

Universidade Estadual de Maringá



CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO BACARIN

Estudos de transferência de calor e massa em fibras têxteis.

PEM
Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica | UEM

Maringá

2015

RODRIGO BACARIN

Estudos de transferência de calor e massa em fibras têxteis

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Ciências Térmicas

Orientador: Prof. Dr. Wagner André dos Santos Conceição

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Luiza Helena Costa Dutra Sousa

**Maringá
2015**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

B116e Bacarin, Rodrigo
Estudos de transferência de calor e massa em
fibras têxteis / Rodrigo Bacarin. -- Maringá, 2015.
71 f. : il. color., figs., tabs. + anexos

Orientador: Prof. Dr. Wagner André dos Santos
Conceição.
Coorientadora: Prof.ª Dr.ª Luiza Helena Costa
Dutra Sousa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, 2015.

1. Transferência de calor e massa - Secagem -
Fibras têxteis. 2. Condutividade térmica - Fibras
têxteis. 3. Difusividade mássica - Fibras têxteis.
4. Transferência de calor e massa - Secagem - Meios
porosos. I. Conceição, Wagner André dos Santos,
orient. II. Sousa, Luiza Helena Costa Dutra,
coorient. III. Universidade Estadual de Maringá.
Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia
Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

CDD 21.ed. 621.4022
MN-003140

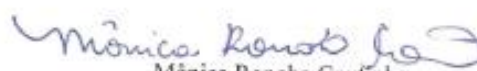


Este é o exemplar definitivo da Dissertação apresentado por **Rodrigo Bacarin**, perante a Comissão Julgadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica em 14 de dezembro de 2015.

COMISSÃO JULGADORA


Wagner André dos Santos Conceição
Presidente – PEM/UEM


Luiza Helena Costa Dutra Sousa
Coorientadora – PEM/UEM


Mônica Ronobo Coufinho
Membro – Unicentro - DEALI


Márcio Higa
Membro – PEM/UEM

Dedico este trabalho a Deus, que é digno de toda honra e glória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, porque Ele, segundo minhas crenças, é a fonte inicial de tudo, e aos dons a mim investidos por ele.

Aos meus pais e meu irmão que sempre deu apoio e incentivou a pesquisa, em especial a minha namorada, Gladys Dyane Monteiro por acreditar e incentivar o investimento da minha carreira acadêmica.

Aos professores Prof. Dr. José Celso Oliveira dos Santos e Prof. Dr. Washington Luiz Felix dos Santos do Departamento de Engenharia Têxtil da UEM que colaboram na análise das amostras de tecidos da pesquisa.

Aos professores Prof. Dr. Wagner André dos Santos Conceição e Prof. Dra. Luiza Helena Costa Dutra Sousa, por me receberem na linha de pesquisa de Ciências Térmicas e encararem o desafio de serem orientadores nesta pesquisa. Agradeço a orientação, os ensinamentos, a dedicação e a confiança na realização deste trabalho.

As empresas Fama Têxtil de Maringá e Paratex Têxtil de Apucarana que forneceram amostras gratuitamente dos tecidos para a pesquisa.

"Eu acredito, eu luto até o fim: não há como
perder, não há como não vencer."

(Oleg Taktarov)

RESUMO

BACARIN, R. **Estudos de transferência de calor e massa em fibras têxteis**. [Studies of heat transfer and mass transfer in textiles fibers]. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá/PR, 2015. 71 páginas.

O presente trabalho explorou a análise dos aspectos fundamentais da transferência de calor e massa em regime transiente (processo de secagem) em fibras têxteis. A evolução da tecnologia e otimização matemática, permitiram contribuir com parâmetros mais precisos na determinação de condutividade térmica para os tecidos e difusividade mássica da água no tecido, especificamente para o tecido malha de poliéster e algodão, e tecido plano de algodão, afim de comportar uma melhor eficiência no processo de secagem abrangendo desde aplicações domésticas até escala industrial. A metodologia focou-se em desenvolver um experimento de secagem com materiais de baixo custo, apoiada de uma plataforma de prototipagem básica (Arduino) em comunicação com Matlab, necessitando apenas de uma balança semi-analítica de boa tolerância. O modelo matemático proposto para as equações de transferência de calor e massa apresentou uma assertividade positiva entre dados experimentais e valores teóricos, garantido pela aproximação dos valores da condutividade térmica do tecido para as fibras têxteis de poliéster ($k_{tec} = 0,1468 \text{ W/mK}$) e de algodão ($k_{tec} = 0,2257 \text{ W/mK}$) cujos valores encontrados em maior frequência na literatura sendo em torno de $0,14 \text{ W/mK}$ para o de poliéster e $0,16 \text{ W/mK}$ para o de algodão.

Palavras-chave: Secagem, condutividade térmica, difusividade mássica, transferência de calor e massa, fibras têxteis, meios porosos.

ABSTRACT

BACARIN, R. **Studies of heat transfer and mass transfer in textiles fibers.** [Estudos de transferência de calor e massa em fibras têxteis]. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá/PR, 2015.71 pages.

This papers explored the analysis of the aspects fundamentals to study transient heat and mass transfer in transient (drying process) in textile fibers. The evolution of technology and mathematical optimization allowed to contribute more precise parameters in determining of thermal conductivity to the fabric and mass diffusivity of water in fabrics (porous medium), specifically for the mesh polyester and cotton textile, and cotton woven plan, in order to behave better efficiency in the drying process applications ranging from domestic to industrial scale. The methodology focused on developing drying an experiment with low-cost materials, supported by a prototyping platform basic (Arduino) in communication to Matlab, requiring only a semi-analytical balance for good tolerance. The mathematical model that proposed for heat and mass transfer equations presented a positive assertiveness between experimental data and theoretical values achieved by the approximation of the thermal conductivity for textile fibers of the polyester ($k_{tec} = 0.1468 \text{ W/mK}$) and the cotton ($k_{tec} = 0.2257 \text{ W/mK}$) as values found in most often of the literature being around 0.14 for polyester fibers and 0.16 W/mK for cotton fibers.

Keywords: Drying, thermal conductivity, mass diffusivity, heat and mass transfer, textiles fibers, porous media.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Dispositivo Alambeta..... | 17 |
| Figura 2 – Micro complexo Têxtil..... | 20 |
| Figura 3 - Classificação das Fibras Têxteis..... | 21 |
| Figura 4 – Tecido Plano e Malha | 22 |
| Figura 5 - Processos de secagem da roupa com transferência de calor e massa. | 25 |
| Figura 6 - Meio poroso (a) O meio e suas propriedades. (b) Representação em resistências térmicas em série. (c) Representação em resistências térmicas em paralelo..... | 26 |
| Figura 7 – Principais propriedades do volume de cálculo..... | 28 |
| Figura 8 – Diagrama dos processos de secagem | 35 |
| Figura 9 - Curva típica de secagem em condições constantes de secagem; teor de umidade em função do tempo | 36 |
| Figura 10 - Comportamento das curvas de secagem..... | 39 |
| Figura 11 - Tipos de umidade..... | 43 |
| Figura 12 - Isotherma de dessorção da umidade de algumas fibras têxteis à 21°C..... | 44 |
| Figura 13 - Esquema ilustrativo do sistema considerado | 46 |
| Figura 14 – Pontos Nodais | 47 |
| Figura 15 - Pontos nodais para o teor de umidade | 49 |
| Figura 16 - Sistema de aquisição dos dados | 52 |
| Figura 17 – Fluxograma do algoritmo proposto..... | 56 |
| Figura 18 - Ajuste para Equação (35) de calor amostra 1 tecido de malha poliéster..... | 58 |
| Figura 19 - Ajuste para Equação (36) da massa amostra 1 tecido de malha poliéster..... | 58 |
| Figura 20 - Ajuste para Equação (35) de calor amostra 2 tecido de malha algodão..... | 59 |
| Figura 21 - Ajuste para Equação (36) da massa amostra 2 tecido de malha algodão..... | 59 |
| Figura 22 - Ajuste para Equação (35) do calor amostra 3 tecido plano sarja 2x1 algodão..... | 60 |
| Figura 23 - Ajuste para Equação (36) da massa amostra 3 tecido plano sarja 2x1 algodão..... | 61 |
| Figura 24 - Ajuste para Equação (35) de calor amostra 4 tecido plano tela algodão..... | 61 |
| Figura 25 - Ajuste para Equação (36) de massa amostra 4 tecido plano tela algodão..... | 62 |
| Figura 26 - Ajuste para Equação (35) de calor amostra 5 tecido plano sarja 2x1 algodão..... | 62 |
| Figura 27 - Ajuste para Equação (36) de massa amostra 5 tecido plano sarja 2x1 algodão..... | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Propriedades térmicas das fibras têxteis..... | 29 |
| Tabela 2 - Propriedades do transporte de massa em fibras têxteis. | 32 |
| Tabela 3 – Modelos de cinética de secagem para camada fina. | 40 |
| Tabela 4 – Umidade de fibras têxteis para dessorção (UR = 60% e T = 21°C). | 44 |
| Tabela 5 - Resultados da análise dos tecidos..... | 50 |
| Tabela 6 - Medição das espessuras das amostras de tecidos | 52 |
| Tabela 7 – Pesagem das amostra de tecido..... | 53 |
| Tabela 8 – Resultados..... | 63 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolos | Significado | Unidade SI |
|---------------------------------|---|----------------------|
| A | Área de troca térmica | [m ²] |
| C _P | Capacidade calorífica | [J/kgK] |
| C _{Pef} | Capacidade calorífica efetiva | [J/kgK] |
| C _{Ptec} | Capacidade calorífica do tecido | [J/kgK] |
| D | Difusividade de massa | [m ² /s] |
| D _{AB} | Difusividade mássica da espécie A em B | [m ² /s] |
| D _{H₂O-Tec} | Difusividade mássica da água na amostra | [m ² /s] |
| D _{H₂O-Ar} | Difusividade mássica da água no ar | [m ² /s] |
| f _v | Fração volumétrica | - |
| g | Gravidade | [m/s ²] |
| h _c | Coefficiente convectivo de transferência de calor | [W/m ² K] |
| h _{ar} | Coefficiente convectivo de transferência de calor do ar | [W/m ² K] |
| h _m | Coefficiente convectivo de transferência de massa do ar | [m/s] |
| h _{fg} | Entalpia de vaporização específica | [J/kg] |
| h _d | Entalpia de dessorção da água | [J/kg] |
| L | Espessura | [m] |
| L _c | Comprimento característico | [m] |
| k | Condutividade térmica | [W/mK] |
| k _f | Condutividade térmica do fluido | [W/mK] |
| k _s | Condutividade térmica do sólido | [W/mK] |
| k _{ef} | Condutividade térmica efetiva | [W/mK] |
| k _{ef, min} | Condutividade térmica efetiva mínima | [W/mK] |
| k _{ef, max} | Condutividade térmica efetiva máxima | [W/mK] |
| k _{tec} | Condutividade térmica do tecido experimental | [W/mK] |
| m | Massa | [kg] |
| m _a | Massa de água | [kg] |
| m _{bu} | Massa de água na temperatura de bulbo úmido | [kg] |
| m _s | Massa seca da amostra | [kg] |
| m _v | Massa do vapor de água | [kg] |

| | | |
|-----------------|--|---|
| \dot{m} | Fluxo de massa | [kg/s] |
| \dot{n}_A | Fluxo da geração da espécie química A | [kg/s] |
| p | Pressão | [Pa] |
| p_{atm} | Pressão atmosférica | [Pa] |
| p_{sat} | Pressão do vapor saturado | [Pa] |
| p_v | Pressão parcial do vapor | [Pa] |
| q_x | Taxa de transferência de calor por condução na direção x | [W] |
| \dot{q}_x | Taxa de geração de calor na direção x | [W/m ³] |
| R | Constante universal dos gases ideais | - |
| T | Tempo | [s] |
| T | Temperatura | [°C] |
| T ₁ | Temperatura no ponto 1 | [°C] |
| T ₂ | Temperatura no ponto 2 | [°C] |
| T _{bu} | Temperatura de bulbo úmido | [°C] |
| T _e | Temperatura externa | [°C] |
| T _f | Temperatura de filme | [°C] |
| T _i | Temperatura interna | [°C] |
| T _∞ | Temperatura do ambiente | [°C] |
| ΔT | Variação de temperatura | [°C] |
| UR | Umidade relativa do ar | - |
| V _t | Volume total do tecido seco | [m ³] |
| V _e | Volume total do tecido encharcado | [m ³] |
| X | Teor de umidade | [kg _{água} /kg _{tec}] |
| X ₀ | Teor de umidade no instante zero | [kg _{água} /kg _{tec}] |
| X _{bu} | Teor de umidade em base úmida | [kg _{água} /kg] |
| X _{bs} | Teor de umidade em base seca | [kg _{água} /kg _{material}] |
| X _c | Teor de umidade crítica | [kg _{água} /kg _{tec}] |
| X _e | Teor de umidade externa em base seca | [kg _{água} /kg _{tec}] |
| X _i | Teor de umidade interna em base seca | [kg _{água} /kg _{tec}] |
| Y | Umidade absoluta do ambiente, em % | - |
| α | Difusividade térmica | [m ² /s] |
| β | Coefficiente de expansão volumétrica | [1/K] |
| ρ | Massa específica | [kg/m ³] |

| | | |
|-----------------------|---|----------------------|
| $\rho_{\text{água}}$ | Massa específica da água | [kg/m ³] |
| ρ_{ef} | Massa específica efetiva | [kg/m ³] |
| ρ_{tec} | Massa específica do tecido | [kg/m ³] |
| ρ_{fibra} | Massa específica da fibra têxtil | [kg/m ³] |
| μ | Viscosidade cinemática | [m ² /s] |
| ϕ | Soma das entalpias de dessecção e vaporização | [J/kg] |
| Δx | Espessura do tecido | [m] |
| Δt | Intervalo de tempo | [s] |
| ΔV | Varição de volume | [m ³] |
| Gr | Número adimensional de Grashof | |
| Nu | Número adimensional de Nusselt | |
| Ra | Número adimensional de Rayleigh | |
| Pr | Número adimensional de Prandtl | |
| E(%) | Erro Percentual | |
| EMR | Erro Médio Relativo | |
| x, y e z | Eixo em coordenadas cartesianas | |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 OBJETIVOS..... | 18 |
| 1.1.1 Objetivos Específicos..... | 18 |
| 2 DESENVOLVIMENTO..... | 19 |
| 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1.1 Indústria Têxtil no Brasil..... | 19 |
| 2.1.2 Fibras Têxteis..... | 20 |
| 2.1.3 Acabamento Têxtil..... | 23 |
| 2.1.4 Secagem Têxtil | 24 |
| 2.1.5 Transferência de calor em meios porosos..... | 25 |
| 2.1.6 Transferência de massa em meios porosos..... | 29 |
| 2.1.7 Determinação dos coeficientes de convecção de calor e massa..... | 32 |
| 2.1.8 Aspectos básicos da Secagem..... | 34 |
| 2.1.9 Cinética da Secagem..... | 38 |
| 2.1.10 Fatores Externos | 41 |
| 2.1.11 Fatores Internos..... | 42 |
| 2.1.12 Análise Matemática do Fenômeno | 45 |
| 2.1.13 Discretização das Equações Diferenciais da Secagem..... | 47 |
| 2.2 MATERIAIS | 49 |
| 2.3 METODOLOGIA | 51 |
| 2.3.1 Premissas do Processo | 54 |
| 2.3.2 Rotina Computacional | 55 |
| 2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 57 |
| 3 CONCLUSÃO..... | 64 |
| REFERÊNCIAS | 67 |
| ANEXOS | 71 |
| A1. FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DO TECIDO | 71 |

1 INTRODUÇÃO

Uma variedade de bens de produção e consumo presentes no cotidiano da sociedade são fabricados na indústria têxtil, como peças do vestuário e artigos do lar. Segundo a Associação Brasileira de Indústrias Têxteis e Confecções (ABIT), em 2014, o mercado têxtil e de confecção mundial apresentaram-se como sendo os mais dinâmicos, realizando constantes lançamentos de produtos e serviços. O Brasil ocupa a quarta posição entre os maiores produtores no setor de vestuário e a quinta posição na produção de materiais têxteis. Embora o Brasil seja um grande produtor e consumidor, sua participação no comércio mundial ainda é muito pequena, contribuindo apenas com cerca de 0,5%.

Atualmente a Ásia é responsável por 73% do volume total produzido no mundo, com destaque para a China e Hong Kong que são responsáveis por 36% das exportações mundiais de produtos têxteis e vestuário. O desafio deste século para a indústria têxtil brasileira 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.

A indústria têxtil é constituída basicamente por processos de manufatura em sequência linear, como etapas de fiação de fibras naturais ou sintéticas, tecelagem, malharia, beneficiamento, acabamento e confecção de artigos para consumo final. As etapas que envolvem processo de secagem são geralmente as últimas no acabamento do tecido, conferindo as propriedades finais do mesmo (SANTOS, 2013).

Segundo Yu e Xu (2015), a transferência de calor e massa simultânea em meios porosos tem atraído maior atenção em diversos ramos da ciência e engenharia, campos como engenharia têxtil e química, armazenamento e conservação de energia, projeto de roupas funcionais, entre outros.

De acordo com Lizák e Mojumdar (2015), o transporte de água é uma ação complexa que ocorre juntamente com o inchaço das fibras têxteis hidrofílicas como o algodão, ocasionando a diminuição da porosidade e permeabilidade ao ar e, por consequência, aumentando a condutividade térmica.

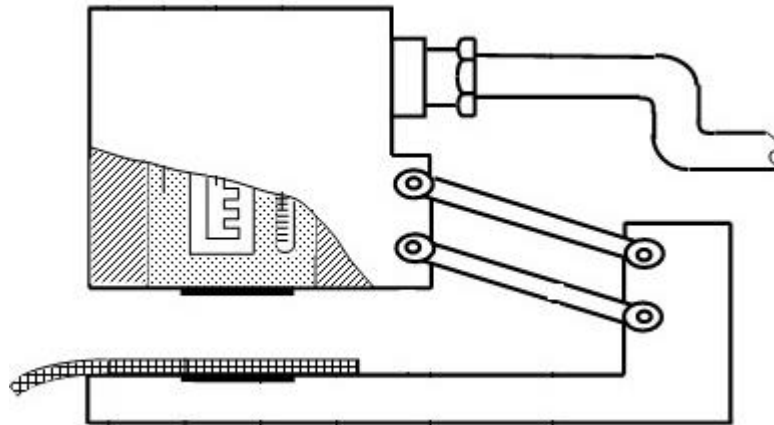
O transporte de massa através de material têxtil depende de vários parâmetros, como espessura, porosidade, tortuosidade e estrutura da fibra têxtil, afinidade da fibra têxtil com água. Dois tecidos feitos do mesmo tipo de fibras têxteis mas com diferentes porosidades podem ter performance térmica bem diferentes. A porosidade têxtil geralmente é determinada pela

avaliação de fibras têxteis e densidades sendo de extrema importância na secagem (NEVES et al., 2015).

O conforto térmico está diretamente relacionado com os fenômenos de transferência de calor e de fluido do corpo para o ambiente, e tendo como resistência natural entre eles a própria vestimenta (DONCA, 2013).

A avaliação do desempenho térmico de novos materiais e produtos (vestuário) são realizados recorrendo a câmaras climáticas e manequins térmicos. Este tipo de procedimento é dispendioso para as empresas uma vez que o custo do instrumento da Figura (1), o Alambeta é elevado.

Figura 1 – Dispositivo Alambeta



Fonte: Adaptado UTTAM (2012).

O processo de secagem envolve 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 podem ocorrer pelos mecanismos de difusão e capilaridade (FOUST, 1982).

