

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

**MODELAGEM E ANÁLISE DA SECAGEM DE ARTIGOS
TÊXTEIS EM SECADORES ROTATIVOS**

Paulo Alexandre Faria

Maringá –PR – Brasil
Agosto 2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

**MODELAGEM E ANÁLISE DA SECAGEM DE ARTIGOS
TÊXTEIS EM SECADORES ROTATIVOS**

Paulo Alexandre Faria
Engenheiro de Produção, UEM-PR, 2008
Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Mario de Matos Jorge

Dissertação de Mestrado submetida à
Universidade de Estadual de Maringá, como
parte dos requisitos necessários à obtenção
do Grau de Mestre em Engenharia Química,
área de Desenvolvimento de Processos.

Maringá –PR – Brasil
Agosto 2018

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

F224m Faria, Paulo Alexandre
Modelagem e análise da secagem de artigos têxteis em secadores rotativos. / Paulo Alexandre Faria. -- Maringá, 2018.
78 f. : il., color., figs., tabs.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso.
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Mario de Matos Jorge.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos, 2018.

1. Secagem. 2. Secador rotativo. 3. Modelagem. 4. Artigos têxteis. I. Paraíso, Paulo Roberto, orient. II. Jorge, Luiz Mario de Matos, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos. IV. Título.

CDD 21.ed. 660.28426

AHS-CRB-9/1065

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da dissertação de Mestrado apresentada por Paulo Alexandre Faria perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Engenharia Química em 21 de agosto de 2018.

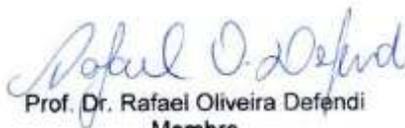
COMISSAO JULGADORA



Prof. Dr. Paulo Roberto Paraiso
Orientador / Presidente



Prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge
Coorientador



Prof. Dr. Rafael Oliveira Defendi
Membro



Prof. Dr. Paulo Eduardo Polon
Membro

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a todas as pessoas que possam se beneficiar com este trabalho e em especial a minha filha Julia Herreiro Faria, ao Gabriel Herreiro Faria que está a caminho e minha esposa Leticia Herreiro Faria.

AGRADECIMENTOS

Dedico a Deus que rege todas as coisas, aos meus professores Luiz Mário e Paulo Paraíso porto da orientação e paciência, aos meus pais e meus irmãos, a 5 Estrelas Lavanderia Industrial pela ajuda e a todos os meus amigos.

**MODELAGEM E ANÁLISE DA SECAGEM DE ARTIGOS
TÊXTEIS EM SECADORES ROTATIVOS**

AUTOR: PAULO ALEXANDRE FARIA

ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ MARIO DE MATOS JORGE

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual de Maringá; Av.Colombo, 5790, BL.E46-09; CEP 87020-900, Maringá-PR, Brasil, defendida em 21 de agosto de 2018.

Masters dissertation; Graduate Program in Chemical Engineering; State University of Maringá; Av.Colombo, 5790, BL.E46-09; CEP 87020-900, Maringá-PR, Brazil, defended on August 21, 2018.

RESUMO

Secadores rotativos são amplamente empregados nos processos industriais dos mais diversos ramos. Na agroindústria são utilizados, por exemplo, na secagem de materiais têxteis. Na secagem de tecido utiliza-se um tipo de secador em que o tecido entra em contato direto com o ar aquecido. Esta operação é fundamental para a qualidade final do produto, mas demanda muita energia onerando os custos de produção. Uma estratégia para reduzir o consumo de energia e manter a qualidade do tecido é trabalhar com o secador nas melhores condições de operação. Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é a modelagem e análise da secagem de artigos têxteis em secadores rotativos industriais. Para tanto, foi desenvolvido um modelo fenomenológico para o processo de secagem de artigos têxteis na área industrial, bem como a aplicação de modelos empíricos presentes na literatura. A validação do modelo foi realizada utilizando dados experimentais coletados numa lavanderia situada na região de Maringá-PR. A coleta de amostras de batelada, temperatura e tempo, foram realizadas nas dependências da empresa em um dos equipamentos de secagem industrial, donde foram modelados e validados no software Matlab®. Com os modelos validados foram realizadas simulações a fim de verificar o comportamento e a influência na operação de secagem. O modelo proposto, bem como os modelos de Page, Midilli, Logaritimico e Henderson e Pabis Modificado representaram bem o perfil de secagem do equipamento analisado. No processo de secagem de artigos têxteis em secadores rotativos, existe uma interferência da temperatura do ar ambiente nesse processo, influenciando significativamente na sua eficiência.

Palavras-Chaves: Secagem, Secador Rotativo, Modelagem, Artigos Têxteis.

