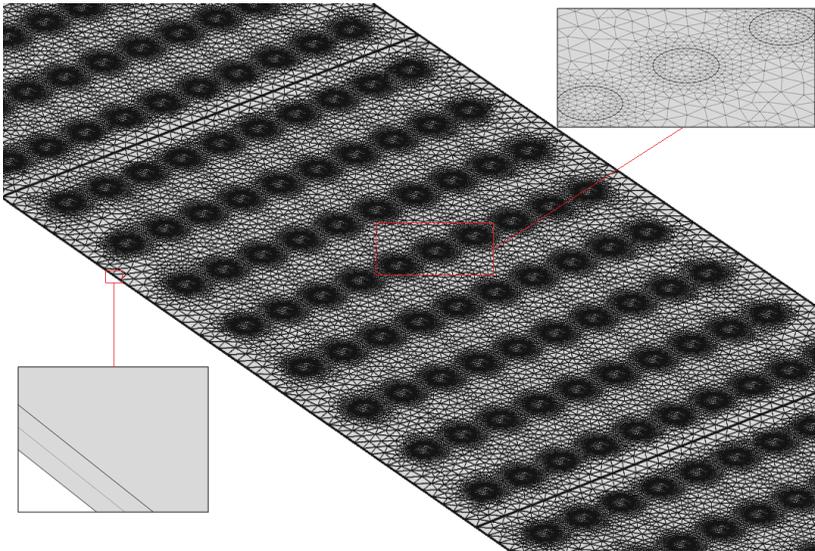
Figura 20– Taxa de secagem calculada para cada malha.



Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 20, pode-se observar o comportamento da taxa de secagem reproduzido como resultado para cada malha testada. Nota-se que o resultado obtido pela Malha 4 é praticamente idêntico ao obtido pela Malha 3. Isso indica que um refinamento ao longo da espessura maior que duas camadas já não apresenta uma alteração significativa dos resultados, além de consumir muito mais tempo de processamento dos cálculos. Dessa forma, a Malha 3, mostrada em detalhe na Figura 21, foi utilizada para a obtenção dos resultados das simulações de secagem em rama.

Figura 21– Malha utilizada nas simulações, mostrando nos detalhes a superfície superior e a espessura do domínio.



Fonte: elaborada pelo autor.

## 4.2 ISOTERMA DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO

Os resultados de ajuste dos dados de Foust *et al.* (1980) aos modelos de isotermas de Henderson – Thompson, de Oswin modificada, de Chung – Pfost e de Sabbah estão na Tabela 10. Nela, podem-se verificar as constantes dos modelos, os coeficientes de determinação e os respectivos erros médios estimados para os modelos.

Observando os resultados da Tabela 10, é possível notar que os erros médios estimados para todos os modelos estão aproximadamente iguais. Desse modo, a equação com maior coeficiente de determinação foi escolhida para representar o fenômeno de desorção de umidade do tecido para o ar de secagem. O modelo de Henderson – Thompson (THOMPSON; PEART; FOSTER, 1968), com  $R^2$  igual a 0,9946 e  $MS$  igual 0,0782 foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais utilizados. Na Figura 22, é possível visualizar o modelo ajustado aos pontos experimentais para cada temperatura. Vale ressaltar que o ajuste foi realizado para uma grande variação de temperaturas e de umidade relativa, o que provavelmente aumentou os erros de estimativa do modelo. De qualquer maneira, esse modelo foi suficiente para

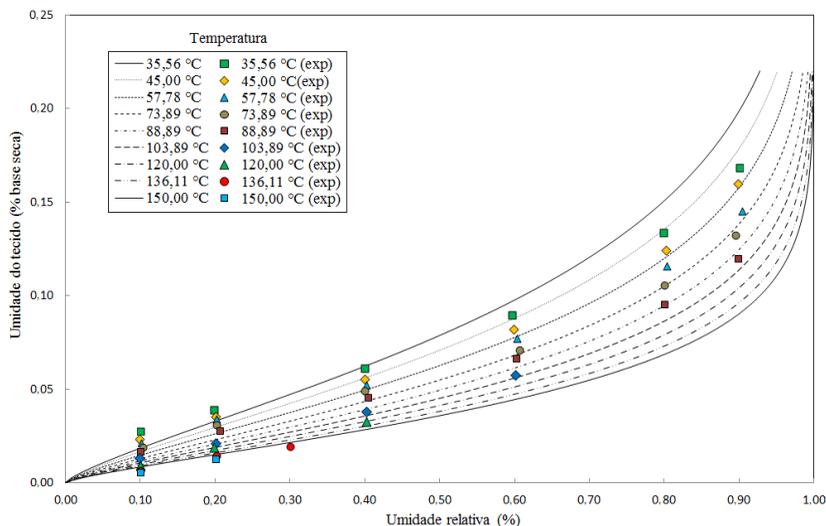
representar razoavelmente o comportamento higroscópico de equilíbrio entre o material têxtil e o ar.

Tabela 10– Constantes dos modelos de isoterma ajustados com os respectivos coeficientes de determinação e erros médios.

Modelo	Constantes			R <sup>2</sup>	MS
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		
Henderson - Thompson	0,2912	8,4254	0,7707	0,9946	0,0782
Oswin modificada	$-4,08 \times 10^{-4}$	0,0868	0,4015	0,9910	0,0783
Chung - Pfof	0,20363	0,0394	43,9332	0,9818	0,0780
Sabbah	0,75485	1,1324	0,3959	0,9727	0,0778

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 22– Modelo de isoterma de Henderson – Thompson ajustado aos pontos experimentais em várias temperaturas.



Fonte: elaborada pelo autor.

O comportamento da isoterma de dessorção de umidade do algodão foi o esperado e assim como para a maioria dos produtos higroscópicos, observa-se que os teores de umidade de equilíbrio decrescem com o aumento da temperatura e a diminuição da umidade

relativa do ar (CORRÊA; ALMEIDA, 1999; SANTOS, *et al.*, 2008). A diminuição da umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura é justificada com base no aumento da pressão de vapor na superfície do produto, que possui maior número de moléculas de água que o ar. Maior pressão de vapor implica em maior perda de água para que o equilíbrio seja atingido (FERREIRA; PENA, 2003).

#### 4.3 CALOR ISOSTÉRICO

O calor isostérico estima a quantidade mínima de energia requerida para remover uma quantidade de água de um material. Através desse parâmetro, é possível se ter uma ideia sobre a demanda energética da secagem do tecido. Com a finalidade de obter um modelo que representasse o calor isostérico em função do teor de umidade do tecido, valores de atividade de água foram calculados a partir da isoterma de Henderson – Thompson, ajustada aos pontos de Foust *et al.* (1980) e mostrada na equação (55), para uma faixa de temperatura entre 30 e 180 °C e teor de umidade do material entre 0,04 e 0,22 (Tabela 11).

$$X_e = \left[ \frac{\ln(1 - UR)}{-(0,2912T + 8,4254)} \right]^{0,7707} \quad (55)$$

Tabela 11– Valores de atividade de água entre temperaturas de 30 e 180°C e umidade de equilíbrio entre 0,04 e 0,22.

$T, ^\circ\text{C}$	$X_e, \% \text{ b.s.}$									
	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
30	0,23 17	0,35 98	0,47 68	0,57 90	0,66 58	0,73 79	0,79 65	0,84 35	0,88 08	0,909 9
45	0,28 15	0,42 85	0,55 63	0,66 23	0,74 72	0,81 36	0,86 43	0,90 24	0,93 06	0,951 2
60	0,32 81	0,48 98	0,62 37	0,72 90	0,80 88	0,86 74	0,90 95	0,93 92	0,95 96	0,973 5
75	0,37 17	0,54 46	0,68 09	0,78 26	0,85 53	0,90 57	0,93 97	0,96 21	0,97 65	0,985 7

(continua)

(conclusão)

T, °C	$X_e$ , % b.s.									
	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
90	0,41	0,59	0,72	0,82	0,89	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99
	25	34	94	56	05	29	98	63	63	22
105	0,45	0,63	0,77	0,86	0,91	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99
	06	71	06	01	72	23	32	52	2	58
120	0,48	0,67	0,80	0,88	0,93	0,96	0,98	0,99	0,99	0,99
	62	6	54	77	74	61	21	08	54	77
135	0,51	0,71	0,83	0,90	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99
	96	08	5	99	26	59	81	43	73	88
150	0,55	0,74	0,86	0,92	0,96	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
	07	18	01	77	42	28	2	64	84	93
165	0,57	0,76	0,88	0,94	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
	99	95	14	20	29	78	47	78	91	96
180	0,60	0,79	0,89	0,95	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	72	43	94	35	95	13	65	86	95	98

Fonte: elaborada pelo autor.