Na prática, a modelagem matemática e simulação numérica fornecem caminhos de baixo custo e melhor eficiência para novos projetos e desenvolvimento de novos materiais têxteis para projetos de roupas funcionais. Desde 1930, pesquisadores vêm discutindo modelos

de transferência de calor e massa em diversos métodos de simulações térmicas com concentração de vapor de água em meios porosos.

Neste trabalho estudou-se os processos de transferência de calor e massa, utilizando-se de um domínio de cálculo composto por uma camada de tecido tendo como fronteiras a placa de acrílico e o ambiente externo, levando em conta os fenômenos de transferência por difusão, convecção natural, bem como considerar os fenômenos de mudança de fase no domínio de cálculo.

Em síntese, para a correta modelagem do processo é necessário conhecimento condições ambientais e os parâmetros característicos do tecido (densidade, espessura, porosidade, entre outros) e as taxas de transporte de calor e massa através do mesmo. Para isto, o modelo matemático foi submetido a um tratamento numérico, valendo-se de aproximações numéricas para os dados experimentais buscando o menor erro possível para determinação da condutividade térmica e coeficiente de difusividade de massa do tecido obtido pela implementação da rotina computacional no Matlab.

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é realizar experimentos monitorando-se as temperaturas e a variação de massa durante secagem natural, analisar modelos matemáticos para regime transiente para transferência de calor e massa, ajustando e validando-se com as simulações numéricas.

1.1.1 Objetivos Específicos

De forma específica este trabalho objetiva:

- Estimar os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa que reproduzam os fluxos dessas grandezas associadas ao processo de secagem;
- Analisar um modelo matemático, com base em estudos obtidos na literatura, para avaliar a transferência de calor e massa em fibras têxteis;
- Analisar erros e ajustar valores de condutividade térmica e difusividade de massa para as fibras têxteis.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Indústria Têxtil no Brasil

A história da indústria têxtil no Brasil começou obviamente com os índios, pois eles já utilizavam técnicas rústicas de entrelaçamento manual de fibras vegetais e produziam tecidos grosseiros para várias finalidades, inclusive para vestimentas.

Logo após com a chegada dos portugueses em 1500, a história da indústria têxtil no Brasil começa no período colonial, que se estende de 1500 até 1844.

Com a evolução das indústrias têxteis em 1866:

“As nove fábricas têxteis de algodão do país possuíam 13.977 fusos e produziam aproximadamente 4 milhões de metros de tecidos. Entre 1866 e 1885, a indústria têxtil expandiu-se rapidamente; no final desse período, 42 fábricas e 66 466 fusos produziam mais de 20 milhões de metros. O Número de teares aumentou em cinco vezes e o número de operários subiu de 795 para 3.172” (STEIN, 1974, p 35).

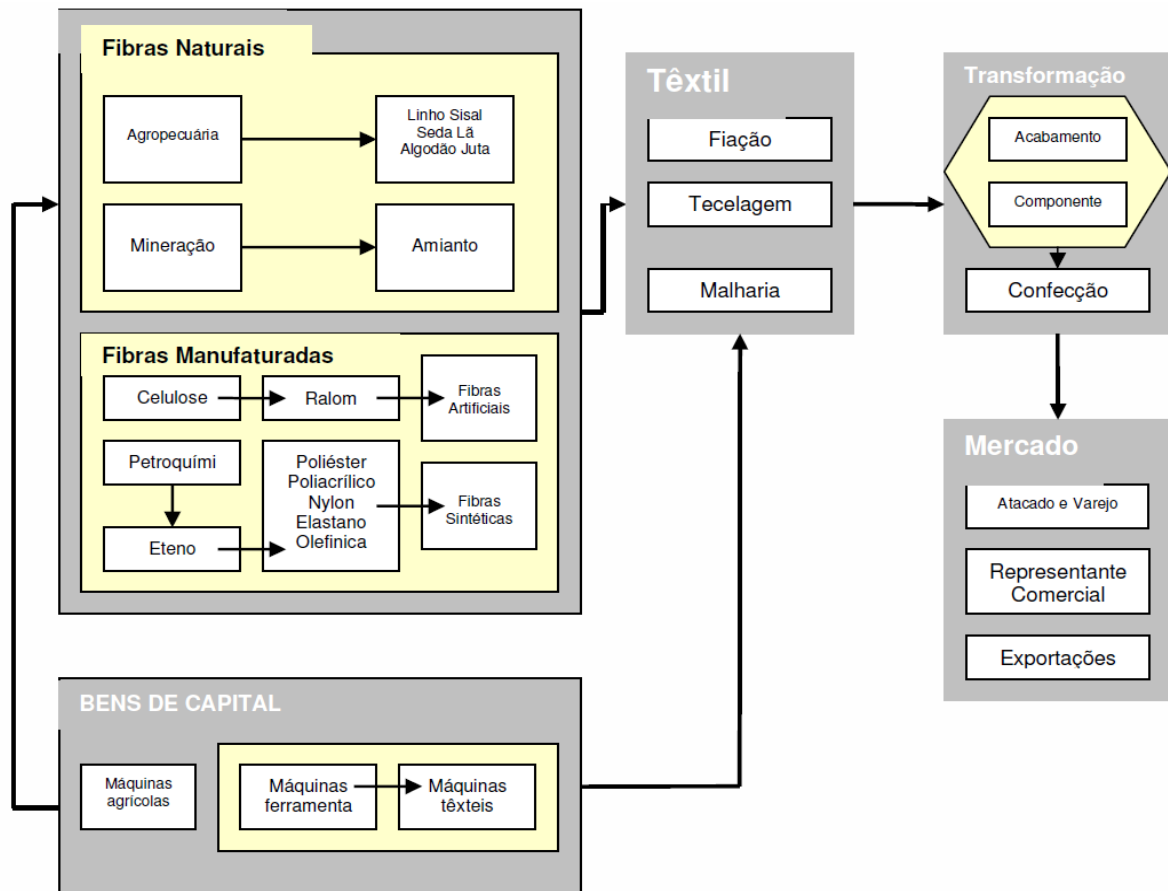
Os primeiros anos da década de noventa foram de acentuada expansão da indústria têxtil algodoeira. Foram fundadas muitas fábricas. Só em São Paulo representavam 19% das novas empresas o que correspondia 70,8% da totalidade do capital investido em indústrias (CANO, 1981, p. 153).

Desde a década de 1980, uma onda de abertura comercial se iniciou em diversos países em desenvolvimento. Por trás desta tendência, estava a convicção dos formuladores de políticas de que o livre comércio poderia garantir a melhoria da qualidade, o bem-estar, o desenvolvimento e crescimento dos negócios (KELLER, 2004).

Neste panorama, destacava-se a ausência de políticas industriais para o setor têxtil. A realidade no meio das empresas do setor têxtil brasileiro foi de mudanças drásticas, gerando uma crise entre os diversos elos da cadeia, com a busca de soluções empresariais muitas vezes individualizadas, reforçando o conflito do setor.

Segundo Firjam e Ferraz (2011) o micro complexo têxtil vestuário é representado por uma cadeia de atividades em sequência linear, desde o processo de beneficiamento e fiação de fibras naturais e/ou químicas, passando pela tecelagem, até o processo de confecção final (Figura 2).

Figura 2 – Micro complexo Têxtil.



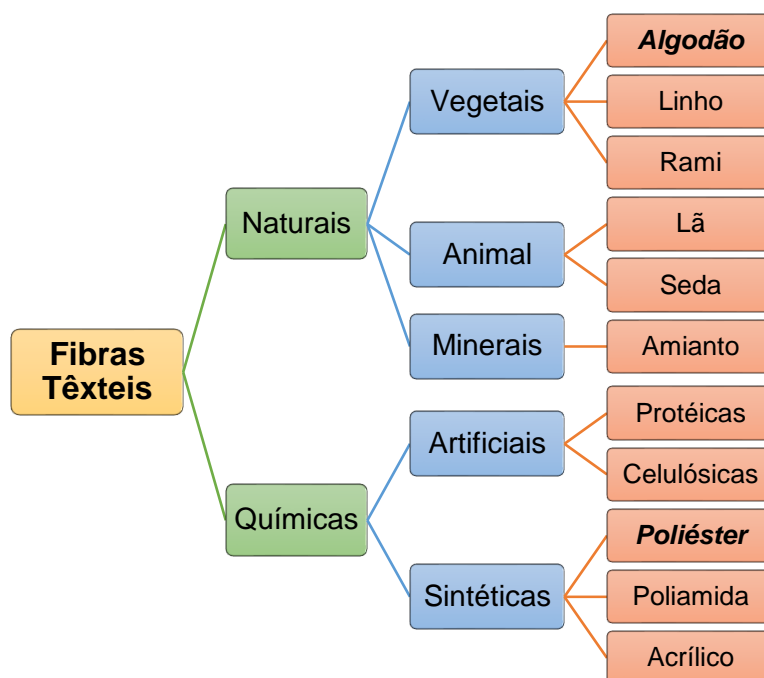
Fonte: Firjam e Ferraz (2011).

2.1.2 Fibras Têxteis

Os materiais têxteis são compostos de diversos tipos de fibras, classificadas como naturais e químicas, estas últimas divididas em artificiais e sintéticas. As fibras naturais tem duas origens: animal e vegetal. As fibras químicas são produzidas a partir de materiais de origem vegetal ou petroquímicos e são classificadas como fibras artificiais, que são produzidas a partir de celulose, tal como a viscose, e sintéticas como o poliéster, poliamida, e o elastano entre outras.

Entende-se por fibra têxtil, todo elemento de origem química ou natural, constituído de macromoléculas lineares, que apresente alta proporção entre seu comprimento e diâmetro e cujas características de flexibilidade, suavidade e conforto ao uso, tornem tal elemento apto às aplicações têxteis. São classificadas conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Classificação das Fibras Têxteis



Fonte: Autor.

As chamadas fibras naturais são todas as fibras que já se apresentam prontas na natureza necessitando apenas alguns processos físicos para transformá-las em fios. Elas estão divididas em:

- Fibra têxtil animal: seda, lã, lhama, etc.
- Fibra têxtil vegetal: algodão, linho, sisal, coco, etc.
- Fibra têxtil mineral: amianto.

A fibra têxtil química é formada de macromoléculas lineares obtidas através de sínteses químicas, logo é um grupo de fibras não naturais que englobam as fibras artificiais e sintéticas e também conhecidas como fibra manufaturada ou fibra feita pelo homem.

As fibras artificiais embora sejam obtidas na natureza a partir da celulose, sofre processos químicos como o acetato, viscose, rayon, tencel, entre outros. E as fibras sintéticas são obtidas a partir de derivados de petróleo e produtos químicos como poliéster, poliamida, acrílico e elastômero, foram criadas para substituir os naturais por serem mais longas e fortes com processos produtivos mais rápidos e eficientes.

Nesta pesquisa foram realizados testes com fibras de poliéster e de algodão.

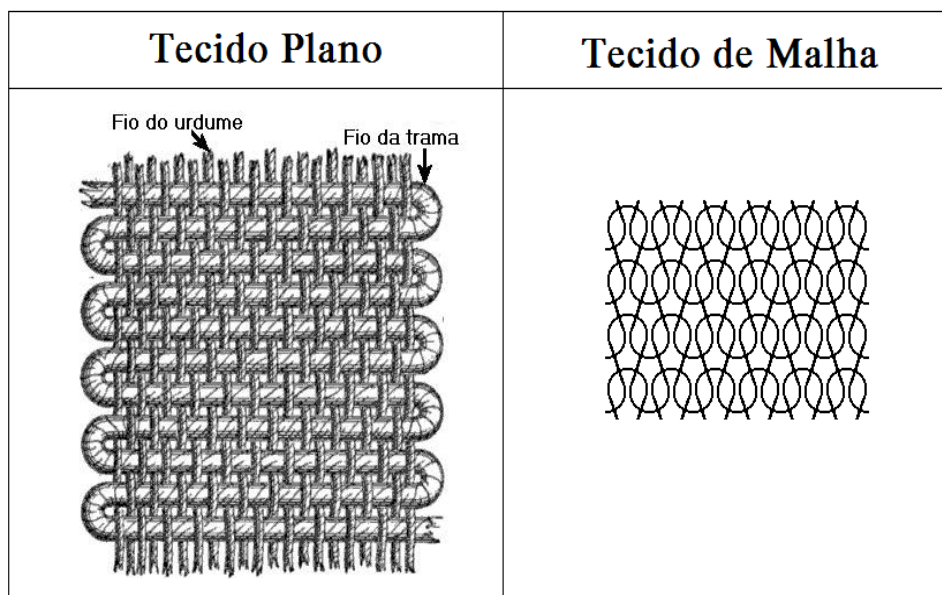
O poliéster, conhecido como tergal, é obtido pela reação do ácido tereftálico com etileno glicol à quente na presença de catalisadores. É a fibra sintética mais utilizada no setor têxtil, ocupando 50% da demanda de fibras químicas e tem o menor custo do mercado, podendo ser

utilizada pura ou em mistura com algodão, viscose, poliamida, linho ou lã em proporções variadas. Além disso, é a fibra de menor custo, apresentando elevada resistência à umidade e aos agentes químicos, alta resistência à tração e elasticidade.

O algodão é a fibra têxtil mais antiga, cerca de 7000 anos atrás lhe garantiram uma grande evolução até os dias atuais, geralmente composta de celulose com longas cadeias de moléculas unidas pelo grupo hidróxidos (OH⁻). Estas longas cadeias estão dispostas nas fibras paralelamente formando uma espiral conferindo grande resistência à tração e estabilidade dimensional. Além disso, as presenças de grande número de hidróxidos são responsáveis pelas propriedades higroscópicas do algodão, facilidade de tingimento e lavagem em meio aquoso.

Os fios são materiais constituídos por fibras naturais, artificiais ou sintéticas. Na Figura 4 observa-se a estrutura de um tecido plano que são resultantes do entrelaçamento no processo de tecelagem por meio de um tear de dois conjuntos de fios que se cruzam em ângulo reto. Os fios dispostos no sentido horizontal são denominados de fios de "trama", os fios dispostos no sentido vertical são denominados de "urdume" e as bordas do tecido são as aureolas que são facilmente distinguíveis do resto do material. Geralmente eles são classificados conforme a matéria prima empregada (natural, sintética ou mista), a forma de entrelaçamento dos fios (tafetá, sarja e cetim), o número de fios por cm² que é a gramatura.

Figura 4 – Tecido Plano e Malha



Fonte: <http://panosparaofuturo.blogspot.com.br/>(2012).

O tecido de malha é formado pela interpenetração de laçadas ou malhas que se apoiam lateralmente e verticalmente, proveniente de um ou mais fios, subdividem-se em: por trama que são tecidos de malha obtidos a partir do entrelaçamento de um único fio, podendo resultar num tecido aberto ou circular, e por urdume que são tecidos de malha obtidos a partir de um ou mais conjuntos de fios, colocados lado a lado. Devido a essas laçadas de formato senoidal que se sustentam entre si e são livres para moverem-se umas sobre as outras, essa propriedade garante a flexibilidade e capacidade de modelagem dos artigos de malhas.

2.1.3 Acabamento Têxtil

Das etapas de processamento têxtil a penúltima etapa é o acabamento têxtil, a que ocorre o beneficiamento, consiste no conjunto de operações físicas, químicas e bioquímicas até o tecido tornar-se apto para manufatura e confecção, geralmente esta etapa pode ser dividida em acabamento primário, secundário e terciário.

O acabamento primário corresponde à preparação do tecido para o tingimento e estampagem. Neste processo elimina-se todos os óleos e aditivos que foram utilizados no processo de tecelagem para obtenção de um tecido limpo, hidrofílico e com bom aspecto. (GONÇALVES, 2007).

No acabamento secundário ocorrem os processos de tingimento e estampagem do tecido, e no terciário tem processos finais que dão características como aspecto físico, textura, brilho, maciez, caimento, resistência e estabilidade.

A hidroextração é a operação de pré-secagem do tecido, nesta etapa o tecido passa por relaxamento, encolhimento têxtil, promovido pelo processo de remoção de água. Finalmente o tecido passa pela fase de enobrecimento final, responsável pelo melhoramento dos todos aspectos em geral.

Na última etapa, a confecção, 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 interior de automóveis, embalagens, entre outros). Os processos envolvidos nessa etapa são o desenho, a confecção de moldes, gradeamento, encaixe, corte e costura (MALDONALDO, 2005).

2.1.4 Secagem Têxtil

O processo de secagem de tecidos na indústria têxtil, geralmente, baseia-se em secadores que podem ser condutivos ou convectivos, os quais utilizam vapor, gás natural e até mesmo infravermelho. Este meio requer um tempo consideravelmente grande e um alto consumo de energia. Atualmente, novas tecnologias são empregadas, as quais utilizam eletricidade no princípio de secagem tais como, radio frequência e microondas tornando o processo de secagem com um menor tempo e consumo de energia (FRANCESCHI et al., 2010).

As etapas de remoção de umidade são extremamente importantes na definição das propriedades e das características finais dos diversos tipos de padronagem e composição do tecido, no processo industrial de beneficiamento têxtil (ALBUQUERQUE, 2011).

De acordo com Sousa (2003), a secagem pode ser definida, do ponto de vista físico, como um balanço entre a transferência de calor da corrente de ar para a superfície do tecido, e a transferência de umidade da superfície do tecido para a corrente de ar. A água se movimenta, no momento da secagem, de zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade, de maneira que a parte externa fica mais seca que a interior.

Pode-se encontrar na indústria têxtil a secagem por condução que tem o melhor rendimento energético, pois confere melhor contato ao tecido e a superfície aquecida utilizando para tal secador de cilindros, porém provoca a migração do corante e de alguns produtos de acabamento, afeta a superfície do tecido e pode provocar um encolhimento na direção dos fios de trama (transversal). Por isto, esse tipo de secagem é usado apenas nos processos intermediários.

Na secagem por convecção, o tecido recebe uma corrente de ar aquecido. A tensão, neste tipo de secador é menor, se comparada à secagem de cilindros e com isso diminui a possibilidade de migração de corantes e produtos acabados.

Um secador que confere as dimensões de largura e comprimento ao tecido, é a rama, sendo o mais utilizado por permitir que o calor residual na saída dele seja recuperado utilizando-se trocadores de calor no processo. O maior inconveniente deste tipo de secador é o espaço ocupado.

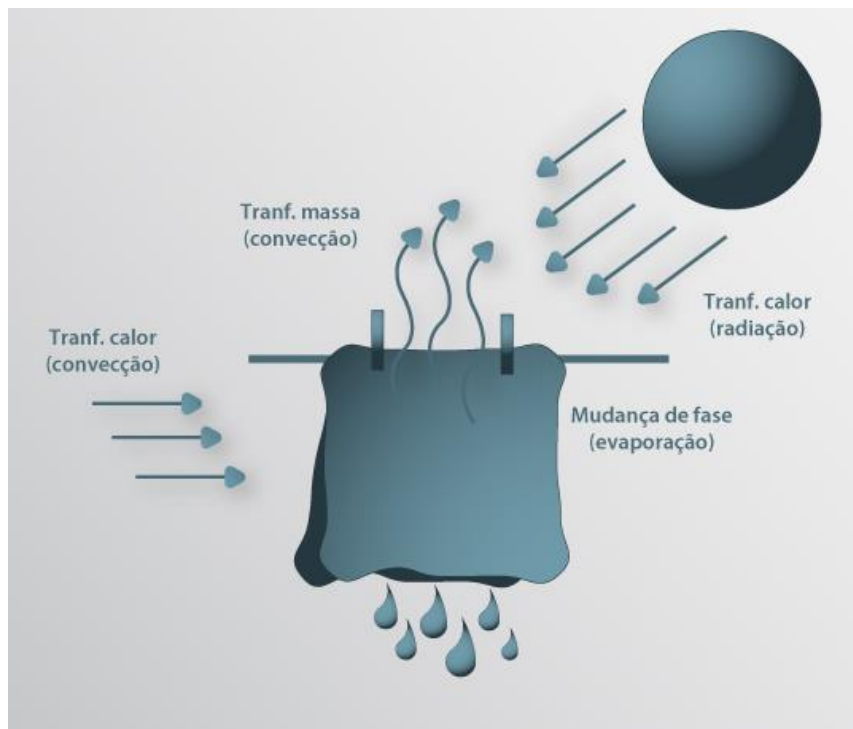
Nos secadores por radiação, a onda mais utilizada é o infravermelho, apesar de ter suas restrições, por apresentar perigo no que se refere a queima do tecido, por isso somente é utilizado no processo de pré-secagem, e o secador de tambor perfurado executa uma secagem mista, ou seja, por condução e convecção.