ABSTRACT

Rotary dryers are widely used in the industrial processes of the most diverse branches. In agro-industry they are used, for example, in the drying of textile materials. In fabric drying a type of dryer is used in which the fabric comes into direct contact with the heated air. This operation is fundamental to the final quality of the product, but it demands a lot of energy costing the production. One strategy to reduce energy consumption and maintain tissue quality is to work with the dryer in the best operating conditions. In this way, the general objective of this work is the modeling and analysis of the drying of textile articles in industrial rotary dryers. For that, a phenomenological model was developed for the drying process of textile articles in the industrial area, as well as the application of empirical models present in the literature. The validation of the model was performed using experimental data collected in a laundry located in the Maringá-PR region. The collection of samples of batch, temperature and time were carried out in the premises of the company in one of the industrial drying equipment, where they were modeled and validated in Matlab® software. With the validated models, simulations were performed in order to verify the behavior and the influence on the drying operation. The proposed model, as well as the Page, Midilli, Logarithmic and Henderson and Modified Pabis models, represented the drying profile of the equipment analyzed. In the drying process of textile articles in rotary dryers, there is an interference of the ambient air temperature in this process, significantly influencing its efficiency.

Key-words: Drying, Rotating Dryer, Modeling, Textile Articles.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABELAS	5
LISTA DE SÍMBOLOS	6
1 INTRODUÇÃO.....	8
2 OBJETIVOS.....	10
3 REFERENCIAL TEÓRICO	11
3.1 A PRODUÇÃO DE TECIDOS.....	11
3.2 BENEFICIAMENTO TÊXTIL EM LAVANDERIAS INDUSTRIAIS.....	14
3.3 O CONSUMO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA TÊXTIL.....	18
3.4 MATERIAIS TÊXTEIS	18
3.5 SECAGEM E CINÉTICA DE SECAGEM.....	20
3.6 SECADORES ROTATIVOS.....	27
3.7 MODELOS MATEMÁTICOS DE SECAGEM.....	28
3.8 AVALIAÇÕES DO MODELO	31
3.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 MATERIAIS	33
4.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	33
4.2.1 Coleta dos Dados no Secador Industrial	37
4.3 METODOLOGIA NUMÉRICA.....	38
4.3.1 Obtenção do Modelo Matemático	38
4.3.2 Solução Numérica	41
4.3.3 Determinação do coeficiente de massa K	42
4.4 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NO SECADOR INDUSTRIAL.....	44
5.2 DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA (K) A PARTIR DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	47
5.2.1 Avaliação dos Ajustes Linear e Exponencial	47
5.2.2 Cálculos dos Parâmetros dos Ajustes	54
5.2.3 Cálculo de K_{exp} , Simulação e Análise das Condições Operacionais do Secador	60
5.3 VALIDAÇÃO DO MODELO FENOMENOLÓGICO PROPOSTO.....	62

5.4	AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS SOBRE OS MODELOS SIMPLIFICADOS E OUTROS MODELOS	64
5.4.1	Ajuste dos Parâmetros e do K.....	64
5.4.2	Ajuste dos Parâmetros com K Experimental.	68
5.5	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	71
6	CONCLUSÕES.....	73
	REFERÊNCIAS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ORIGEM DAS FIBRAS TÊXTEIS _____	11
FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DE PROCESSO DE FIOS E ACABAMENTO TÊXTIL _____	12
FIGURA 3 - TIPOS DE TECIDOS _____	13
FIGURA 4 - TIPOS DE TRAMAS _____	14
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DOS ARTIGOS _____	16
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE SECAGEM _____	17
FIGURA 7 - MORFOLOGIA DA FIBRA DE ALGODÃO _____	19
FIGURA 8 - UMIDADE DE UM MATERIAL, DURANTE UM PROCESSO DE SECAGEM _____	23
FIGURA 9 - FOTO FRONTAL DO SECADOR ROTATIVO _____	34
FIGURA 10 - VISTA ISOMÉTRICA FRONTAL DO SECADOR _____	34
FIGURA 11 - VISTA EXPLODIDA FRONTAL _____	35
FIGURA 12 - VISTA ISOMÉTRICA TRASEIRA DO SECADOR. _____	35
FIGURA 13 - VISTA TRASEIRA DO SECADOR. _____	36
FIGURA 14 - FORNO DE SECAGEM _____	38
FIGURA 15 – AJUSTE MODELO LINEAR ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	51
FIGURA 16 - AJUSTE MODELO EXPONENCIAL ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	51
FIGURA 17 - AJUSTE MODELO LINEAR ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	52
FIGURA 18 - AJUSTE MODELO EXPONENCIAL ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	52
FIGURA 19 - AJUSTE MODELO LINEAR ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	53
FIGURA 20 - AJUSTE MODELO EXPONENCIAL ($1,25 \text{ M}^3 \cdot \text{S}^{-1}$) _____	53
FIGURA 21 – VALOR MÉDIO DE B1 ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	55
FIGURA 22 - VALOR MÉDIO DE B2 ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	55
FIGURA 23 - VALOR MÉDIO DE B3 ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	56
FIGURA 24 - VALOR MÉDIO DE B1 ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	56
FIGURA 25 - VALOR MÉDIO DE B2 ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	57
FIGURA 26 - VALOR MÉDIO DE B3 ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	57
FIGURA 27 - VALOR MÉDIO DE B1 ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	58
FIGURA 28 - VALOR MÉDIO DE B2 ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) _____	58
FIGURA 29 - VALOR MÉDIO DE B3 ($1,25 \text{ M}^3 \cdot \text{S}^{-1}$) _____	59
FIGURA 30 - PERDA DE MASSA DE ÁGUA EM INTERVALOS DE 5 MIN _____	61