De acordo com a metodologia proposta para o cálculo de calor isostérico, o gráfico do logaritmo neperiano da atividade de água foi plotado em função do inverso das temperaturas para cada teor de umidade do material (Figura 23). Assim, é possível calcular o calor isostérico líquido, mostrado na Tabela 12, através dos coeficientes angulares de cada reta, multiplicando esse valor pela constante dos gases ( $R = 0,4618 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ ). O calor isostérico integral  $Q_{st}$  foi obtido somando-se o calor isostérico líquido ao calor de vaporização da água a uma temperatura de  $90 \text{ °C}$  (que é igual a  $2284,95 \text{ kJ}/\text{kg}$ ), valor médio entre as temperaturas nas quais foram obtidos os dados de isoterma de dessorção.

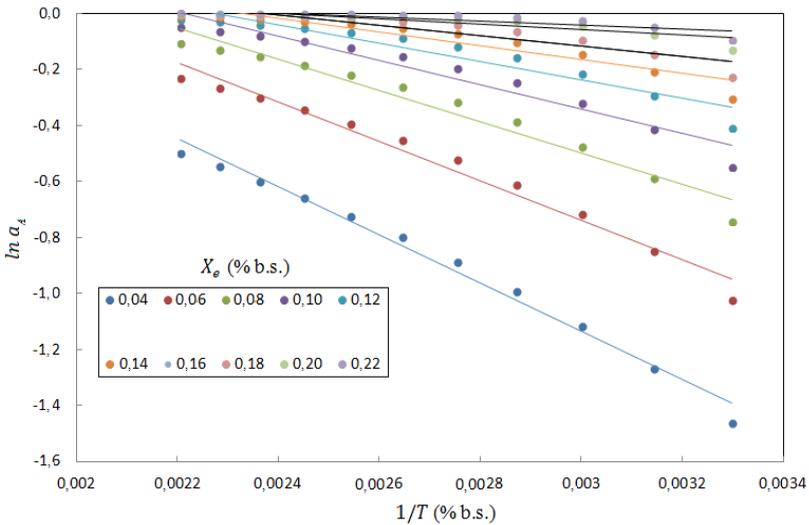
O decréscimo do calor isostérico para umidades relativas cada vez maiores indica que quanto menor a quantidade de água no tecido, mais energia é necessária para evaporar a água adsorvida no produto. Silva *et al.* (2002), Silva *et al.* (2006), Resende *et al.* (2006) e Campos *et al.* (2009) obtiveram conclusões similares estudando produtos alimentícios e agrícolas. Al-Muhtalseb, McMinn e Magee (2004), concluíram que esse tipo de comportamento ocorre porque existem sítios ativos altamente polares na superfície do material poroso com baixo teor de umidade.

Tabela 12– Valor do calor isostérico calculado para o tecido.

$X_e$ , % b.s.	$q_{st}$ , kJ/(kg K)	$Q_{st}$ , kJ/(kg K)
0,04	397,35	2682,30
0,06	324,53	2609,48
0,08	257,67	2542,62
0,10	199,82	2484,77
0,12	151,96	2436,91
0,14	113,76	2398,71
0,16	84,12	2369,07
0,18	84,12	2369,07
0,20	44,76	2329,71
0,22	32,33	2317,28

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 23– Curvas de  $\ln(a_A)$  versus  $1/T$ , baseadas na equação de Clausius – Clapeyron, para diferentes teores de umidade do material.

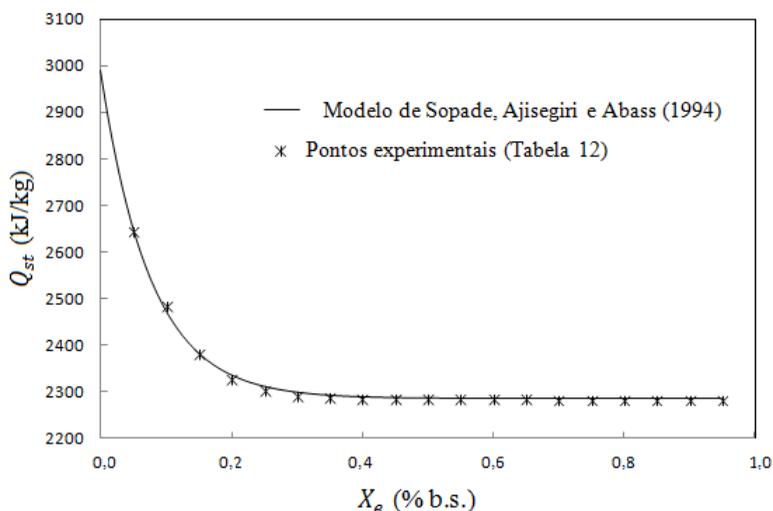


Fonte: elaborada pelo autor.

A soma do calor isostérico líquido com a entalpia de vaporização da água resulta no calor isostérico integral. O modelo de Sopade, Ajisehiri e Abass (1994), equação (35), foi utilizado para representar a variação do calor isostérico líquido com o teor de umidade do material, dados obtidos da Tabela 12. O modelo de calor isostérico integral ajustado é mostrado como a equação (56), no qual o calor de vaporização da água foi obtido a uma temperatura de 90 °C, valor médio entre as temperaturas nas quais foram obtidos os dados de isoterma de dessecção. O gráfico da equação (56) ajustada aos pontos da Tabela 12 pode ser visto na Figura 24.

$$Q_{st} = 704,62 \exp(-13,17X_e) + 2284,95 \quad (56)$$

Figura 24—Modelo ajustado aos valores de calor isostérico integral de dessecção em função da umidade de equilíbrio do tecido.



Fonte: elaborada pelo autor.

Os valores de calor isostérico integral são maiores que o próprio calor de vaporização da água pura, indicando que a energia de ligação entre as moléculas de água e os sítios é maior que a energia que liga as moléculas de água entre si no estado líquido. O modelo de Sopade, Ajisehiri e Abass (1994) representou bem os dados da Tabela 12, com coeficiente de determinação igual a 0,9982. Zhu e Li (2010) indicaram o valor médio de calor de dessecção do vapor de água em um material

têxtil igual a 2522,0 kJ/kg, valor que está em concordância com a faixa de resultados fornecidos pelo modelo.

#### 4.4 COEFICIENTES CONVECTIVOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA

Os coeficientes convectivos de transferência de calor e de massa foram estimados no estudo de caso 1, no qual o ar ambiente está a 25 °C de temperatura e 85 % de umidade relativa (16,87 g de H<sub>2</sub>O/kg de ar seco) e o ar de secagem está a 180 °C e 3,7 % de umidade relativa (23,95 g de H<sub>2</sub>O/kg de ar seco). Aproximações sucessivas desses coeficientes foram realizadas tais que o tecido fosse seco até o teor de umidade igual a 7,0 % b. s., valor que é obtido no processo real (FERRAZ *et al.*, 2010; BORGES; PICKLER; MANTELLI, 2011).

A primeira aproximação foi realizada para o coeficiente de transferência de calor na região R2 (zona de impacto do ar de secagem sobre o tecido), baseando-se nas equações empíricas apresentadas em Geankoplis (1993):

$$h_2 = 1,17 \times J_{ar}^{0,37} \quad (57)$$

$$J_{ar} = u_{inj} \rho_{ar} \quad (58)$$

Na equação (57), que calcula o fluxo de massa do ar de secagem que sai dos injetores ( $J_{ar}$ ),  $u_{inj}$  é a velocidade de injeção do ar sobre a superfície e  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar. A equação (57) é recomendada para o caso do ar escoando perpendicularmente à superfície do material com fluxo de massa entre 3900 e 19500 kg/(m<sup>2</sup> h).

Uma primeira estimativa do coeficiente convectivo de transferência de massa pode ser feita igualando-se as equações de transferência de calor e de massa resultando na equação (59), onde  $T_{ar}$  é a temperatura do ar de secagem (em °C),  $T_{bu}$  é a temperatura de bulbo úmido (em °C),  $UA_{bu}$  é a umidade absoluta na temperatura de bulbo úmido,  $UA_{ar}$  é a umidade absoluta do ar de secagem e  $\Delta H_{vap}$  é a entalpia de vaporização da água.

$$k_2 = \frac{h_2}{\Delta H_{vap}} \frac{(T_{ar} - T_{bu})}{(UA_{bu} - UA_{ar})} \quad (59)$$

A Tabela 13 mostra os valores dos coeficientes convectivos de transferência de calor e de massa estimados no estudo de caso 1.

Tabela 13 – Coeficientes convectivos de transferência de massa e de calor estimados no estudo de caso 1 para as regiões R1 e R2.

$k_1$ (m/s)	$k_2$ (m/s)	$h_1$ (W/m <sup>2</sup> K)	$h_2$ (W/m <sup>2</sup> K)
0,001	0,002	71,4	142,8

Fonte: elaborada pelo autor.