Uma combinação de secagem por microondas e secagem convectiva pode fornecer maiores taxas de secagem, e ser mais eficiente em tecidos mais porosos. O tamanho dos poros e do diâmetro das fibras tem um impacto significativo nos processos de secagem (LI e ZHU, 2003).

2.1.5 Transferência de calor em meios porosos

O mecanismo de transferência de calor em fibras têxteis é um fenômeno complexo envolvendo três processos condução, convecção e radiação. Cada processo da Figura 5 pode ser analisado separadamente e tem as suas relações matemáticas específicas, mas geralmente o mais significativo são os processos de condução e convecção para os tecidos.

Figura 5 - Processos de secagem da roupa com transferência de calor e massa.



Fonte: <http://labvirtual.eq.uc.pt/>

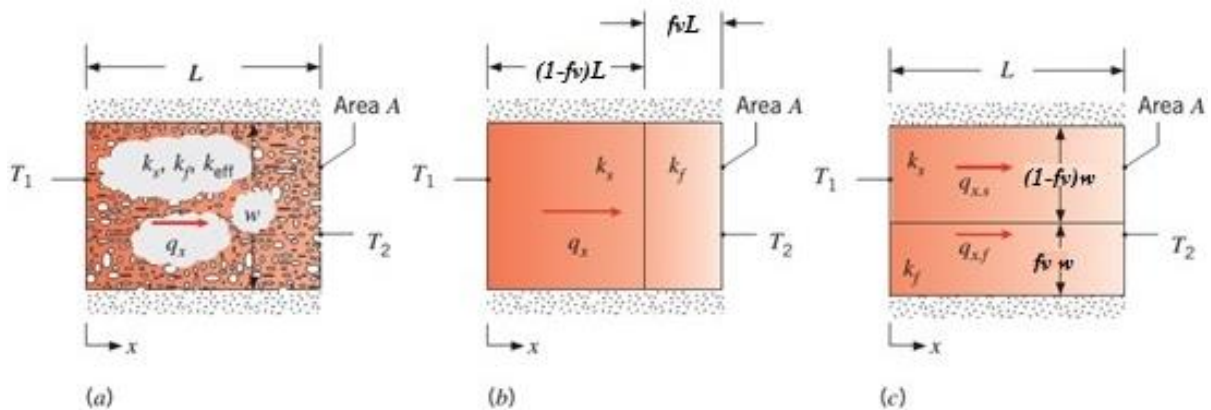
Na Figura 5, tem-se o movimento de vapor de água através dos tecidos porosos devido às diferenças de concentração, logo o processo de transferência de calor está ligado ao processo de transferência de massa com mudança de fase, tais como difusão molecular, absorção de umidade e evaporação.

Basicamente, a condução depende da transferência de energia entre moléculas dentro de um fluido ou sólido poroso, a convecção é devido ao movimento do fluido dentro de um meio poroso, e a radiação é uma forma de transmissão de energia eletromagnética independente de quaisquer processos. No entanto, os três processos dependem da variação de temperatura para que transferência de energia ocorra.

O mecanismo de transferência de calor em meios porosos inclui a condução no meio sólido das fibras têxteis juntamente com ar aprisionado entre elas, radiação e convecção. Simultaneamente ocorre transferência de massa com a difusão do vapor nos espaços vazios do tecido e absorção de umidade pelas fibras têxteis (INCROPERA, 2014).

A condutividade térmica para meios porosos será a combinação condutividade térmica das fibras têxteis com o ar aprisionado entre as fibras e a umidade retida ou ligada. Então um meio poroso é dito saturado quando o fluido for um gás ou um líquido, em contrapartida todas fases coexistem em um meio poroso insaturado, considere um meio poroso saturado que é submetido a temperaturas superficiais T_1 em $x = 0$ e T_2 em $x = L$, conforme mostrado na Figura 6 (a).

Figura 6 - Meio poroso (a) O meio e suas propriedades. (b) Representação em resistências térmicas em série. (c) Representação em resistências térmicas em paralelo.



Fonte: Adaptado Incropera (2014).

Após as condições de regime estacionários serem atingidas e se $T_1 > T_2$, a taxa de transferência de calor pode ser representada pela Equação (1):

$$q_x = \frac{k_{ef} A}{L} (T_1 - T_2) \quad (1)$$

Sendo k_{ef} uma condutividade térmica efetiva, lembrando que a Equação (1) será válida se a movimentação do fluido e a transferência de calor por radiação no interior do meio forem

desprezíveis. Para Hes et al. (2001), existem vários métodos de determinação da condutividade em tecidos, um exemplo é a placa aquecida (placa/tecido) ou placa aquecida com placa fria (placa/tecido/placa). Foram construídos dois equipamentos comerciais que possuem resultados confiáveis: o Thermolabo desenvolvido por Kawabata (1983) apud Hes (2001), e um aparelho chamado Alambeta construído por Hes e Dolezal (1989) apud Hes (2001).

A condutividade térmica efetiva varia com a porosidade ou fração de vazios do tecido chamado de fv (*fração volumétrica*), que é razão entre o volume de água que está retida no volume total (matriz sólido mais fluido) que depende da geometria detalhada da fase sólido, como distribuição de tamanhos e a forma de empacotamento das partículas individuais também influenciam no valor de k_{ef} , para facilitar o determinação da condutividade térmica pode ser enquadrado como paredes compostas Figuras 6(b) e 6(c), o meio é modelado como equivalente a uma parede composto em série constituída por uma região fluida de comprimento fvL e uma região sólida de comprimento $(1-fv)L$. Aplicando a Lei de Fourier e desprezando a convecção ($h_1 = h_2 = 0$) tem-se que a Equação (2):

$$q_x = \frac{A\Delta T}{(1-fv)L/k_s + fvL/k_f} \quad (2)$$

Igualando as Equações (1) e (2), obtém-se a Equação (3):

$$k_{ef,\min} = \frac{1}{(1-fv)/k_s + fv/k_f} \quad (3)$$

Analogamente pode ser considerado uma parede composta da Figura 6(c) em paralelo por uma região fluida de largura $fv.w$ e região sólida de largura $(1-fv)w$ e combinando com a Equação (1) obtém-se:

$$k_{ef,\max} = fv k_f + (1-fv)k_s \quad (4)$$

Enquanto as duas Equações (3) e (4) fornecem valores de mínimos e máximos possíveis para k_{ef} para sistemas compostos, Maxwell primeiramente desenvolveu uma expressão para condutividade elétrica efetiva de uma matriz sólida em inclusões uniformemente distribuídas de esferas não condutoras, uma analogia a esta equação determinou a equação condutividade térmica efetiva de um meio poroso saturado constituído por uma fase sólida interconectada no interior da qual há uma distribuição diluída de regiões esféricas de fluidos (INCROPERA, 2014). O resultado de Maxwell é a Equação (5):

$$k_{ef,\max} = \left[\frac{k_f + k_s - 2fv(k_s - k_f)}{k_f + 2k_s + fv(k_s - k_f)} \right] k_s \quad (5)$$

Equação (5) é válida para frações volumétricas relativamente baixas da ordem de $f_v \leq 0,25$, um grande problema pode ser o aprisionamento do ar além de água entre as fibras têxteis que infelizmente não existe um método confiável para mensurar o volume de ar entre as fibras têxteis.

Então para esta pesquisa considerou-se o tecido como um volume de cálculo composto de ar, água e fibras têxteis conforme a Figura 7, quando imerso totalmente em água, todas lacunas ocupadas pelo ar seriam preenchidas de água, com esta hipótese pode se inicialmente determina a fração volumétrica de água e fibras têxteis. Posteriormente durante a secagem com a evaporação da água os espaços vazios seriam lentamente substituindo pelo ar novamente, também se notou que as frações volumétricas eram maiores que $f_v > 0,25$, logo o uso da Equação (5) não representaria um modelo mais adequado, então adotou-se a Equação (6):

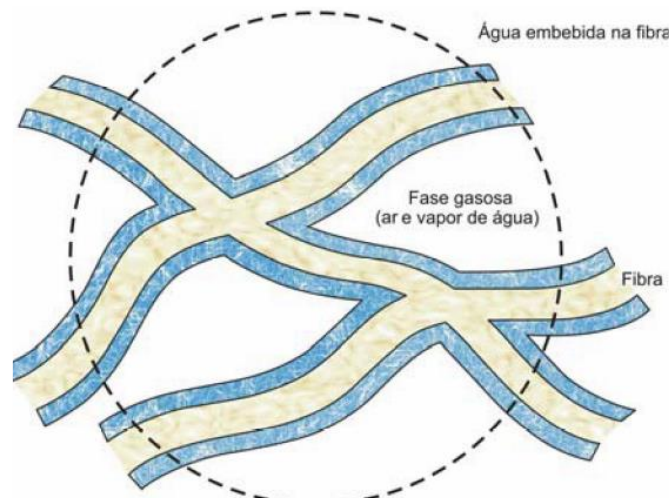
$$f_{v_{ar}}(t) + f_{v_{\acute{a}gua}}(t) + f_{v_{tecido}} = 1 \quad (6)$$

A Equação (6) utilizada nos experimentos de Santos (2013), aonde considerou-se que o fluido suporte satura o meio poroso no início do processo de secagem, ou seja, todo meio poroso do tecido é preenchido pela água. Podemos encontrar a Equação (7) para condutividade térmica conhecendo as frações parciais do tecido, apresentada como:

$$k_{ef} = f_{v_{ar}}(t)k_{ar} + f_{v_{\acute{a}gua}}(t)k_{\acute{a}gua} + f_{v_{tec}}k_{tec} \quad (7)$$

As equações e etapas utilizadas para determinação da fração volumétrica do tecido estão apresentadas detalhadamente no Anexo A1 deste trabalho.

Figura 7 – Principais propriedades do volume de cálculo



Fonte: Correia (2005).

Em 1997, Gibson e Charmchi obtiveram valores aproximados para condutividade térmica das fibras têxteis de poliéster e de algodão por meio de um experimento denominado de Célula Dinâmicas de Umidade e Permeabilidade (DMPC – Dynamic Moisture Permeation Cell), que normalmente obtém propriedades de difusão e convecção em regime permanente, e tinha a possibilidade de gravar as variações temperaturas e concentração de água transientes nos experimentos, fato este, permitiu-lhe realizar simulação em regime transiente.

Na Tabela 1 são apresentados os valores para condutividade térmica e capacidade calorífica obtidos nesses experimentos, tais quais são utilizados em diversos estudos na atualidade sobre secagem em materiais têxteis.

Tabela 1 - Propriedades térmicas das fibras têxteis.

| Composição | Espessura m | Capacidade Calorífica J/kg K | Condutividade Térmica W/mK |
|-------------------|------------------------------|---|---|
| Lã | $6,43 \times 10^{-4}$ | 1360 | 0,20 |
| Seda | $1,35 \times 10^{-4}$ | 1380 | 0,20 |
| Algodão | $3,84 \times 10^{-4}$ | 1210 | 0,16 |
| Poliamida | $8,61 \times 10^{-4}$ | 1430 | 0,20 |
| Poliéster | $5,89 \times 10^{-4}$ | 340 | 0,14 |

Fonte: GIBSON E CHARMCHI (1997).

2.1.6 Transferência de massa em meios porosos

De uma forma geral a transferência de massa pode ser definida como o movimento geral da matéria. Em um sentido mais restrito a transferência de massa pode ser definida como o movimento de um componente (A, B) em outro componente ou em um grupo de componentes, em razão de uma diferença de concentração. Esta transferência pode ocorrer por difusão molecular ou convecção (ÇENGEL, 2012, p798).

Segundo Neves et al (2015), um tecido deve ser modelado como material poroso feito de fibras, água contida nas fibras e ar em frações volumétricas, de um ponto de vista um aumento de retenção de água nas fibras diminui a fração volumétrica ocupada pelo ar, assim diminuindo a resistência térmica do tecido. Muitos estudos foram realizados negligenciando a presença de água nas fibras, diminuindo a precisão dos resultados. Neves et al (2015) no seu

modelo atingiu uma melhor assertividade considerando a presença de água comprovada por meio de análise de sensibilidade de transferência de calor e massa comparando o tecido seco com o úmido.

Como mecanismos físicos similares estão associados à transferência de calor e massa, não é surpresa que as equações de taxa correspondentes possuam a mesma forma. A lei de Fick representa a taxa de difusão de massa sendo ela análoga à condução na transferência de calor regida pela Lei de Fourier. Para o tecido a concentração de umidade é função do tempo em regime transiente, expressando o fluxo de massa por unidade de área dependendo da concentração de água no tecido. A difusão de massa em regime transiente é representada pela Equação (8), em que X representa o conteúdo de umidade no tecido.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

Existem várias condições de contorno para solução da Equação (8), porém considera-se algumas hipóteses como: homogeneidade do tecido, dimensões constantes do tecido, difusividade mássica da água entre as fibras, a superfície do tecido que entra em equilíbrio com o ar externo quando a umidade relativa do tecido torna-se igual a umidade relativa do ambiente.

Durante a secagem, para que haja a evaporação de água da superfície do material para o ambiente, a água deve ser transportada do interior do sólido até a superfície. Os mecanismos mais relevantes durante o processo são:

- Difusão líquida que ocorre devido à existência do gradiente de concentração;
- Difusão de vapor que ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;
- Escoamento de líquido e de vapor que ocorrem devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e alta temperatura. Todas estas considerações, tais como, conteúdo inicial de umidade do material;
- Conteúdo final de umidade que o material pode chegar (umidade de equilíbrio);
- O modo pelo qual a água está relacionada com a estrutura do sólido e como o transporte da água é feito do interior à superfície do sólido durante a secagem que servem para fundamentar o fenômeno de secagem.

A expressão matemática da teoria difusional é feita por meio de um balanço de massa que resulta na segunda lei de Fick, mostrada na Equação (8), considerando um sistema unidimensional e em coordenadas cartesianas tem-se a Equação (9):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \left(\frac{\partial X}{\partial x} \right) \right] \quad (9)$$

Em que t é o tempo, x é a distância no sólido e D é o coeficiente de difusão do líquido através do sólido. A solução da Equação (9) é obtida quando a condição inicial e as condições de contorno das Equações (10), (11) e (12) são estabelecidas. Algumas hipóteses podem ser consideradas:

- O tecido é homogêneo;
- As dimensões do tecido permanecem constantes (com espessura l);
- O coeficiente de difusão é considerado constante;
- A superfície do sólido entra imediatamente em equilíbrio com o meio de secagem;
- A umidade limite é a umidade de equilíbrio do material X_c .

Com a condição inicial e as condições de contorno conforme são apresentadas pelas Equações (9), (10) e (11):

$$X(x,0) = X_0, \text{ para } 0 < x < l \quad (10)$$

$$X(0,t) = X_c, \text{ para } t > 0 \quad (11)$$

$$X(L,t) = X_c, \text{ para } t > 0 \quad (12)$$

Levando em conta as hipóteses apresentadas, a solução analítica da equação diferencial apresentada por Crank (1975) é dada pela Equação (13):

$$\frac{X - X_c}{X_0 - X_c} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{e^{\left[-D \frac{(2j+1)^2 \pi^2 t}{l^2} \right]}}{(2j+1)^2} \quad (13)$$

O modelo de difusão molecular despreza os efeitos da transferência de calor devido ao movimento de umidade do sólido que 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 (SANTOS, 2013).

A teoria capilar é o movimento do líquido em consequência das forças resultantes das diferenças entre a pressão hidrostática e os efeitos da tensão interfacial em sólidos granulados ou estrutura porosas.

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).

As propriedades de difusividade mássica de água nos tecidos também foram determinadas por Gibson e Charmchi (1997) no método DMPC (Dynamic Moisture Permeation Cell), os dados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do transporte de massa em fibras têxteis.

| Composição | Espessura m | Difusividade Mássica m²/s | Fator de Tortuosidade |
|-------------------|------------------------|---|----------------------------------|
| Lã | $6,43 \times 10^{-4}$ | $6,63 \times 10^{-6}$ | 0,20 |
| Seda | $1,35 \times 10^{-4}$ | $4,09 \times 10^{-6}$ | 0,20 |
| Algodão | $3,84 \times 10^{-4}$ | $7,60 \times 10^{-6}$ | 0,16 |
| Poliamida | $8,61 \times 10^{-4}$ | $8,87 \times 10^{-6}$ | 0,20 |
| Poliéster | $5,89 \times 10^{-4}$ | $1,19 \times 10^{-5}$ | 0,14 |

Fonte: GIBSON E CHARMCHI (1997).

O fator de tortuosidade é comumente utilizada para descrever a difusão em meios porosos, sendo uma propriedade de se curvar sendo tortuoso ou torcido. Matematicamente é razão entre arco – corda (GRISAN et al., 2003).

Outras teorias 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). Essas teorias ocorrem simultaneamente e ainda não há uma relação teórica que generalize todos os casos de secagem (ALONSO, 2001).

2.1.7 Determinação dos coeficientes de convecção de calor e massa

Para determinar o coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c) durante a secagem recorre-se aos conceitos de convecção natural. Primeiramente determinar-se o número

adimensional de Grashof que representa a razão das forças de empuxo para as forças viscosas que agem sobre o fluido, como segue na Equação (14):

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_e - T_\infty)L_c^3}{\mu^2} \quad (14)$$

Em que:

g - aceleração gravitacional, 9,81 m/s²

β - coeficiente de expansão volumétrica, 1/T_f em 1/K

T_e - temperatura externa do tecido (da superfície), °C

T_∞ - temperatura do ambiente, °C

L_c - comprimento característico da geometria, m

μ - viscosidade cinemática do ar, m²/s

A transferência de calor por convecção natural em uma superfície depende da geometria da superfície e de sua orientação. Depende também da variação da temperatura da superfície e das propriedades termofísicas do fluido envolvido durante a secagem (ÇENGEL, 2012, p525).

Das numerosas correlações de diversos níveis de complexidade e precisão declarada disponíveis na literatura para qualquer geometria dada, apresenta-se a seguir as que são mais conhecidas e largamente utilizadas como o número de Nusselt médio na convecção natural que toma a forma como na Equação (15):

$$Nu = \frac{h_c L_c}{k_{ar}} = C(Gr_L Pr)^n = C Ra_L^n \quad (15)$$

O número adimensional de Rayleigh Ra_L^n da Equação (16) é o produto do número de Grashof e Prandtl, que descreve a razão entre as forças de flutuação e o produto das difusividades térmicas e de quantidade de movimento, como segue:

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_e - T_\infty)L_c^3}{\mu^2} Pr = \frac{g\beta(T_e - T_\infty)L_c^3}{\mu\alpha} \quad (16)$$

Os valores de C e n da Equação (15) dependem da geometria da superfície e do regime de escoamento, que é caracterizado pela faixa do número de Rayleigh, para placa horizontal com a superfície superior exposta a convecção natural tem-se duas faixas do número de Rayleigh conforme as Equações (17) e (18):

$$10^4 < Ra_L < 10^7 \quad Nu = 0,54 Ra_L^{1/4} \quad (17)$$

$$10^7 < Ra_L < 10^{11} \quad Nu = 0,15 Ra_L^{1/3} \quad (18)$$

Assim que determinado o número adimensional de Rayleigh, é possível calcular o coeficiente convectivo de transferência de calor pela Equação (15) conhecendo o comprimento característico L_c e o k_{ar} sendo a condutividade térmica do ar.