A literatura ainda carece de valores experimentais dos coeficientes convectivos de calor e de massa em um tipo de sistema como o presente na rama, onde diversos injetores direcionam perpendicularmente jatos de ar a altas velocidades sobre a superfície do tecido. Normalmente, os trabalhos publicados nessa área são relacionados ao estudo numérico/ experimental do escoamento do ar em um ou poucos injetores de ar. Desse modo, determina-se a constante adimensional de Nusselt, que é utilizada para o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor. O coeficiente convectivo de transferência de massa é então calculado relacionando-o com o coeficiente convectivo de calor, como foi apresentada na equação (59), ou por meio de correlações empíricas, como a de Chilton-Colburn (CHIN; HSUEH, 1986).

Gao (2003) determinou coeficientes convectivos de calor experimentalmente em uma placa com 25 bicos configurados de diferentes modos, encontrando valores que variaram de 120 a 600 W/(m<sup>2</sup>K), dependendo da geometria e do número de Reynolds. Francis e Wepfer (1996) obtiveram numericamente, através de um modelo unidimensional e da teoria de Kolmogoroff, coeficientes de transferência de calor entre 30 e 120 W/(m<sup>2</sup>K) e de transferência de massa entre 0,023 e 0,074 m/s em um sistema constituído de um sólido semi-poroso seco convectivamente por ar a uma temperatura média de 150 °C. Utilizando o método de secagem do tipo *through-air* com ar de secagem em temperaturas de 353 e 389 °C, Lee *et al.* (2002) obtiveram coeficientes de transferência de calor entre 56,0 e 80,9 W/(m<sup>2</sup>K) e de massa entre 0,056 e 0,105 m/s na secagem de amostras de tapete de *nylon*.

A utilização de uma estimativa dos valores dos coeficientes através do estudo de caso 1 foi uma alternativa viável para os cálculos propostos neste trabalho, já que este não contempla os modelos de

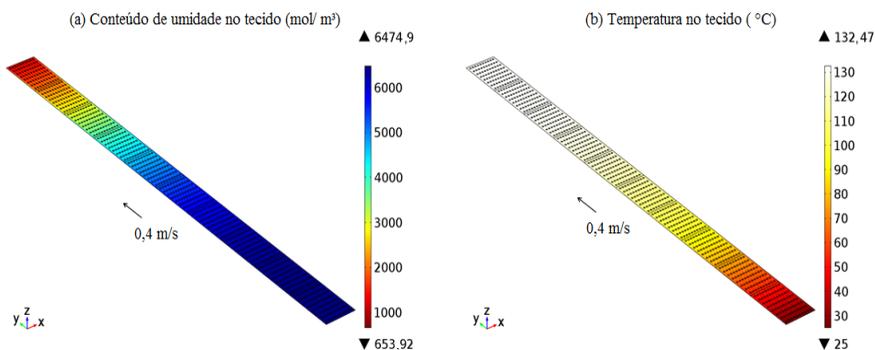
escoamento do ar sobre o tecido. De qualquer modo, os valores de coeficientes de transferência de calor estimados, mostrados na Tabela 13, estão em concordância com os valores encontrados na literatura. No entanto, os coeficientes de transferência de massa estão abaixo daqueles encontrados nos trabalhos publicados, que normalmente utilizam a analogia de Chilton – Colburn para relacionar os coeficientes de calor com os de massa. É importante ressaltar que as correlações que determinam esses coeficientes dependem da geometria dos injetores de ar, do movimento da superfície, do ângulo de incidência do jato de ar, entre outros parâmetros. Dessa forma, as diferenças encontradas entre os valores estimados e os valores encontrados em publicações da área justificam-se pelas particularidades de cada caso. Assim, para determinar os coeficientes de transferência de calor e de massa com maior precisão é necessário realizar um estudo do escoamento do ar nos injetores e a incidência dos jatos sobre o tecido.

#### 4.5 PERFIS DE UMIDADE E TEMPERATURA NO TECIDO

Os modelos transientes de transferência de calor e de transferência de massa em meios porosos foram resolvidos para 75 s (com passo igual a 0,5 s), que é o tempo decorrido para que 30 m de tecido passem a uma velocidade de 0,4 m/s no interior da rama. No final deste intervalo de tempo, a solução dos modelos convergiu para o modo estacionário, que corresponde aos resultados mostrados nesta seção.

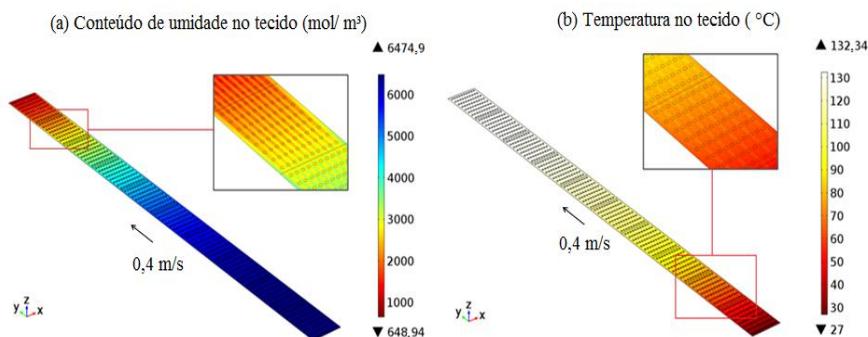
Os perfis de umidade na superfície do tecido para os estudos de caso 1, 2, 3 e 4 (com razão de reciclo de 1:2) podem ser observados nas Figuras 25-a, 26-a, 27-a e 28-a, respectivamente. Apesar da condição do ar ser diferente em cada simulação, pode-se notar que o comportamento é similar em todos os casos, incluindo a situação em que ocorre reaproveitamento do calor de exaustão para pré-aquecimento do ar e do tecido. Inicialmente o tecido entra na rama com uma concentração de aproximadamente 6475 mol de H<sub>2</sub>O/ m<sup>3</sup> de tecido seco, que equivale a uma umidade em base seca em torno de 70 %. Depois de receber calor do ar de secagem, o qual aqueceu a fase sólida e evaporou a água contida nele, o tecido saiu do processo com uma umidade em base seca de aproximadamente 7,0 %. Estes valores condizem com os valores médios de processos reais de secagem de material têxtil em rama e com trabalhos que desenvolveram estudos nessa área, como Ferraz *et al.* (2010) e Borges, Pickler e Mantelli (2011).

Figura 25– Perfil de umidade (a) e perfil de temperatura (b) no tecido para o estudo de caso 1 ( $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $UA_{amb} = 16,87 \text{ g/kg}$ ;  $T_{ar} = 180^{\circ}\text{C}$ ,  $UA_{ar} = 23,95 \text{ g/kg}$ ).



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 26– Perfil de umidade (a) e perfil de temperatura (b) no tecido para o estudo de caso 2 ( $T_{amb} = 27^{\circ}\text{C}$ ,  $UA_{amb} = 19,20 \text{ g/kg}$ ;  $T_{ar} = 179,5^{\circ}\text{C}$ ,  $UA_{ar} = 26,28 \text{ g/kg}$ ).

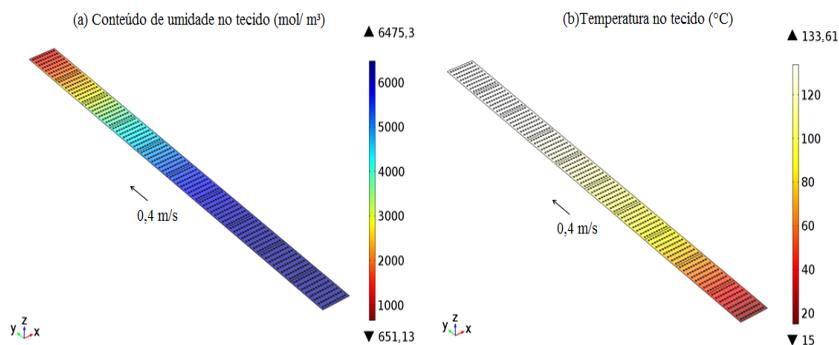


Fonte: elaborada pelo autor.

Os perfis de temperatura na superfície do tecido para os estudos de caso 1, 2, 3 e 4 (com razão de reciclo 1:2) são mostrados nas Figuras 25-b, 26-b, 27-b e 28-b e também é possível observar que o comportamento é similar em todos os casos, mesmo com as temperaturas iniciais do tecido diferentes em cada situação. Como os coeficientes de transferência são elevados, o incremento na temperatura ocorre logo nos primeiros campos do secador. Realizando experimentos de secagem de nylon, Xue (2004) observou o rápido incremento na

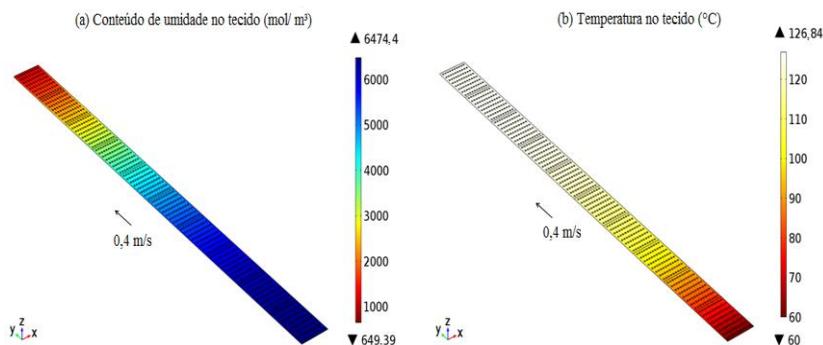
temperatura do tecido a poucos metros da entrada do secador, seguida da estabilização da temperatura do material que caracteriza o período à taxa constante.

Figura 27– Perfil de umidade (a) e perfil de temperatura (b) no tecido para o estudo de caso 3 ( $T_{amb} = 15\text{ °C}$ ,  $UA_{amb} = 9,02\text{ g/kg}$ ;  $T_{ar} = 183\text{ °C}$ ,  $UA_{ar} = 16,58\text{ g/kg}$ ).



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 28– Perfil de umidade (a) e perfil de temperatura (b) no tecido para o estudo de caso 4, com razão de reciclo 1:2 ( $T_{p-ar} = 60\text{ °C}$ ,  $UA_{p-ar} = 25,38\text{ g/kg}$ ;  $T_{ar} = 166,8\text{ °C}$ ,  $UA_{ar} = 30,22\text{ g/kg}$ ).



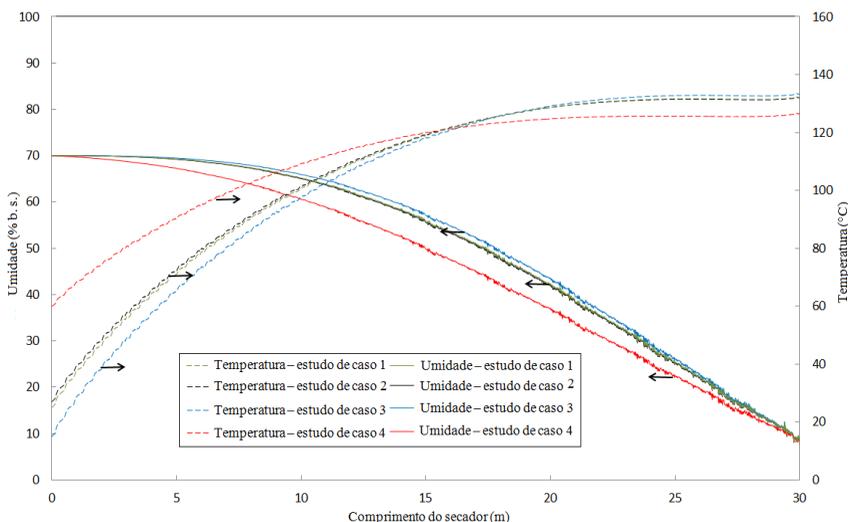
Fonte: elaborada pelo autor.

Observando os detalhes em destaque na Figura 26, pode-se notar a presença de rastros com menor umidade e maior temperatura sobre o tecido ao longo do comprimento do secador, que também aparecem nos outros estudos de caso. Isso ocorre por causa do movimento do tecido

dentro da rama combinado com a presença dos injetores que incidem o ar de secagem, diminuindo a resistência à transferência de calor e massa da região R2. A contribuição do escoamento perpendicular do ar sobre a superfície na transferência de calor é maior quando o tecido está a velocidades mais baixas. Em equipamentos reais, é necessário que os bicos de injeção sejam dispostos de modo a reduzir o efeito dos rastros, para que o produto troque calor e massa com o ar de secagem uniformemente.

Os perfis de umidade e temperatura ao longo do tecido nos estudos de caso 1, 2, 3 e 4 são mostrados na Figura 29. Esses perfis foram obtidos ao longo do eixo y na posição central do domínio ( $x = 1$  m e  $z = 0,00075$  m).

Figura 29– Perfis de umidade e temperatura ao longo da rama para os estudos de caso 1, 2, 3 e 4 (razão de reciclo de 1:2).



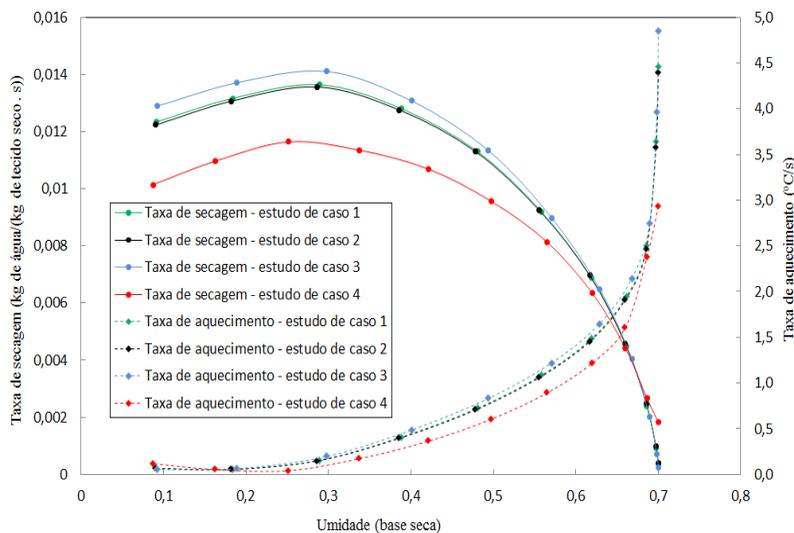
Fonte: elaborada pelo autor.

Observando a Figura 29, é possível constatar que em todas as simulações, a temperatura é estabilizada até o fim do processo em torno dos 130 °C nos quatro últimos campos da rama (18 a 30 m de distância da entrada). Medições feitas no processo real mostraram que o tecido, assim que sai da rama, chega a uma temperatura de 105 °C. Como na simulação realizada não se considerou perda de calor para o ambiente através das paredes do secador (hipótese de secador adiabático), resulta

que todo o calor fornecido pelo ar de secagem está disponível para aquecer o tecido e remover a água contida nele até a umidade final desejada. Dessa forma, conclui-se que a temperatura de saída na simulação deva ser maior que no processo real, onde as perdas de calor para o meio externo estão presentes.

A influência das condições do ar ambiente na cinética de secagem é mostrada na Figura 30. As curvas foram obtidas ao longo do eixo  $y$  na posição central do domínio ( $x = 1$  m e  $z = 0,00075$  m).

Figura 30– Cinética de secagem e taxa de aquecimento do tecido para os estudos de caso 1, 2, 3 e 4 (razão de reciclo de 1:2).



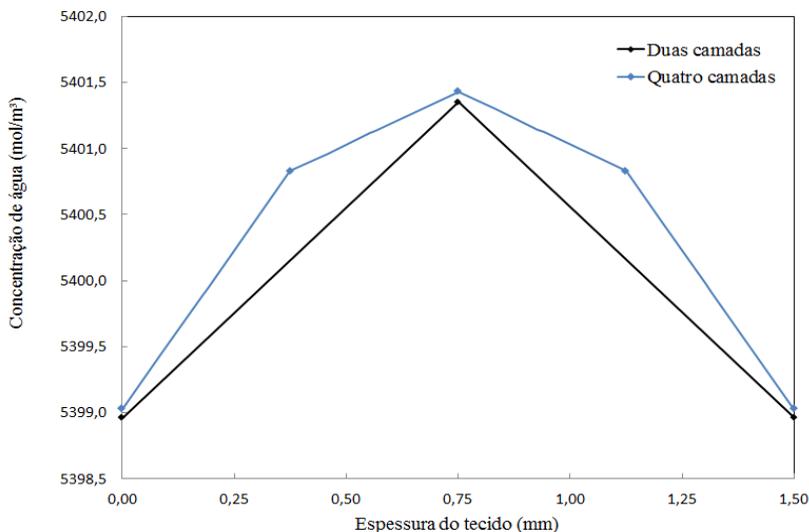
Fonte: elaborada pelo autor.

É possível notar que a taxa de secagem é mais elevada quando a temperatura do ar de secagem é maior. Esse resultado é esperado, uma vez que o potencial para a transferência de calor e consequentemente, para a transferência de massa, foi incrementado. Por outro lado, na prática, o incremento da temperatura do ar de secagem nem sempre é viável, uma vez que as reações envolvidas no processo de termofixação das resinas e dos corantes aplicados no tecido podem ser afetadas pela mudança de temperatura, resultando em um produto com qualidade indesejada. Neste caso, a temperatura do ar de secagem deve ser cuidadosamente controlada para evitar danos ao tecido.