O coeficiente convectivo de massa do ar (h_m) pode ser determinado pela analogia de Chilton-Colburn como na Equação (19):

$$\frac{h_c}{h_m} = \rho_{ar} C_{par} Le^{2/3} \quad (19)$$

O número adimensional de Lewis (Le), Equação (20), caracteriza os escoamentos dos líquidos nos quais há processos simultâneos de difusão e convecção de calor e massa, sendo a relação entre difusividade térmica e difusividade da massa, representada respectivamente pelos números adimensionais Prandtl (convecção do calor) e Schmidt (convecção da massa) (ÇENGEL, 2012, p836).

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (20)$$

Por sua importância prática, a difusão de vapor de água na atmosfera tem sido tema de vários estudos, a relação de Marrero e Mason (1972) apud Çengel (2012) representa a difusividade do vapor de água no ar atmosférico conforme a Equação (21):

$$D_{H_2O-Ar} = 1,87 \times 10^{-10} \frac{T_{amb}^{2,072}}{P} \quad (21)$$

Em que T é a temperatura do ambiente em Kelvin, e P é a pressão atmosférica em atm. Normalmente algumas literaturas consideram o número adimensional de $Le = 1$ para convecção natural simplificando a Equação (19) para obtenção do coeficiente convectivo da massa. Entretanto neste estudo, devido ao tamanho da amostra e a rigor do processo, opta-se por utilizar os valores para difusividade térmica e da massa empíricos com a finalidade de obter melhores aproximações.

2.1.8 Aspectos básicos da Secagem

A secagem de sólidos é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nos mais diversos processos usados em indústrias agrícolas, cerâmicas, químicas, alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose, mineral e de polímeros. É também uma das operações mais complexas e menos entendida, devido à dificuldade e deficiência da descrição matemática dos fenômenos envolvidos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento

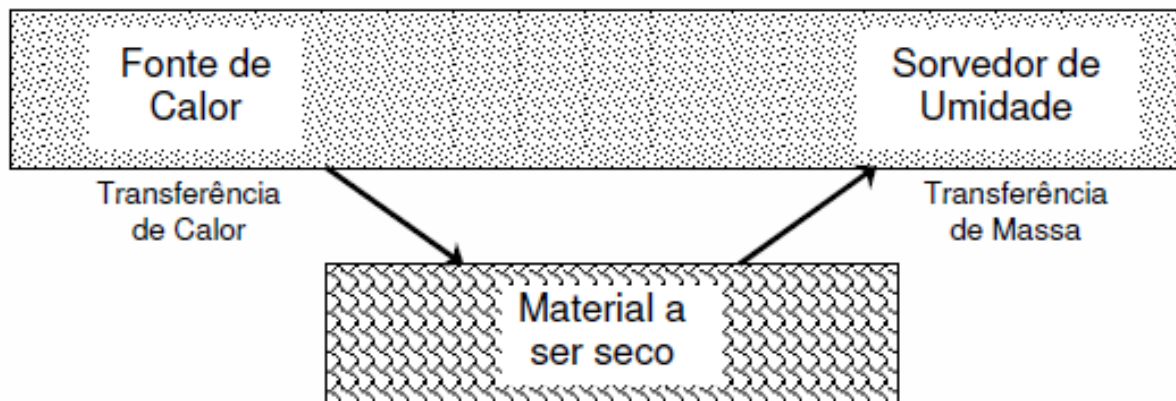
dos sólidos, baseado em extensiva observação experimental e experiência operacional (MENON; MUJUMDAR, 1987).

A secagem é a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido. E a quantidade de água presente no sólido é chamada de umidade. Esta definição de secagem exclui a concentração de uma solução e a remoção mecânica de água por filtragem ou centrifugação. Exclui também métodos térmicos relacionados à destilação (PARK et al., 2007).

A secagem é um dos processos mais utilizados para melhorar a estabilidade do tecido, pois diminui a atividade de água do produto, reduz a atividade microbiana e minimiza as mudanças físicas e químicas que ocorrem durante o armazenamento (MIHOUBI et al., 2009).

Na Figura 8 mostra-se o diagrama dos processos 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 evaporação. 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 8 – Diagrama dos processos de secagem



Fonte: Alonso (2001).

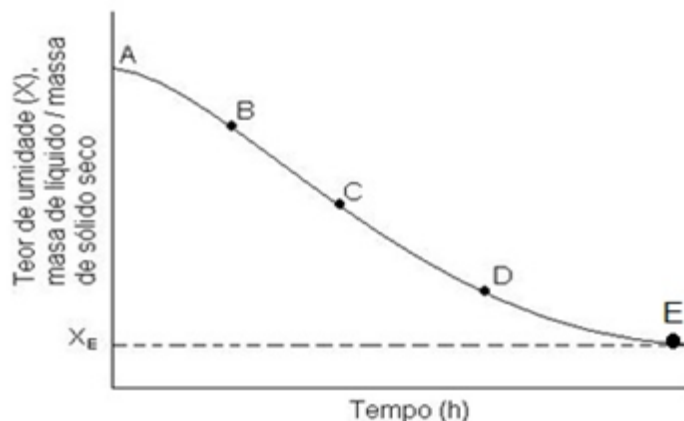
A secagem de um sólido úmido, é feita mediante passagem de uma corrente de ar atmosférico aquecido a uma temperatura e umidade fixas, por uma combinação de transferências de calor (para evaporar o líquido) e massa (para remover a umidade de dentro do sólido), reduz a quantidade de água presente no corpo-sólido (FOUST, 1982).

Dessa forma, observa-se que dois fenômenos ocorrem simultaneamente quando um sólido úmido é submetido à secagem (PARK et al., 2007):

- Transferência de energia (calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial. Esta transferência depende de condições externas de temperatura, umidade do ar, fluxo e direção de ar, área de exposição do sólido (forma física) e pressão.
- Transferência de massa (umidade) do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. O movimento interno da umidade no material sólido é função da natureza física do sólido, sua temperatura e conteúdo de umidade.

Esse processo manifesta-se sob um comportamento típico, que pode ser observado na curva de secagem. Cada sólido possui uma curva característica (PARK et al., 2007). Os sólidos, em geral, possuem uma curva de secagem bem definida, decrescente ao longo do período da secagem, como o ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Curva típica de secagem em condições constantes de secagem; teor de umidade em função do tempo



Fonte: Foust (1982).

Na interpretação do gráfico da Figura 9, tem-se:

Trecho AB: A temperatura do sólido é menor que a temperatura ambiente. O calor transferido do ar para o sólido é maior do que o calor retirado do sólido para evaporar água;

Trecho BC: Período de taxa constante. A temperatura do sólido é igual a temperatura ambiente. É caracterizado pela velocidade de secagem ser inalterada com a diminuição do teor de umidade. O calor é transferido para a superfície de secagem do sólido basicamente por convecção.

Em linhas gerais, a temperatura do sólido e a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem às condições de regime permanente. Nesse regime, as temperaturas no interior do sólido tendem a serem iguais à temperatura de bulbo úmido do gás, permanecendo estáveis e a taxa de secagem também permanece constante (FOUST, 1982).

Trecho CDE: período de taxa decrescente. Inicia quando a umidade do sólido atinge um valor determinado chamado umidade crítica. Este trecho pode ser dividido em duas zonas: zona de superfície de secagem não-saturada e zona em que o fluxo interno de água controla o processo. Além desse ponto, a temperatura da superfície eleva-se e a taxa de secagem cai rapidamente (FOUST, 1982).

X_E (Ponto E): A taxa de secagem aproxima-se de zero, num certo teor de umidade de equilíbrio, que é o menor teor de umidade atingível no processo de secagem.

Para os trechos CD e DE tem-se:

Zona de superfície de secagem não-saturada (trecho CD): Segue-se imediatamente a umidade crítica. Neste estágio, a superfície do sólido apresenta áreas secas que se ampliam na proporção em que a secagem prossegue. Consequentemente a taxa de secagem diminui uma vez que a mesma é relativa a toda a área do sólido em contato com o ar. A evaporação ocorre na superfície do sólido e a resistência a difusão interna do líquido é pequena comparada com a resistência para remover o vapor da superfície. A temperatura do sólido aumenta, pois recebe do ar a mesma quantidade de calor que corresponderia ao período de taxa constante, sem, no entanto, ocorrer igual evaporação. Em outras palavras, parte da energia que era utilizada para a evaporação na fase anterior, acaba sendo utilizada para elevar a temperatura do sólido (FOUST, 1982).

Zona em que o fluxo interno de água controla a operação (Trecho DE): Caracteriza-se pelo fato de que o fluxo interno de água controla a taxa de secagem. Os fatores que influenciam a taxa de secagem são os mesmos que afetam a difusão da água através de sólidos. Observa-se que a umidade do ar não tem efeito na taxa de secagem, mostrando que esta depende da resistência a difusão da água. A medida que a quantidade de umidade do sólido diminui por causa da secagem, a velocidade da difusão interna da umidade decresce. A evaporação ocorre dentro da estrutura do sólido (FOUST, 1982).

2.1.9 Cinética da Secagem

A evolução das transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da secagem faz com esta operação seja delineada em curvas, denominadas de curva de evolução do teor de água do produto (X), curva de sua temperatura (T) e curva da velocidade de secagem (dX/dt), também chamada de taxa de secagem, ao longo do tempo, para um experimento utilizando ar de propriedades constantes (PARK et al., 2007).

Na Figura 10 observa-se três estágios na secagem, no primeiro estágio é a etapa do aquecimento do material, onde a energia absorvida pelo material é utilizada na forma de calor sensível. No segundo estágio ocorre o período de taxa constante, onde a transferência de massa e calor são equivalentes. Este período continua enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para suprir a perda por evaporação de água na superfície. (PARK et al., 2007).

A curva (a) da Figura 10 representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (conteúdo de umidade do produto, $X = X_{BS}$, em relação à evolução do tempo de secagem t), isto é, é a curva obtida pesando o produto durante a operação numa determinada condição de secagem (PARK et al., 2007).

A curva (b) da Figura 10 representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, dX/dt em relação à evolução do tempo t), isto é, a curva obtida diferenciando a curva (a) (PARK et al., 2007).

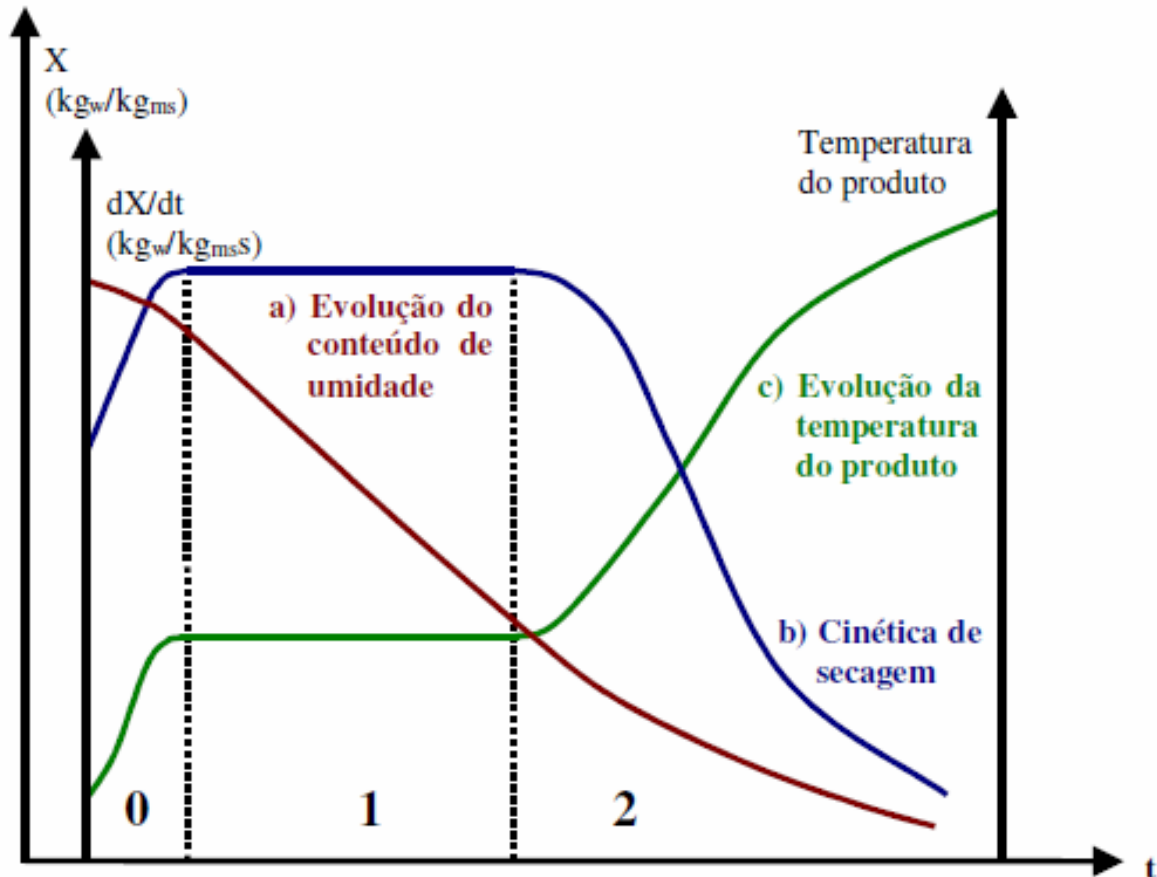
A curva de velocidade de secagem resulta da derivação da curva de secagem em relação à quantidade de umidade, e pode ser dividida em período de taxa constante de secagem e período de taxa decrescente de secagem, verificam-se os dois períodos de secagem:

Período de taxa constante de secagem: é o representado pelo segmento “1” da Figura 10, no período de taxa constante, a superfície do material é mantida num nível de umidade tal que a secagem ocorre como se fosse água evaporando. Se o sólido for poroso, a maioria da água evaporada no período de taxa constante é proveniente do interior do sólido. Este período só continua desde que a água seja provida à superfície tão rápido quanto é evaporada (PARK et al., 2007).

Período de taxa decrescente de Secagem: Este período compreende o segmento “2” da Figura 10. Quando a quantidade de água na superfície do produto começa a diminuir há o abaixamento progressivo da pressão parcial de vapor da água na superfície e, conseqüentemente, a velocidade de secagem também diminui, até que, ao final desse período,

o produto está em equilíbrio com o ar (igualdade de pressões parciais de vapor) e a velocidade de secagem torna-se nula (PARK et al., 2007).

Figura 10 - Comportamento das curvas de secagem.



Fonte: Park, et al. (2007).

A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto, T em relação à evolução do tempo t), isto é, é a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem (PARK et al., 2007).

Existem várias técnicas de secagem. Dentre estas a mais convencional é a secagem natural convectiva e é considerada como um processo simultâneo de transferência de calor e massa, onde a água é transferida por difusão do interior do material para a interface ar-sólido, e da interface para a corrente de ar por convecção. (ARRIECHE, 2003).

A secagem ocorre pela evaporação do líquido presente na fase sólida quando é aquecido por convecção, condução ou radiação. Mesmo a secagem convectiva sendo o método mais convencional, apresenta um consumo de energia bastante expressivo devido aos longos tempos de secagem são requeridos, por causa das baixas condutividades térmicas dos materiais durante

o período de taxa decrescente, que dificultam a transferência de calor. Outros métodos de secagem foram desenvolvidos que podem ser usados em conjunto com a secagem por convecção ou de forma independente (MOTÉVALI et al., 2011).

Na Tabela 3 estão representadas as principais equações que descrevem a cinética de secagem em camada fina.

Tabela 3 – Modelos de cinética de secagem para camada fina.

| Modelo | Equações | Referência |
|---|--|------------------------------|
| Motta Lima | $\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} = \exp\left(-k_1 \frac{N_c}{X_0}\right)^{n_1}$ | Motta Lima (1999) |
| Lewis | $\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} = \exp(-kt)$ | Mancini (1996) |
| Difusivo | $\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{6}{(j\pi)^2} \exp\left[-(j\pi)^2 \frac{D_{eff}}{R^2} t\right]$ | Barrozo (1995) |
| Brooker | $\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} = C \exp(-Kt)$ $K = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$ | Brooker (1974) |
| Overhults | $\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} = \exp[-(Kt)^n]$ | Overhults (1973) |
| Henderson – Henderson | $\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} = C \left[\exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right]$ $K = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$ | Henderson – Henderson (1968) |
| Page | $\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} = \exp(-Kt^n)$ $K = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$ | Page (1949) |

Fonte: Autor.

2.1.10 Fatores Externos

Os fatores externos 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 de água, e do processo que ele passa na mudança de temperatura ou de conteúdo de vapor de água na mistura (BRITTO, 2010).

O cálculo das propriedades do ar utilizado no processo de secagem foi realizado por meio das equações psicrométricas apresentadas em ASHRAE (2009). A umidade do ar é um importante parâmetro para a secagem, pois influencia diretamente na transferência de umidade do sólido para o meio externo.

A umidade absoluta é a razão entre a massa de vapor de água por unidade de massa de ar seco presente no ambiente, de acordo com a Equação (22):

$$Y = \frac{m_v}{m_s} \quad (22)$$

Sendo m_v a massa de vapor de água e m_s a massa de ar seco, 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.

A umidade relativa é a razão entre a fração molar de vapor de água no ar, considerando o comportamento da mistura de gases perfeitos, a umidade relativa pode ser calculada como sendo a razão entre a pressão parcial do vapor de água no ar (p_v) e a pressão do vapor saturado no ar e na mesma temperatura (p_{sat}) conforme a Equação (23):

$$UR = \frac{p_v}{p_{sat}} \quad (23)$$

A pressão do vapor saturado no ar (Pa) pode ser determinada pela relação empírica de Tetens (1930), utilizando a temperatura (K), pela Equação (24):

$$p_{sat}(T) = 610,8e^{\left[\frac{(17,3T-4725,5)}{(T-35,85)}\right]} \quad (24)$$

Outra forma de determinar a umidade absoluta do ar, é pela Equação (25) conhecendo a umidade relativa, com a pressão de saturação do vapor de água e pressão atmosférica em Pa.

$$Y = 0,622 \frac{UR p_{sat}}{p_{atm} - UR p_{sat}} \quad (25)$$

2.1.11 Fatores Internos

O teor de umidade na base seca é a relação entre a massa de água presente e a massa seca do tecido, conforme a Equação (26):

$$X_{bs} = \frac{m_a}{m_s} \quad (26)$$

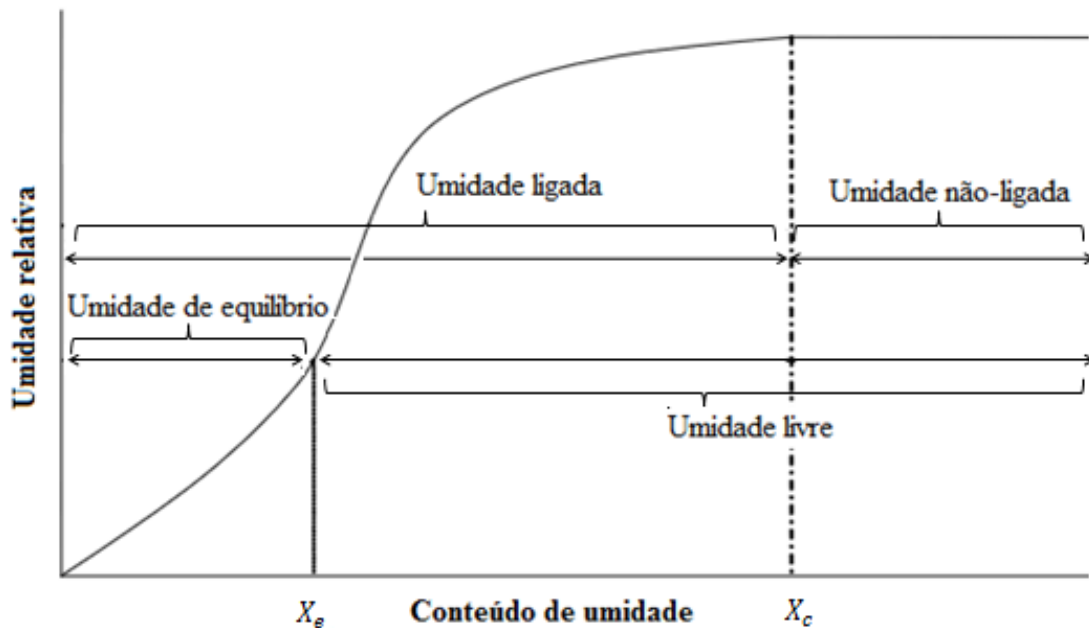
Na base úmida é a relação de água contida (umidade) com a massa total do produto, conforme a Equação (27):

$$X_{bu} = \frac{m_a}{m_t} \quad (27)$$

O tecido é um meio poroso higroscópico, pois certa quantidade de líquido permanece fisicamente vinculada, como umidade ligada nas fibras têxteis, refere-se à água contida no sólido que exerce uma pressão de vapor no equilíbrio menor que a do líquido puro a mesma temperatura. E a umidade não ligada refere-se à água contida no sólido que exerce pressão de vapor de equilíbrio igual à 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). No gráfico da Figura 11 define-se os tipos de umidades envolvido durante o processo de secagem dos materiais têxteis (sólidos porosos).

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. Esta variável depende essencialmente da natureza do material, temperatura e a umidade do ar. A determinação da umidade de equilíbrio é importante para 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.

Figura 11 - Tipos de umidade



Fonte: Treybal (1980).

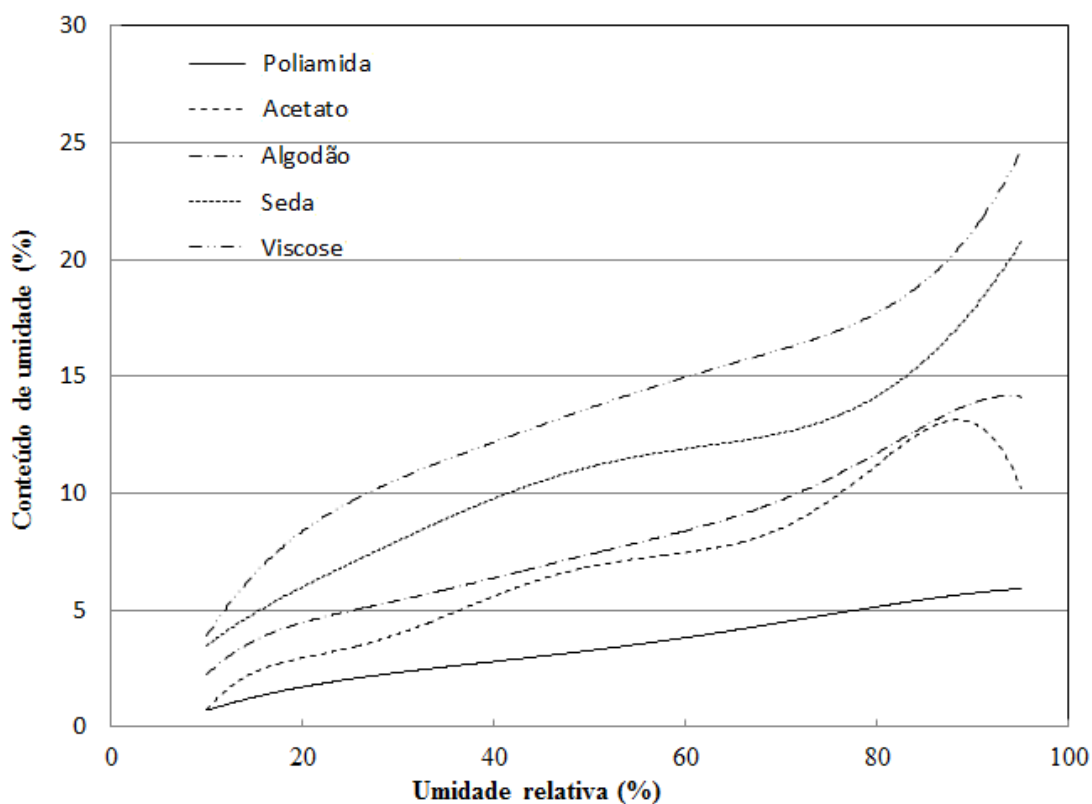
As isotermas de adsorção e dessorção de umidade são importantes para definir limites de desidratação do produto, estimar as mudanças do teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente e para definir os teores de água adequados ao equilíbrio. Além disso, as isotermas de equilíbrio higroscópico, pode-se determinar o requerimento de energia necessário ao processo de secagem.

A curva de uma isoterma se apresenta de duas formas: isoterma de adsorção, obtida quando o material seco é colocado sob presença de umidade relativa, medindo-se o aumento de massa devido à hidratação; agora a isoterma de dessorção é obtida quando o material umedecido é colocado sob as mesmas condições atmosféricas criadas para a adsorção, para medir a diminuição de massa e a diferença entre as duas isotermas é considerada como histerese.

No caso de sólidos porosos compostos por fibras higroscópicas, como o algodão, o comportamento de adsorção e dessorção da umidade é complexo, devido as interações da água com o material, a Figura 12 mostra as curvas de dessorção para umidade de alguns tipos de fibras têxteis.

Outro fator interno importante é a evaporação superficial que é controlada pela difusão do vapor na superfície do sólido para o meio de secagem através da camada de ar em contato com a superfície. Uma vez que a secagem envolve a transferência de massa entre as fases sólida e gasosa.

Figura 12 - Isoterma de dessorção da umidade de algumas fibras têxteis à 21°C.



Fonte: Mujumdar (2005).

O calor de dessorção fornece indicação do vínculo energético existente entre as moléculas de água e o material ao qual elas se encontram associadas. Também é definido termodinamicamente como a diferença entre a entalpia da água, na fase de vapor, e a entalpia da água líquida adsorvida no sólido, representando a quantidade de energia necessária para evaporar a água adsorvida na fase sólida do produto (JOHANN et al, 2010). Na Tabela 2 mostra-se a umidade de equilíbrio para alguns materiais têxteis.

Tabela 4 – Umidade de fibras têxteis para dessorção (UR = 60% e T = 21°C).

| Fibra | Umidade Absorvida (%) |
|------------------|------------------------------|
| Poliéster | 0,40 |
| Acetato | 7,81 |
| Algodão | 8,36 |
| Seda | 11,51 |
| Lã | 16,08 |

Fonte: Mujumdar (2005).

O método mais utilizado para determinar o calor de dessorção é aplicação da Equação (28) de Clausius-Clapeyron:

$$\frac{h_d}{R} = \left. \frac{\partial \ln p_v}{\partial (1/T)} \right|_{x_e} \quad (28)$$

Em que:

h_d - o calor de dessorção da água em kJ/kg;

R - constante universal dos gases;

p_v - pressão de vapor do material têxtil em Pa;

T - temperatura do ambiente em K

x_e - teor de umidade de equilíbrio em base seca (kg de massa de água por kg de massa seca).

É de suma importância, correta determinação do calor de dessorção para processos de secagem.

2.1.12 Análise Matemática do Fenômeno

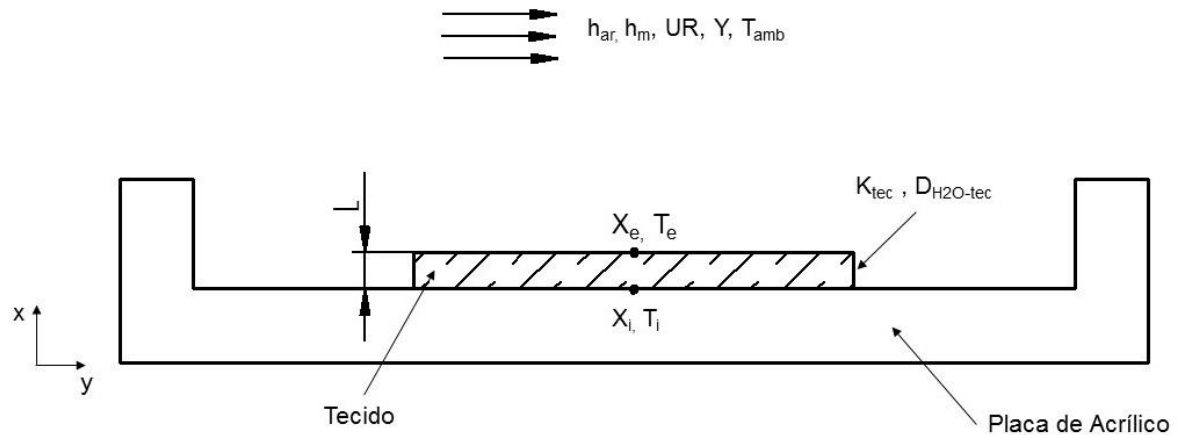
O método dos elementos finitos (MEF) é um procedimento numérico utilizado para resolução de sistemas de equações diferenciais parciais (EDP). O método consiste na divisão do domínio da solução em regiões de forma simples. Uma solução aproximada para a EDP pode, então, ser obtida para cada um desses elementos. 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 entre outros parâmetros (RAO, 2005).

O método numérico utilizado na solução é elementos finitos, que se baseia na subdivisão do meio em número suficiente de elementos de volume e, em seguida, na aplicação do balanço de energia em cada elemento. Isso é primeiramente feito pela seleção de pontos nodais (ou nós) em que as temperaturas devem ser determinadas e, em seguida, pela formação de elementos (ou volume de controle) em torno dos nós, desenhando linhas unindo os pontos médios entre os nós. (ÇENGEL, 2012, p302)

Na Figura 13 apresenta-se uma ilustração do volume de controle considerado.

Figura 13 - Esquema ilustrativo do sistema considerado



Fonte: Autor.

O problema de transferência de calor e massa no interior do tecido sob condições transientes é representado por uma equação diferencial parcial (EDP), ou seja, uma equação que contém derivadas parciais. Para o modelo matemático considerado, a conservação da energia se apresenta sob a forma da Equação (29) e a para conservação de massa temos a 2ª Lei de Fick Equação (30):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{ef} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho_{ef} C_{Pef} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (29)$$

$$D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = \frac{\partial X}{\partial t} + n_A \quad (30)$$

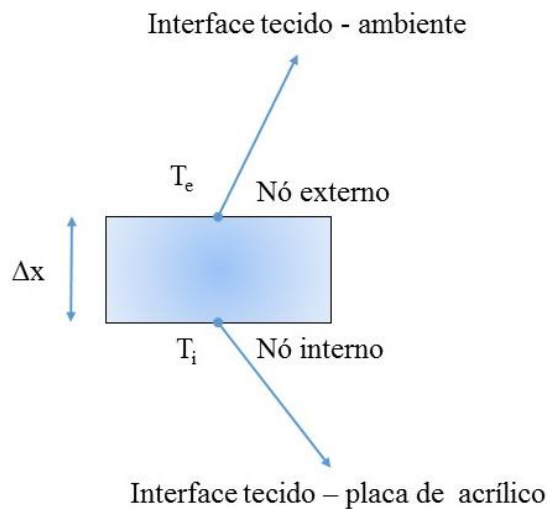
Em que ρ_{ef} é a densidade do tecido, C_{Pef} é a capacidade calorífica do tecido, T é a temperatura, D_{ef} é a difusividade mássica efetiva da água no tecido, X é o teor de umidade, \dot{q} é a geração interna de calor, n_A é a geração da espécie A na mistura, t é o tempo e x são as posições em coordenadas cartesianas usuais.

Em problemas transientes, no entanto, as temperaturas mudam com o passar do tempo, bem como a posição, e a solução por diferenças finitas de problemas transientes requer discretização no tempo e discretização no espaço (ÇENGEL, 2012, p322).

2.1.13 Discretização das Equações Diferenciais da Secagem

A malha para utilização do método das diferenças finitas é representada de maneira satisfatória pela própria espessura do tecido, sendo as fronteiras entre a placa de acrílico e o ambiente externo para cada tecido. Na Figura 14 apresentam-se os pontos nodais com os sensores de temperatura considerados no experimento.

Figura 14 – Pontos Nodais



Fonte: Autor.

O método utilizado na discretização do modelo é implícito na qual as temperaturas dos pontos nodais são resolvidas simultaneamente para cada passo de tempo, e não impõe nenhum limite para magnitude do passo de tempo, sendo incondicionalmente estável, portanto é permitido usar qualquer passo de tempo nesse método, naturalmente, quanto menor for o passo de tempo, melhor será a precisão da solução (ÇENGEL, 2012, p327).

Na Equação (31) apresenta-se o balanço de calor interface tecido – ambiente proveniente da Equação (29).

$$h_{ar}A(T_{\infty} - T_e^t) + k_{ef}A\left(\frac{T_i^t - T_e^t}{\Delta x}\right) + \dot{q}_x A \frac{\Delta x}{2} = \frac{\rho_{ef}AC_{p_{ef}} \cdot \Delta x(T_e^{t+1} - T_e^t)}{\Delta t} \quad (31)$$

Sendo que A é a área do tecido perpendicular ao fluxo de calor que pode ser simplificada na equação, temos \dot{q}_x como fluxo de geração interna de calor devido ao calor latente vaporização da água (W/m^3) na direção x , h_{ar} o coeficiente convectivo do ar ambiente (W/m^2K),

ρ_{ef} a densidade efetiva do tecido umedecido (kg/m^3), C_{Pef} o capacidade calorífica efetiva do tecido umedecido (J/kgK), Δx a espessura do tecido (m), k_{ef} a condutividade térmica efetiva do tecido umedecido (W/mK), T_∞ a temperatura do ambiente ($^\circ\text{C}$), T_e^{t+1} a temperatura no ponto nodal externo ao tecido no passo de tempo “t+1” ($^\circ\text{C}$), T_e^t a temperatura no ponto nodal externo ao tecido no passo de tempo “t” e Δt o intervalo de tempo (s). O terceiro termo da Equação (31) é definido por:

$$\dot{q}_x = \frac{\dot{m}_a (h_{fg} + h_d)}{\Delta V} \quad (32)$$

A geração interna de calor devido ao calor latente de vaporização da água no tecido pode ser calculada conforme a Equação (32). Em que, \dot{m}_a é a vazão mássica (kg/s), h_d a entalpia da água de sorção nas fibras do tecido (J/kg), h_{fg} o calor latente de vaporização da água (J/kg) e ΔV a variação volumétrica de água na mistura (m^3).

Segundo Neves et al (2015), o calor latente de vaporização da água (J/kg) em materiais têxteis pode ser determinado pela Equação (33) em função da temperatura (K):

$$h_{fg}(T) = 2792x10^6 - 160T - 3,43T^2 \quad (33)$$

De acordo com Neves et al (2015), a entalpia da água de desorção (J/kg) nos tecidos que representa a energia necessária para que ocorra o transporte das moléculas de água entre as fibras têxteis é dada pela Equação (34) em função da umidade relativa do ar:

$$h_d(UR) = 1,95x10^5 (1 - UR) \left(\frac{1}{0,2 + UR} + \frac{1}{1,05 - UR} \right) \quad (34)$$

Assumindo que $\phi = h_{fg} + h_d$, substituindo a geração de calor na Equação (31) e isolando a vazão mássica, tem-se:

$$\dot{m} = \frac{2\Delta V}{\phi} \left[\frac{\rho_{ef} C_{Pef}}{\Delta t} (T_e^{t+1} - T_e^t) - \frac{h_{ar}}{\Delta x} (T_\infty - T_e^t) - \frac{k_{ef}}{\Delta x^2} (T_i^t - T_e^t) \right] \quad (35)$$

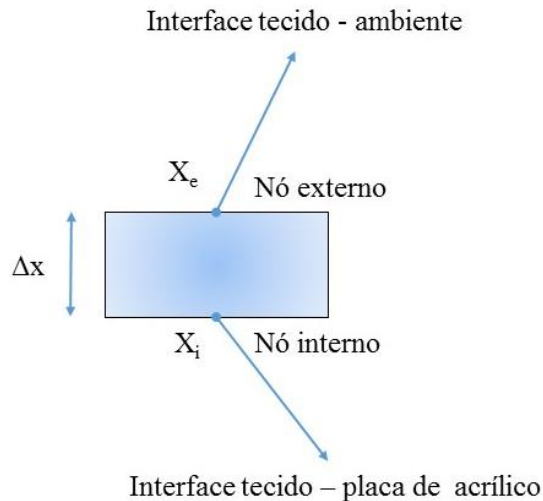
A Equação (36) representa aplicação da 2ª Lei de Fick para o transporte de massa através dos pontos nodais do tecido, o primeiro termo representa taxa de difusão entre as interfaces do tecido visualizadas na Figura 15, e o segundo termo representa a convecção de massa.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{2D_{H2O-Tec}}{\Delta x^2} (X_e - X_i) + \frac{h_m}{\Delta x} (Y - X_e) \quad (36)$$

Em que X_e e X_i correspondem ao teor de umidade na base seca (kg de água por kg de tecido) conforme os pontos nodais da Figura 14, Y é a concentração de vapor de água no ambiente (kg de vapor de água por kg de ar seco), ou seja, umidade absoluta obtido pela Equação (25), e h_m é o coeficiente de transferência convectiva de massa (m/s) calculado pela

relação de Chilton-Colburn na Equação (19), o termo $\frac{\partial X}{\partial t}$ é a variação do teor de umidade na base seca do tecido (1/s).

Figura 15 - Pontos nodais para o teor de umidade



Fonte: Autor.

2.2 MATERIAIS

Neste item serão apresentados os materiais, equipamentos e periféricos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

- a) Microcontrolador Arduino Mega 2560 com suporte de entrada/saída embutido, uma linguagem de programação padrão. A placa Arduino Mega 2560, baseada no microcontrolador ATmega 2560, utilizada nos experimentos através dela será realizada a aquisição de dados dos sensores de temperatura monitorados pelo Matlab em tempo real.
- b) Sensores de temperatura analógicos LM35DZ da Texas Instruments apresenta saída de tensão linear, tendo uma saída de um sinal de 10 mV para cada grau Celsius de temperatura, tolerância de $\pm 0,5$ °C, faixa de operação de -55 °C até 150 °C;
- c) Placas de acrílicos transparentes medindo 3 mm de espessura com 75x75 mm para auxiliar no manejo do tecido umedecido com água;
- d) Capacitores Eletrolíticos de 1 μ F/50V e Resistores de 10K Ω para estabilizar a leitura dos sensores de temperatura LM35DZ;

- e) Uma balança semi-analítica da Bel Mark 160 com precisão de $\pm 0,001$ g do Laboratório de Microscopia, localizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Maringá (UEM);
- f) Um psicrômetro digital da Equitherm modelo TH439, faixa de umidade relativa de 25% a 98% e tolerância de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$;
- g) Tecido plano, 100% algodão, cor preta, estrutura sarja 2x1, gramatura 281,26 g/m³. Tecido fornecido pela empresa Paratex, localizada na cidade de Apucarana/PR;
- h) Tecido plano, 100% algodão, cor branca, estrutura sarja 2x1, gramatura 317,92 g/m³. Tecido fornecido pela empresa Paratex, localizada na cidade de Apucarana/PR;
- i) Tecido plano, 100% algodão, sem cor, estrutura de tela, gramatura 278,41 g/m³. Tecido fornecido pela empresa Paratex, localizada na cidade de Apucarana/PR;
- j) Malha, 100% poliéster, cor branca, gramatura 127,12 g/m³. Tecido fornecido pela Fama Têxtil, localizada na cidade de Maringá/PR;
- k) Malha, 100% algodão, cor branca, gramatura 158,38 g/m³. Tecido fornecido pela Fama Têxtil, localizada na cidade de Maringá/PR.