Na Figura 30, ainda é possível observar que a secagem ocorreu durante o aquecimento do tecido seguido de um período de taxa decrescente. Inicialmente, o tecido está mais frio que o meio de secagem. O calor contido no ar acarreta uma rápida elevação da temperatura do produto, ocorrendo um aumento da velocidade de secagem até um ponto máximo. A taxa de secagem máxima variou entre 0,012 e 0,014 kg de água/(kg de tecido seco . s) para um teor de umidade do material entre 25 e 30% b.s., conforme a temperatura do processo.

O período à taxa constante não ocorreu, sendo que depois de atingir um valor máximo, a taxa de secagem diminuiu progressivamente, caracterizando um período de taxa decrescente. Do início ao fim do processo, o material tem a sua temperatura incrementada com a remoção concomitante de umidade do interior do material. Os perfis de concentração de água dentro do material ao longo da espessura do tecido ao final da secagem para duas e quatro camadas de discretização são mostrados na Figura 31.

Figura 31– Distribuição de umidade na saída do secador ao longo da espessura do tecido com duas e quatro camadas de discretização.



Fonte: elaborada pelo autor.

Pode-se notar que uma distribuição de umidade ao longo da espessura foi considerada, manifestando-se um ponto de máxima quantidade de água no centro da camada e que se reduz até a superfície do tecido. A consideração da distribuição de umidade ao longo da espessura permite ao modelo melhor representar o comportamento fenomenológico da secagem de um produto onde a taxa de evaporação da água diminui à medida que superfície fica mais seca.

À medida que a quantidade água vai diminuindo na superfície do material, a umidade no ar junto ao tecido(calculada pela isoterma de dessorção) é reduzida, fazendo com que a diferença de potencial para a transferência de massa também se reduza até eventualmente se chegar ao teor de umidade de equilíbrio. Como já citado, o processo sob estudo considerou finalizada a secagem quando a umidade do tecido de algodão atingiu 7,0 % em base seca.

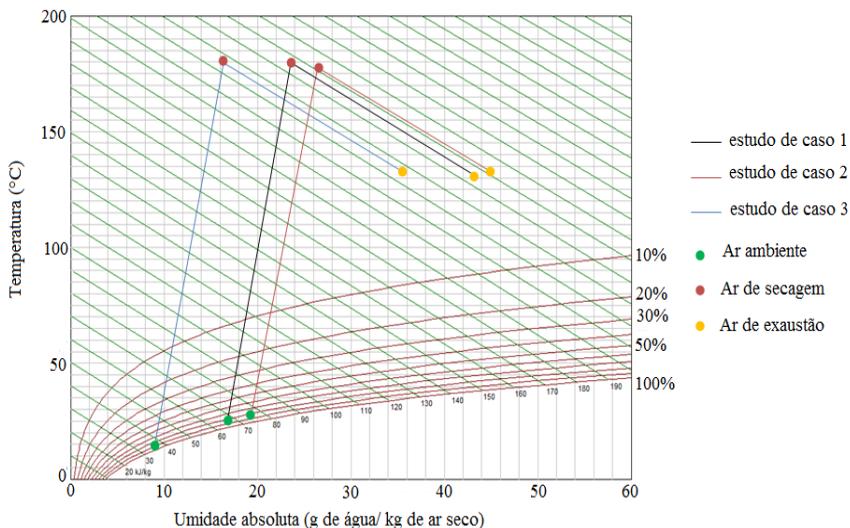
#### 4.6 CONSUMO DE GÁS NATURAL E DESEMPENHO DA RAMA

O desempenho da rama é bastante sensível às condições ambientes, devido à exposição do tecido ao ar externo quando ele entra no secador e também por causa da utilização do ambiente como ar de secagem após a combustão do gás natural.

A Figura 32 mostra, na carta psicrométrica, as linhas de aquecimento do ar ambiente para os estudos de caso 1, 2 e 3 até a temperatura de processo do ar de secagem e o resfriamento adiabático depois do processo, com o gás de exaustão em equilíbrio térmico com o tecido. Isso significa que todo o cálculo do desempenho da rama foi realizado no melhor cenário possível, que é a máxima eficiência de troca térmica entre o ar de secagem e o tecido.

Uma vez que o tecido está inicialmente em equilíbrio térmico com o ar ambiente, o ar de secagem deve estar mais quente em épocas mais frias para garantir a secagem do material até o nível adequado para o processo. Do mesmo modo que em épocas mais quentes, o ar de secagem pode ser menos aquecido e ainda garantir o teor de umidade até o nível requerido. Esta tendência aponta que a realização de uma etapa de pré-aquecimento do tecido reduz o consumo de combustível pelo processo.

Figura 32– Linhas de aquecimento do ar utilizado no processo para os estudos de caso 1, 2 e 3.

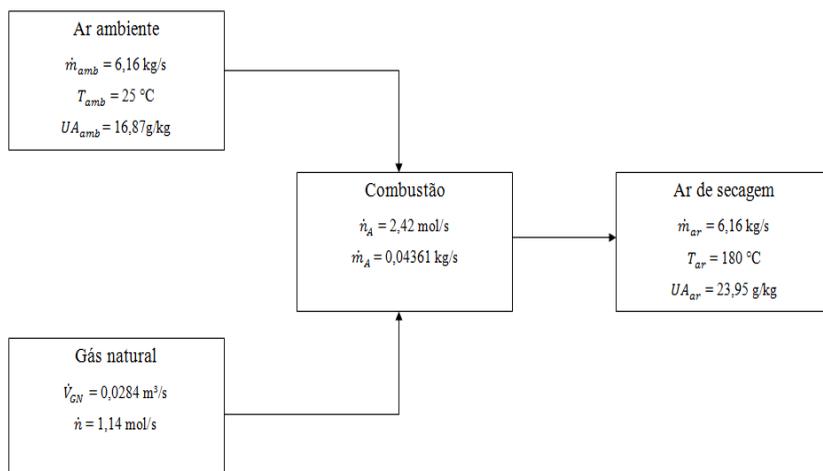


Nas simulações, considerou-se a quantidade de água gerada pela queima do gás natural que é acrescentada ao ar. As linhas de aquecimento são inclinadas porque nos cálculos foi considerada a quantidade de água adicionada ao ar devido à combustão completa de gás natural. A Figura 33 mostra um esquema com as condições do ar antes e depois de seu aquecimento para o estudo de caso 1. Apesar da quantidade de água adicionada ser grande relativamente à umidade do ar ambiente, o ar de secagem não perde a capacidade de incorporar mais água que é removida do tecido, devido à temperatura do processo ser elevada.

Os principais resultados dos cálculos do impacto da condição do ar ambiente no processo de secagem do tecido em rama estão mostrados na Tabela 14. Com a vazão mássica de ar de secagem mantendo-se praticamente igual nos três casos, verifica-se que é necessário fornecer mais energia por meio da queima do gás natural em um processo ocorrendo a uma temperatura ambiente mais baixa. Em uma época com temperatura média mais fria, como no estudo de caso 3, foi possível estimar um aumento de 5,3 % no consumo de combustível em relação às condições do ar ambiente com 85% de umidade relativa e 25 °C de temperatura (estudo de caso 1). No estudo térmico da secagem de

palmilhas em rama, Ceron (2008) inferiu a influência da condição do ar do ambiente no processo de secagem, havendo necessidade de tempos maiores para aquecer e manter a temperatura do secador estável em períodos mais úmidos, estimando um custo de 5 % a mais de combustível, valor em concordância com o calculado neste trabalho.

Figura 33– Esquema mostrando as condições do ar antes e depois da combustão do gás natural para o estudo de caso 1.



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 14– Resultados dos estudos de caso 1, 2 e 3, mostrando a vazão de ar utilizado, o consumo de gás natural e as taxas de energia envolvidas no processo.

Estudo de caso	$T_{ar}$ (°C)	$\dot{m}_{ar}$ (kg/s)	$\dot{V}_{GN}$ (m³/s)	$\dot{Q}_{ar}$ (kJ/s)	$\dot{Q}_{tec}$ (kJ/s)	% $\dot{Q}_p$	$Q_{proc}$ (kJ/kg)
1	180,0	6,16	0,0284	1002,68	681,49	32,03	5926,00
2	179,5	6,28	0,0284	995,96	672,62	32,47	5798,45
3	183,0	6,06	0,299	1057,28	728,52	31,09	6334,96

Fonte: elaborada pelo autor.