Uma análise preliminar dos tecidos, a fim de se determinar algumas propriedades padronizadas pelas normas ABNT NBR ISO 139 – Condicionamento de materiais têxteis para ensaios – procedimento (2008), NBR 10588 – Determinação do número de fios de tecidos planos (2015) e NBR 10591 – Determinação da gramatura de tecido (2008), foi realizada pelo Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade Estadual de Maringá (UEM) do Campus Goioerê/PR. Os resultados obtidos pelo Departamento de Engenharia Têxtil são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 - Resultados da análise dos tecidos.

| Amostra | Cor | Estrutura | Composição | Densidade da fibra têxtil g/cm³ | Gramatura do tecido g/m² |
|----------------|---------------|------------------|-------------------|---|--|
| 1 | Branco | Malha | Poliéster | 1,38 | 127,12 |
| 2 | Branco | Malha | Algodão | 1,52 | 158,38 |
| 3 | Branco | Sarja 2x1 | Algodão | 1,52 | 317,92 |
| 4 | Cru | Tela | Algodão | 1,52 | 278,41 |
| 5 | Preto | Sarja 2x1 | Algodão | 1,52 | 281,26 |

Fonte: Autor.

2.3 METODOLOGIA

São abordados neste tópico os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho e a metodologia empregada. Quatro amostras de tecidos são de puro algodão variando-se apenas estruturas, tecido plano sarja, tela e malha, e a outra amostra é tecido de malha de fibras de poliéster. Os testes foram realizados pelo monitoramento do perfil de temperatura nas fibras dos tecidos por meio do microcontrolador, com sensores de temperatura, conectados ao Arduino® para leitura dos sinais com aquisição dados por uma rotina computacional do Matlab. A variação de massa por tempo durante secagem natural nas fibras têxteis foi obtida por pesagem em uma balança semi-analítica milesimal.

Arduino® é uma ferramenta italiana projetada com a intenção de facilitar o computador pessoal interagir com o mundo físico. É uma plataforma de prototipagem física de código aberto baseada em uma placa microcontrolador, adicionada a um ambiente de desenvolvimento de programas livre para instalação dos mesmos na placa. O Arduino possibilita desenvolver objetos interativos, ter entradas de vários sensores e controlar luzes, motores e outros dispositivos, sendo possível o uso sozinho ou em comunicação com outros softwares instalados no computador (ARDUINO, 2015).

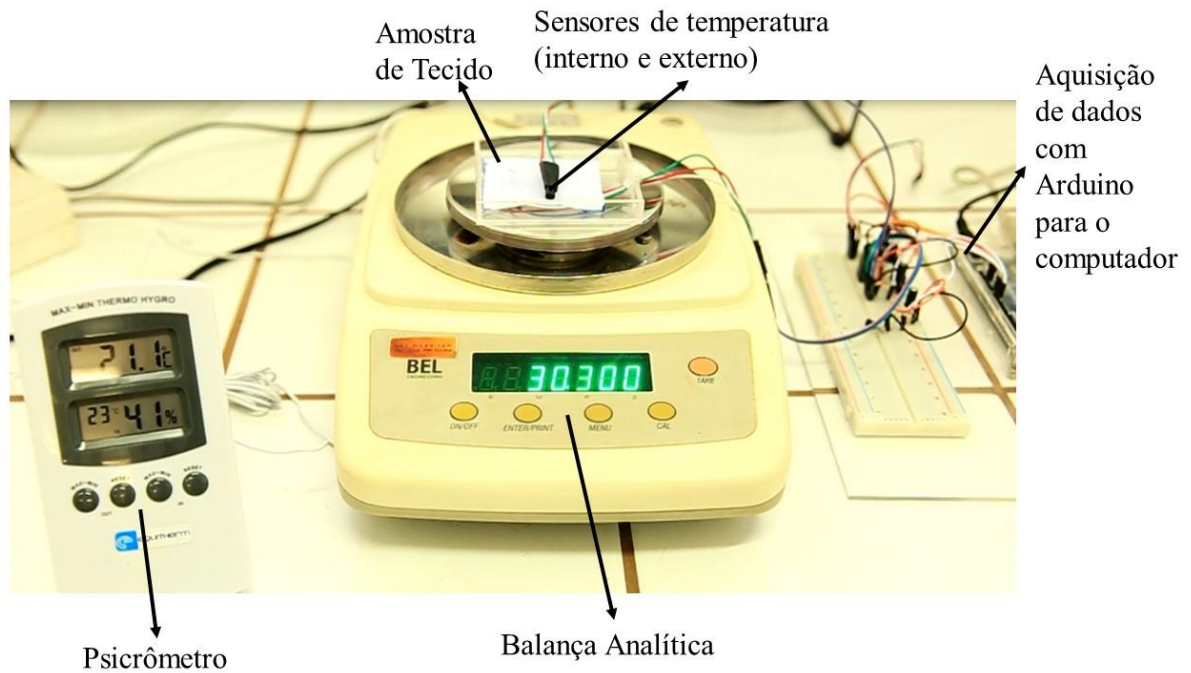
O sistema de aquisição de dados apresentado na Figura 16, é dotado de sensores de temperatura posicionados em ambos os lados (interno sobre a placa de acrílico e externo em contato com o ar ambiente) da amostra de tecido durante o processo de secagem convectiva natural. A variação de massa é obtida na balança semi-analítica e o psicrômetro digital para monitoramento das condições ambientais.

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Microscopia, localizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

A placa do microcontrolador Arduino é responsável pela leitura dos sensores, e o algoritmo do Matlab por compilar os dados e gerar os gráficos para os experimentos.

Para realizar o experimento de secagem convectiva natural foram recortados os tecidos em quadrados de 60x60 mm² e na sequência mediu-se a espessura das amostras com o micrômetro analógico da marca Mitutoyo com capacidade de 0-25 mm, tolerância de $\pm 0,002$ mm, graduação de 0,01 mm e força de medição de 5-10 N.

Figura 16 - Sistema de aquisição dos dados



Fonte: Autor.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados das medições realizadas com o micrômetro:

Tabela 6 - Medição das espessuras das amostras de tecidos

| | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Amostra 4 | Amostra 5 |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Medições | Tecido | Tecido | Tecido | Tecido | Tecido |
| | Malha | Malha | Sarja 2x1 | Tela Cru | Sarja 2x1 |
| | Branca de | Branca de | Branco de | de Algodão | Preto de |
| | Poliéster | Algodão | Algodão | mm | Algodão |
| | mm | mm | mm | | mm |
| 1 | 0,306 | 0,310 | 0,550 | 0,555 | 0,443 |
| 2 | 0,310 | 0,305 | 0,560 | 0,555 | 0,435 |
| 3 | 0,297 | 0,308 | 0,540 | 0,555 | 0,440 |
| 4 | 0,307 | 0,318 | 0,558 | 0,550 | 0,445 |
| 5 | 0,305 | 0,310 | 0,555 | 0,545 | 0,450 |
| 6 | 0,298 | 0,308 | 0,532 | 0,540 | 0,450 |
| 7 | 0,310 | 0,312 | 0,542 | 0,545 | 0,440 |

(Continuação)

| | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Amostra 4 | Amostra 5 |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Medições | Tecido | Tecido | Tecido | Tecido Tela | Tecido |
| | Malha | Malha | Sarja 2x1 | Cru de | Sarja 2x1 |
| | Branca de | Branca de | Branco de | Algodão | Preto de |
| | Poliéster | Algodão | Algodão | mm | Algodão |
| | mm | mm | mm | | mm |
| 9 | 0,289 | 0,304 | 0,530 | 0,548 | 0,450 |
| 10 | 0,300 | 0,308 | 0,542 | 0,548 | 0,435 |
| Desvio Padrão | 0,007 | 0,004 | 0,011 | 0,007 | 0,006 |
| Média | 0,302±0,002 | 0,309±0,001 | 0,546±0,003 | 0,547±0,002 | 0,443±0,001 |

Fonte: Autor.

Uma câmera Logitech C270 (alta resolução de 1280x720 pixels) posicionada frontalmente a balança da Figura 16 registrou todas leituras da balança ao longo do tempo.

Em sequência, realizou-se a pesagem do tecido seco (m_0) sob condições ambientais. Após isto, encharcou-se a amostra em água até ficasse completamente molhado e novamente pesou-se as amostras obtendo a massa de água adicionada (m_1) com o objetivo de obter a variação de absorção de água para determinar a fração volumétrica inicial de tecido ($f_{v_{tec}}$) conforme o Anexo A1 que são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Pesagem das amostra de tecido

| Amostra | Cor | Estrutura | Composição | Gramatura g/m² | m₀ g | m₁ g | f_{v_{tec}} |
|----------------|---------------|------------------|-------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1 | Branco | Malha | Poliéster | 127,12 | 0,629 | 1,328 | 0,3050 |
| 2 | Branco | Malha | Algodão | 158,38 | 0,495 | 1,600 | 0,2927 |
| 3 | Branco | Sarja 2x1 | Algodão | 317,92 | 1,197 | 3,078 | 0,2462 |
| 4 | Cru | Tela | Algodão | 278,41 | 1,065 | 2,284 | 0,3348 |
| 5 | Preto | Sarja 2x1 | Algodão | 281,26 | 1,060 | 2,390 | 0,2907 |

Fonte: Autor.

Em seguida, colocou-se a amostra sobre a placa de acrílico monitorando-se as temperaturas com sensores, a variação de massa de água no tecido pela leitura da balança semi-analítica e deixou que ocorresse a secagem convectiva natural.

2.3.1 Premissas do Processo

Para a resolução do problema apresentado, anteriormente ao seu desenvolvimento, são mencionadas algumas considerações utilizadas no trabalho, tais como:

- Considera-se o tecido como uma matriz formada de ar, água e fibras têxteis, logo determinou-se a condutividade térmica efetiva com as frações volumétrica de ar ($f_{v_{ar}}$) e água ($f_{v_{água}}$) variando conforme o tempo, e a fração volumétrica do tecido ($f_{v_{tec}}$) e a condutividade térmica do tecido (k_{tec}) sendo constante de acordo com a Equação (7) e Figura (7);
- Pelo fato da amostra de tecido ser extensa longitudinalmente, direção y , considera-se transferência de calor e massa apenas na direção x , ou seja, problema de geometria unidimensional;
- O volume de controle (sistema) apresentado na Figura 13 considerado é a região do tecido sendo as fronteiras a placa de acrílico e o ambiente, sendo os pontos interno (placa de acrílico) e externo (ambiente) respectivamente, para o tecido considera-se apenas transferência de calor e massa por condução, sendo de direção unidimensional, sem geração de calor e em regime transiente (taxa acumulo de energia no sistema variando a cada instante);
- As superfícies (ponto externo) dos tecidos teste estão submetidas ao processo de transferência de calor e massa por convecção natural;
- Considera-se que do lado interno do tecido, a placa de acrílico, não há fluxo de calor e mássico.

Análise fenológica de transferência de massa é análogo a transferência de calor, neste experimento considerou-se que no ponto interno da Figura 15, não ocorre a difusão de massa, ou seja, X_i a taxa de variação de água ou umidade retida no tecido no ponto interno é zero porque está sobre a placa de acrílico impedindo o fluxo de água neste sentido, e a geração de espécie química durante o processo é nula porque não há formação de nova espécie durante o processo. E a variação do teor de água na base seca são obtidas para Equação (36) das amostras pelas leituras da balança semi-analítica.

2.3.2 Rotina Computacional

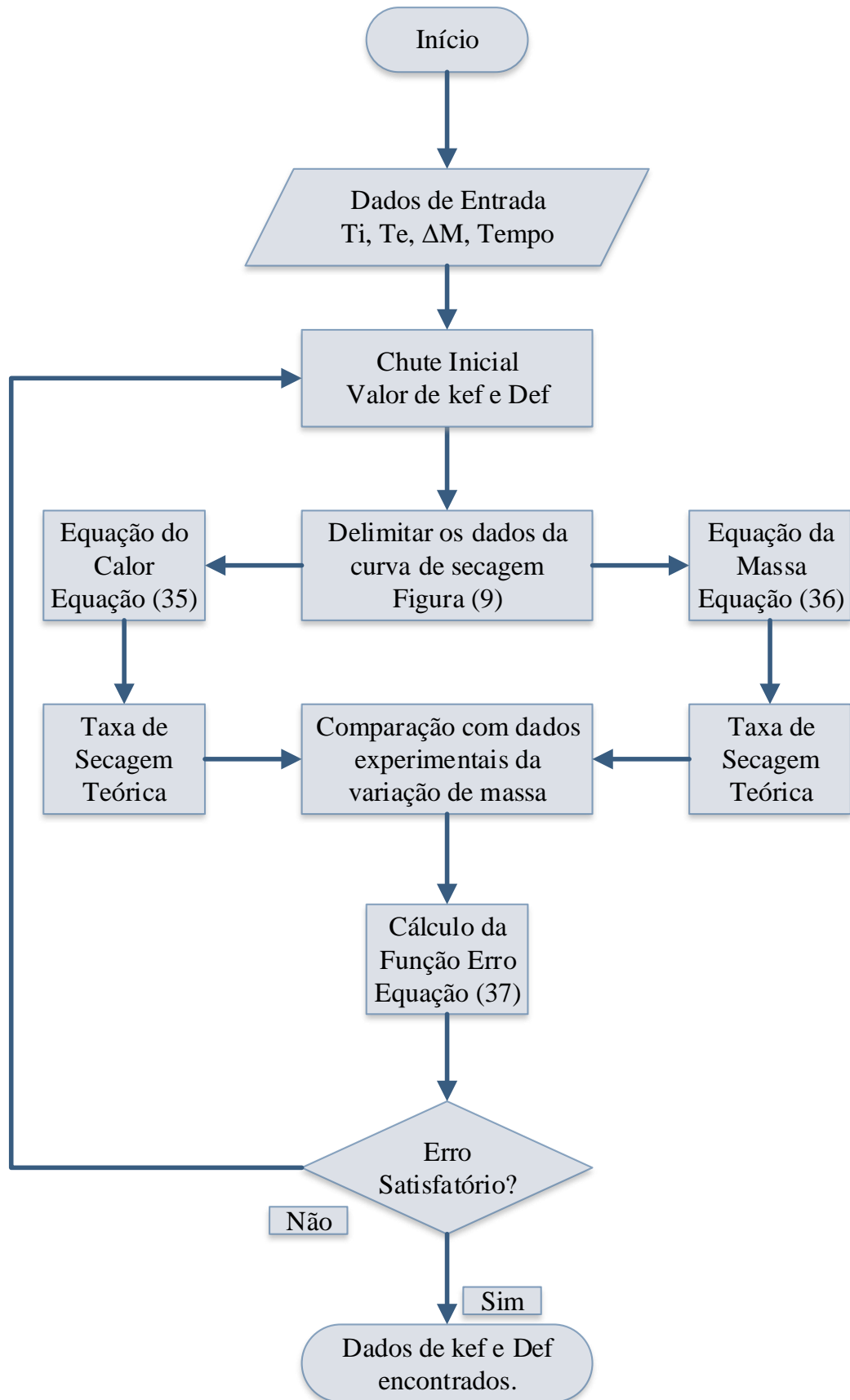
Os modelos de transferência de calor e massa foram aplicados para representar o fenômeno de secagem, que é um problema multifísico. Com a função ‘fminsearch’, função de otimização do Matlab, implementa o algoritmo de busca pelo método Simplex de Nelder-Mead que modifica os componentes das variáveis até atingir o mínimo da função, neste caso, implementamos o algoritmo com os dados experimentais e teóricos para obter a condutividade térmica do tecido (k_{tec}) e a difusividade mássica da água no tecido (D_{H_2O-tec}).

A rotina computacional proposta no Matlab para análise da transferência de calor e massa na secagem do tecido em regime transiente, com o lado de cima exposto a convecção natural obteve-se expressões pela discretização das equações da formulação matemática do problema multifísico. Para dimensionar ajustar a diferença entre o modelo analítico e os valores experimentais medidos foi definida a função erro experimental RMSE (Root Mean Square Error), ou seja, erro médio quadrado representada na Equação (37) para a Equação (35) e (36) do calor e da massa, respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_e - m_c)^2} \quad (37)$$

Em que n é número de dados considerados no experimento, m_c a vazão mássica teórica de água evaporada durante o processo de secagem (kg/s) e m_e a vazão mássica experimental de água evaporada durante o processo de secagem (kg/s). Na Figura 17 apresenta-se o fluxograma da rotina computacional.

Figura 17 – Fluxograma do algoritmo proposto



Fonte: Autor.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o modelo matemático devidamente discretizado e com o procedimento de cálculo definido e implementado computacionalmente em linguagem M-código do Matlab, procedeu-se com as simulações nas amostras de tecido cujas estruturas encontram-se apresentadas.

Neste estudo foram simuladas situações físicas envolvendo o domínio de cálculo modelado, modificando as condições iniciais e de fronteira para cada amostra, a fim de poder criar diferentes condições e verificar o comportamento dos resultados obtidos e discuti-los sob a ótica do fenômeno físico.

A influência do mecanismo convectivo também foi avaliada, mesmo não havendo a velocidade da corrente de ar sobre o módulo, o mecanismo convecção considerada foi o natural, que não pode ser negligenciado.

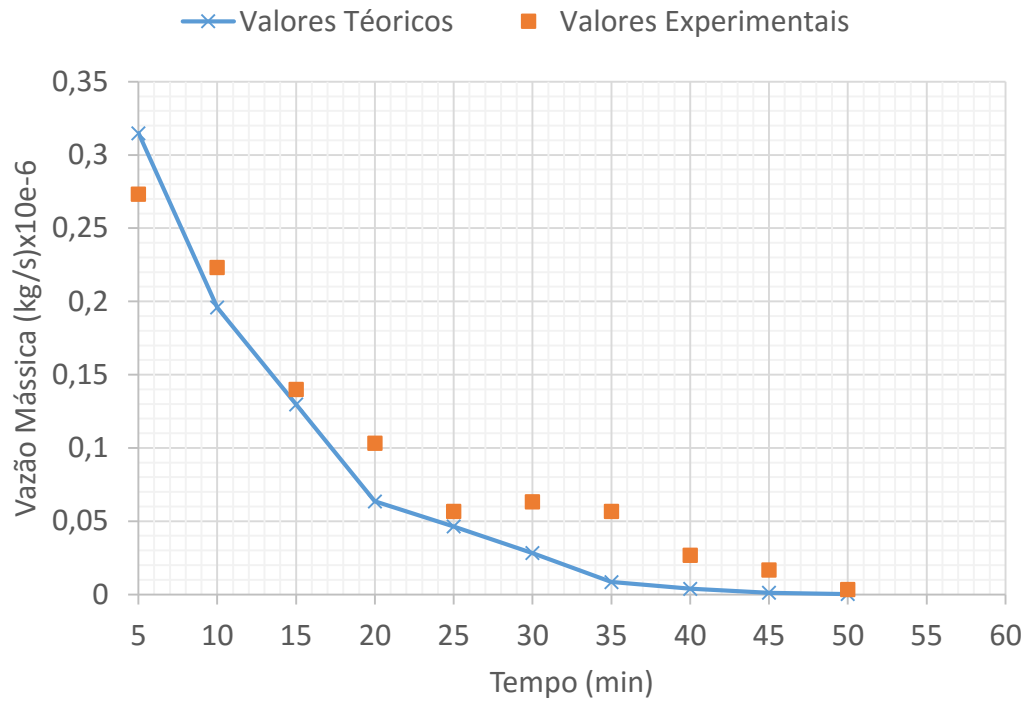
Para os modelos anteriormente discretizados, definiu-se passo tempo da EDP (equação diferencial parcial) em 5 min, este passo tempo pode ser definido sem restrições porque utilizou-se métodos implícitos para solução das equações diferenciais, entre as medições de umidade relativa, fluxo mássico, temperatura, e a fração volumétrica de água concentrada na amostra que foram atualizadas a cada passo tempo pela rotina computacional, os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 18 a 27.