A medida do consumo ( $Q_{proc}$ ) é feita pela quantidade de energia gasta para cada quilograma de água evaporada pelo secador. Os valores

de  $Q_{proc}$  mostrados na Tabela 14 estão dentro da faixa de valores estimados por Mujumdar (2006), que afirmou que a secagem convectiva de tecidos gasta de 5000 a 8000 kJ/kg, confirmando que esse tipo de processo apresenta um consumo intensivo de energia. É importante observar que nem toda a energia contida no ar de secagem é utilizada para aquecer e evaporar a umidade do tecido. Pouco mais de 30% de toda a energia vinda da queima do combustível não foi utilizada no processo. Esta estimativa mostra que os gases de exaustão tem um grande potencial para o reaproveitamento energético, alternativa mostrada a seguir.

#### 4.7 REAPROVEITAMENTO DO CALOR DO GÁS DE EXAUSTÃO

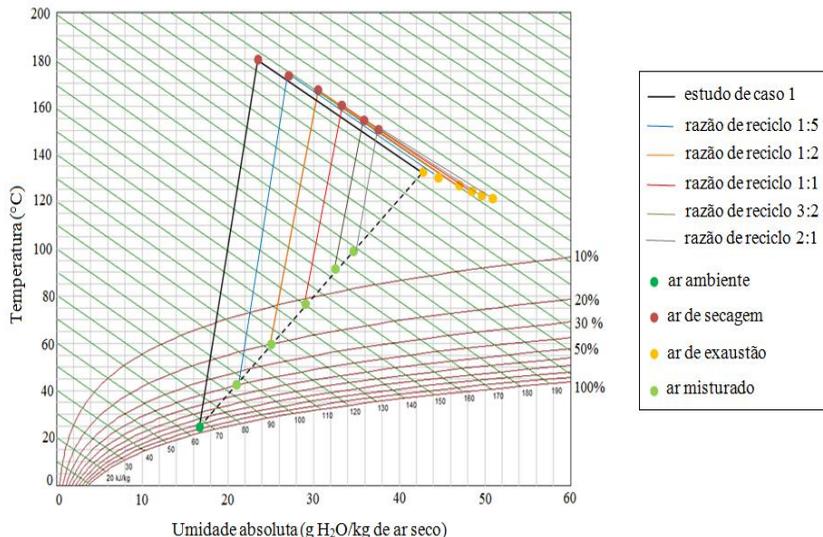
A alternativa proposta para a redução de consumo de gás natural pela rama envolve o reaproveitamento do calor dos gases de exaustão do processo, tomando-se como referência o estudo de caso 1 para uma temperatura ambiente de 25°C. A ideia consiste em utilizar uma parte do calor de exaustão para pré-aquecimento do tecido e outra parte para o pré-aquecimento do ar, por meio da mistura entre a parcela do gás de exaustão e o ar fresco.

A Figura 34 mostra na carta psicrométrica as condições do ar durante o processo sem reciclo e com várias razões de reciclo para o pré-aquecimento do tecido e do ar, estudos de caso 1 e 4, respectivamente. As condições de temperatura e umidade do ar resultante da mistura do ar de exaustão com o ar fresco para a realização da secagem também estão indicadas para cada razão de reciclo.

A capacidade do ar de secagem receber umidade não foi reduzida pelo fato de o ar de exaustão (carregando a água removida do tecido) ser misturado ao ar ambiente. Com a temperatura do ar de secagem reajustada para cada razão de reciclo, o tecido que entrou na rama com 70% b.s. de umidade, saiu do processo com 7,0% b.s. de umidade.

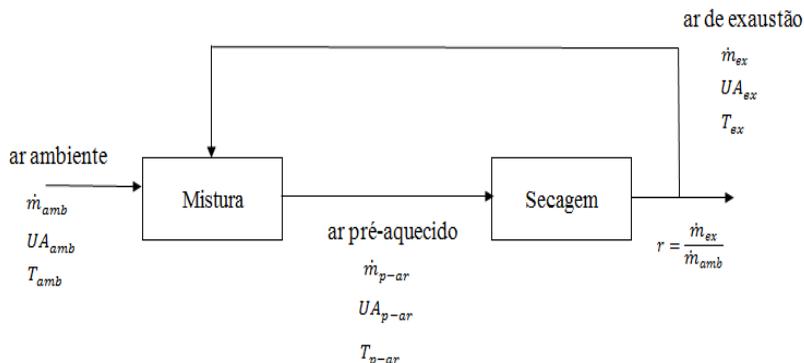
Na Figura 35 pode-se observar o esquema do balanço de massa do ar para o sistema de pré-aquecimento proposto. Os resultados desses balanços de massa para cada razão de reciclo são mostrados na Tabela 15.

Figura 34– Carta psicrométrica mostrando as condições do ar nos processos sem reciclo (estudo de caso 1) e com diferentes razões de reciclo (estudo de caso 4).



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 35 – Esquema do reaproveitamento do calor de exaustão para pré-aquecimento do tecido e do ar de secagem.



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Resultados dos balanços de massa para cada razão de reciclo do estudo de caso 4.

<i>r</i>	Ar ambiente		Ar pré-aquecido		Ar de exaustão	
	$\dot{m}_{amb}$ (°C)	$UA_{amb}$ (g/kg)	$\dot{m}_{p-ar}$ (°C)	$UA_{p-ar}$ (g/kg)	$\dot{m}_{ex}$ (°C)	$UA_{ex}$ (g/kg)
1:5	5,13	16,87	6,16	21,17	1,03	27,07
1:2	4,15	16,87	6,16	25,38	2,01	30,22
1:1	3,08	16,87	6,16	29,77	3,08	33,44
3:2	2,46	16,87	6,16	32,35	3,70	35,32
2:1	2,05	16,87	6,16	34,07	4,11	36,66

Fonte: elaborada pelo autor.

O ar ambiente a 25 °C e com 85 % de umidade relativa do ar (16,87 g de água/kg de ar seco) foi tomado como padrão nos balanços de massa. A base para o cálculo foi a vazão mássica da mistura, tomando como referência a vazão mássica do ar de secagem do estudo de caso 1 para fins comparativos. Os resultados da Tabela 15 indicam que uma parcela do gás de exaustão não é reciclada. Para o aproveitamento máximo da energia contida nessa corrente, recomenda-se que a outra parte do gás de exaustão seja utilizada em sistemas de recuperação de calor para suprir outras necessidades térmicas da indústria, como por exemplo, em trocadores de calor.

Na Tabela 16, mostra-se o balanço energético realizado para cada razão de reciclo e também sem reciclo de gás de exaustão (estudo de caso 1), destacando-se o consumo de gás natural em cada situação. É possível constatar que o consumo de combustível com o sistema de pré-aquecimento proposto foi reduzido em uma faixa que varia de 19 a 64 % em relação ao processo realizado sem esse sistema (estudo de caso 1). Isso ocorre porque como o tecido já entra no processo pré-aquecido, a quantidade de calor necessário para aquecer e secar o material ( $\dot{Q}_{tec}$ ) também é inferior. Além disso, a temperatura do ar de secagem foi reajustada para um valor inferior ao processo sem reciclo. Consequentemente, o calor perdido pela exaustão é menor comparado com os valores dos outros casos e a eficiência do secador aumenta.

O pré-aquecimento do tecido e do ar de secagem pela mistura de parte do ar exaustão com ar fresco economiza gás natural em média praticamente na mesma escala que um sistema de recuperação que utiliza trocadores de calor. O nível de economia de consumo de gás

natural no reciclo de 1:2 alcançou 30,6 % em relação ao consumo de combustível sem reciclo. Este valor é similar ao praticado na indústria têxtil, que utiliza sistema com trocadores de calor. Nestes sistemas, a redução de consumo do combustível é da faixa de 20 a 30 % (BEE, 2010). Como se pode ver nos resultados, em razões de reciclo maiores, a temperatura do ar de secagem foi reajustada para valores menores, de modo que o tecido permanecesse com a especificação desejada (7,0 % de umidade em base seca no fim do processo). Na prática, o reajuste da temperatura do ar de secagem pode ser limitado por motivos operacionais, como por exemplo, para atender uma temperatura mínima para a termofixação de acabamentos no tecido.

Tabela 16– Resultados obtidos dos cálculos de balanço energético para as razões de reciclo do estudo de caso 4 e para o estudo de caso 1.

Razão de reciclo	$V_{GN}$ (m <sup>3</sup> /s)	$T_{p-ar}$ (°C)	$T_{ar}$ (°C)	$\dot{Q}_{ar}$ (kJ/s)	$\dot{Q}_{tec}$ (kJ/s)	$Q_{proc}$ (kJ/ kg)
Sem reciclo*	0,284	25,00*	180,00	1002,68	681,49	5926,00
1:5	0,230	42,92	173,35	811,96	593,02	5112,24
1:2	0,197	60,00	166,80	693,71	510,25	4361,11
1:1	0,147	78,75	159,45	518,74	422,36	3609,91
3:2	0,120	89,50	155,25	423,08	374,21	3171,27
2:1	0,102	96,67	152,35	358,42	342,73	2904,49

\*Sem reciclo corresponde ao estudo de caso 1, onde 25,00 °C é a temperatura do ar ambiente que entra na rama.

Fonte: elaborada pelo autor.

É importante ressaltar que o reaproveitamento energético proposto e os resultados estimados nas simulações dependem fortemente de cada processo, do tipo e da gramatura do tecido, das condições de temperatura e umidade do ar de secagem, da quantidade de água contida inicialmente no tecido e com que umidade ele deve sair, da velocidade do tecido na rama etc. Em situações reais, uma etapa de pré-aquecimento do tecido pode ser inviabilizada, dependendo do tipo de amaciante aplicado na manta na entrada da rama. Contudo, baseando-se na estimativa feita nas simulações, é extremamente recomendado que as etapas de pré-aquecimento do tecido (sendo possível) e do ar de secagem, utilizando o gás de exaustão, sejam colocadas em prática.

## 5 CONCLUSÕES

A realização de um estudo de modelagem e simulação da transferência de calor e massa da secagem de um tecido em uma rama de aquecimento direto mostrou-se como uma ferramenta bastante útil para avaliar o desempenho do processo de secagem. Os modelos considerados representaram adequadamente os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem de tecido em rama, sendo possível realizar boas estimativas de consumo energético e das perdas envolvidas por meio das simulações e dos balanços de massa e energia relacionados.

Por meio dos quatro estudos de caso, verificou-se que a rama é um equipamento sensível às condições do ambiente, consumindo mais combustível durante estações mais frias. O reaproveitamento energético dos gases de exaustão para o pré-aquecimento do tecido e do ar de secagem causou um impacto positivo para a redução do consumo de gás natural.

Este estudo proporcionou uma visão mais detalhada da secagem do tecido na rama, incorporando o conhecimento fenomenológico em um importante processo prático da indústria têxtil e possibilitando a melhoria no desempenho do equipamento pela boa capacidade de predição dos modelos matemáticos.



## 6 SUGESTÕES

As sugestões a seguir referem-se à realização de futuras pesquisas na área de secagem de tecidos em rama que podem complementar este trabalho:

- a) realização de um estudo do escoamento do ar nos injetores localizados no interior da rama, para que seja possível calcular mais precisamente números de Nusselt, e assim, determinar os coeficientes convectivos de transferência de calor e de massa;
- b) simulação do processo de secagem com diferentes tipos de tecido a diferentes velocidades de processo, verificando o impacto no consumo de gás natural pela rama;
- c) realização de medidas experimentais de secagem de tecidos para obtenção de curvas de adsorção/dessorção de umidade e de calor isostérico;
- d) acoplamento dos modelos de escoamento do ar aos modelos de transferência de calor e de massa no tecido, a fim de verificar como as condições de velocidade e distribuição do ar sobre o tecido afetam a secagem.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-FATTAH, A. **Numerical and experimental study of turbulent impingement twin jet flow.** Experimental Thermal and Fluid Science. n. 31, p. 1061-1072, Elsevier, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Fica estabelecida no Regulamento Técnico ANP parte integrante desta Resolução, a especificação do gás natural, nacional ou importado, a ser comercializado em todo o território nacional.** Resolução ANP n. 16, de 17 de junho de 2008. Diário Oficial, Brasília, DF, 18 de junho de 2008.

ALCÂNTARA, M. R.; DALVIN, D. **A química do processamento têxtil.** Química Nova, n. 19, vol. 3, 1996.

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. **Water Sorption Isotherms of Starch Powders. Part 2: Thermodynamics Characteristics,** Journal of Food Engineering, n. 62, p. 135-142, 2004.

ALONSO, L. F. T. **Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. 241 p. 2001.

AMESTOY, P. R.; DUFF, I. S.; L'EXCELLENT, J. Y. **Multifrontal parallel distributed symmetric and unsymmetric solvers.** Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., n. 184, p. 501-520, 2000.

ANDERSON, B. A.; SINGH, R. P. **Effective heat transfer coefficient measurement during air impingement thawing using an inverse method.** International Journal of Refrigeration, n. 29, p. 281-293, Elsevier, 2006.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., **Handbook Fundamentals,** 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIAS TÊXTEIS E CONFECÇÕES. **Dados gerais do setor atualizados em 2012,**

**referentes ao ano de 2011.** Disponível em: <<http://www.abit.org.br>>. Acesso em: 06/06/2012.

BASTIAN, E. Y. O. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil.** São Paulo: CETESB: SINDITÊXTIL, 2009.

BEE: Bureau of Energy Efficiency. **Detailed project report on installation of waste heat recovery system in stenter,** New Delhi, 2010.

BONTEMPI, A. **Eficiência energética de secadores industriais: análise e propostas experimentais.** 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2004.

BORGES, T. P. F., PICKLER, G. P., MANTELLI, M. B. H., **Heat pipe air heaters in stenters for textile industry,** 21<sup>st</sup> Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Natal, Brazil, 2011.

BRITTO, J. F. **Considerações sobre psicrometria.** Revista SBCC, ed. 45, 2010.

BRÜCKNER TEXTIL. **Power-frame stenter.** Disponível em: <<http://www.brueckner-textil.de>>. Acesso em: jul. 2013.

BUCHLIN, J. M. **Convective heat transfer in impingement-gas-jet arrangements.** Journal of applied fluid mechanics.vol. 4, n. 2, p. 137-149, 2011.

CAMPOS, A.R.N. *et al.* **Isotermas de adsorção e calor isostérico da palma de forrageira enriquecida proteicamente.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 13, n.6, p.734-740, 2009.

CERON, L. P. **Desenvolvimento do processo de secagem em rama na produção de palmilhas para calçados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 98 p., 2008.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R.P. **Métodos numéricos para engenharia.** 5<sup>a</sup> ed. McGraw Hill, 2008.

CHATTERJEE, P. K.; GUPTA, B.S. **Porous structure and liquid flow models**. Absorbent Technology, Elsevier Science, 2002.

CHEREM, L. F. C. **Um modelo para a predição da alteração dimensional em tecidos de malha de algodão**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. 292 p. , 2004.

CHIN, D.T.; HSUEH, K. L. **An analysis using the Chilton – Colburn analogy for mass transfer to a flat surface from an unsubmerged impinging jet**. *Electrochimica Acta*, vol. 31, n. 5, pp. 561-564, 1996.

CHOUDHURY, A. K. R. **Textile preparation and dyeing**. India: Science Pub. Inc., p. 835 , 2006.

COLUCCI, D. W.; VISKANTA, R. **Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet**. *Experimental Thermal and Fluid Science*, n. 13, p. 71-80, Elsevier, 1996.

COMSOL. **COMSOL Multiphysics® reference guide**. Version 4.3a. 2012.

CORRÊA, P. C.; ALMEIDA, F. A. C. **Comparação de modelos matemáticos de equilíbrio higroscópico para semente e fibra de algodão herbáceo, cultivar redenção**. *Rev. Ol. Fibras*, vol. 3., n. 1, p. 1 – 6, Campina Grande, 1999.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2nded, Oxford Science Publication, 1975.

DHATT, G.; TOUZOUT, G.; LENFRAÇOIS, E. **Finite element method**. John Wiley & Sons, London, 2012.

DINCER, I. **Exergy as a potential tool for sustainable drying systems**. *Sustainable Cities and Society*. Elsevier, 2011.

EKKAD, S.V.; KOTROVITZ, D. **Jet impingement heat transfer on dimpled target surfaces**. *International journal of heat and fluid flow*. n. 23, p. 22-28, Elsevier, 2002.

EUROPEAN COMMISSION. **Reference document on best available techniques for the textiles industry.** [s.l.]: Integrated Pollution Prevention and Control, 2003.

FERRAZ, A. D *et al.* **Eficiência na indústria têxtil: oportunidades para o gás natural.** Rio Oil&Gas Expo and Conference 2010. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP, Rio de Janeiro, 2010.

FERREIRA, C. D.; PENA, R. S. **Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gaspaes*).** Ciência e Tecnologia de Alimentos, vol. 23, n. 2, p. 251 – 255, 2003.

FOUST, A. S. *et al.* **Principles of Unit Operations.** John Wiley and Sons, New York, 1980.

FRANCESCHI, K., PÉREZ, S., MAGARELLI, D., **Determinación de los coeficientes de transferencia de masa y energía para el proceso de secado de textiles en función de la densidad del material,** Información Tecnológica, vol. 21, n. 5, p. 99-106, 2010.