O erro médio quadrático (RMSE) considerado deverá ser o menor possível e o coeficiente de correlação (R^2) o mais próximo de 0,99, e a proximidade dos pontos (valor teórico e valor experimental) representam os melhores posicionamentos encontrados dos valores de condutividade térmica e difusividade mássica obtidos pelo ajuste realizado pelo algoritmo.

Nas Figuras 18 e 19 representam-se os experimentos realizado com a Amostra 1 - tecido malha de poliéster de cor branca - para 11 pontos experimentais. Secou-se 0,306 g de água no tecido no intervalo de 60 min, umidade relativa de 47% e temperatura ambiente de 25,5 °C, e também se obteve um $R^2 = 0,95$ para a Figura 18 e $R^2 = 0,97$ para a Figura 19.

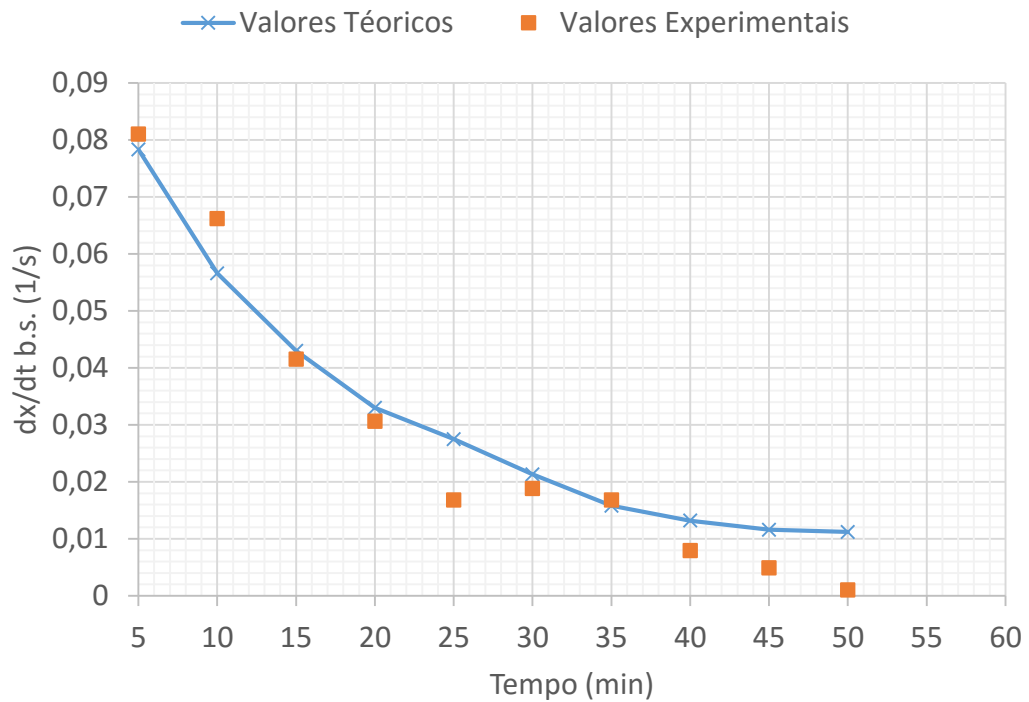
Nas Figuras 20 e 21 representam-se os experimentos realizados com a Amostra 2 - tecido malha de algodão de cor branca - para 10 pontos experimentais. Secou-se 0,266 g de água no tecido no intervalo de 50 min, umidade relativa de 37% e com temperatura ambiente de 27 °C, atingiu um $R^2 = 0,98$ para equação de calor e $R^2 = 0,97$ para equação da massa.

Figura 18 - Ajuste para Equação (35) de calor amostra 1 tecido de malha poliéster.



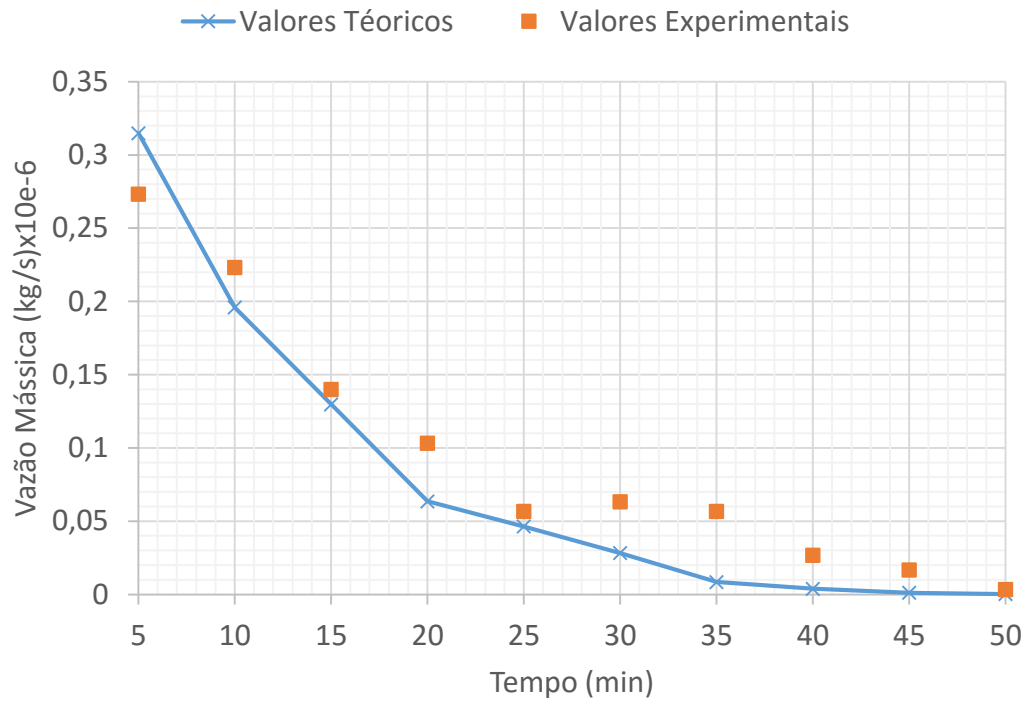
Fonte: Autor.

Figura 19 - Ajuste para Equação (36) da massa amostra 1 tecido de malha poliéster.



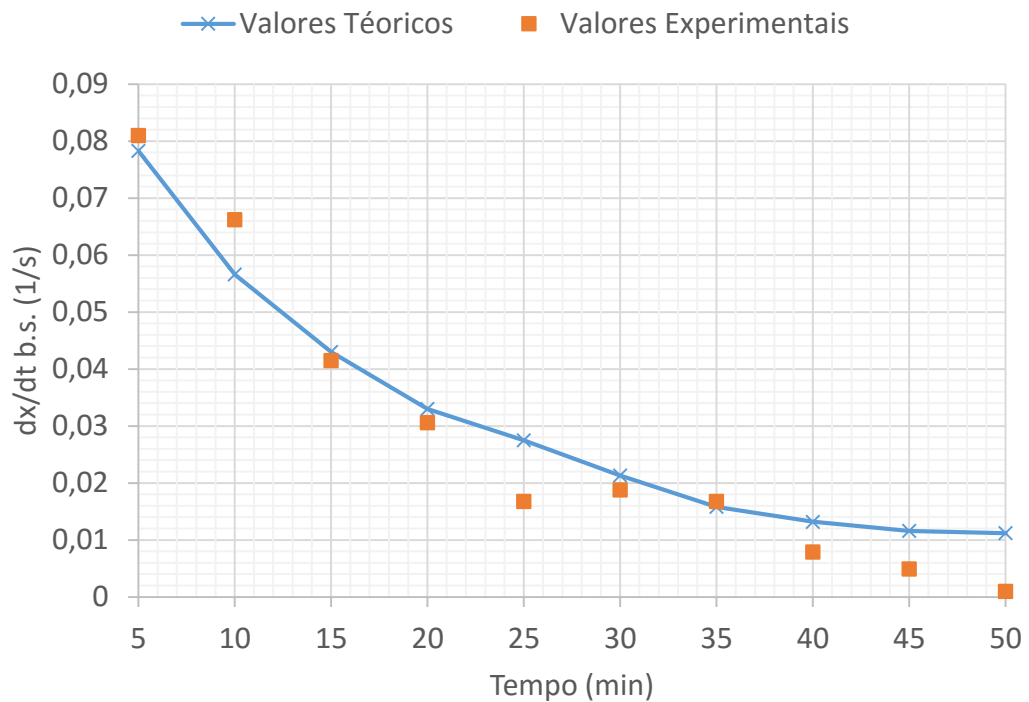
Fonte: Autor.

Figura 20 - Ajuste para Equação (35) de calor amostra 2 tecido de malha algodão.



Fonte: Autor.

Figura 21 - Ajuste para Equação (36) da massa amostra 2 tecido de malha algodão.



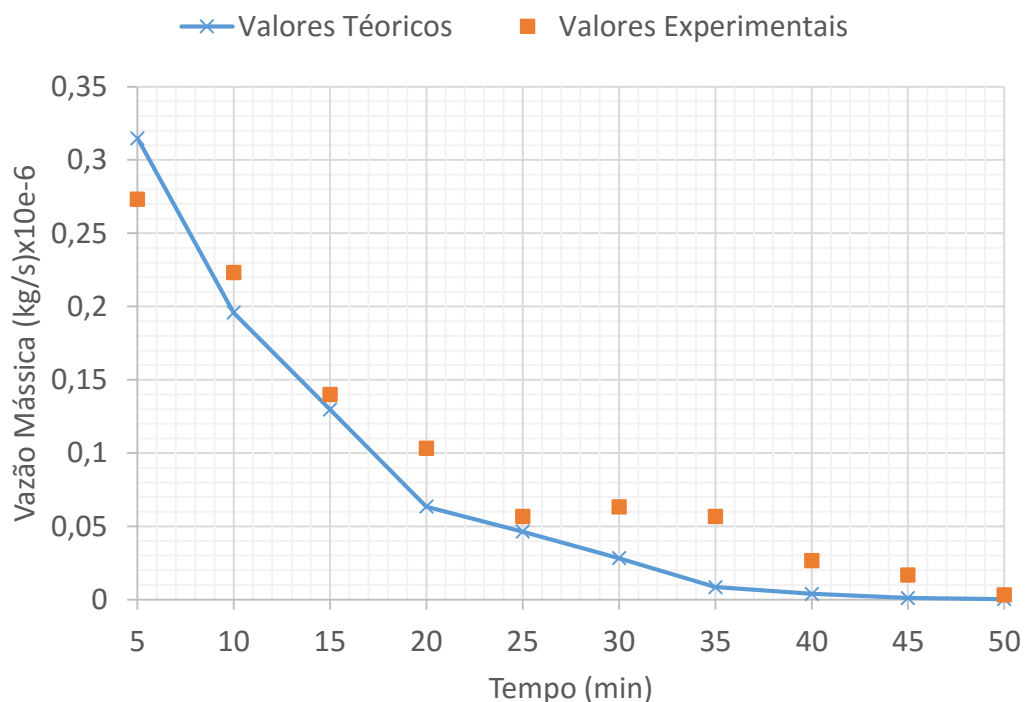
Fonte: Autor.

Nas Figuras 22 e 23 representam-se os experimentos realizados com a Amostra 3 - tecido plano sarja 2x1 algodão de cor branca - para 10 pontos experimentais. Secou-se 0,127 g de água no tecido no intervalo de 50 min, umidade relativa de 45% e temperatura ambiente de 29 °C, com $R^2 = 0,85$ para a equação de calor e $R^2 = 0,95$ para a equação da massa.

Nas Figuras 24 e 25 representam-se os experimentos realizados com a Amostra 4 - tecido plano tela algodão sem carga de cor (tecido cru) - para 10 pontos experimentais. Secou-se 0,128 g de água no tecido no intervalo de 50 min, umidade relativa de 41% e temperatura ambiente de 31 °C, encontrou-se $R^2 = 0,90$ para a equação de calor e $R^2 = 0,93$ para equação da massa.

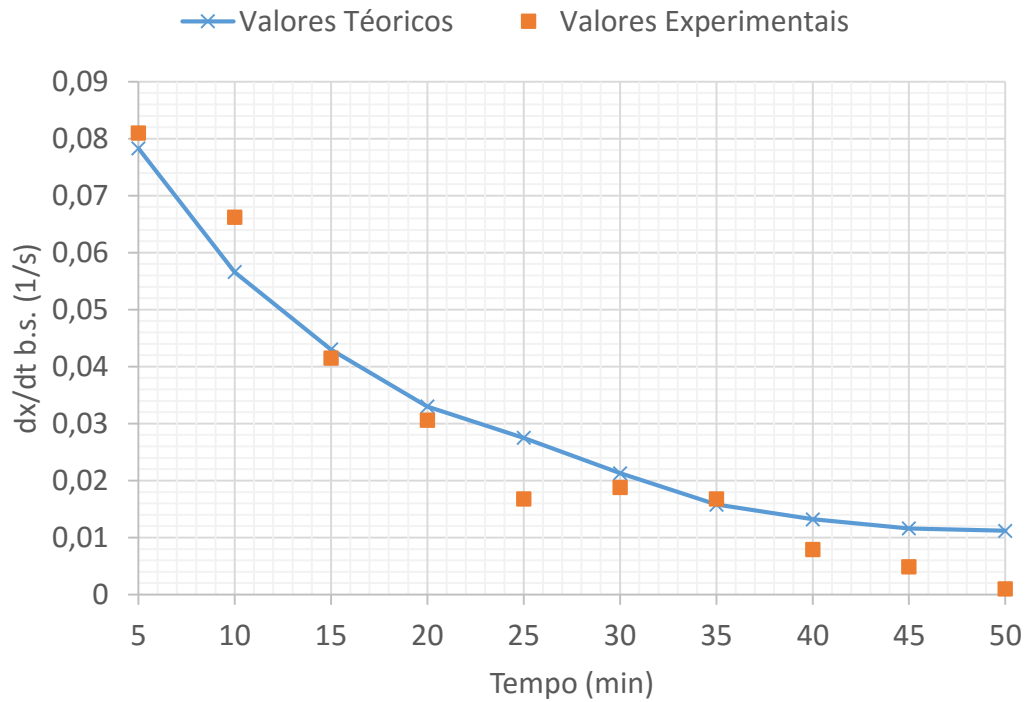
Nas Figuras 26 e 27 representam-se os experimentos realizados com a Amostra 5 - tecido plano sarja 2x1 algodão cor preta - para 10 pontos experimentais. Secou-se 0,289 g de umidade do tecido no intervalo de 50 min, umidade relativa de 41% e temperatura ambiente de 31,5 °C, e também se obteve $R^2 = 0,97$ para a Figura 26 e $R^2 = 0,98$ para a Figura 27.

Figura 22 - Ajuste para Equação (35) do calor amostra 3 tecido plano sarja 2x1 algodão.



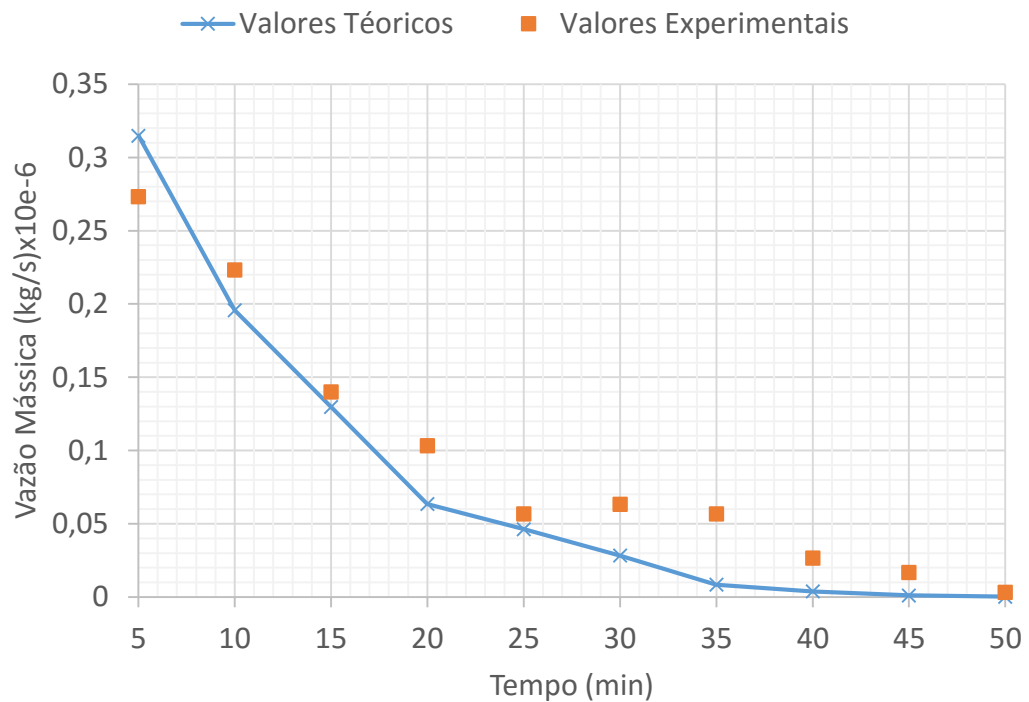
Fonte: Autor.

Figura 23 - Ajuste para Equação (36) da massa amostra 3 tecido plano sarja 2x1 algodão.



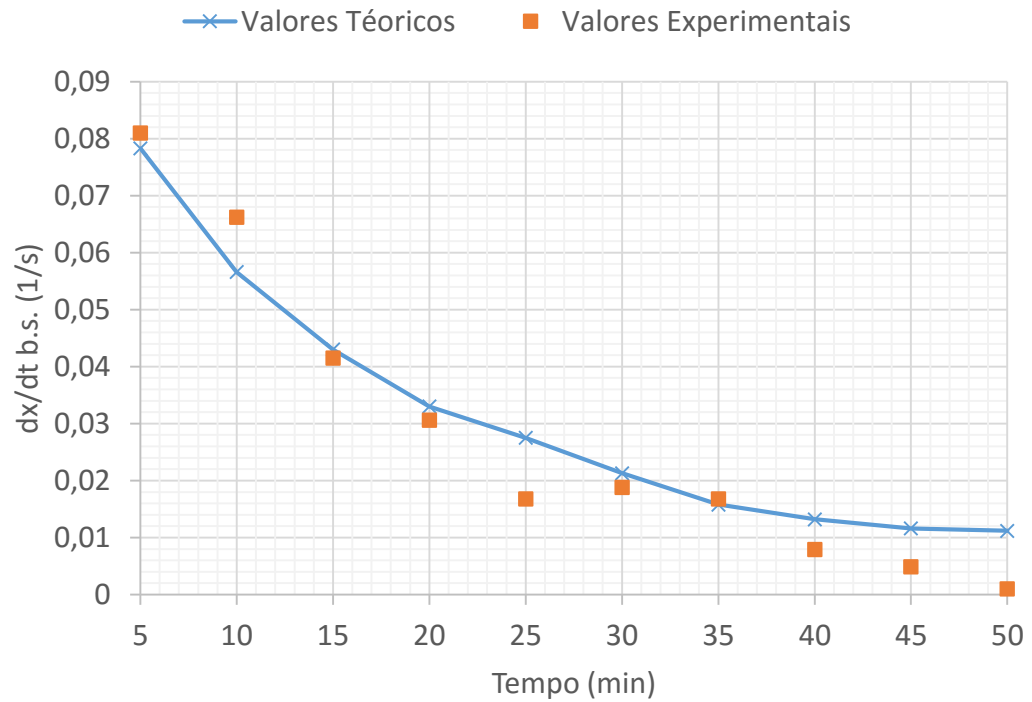
Fonte: Autor.

Figura 24 - Ajuste para Equação (35) de calor amostra 4 tecido plano tela algodão.