FRANCIS, N. D.; WEPFER, W. J., **Jet impingement drying of moist porous solid,** Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 39, n. 9, p. 1911-1923, 1996.

FREITAS, K. R. **Caracterização e reuso de efluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

GAO, L. **Effect of jet hole arrays arrangement on impingement heat transfer.** Thesis (Ms. Mechanical Engineering). Louisiana State University, 2003.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and unit operations.** 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall Int., 921 p., 1993.

GIBSON, P. W.; CHARMCHI, M., **Modeling convection/diffusion processes in porous textiles with inclusion of humidity-dependent air permeability,** Int. Comm. Heat Mass Transfer, vol. 24, n. 5, p. 709-724, 1997.

GONÇALVES, M. J. **Biodescoloração de efluentes têxteis**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

GOULART, L. M. **A introdução do gás natural nas empresas têxteis dos municípios de Odessa, Santa Bárbara D'Oeste e Sumaré: Fatores Intervenientes**, 2008.

GREG, S.J.; SING, K. S. W. **Adsorption, surface area and porosity**. 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press, London, 1982.

HAGHI, A. K. **Simultaneous moisture and heat transfer in porous systems**. *Journal of Computational and Applied Mechanics*, vol. 2, n. 2, p. 195-204, 2001.

\_\_\_\_\_, **Heat and mass transfer in textiles**. WSEAS Press, Montreal, 2011.

HANSEN, L. G.; WEBB, B.W, **Air Jet impingement heat transfer from modified surfaces**, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 36, n. 4, p. 989-997, 1993.

HASANBEIGI, A., **Energy-efficiency improvement opportunities for the textile industry**, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.

HASANBEIGI, A.; PRICE, L.A **review of energy use and energy efficiency technologies for the textile industry**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. USA, 2012.

HUTTON, D. **Fundamentals of finite element analysis**. New York: McGraw Hill, 2004.

INSPIRON. **Hot Air Stenters**. Disponível em: <<http://inspiron.co.in/stenters/twinAir.php>>. Acesso em: jul. 2013.

KARACAPILIDIS, N. I.; PAPPIS, C. P. **Production planning and control in textile industry: a case study**. *Computers in Industry*, Elsevier Science, 1996.

LEE, H. S. *et al.*, **A model of through-air drying of tufted textile materials**, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 45, p. 357-366, 2002.

MALDONADO, L. M. O.; BRUNO, F. S. **O futuro da indústria têxtil e de confecções: vestuário de malha**. Sériepolítica industrial – 7. Brasília, 2005.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. G.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 7<sup>th</sup> ed. McGraw Hill, 2005.

MORONI, L. G. *et al.* **Manual de não-tecidos: classificação, identificação e aplicações**. 3. Ed. São Paulo: ABINT, 2005.

MUJUMDAR, A. S., **Handbook of industrial drying**. CRC Press, New York, 2006.

MULET, A. *et al.* **Equilibrium isotherms and isostheric heats of morel (*Morchella esculenta*)**. Journal of Food Engineering, London, vol. 53, p.75-81. 2002.

OĞULATA, R. T. **Utilization of waste – heat recovery in textile drying**. Applied energy, n. 79, p. 41- 49, 2004.

OKTAY, Z.; HEPBASLI, A. **Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer**. Energy Conversion and Management, n. 44, p. 1193-1207, 2002.

PARK, K. J. B. *et al.* **Considerações termodinâmicas das isotermas**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, vol. 10, n. 1, p. 83-94, 2008.

\_\_\_\_\_. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas, 2007. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>>. Acesso em 23/11/2011.

PEREIRA, R. O. **Combinação de tratamento biológico aeróbio com processos oxidativos avançados visando intensificar a remoção de matéria orgânica em efluentes da indústria têxtil e de celulose Kraft**.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Viçosa, Brasil, 2007.

PERIM, M. M., **Análise da influência da recirculação de ar no desempenho de uma bomba de calor aplicada à secagem.** Tese (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Estadual de Campinas, 119 p., 1994.

PERRY, R. H.; GREEN, D.W. **Perry's chemical engineers' handbook.** Seventh edition. New York: McGraw Hill, 1999.

PFOST, H. B, *et al.* **Sumarizing and reporting equilibrium moisture for grains.** ASAE, n. 76 – 3520, St. Joseph, 1976.

POURDEYHIMI, B.; MAZÉ, B.; TAFRESHI, H. V. **Simulation and analysis of unbonded nonwoven fibrous structures.** Journal of Engineered Fibers and Fabrics, vol. 1, issue 2, p. 47-65, 2006.

RANGEL, A.; DA SILVA, M.; COSTA, B. **Competitividade da indústria têxtil brasileira.** Revista de Administração e Inovação, São Paulo, vol. 7, n. 1, p. 151-174, jan./mar. 2010.

RAO, S. S. **The finite element method in engineering.** 4th ed., p. 3-49. Florida, 2005.

REBENFELD, L. **Fibers and fibrous materials.** Absorbent Technology. Elsevier Science, 2002.

RESENDE, O. *et al.* **Isotermas e calor isostérico de sorção do feijão.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, vol. 3, n. 26, p. 626-631, jul.-set. 2006.

SAAD, Y.; SCHULTZ, M.H. **GMRES: a generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems,** SIAM J. Sci. Stat. Comput., 7:856-869, 1986.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. **Zoneamento ecológico-econômico – ZEE: Vale do Itajaí.** Florianópolis, 170 p., 1999.

SANTOS, J. C. O. *et al.*. **Estudo da cinética e isoterma de secagem de tecido composto por poliéster e algodão.** Acta Sci. Technol., vol. 30, n. 1, p. 63 – 72, 2008.

SCHAEFER; M. F.; OLIVEIRA, R. **Alteração dimensional da malharia circular.** 1º Congresso de Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade. Unifebe, Brusque, Santa Catarina – 24 a 27 de agosto de 2010.

SERENO, C. A. A. **Método dos elementos finitos móveis – aplicações em engenharia química.** Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1989.

SHARIF, M. A. R., BANERJEE, A. **Numerical analysis of heat transfer due to confined slot-Jet impingement on a moving plate.** Applied Thermal Engineering, vol. 29, p. 532-540, 2009.

SILVA, M. M. *et al.* **Dessorção e calor isostérico em polpa de manga.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 6, n. 1, p. 123-127, 2002.

SILVA, Y. C. *et al.* **Determinação do calor isostérico de sorção e da entropia diferencial do cajá em pó microencapsulado com diferentes formulações.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, vol. 8, n. 2, p.103-109, 2006.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introduction to chemical engineering thermodynamics.** 7th ed. McGraw Hill, 2005.

SOPADE, P. A.; AJISEGIRI, E. S.; ABASS, A. B. **Moisture sorption study on nigerean foods: kuka.** J. stored Prod. Res., vol. 30, n. 4, p. 331-338, 1994.

SPENCER, D. J. **Knitting technology: a comprehensive handbook and practical guide.** Third edition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2001.

STATEN, M. L., JONES, N. L. **Local refinement of three dimensional finite element meshes.** Engineering with Computers, vol. 13, p. 165-174, 1997.

SWASTIK TEXTILE. **Stenter: Optima 2510 – with horizontal return chain and Optima 2610 – with vertical return chain.** Disponível em: <<http://www.swastiktextile.com>>. Acesso em: jul. 2013.

TETENS, O. **ÜbereinigemeteorologischeBegriffe.** ZeitschriftGeophysic, vol.6, p. 297-309, Wurzburg, 1930.

THOMPSON, T. L., PEART, R. M. and FOSTER, G. H., **Mathematical simulation of corn drying: a new model.** Trans. ASAE, vol. 24,n. 3, p. 582-586, 1968.

TREYBAL, R. E. **Mass transfer operations.** 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill, 1980.

WAANANEN, K. M.; OKOS, M. R. **Effect of porosity on moisture diffusion during drying of pasta.** Journal of Food Engineering, n. 28, p. 121-137, 1994.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. **Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures.** Journal of Food Engineering, vol. 14, pp. 269 – 287, 1991.

XUE, L., **Process optimization of dryers/tenters in the textile industry,** Master's Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2004.

ZHU, Q. Y. and LI, Y., **Numerical simulation of the transient heat and liquid moisture transfer through porous textiles with consideration of electric double layer,** Int. Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 53, p. 1417-1425, 2010.

ZUCKERMAN, N.; LIOR, N. **Jet impingement heat transfer:** physics, correlations and numerical modeling. Advances in Heat Transfer.vol. 39, pp. 565-631, 2006.

ZUPIN, Z.; DIMITROVSKI, K. **Mechanical properties of fabrics made from cotton and biodegradable yarns bamboo, SPF, PLA in Weft, Woven Fabric Engineering,** PolonaDobnikDubrovski, InTech, 2010.