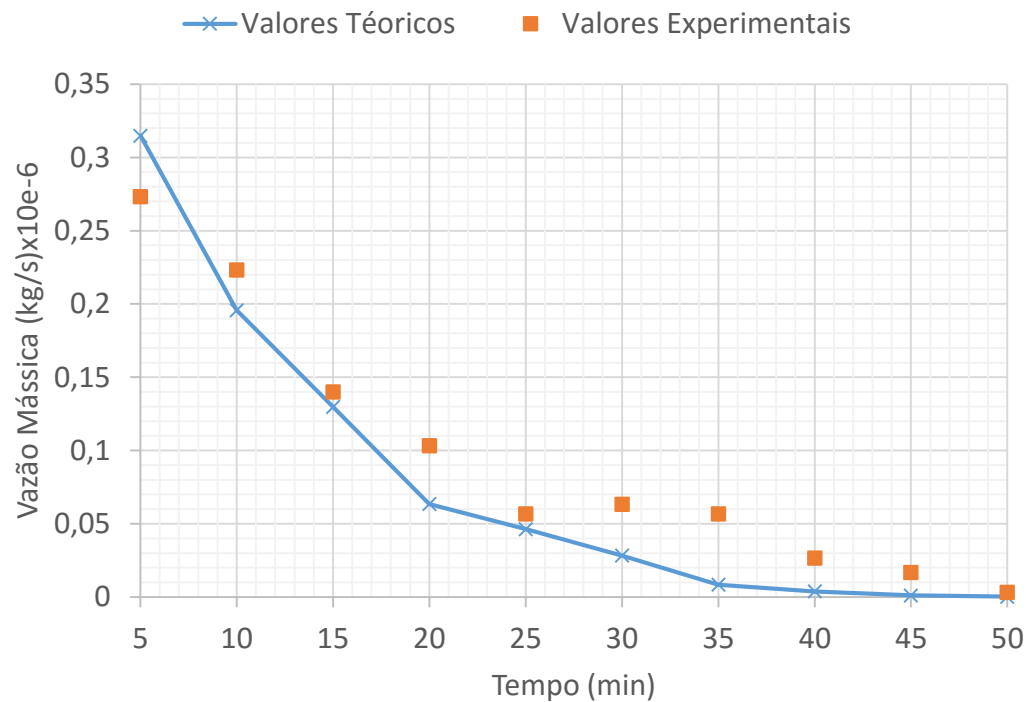
Fonte: Autor.

Figura 25 - Ajuste para Equação (36) de massa amostra 4 tecido plano tela algodão.



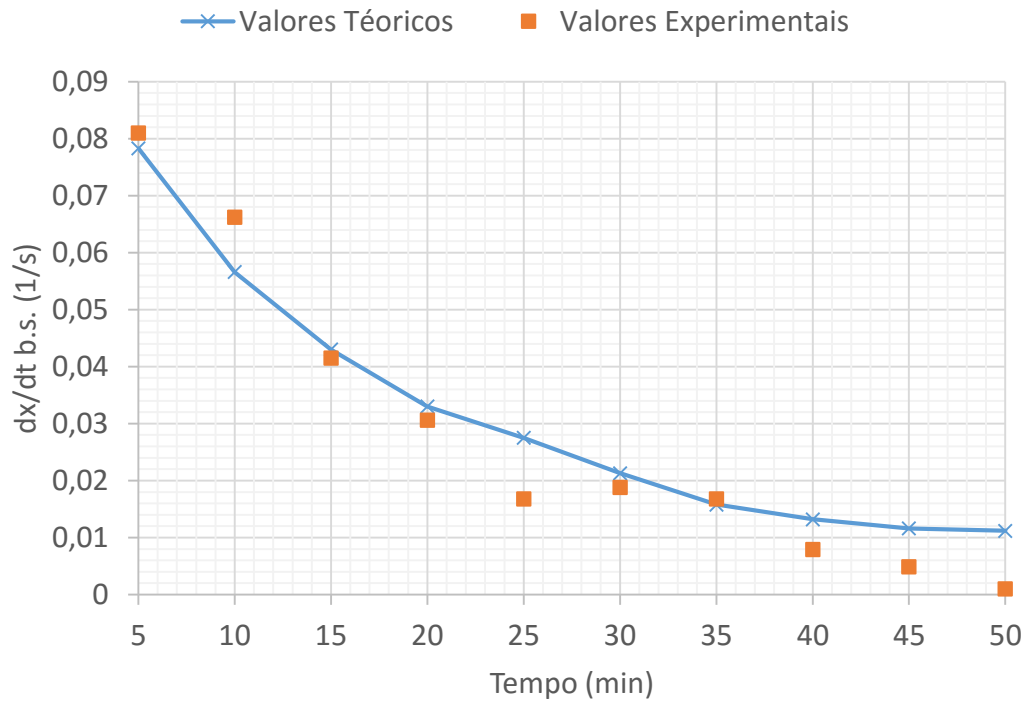
Fonte: Autor.

Figura 26 - Ajuste para Equação (35) de calor amostra 5 tecido plano sarja 2x1 algodão.



Fonte: Autor.

Figura 27 - Ajuste para Equação (36) de massa amostra 5 tecido plano sarja 2x1 algodão.



Fonte: Autor.

Os resultados são apresentados na Tabela 8, que provêm dos ajustes entres pontos experimentais e teóricos com a finalidade de definir valores mais adequados para a condutividade térmica do tecido e difusividade mássica da água no tecido.

Tabela 8 – Resultados.

| Amostra | Gramatura g/m ² | Fração volumétrica fv _u | Umidade Relativa % | Temperatura Ambiente °C | k _{tec} W/mK | D _{H2O-Tec} m ² /s |
|---------|-------------------------------|--|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|---|
| 1 | 127,12 | 0,305 | 47 | 25,5 | 0,147 | 1,431x10 ⁻⁵ |
| 2 | 158,38 | 0,293 | 37 | 27 | 0,225 | 1,375x10 ⁻⁵ |
| 3 | 317,92 | 0,246 | 45 | 29 | 0,589 | 2,476x10 ⁻⁵ |
| 4 | 278,41 | 0,335 | 41 | 31 | 0,545 | 2,981x10 ⁻⁵ |
| 5 | 281,26 | 0,291 | 41 | 31,5 | 0,490 | 2,817x10 ⁻⁵ |

Fonte: Autor.

Como foi possível observar, o perfil dos valores experimentais e o perfil dos valores numéricos em cada amostra obtido apresentam a mesma tendência de comportamento, porém existe um erro de maior incidência na Amostra 3 e 4 (distanciamento maior entre os pontos), porque a Amostra 3 possui menor $R^2 = 0,8143$ para equação de calor, e a Amostra 4 apresentou $R^2 = 0,9127$. E nota-se que os valores do erro quadrático (RMSE) para equação de calor são bem menores do que para equação massa, acarretando o melhor ajuste do algoritmo para os dados experimentais para o modelo matemático de transferência de calor do processo. Os erros apresentados podem ser justificados pelas flutuações da balança (sensibilidade) durante a pesagem.

A balança analítica e os sensores de temperatura estão sujeitos a variações nas medições, uma vez, que presença de pequenas correntes de ar, variação na tensão de alimentação, variação de temperatura e umidade podem trazer erros devido a sensibilidade desses equipamentos durante os testes, a duração média de cada teste era de 6 horas, separados em turnos diurno e matutino procurando diminuir a interferência da variações climáticas durante o dia. Isto pode ser notado no comportamento de algumas amostras que obtiveram resultados precisos para fenômenos de secagem e ressalva para as exceções como as amostras 3 e 4.

3 CONCLUSÃO

Com a metodologia apresentada, montada através de uma placa de prototipagem Arduino® e sensores de temperatura LM35DZ encontrado facilmente no mercado a baixo custo, pode-se simular a secagem com fidelidade ao processo, útil para determinação dos valores de condutividade térmica do tecido k_{tec} e difusividade mássica através dos tecidos D_{H_2O-Tec} .

E considerando os objetivos previamente definidos, foi implementado um modelo transiente, unidimensional, de transferência de calor e massa satisfatório. O código implementado resolve numericamente um sistema de equações com derivadas parciais, recorrendo ao método implícito e à técnica dos volumes finitos. As equações, a saber, a equação da transferência de calor e a equação da transferência da massa para fase líquida da água, são resolvidas por um processo iterativo, em cada etapa ou passo de tempo, previamente definido como 5 min.

Conhecendo-se as propriedades físicas do tecido e após definido as condições ambientais e psicrométricas do ar, pode-se utilizar o algoritmo de cálculo para simular as trocas

de calor e fluxo de vapor de água ao longo do tempo e na espessura do tecido. E ainda foi possível variar a quantidade de água retida nas fibras têxteis ao longo do tempo.

A determinação dos coeficientes de condutividade térmica e difusividade mássica da água dos tecidos mostram-se importante, uma vez que na literatura não são encontrados valores para diversas gamas de tecidos que existem, sendo estas as propriedades indispensáveis para a análise eficiência térmica dos tecidos, principalmente os que serão utilizados em práticas esportivas.

Os valores encontrados para coeficientes de condutividade térmica e difusividade mássica podem variar muito de tecido para tecido, conforme a porosidade, estrutura dos tecidos, material das fibras têxteis, no geral os valores encontrados para as fibras têxteis foram satisfatórios. Os tecidos com estruturas de malha por trama, com laçadas de fibras têxteis (contextura), apresentam a condutividade térmica em média 58% menor que os tecidos planos (estrutura de entrelaçamento de fios urdume e trama) para a fibras de algodão de cor branca, e para difusividade mássica essa diferença é em torno de 53%.

Os valores encontrados para coeficientes de condutividade térmica dependem da porosidade, estrutura dos tecidos, material das fibras têxteis, no geral os valores encontrados para as fibras têxteis foram satisfatórios. A Amostra 1 - tecido de malha com fibras de poliéster apresentou um $k_{tec} = 0,147 \text{ W/mK}$, validando o modelo, uma vez que, aproximou-se dos valores encontrados na literatura para o poliéster a temperatura ambiente que é de $0,14 \text{ W/mK}$ obtidos pelo experimento de Gibson e Charmchi (1997).

Os testes com tecido malha de algodão revelaram uma aproximação mais discreta comparada ao tecido de malha de poliéster conforme experimentos de Gibson e Charmchi (1997) que chegou no valor de $0,16 \text{ W/mK}$ para fibras de algodão, experimento que foi realizado com o dispositivo DMPC na temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ambiente de 60%, e nesta pesquisa encontrou-se $0,225 \text{ W/mK}$.

Outro fator importante é a gramatura, ou seja, tecidos mais densos, possuem condutividade térmica maior, devido ao acúmulo de água entre as fibras têxteis ser maior. A presença de tinta, um polímero associado as fibras têxteis do algodão, apresenta diferenças em torno de 10% nos valores encontrados para as Amostra 4 e 5, sendo a Amostra 4, tecido cru sem tinta e sem acabamento final, obteve os valores de $k_{tec} = 0,546 \text{ W/mK}$ e $D_{H_2O-Tec} = 2,981 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, e para o tecido preto com maiores cargas de tintas (Amostra 5) encontrou-se os valores de $k_{tec} = 0,490 \text{ W/mK}$ e $D_{H_2O-Tec} = 2,817 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

As maiores diferenças ficaram no transporte de massa, uma vez que as fibras envolta pelo polímero das tintas, que forma uma película em torno das fibras e fios, indica uma

facilidade maior para passagem da água, ao contrário, das fibras de algodão que são hidrófilas e retém água entre as fibras e fios.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO. **Introduction**. 2015. Arduino Website. Disponível em: www.arduino.cc. Acesso em: 02 jan. 2015.
- ALBUQUERQUE, W. M. S. **Estudo de secagem de tecido jeans**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, 2011.
- ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. **A química do processamento têxtil**. Química Nova, n. 19, vol. 3, 1996.
- ALONSO, L. F. T. **Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- ARRIECHE, L. S. **Evolução da forma e encolhimento de um system gel durante a secagem por convecção forçada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, 2003.
- BONTEMPI, A. **Eficiência energética de secadores industriais: análise e propostas experimentais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2004.
- BRITTO, J. F. **Considerações sobre psicrometria**. Revista SBCC, ed. 45, 2010.
- CANO, W. **Raízes da concentração industrial em São Paulo**. T.A. Queiroz, São Paulo, 1981.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R.P. **Métodos numéricos para engenharia**. 5ª ed. McGraw Hill, 2008.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. Ed., Oxford Science Publication, 1975.
- CORREIA, E. L. S. **Modelo térmico aplicado à caracterização do conforto proporcionado pelo vestuário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Humana) – Universidade do Minho, 2005.
- ÇENGEL, Y. A. **Heat transfer: a practical approach**, 2. Ed., McGraw-Hill, Boston, 2002.
- ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. Tradução: Fátima A. M. Lino; Revisão técnica: Kamal A. R. Ismail. 4. Ed., McGraw-Hill, Porto Alegre, 2012.
- DONCA, R. **Modelagem matemática e simulação da transferência de calor e massa através de um meio poroso têxtil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

- FRANCESCHI, K.; PÉREZ, S.; MAGARELLI, D.; **Determinación de los coeficientes de transferencia de masa y energía para el proceso de secado de textiles em función de la densidade del material**, Información Tecnológica, vol. 21, n. 5, p. 99 - 106, 2010.
- FOUST, A.S., **Princípios das Operações Unitárias**. 2ª Edição, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.
- FIRJAM, A. A.; FERRAZ, F. T. **Uma breve análise acerca do segmento industrial têxtil e de confecção brasileiro pós década de 80 e a competitividade do setor no mercado de Juiz de Fora, MG**. Redige, v. 2, n.3, 2011.
- 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**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- GRESAN, E.; FORACCHIA, M.; RUGGERI, A. **A novel method for automatic evaluation of retinal vessel tortuosity**. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Cancun, México, 2003.
- HES, L.; OFFERMANN, P.; DVORAKORA, I. **The effect of underwear on thermal contact feeling caused by dressing up and wearing of garments**. Tecnitex 2001 Autex Conference, 2001.
- INCROPERA, F. P. Z. **Fundamentos de Transferência de calor e de massa**. Tradução e revisão técnica Eduardo Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 7ª Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2014.
- JOHANN, G.; PEREIRA, N. C.; MOTTA LIMA, O. C.; SILVA, E. A. **Determinação do calor de dessorção para materiais têxteis**. Acta Scientiarum. Technology, v. 32, n. 1, p. 63 - 68, 2010.
- KARACAPILIDIS, N. I.; PAPPIS, C. P. **Production planning and control in textile industry: a case study**. Computers in Industry, Elsevier Science, 1996.
- MORONI, L. G. et al. **Manual de não tecidos: classificação, identificação e aplicações**. 3. Ed, Associação Brasileira de Indústria Nacional Têxtil (ABINT), São Paulo, 2005.
- LI, Y. The science of clothing comfort. **The Textile Institute**, v. 31, n. 1/2, 2001.
- LIZÁK, P.; MOJUMDAR, S. C. **Influence of the material structure on the thermal conductivity of the clothing textiles**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 119, i. 2, p. 865 - 869, 2015.

- MENON, A. S.; MUJUMDAR, A. S. **Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers**: Handbook of Industrial Drying, New York, 1987.
- MIHOUBI, D.; TIMOUMI, S.; ZAGROUBA, F. **Modelling of convective drying of carrot slices with IR heat source**. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009.
- MOTTA LIMA, O. C. **Estudo sobre a Secagem de Folhas de Celulose**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual Maringá, 1999.
- MOTEVALI, A.; MINAEI, S.; KHOSHTAGAZA, H. M. **Evaluation of energy consumption in different drying methods**. Energy Conversion and Management, 2011.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. CRC Press, New York, 2006.
- NEVES, S. F.; CAMPOS, J. B. L. M.; MAYOR, T. S. **On the determination of parameters required for numerical studies of heat and mass transfer through textiles – Methodologies and experimental procedures**. International Journal of Heat and Mass Transfer, n. 811, p. 272 - 282, 2015.
- 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.; PARK, K. J.; CORNEJO, E. P.; FABBRO, I. M. **Considerações termodinâmicas das isotermas**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 10, n. 1, p. 83 - 94, 2008.
- PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. **Apostila de conceitos de processo e equipamentos de secagem**, Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial, 2007.
- POURDEYHIMI, B.; MAZÉ, B.; TAFRESHI, H. V. **Simulation and analysis of unbonded nonwoven fibrous structures**. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, v. 1, i. 2, p. 47 - 65, 2006.
- RAO, S. S. **The finite element method in engineering**. 4th Ed., p. 3 - 49. Florida, 2005.
- SANTOS, R. M. **Estudo da Secagem e do Consumo de Gás Natural em uma Rama Textil de Aquecimento Direto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- SOUSA, L.H.C.D. **Secagem de materiais têxteis**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2003.
- STEIN, J. R. S. **Origens e evolução da indústria têxtil no Brasil**: Campus, Rio de Janeiro, 1974.
- TREYBAL, R. E. **Mass transfer operations**. 3rd Ed., McGraw-Hill, 1980.

UTTAM, D. **Objective measurement of heat transport through clothing.** International Journal of Engineering Research and Development, v. 2, i. 2, p. 43-47, 2012.

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.

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

YU, Y.; XU, D. **On the inverse problem of thermal conductivity determination in nonlinear heat and moisture transfer model within textiles.** Applied Mathematics and Computation, v. 264, p. 284 – 299, 2015.

ZHU, Q. Y.; 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, v. 53, p. 1417 - 1425, 2010.

_____. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem.** Campinas, 2007.

Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>>. Acesso em 01/10/2015.

ANEXOS

A1. FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DO TECIDO

O equacionamento realizado para os valores fração volumétrica do tecido proposto nos procedimentos experimentais para instante inicial (pesagem das amostras antes do experimento) para uma matriz com três fases é a Equação (38):

$$fv_{ar}(t) + fv_{\acute{a}gua}(t) + fv_{tecido} = 1 \quad (38)$$

E também podemos expressar de outra forma em termos de volume:

$$\frac{V_{ar}(t)}{V_t} + \frac{V_{\acute{a}gua}(t)}{V_t} + \frac{V_{tecido}}{V_t} = 1 \quad (39)$$

Em que V_{tecido} é o volume total do tecido obtido através da gramatura do tecido:

$$V_{tecido} = \frac{m_s}{\rho_{fibra}} = \frac{AxGramatura}{\rho_{fibra}} \quad (40)$$

Em que A é área da amostra 36 cm^2 , ρ_{fibra} representa a densidade da fibra têxtil. E o volume total da amostra (V_0) determinado pela AxL , sendo que L representa a espessura da amostra. Após ter encharcado o tecido, realizou-se a segunda pesagem quando foi possível determinar a fração volumétrica da água e descobrir quanto o tecido aumento de volume.

$$V_{\acute{a}gua} = \frac{\Delta m_{\acute{a}gua}}{\rho_{\acute{a}gua}} = \frac{m_1 - m_0}{\rho_{\acute{a}gua}} \quad (41)$$

Toma-se como hipótese que o tecido banhado por água por tempo 15 minutos toda a fração volumétrica do ar torna-se nula de acordo com a Equação (42) e o valor do volume total (V_1) deve ser atualizado para a nova condição.

$$\frac{V_{\acute{a}gua}(t)}{V_e} + \frac{V_{tecido}}{V_t} = 1 \quad (42)$$

$$V_e = \frac{(1 - V_{tecido}/V_t)}{V_{\acute{a}gua}(t)} \quad (43)$$

De posse dos valores do volume total encharcado (V_e), pode-se determinar o fator de aumento de volume (F) e a ‘nova’ fração volumétrica do tecido após encharcado (fv_u).

$$F = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V_e - V_t}{V_t} \quad (44)$$

$$fv_{umedecido} = \frac{V_{tecido}}{V_e} \quad (45)$$