FIGURA 31 - CURVA DE PERDA DE ÁGUA ACUMULADA _____	61
FIGURA 32 - DESVIO GLOBAL DO MODELO PROPOSTO ($1,25\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) _____	63
FIGURA 33 - AJUSTE DE DADOS PARA MODELO PROPOSTO SIMPLIFICADO (EQ. 22) _____	64
FIGURA 34 - AJUSTE DE DADOS PARA PAGE _____	66
FIGURA 35 - AJUSTE DE DADOS PARA WANG E SING _____	67
FIGURA 37 - AJUSTE DE DADOS PARA HANDERSON E PABIS _____	67
FIGURA 38 - AJUSTE DE DADOS PARA H. P. MODIFICADO _____	67
FIGURA 39 - AJUSTE DE DADOS PARA DOIS TERMOS _____	68
FIGURA 40 - AJUSTE DE DADOS PARA MIDILLI _____	68
FIGURA 41 - AJUSTE DE DADOS PARA MODELO PROPOSTO SIMPLIFICADO (EQ. 23) _____	69
FIGURA 42 - AJUSTE DE DADOS PARA LOGARÍTIMICO (K EXP.) _____	70
FIGURA 43 - AJUSTE DE DADOS PARA MIDILLI (K EXP.) _____	70
FIGURA 44 - AJUSTE DE PAGE SOBRE A TEMPERATURA _____	71
FIGURA 45 - AJUSTE DE MIDILLI SOBRE A TEMPERATURA _____	72

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS LINEARES	14
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DO ALGODÃO	20
TABELA 3 - MODELOS MATEMÁTICOS DE SECAGEM	30
TABELA 4 - DADOS EXPERIMENTAIS ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).	45
TABELA 5 - DADOS EXPERIMENTAIS ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).	46
TABELA 6 - DADOS EXPERIMENTAIS ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	46
TABELA 7 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS LINEARES ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	48
TABELA 8 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS EXPONENCIAIS ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	48
TABELA 9 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS LINEARES ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	49
TABELA 10 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS EXPONENCIAIS ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	49
TABELA 11 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS LINEARES ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	50
TABELA 12 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS EXPONENCIAIS ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	50
TABELA 13 - RESUMO ESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS EXPONENCIAIS	59
TABELA 14 – RESUMO DOS PARÂMETROS EXPONENCIAIS E DADOS PARA CÁLCULOS	60
TABELA 15 - K_{EXP} ENCONTRADOS	60
TABELA 16 - DIFERENÇA PERCENTUAL DE SECAGEM ENTRE VAZÕES	62
TABELA 17 - AJUSTE DO MODELO PROPOSTO SIMPLIFICADO (EQ. 22)	65
TABELA 18 - APLICAÇÃO DE VÁRIOS MODELOS NOS DADOS COLETADOS	65
TABELA 19 - AJUSTE DO MODELO PROPOSTO SIMPLIFICADO K EXPERIMENTAL (EQ. 23)	69
TABELA 20 - APLICAÇÃO DE VÁRIOS MODELOS NOS DADOS COLETADOS K EXPERIMENTAL	70
TABELA 21 - VALORES DE ERRO E DE QUI-QUADRADO	72

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidades SI
Z_e	Altura de elevação de entrada	[m]
Z_s	Altura de elevação de saída	[m]
Q	Calor trocado	[kJ/kg]
$C_{p_{ar,ent}}$	Capacidade calorífica do ar na entrada	[kJ/kg°C]
$C_{p_{ar,sai}}$	Capacidade calorífica do ar na saída	[kJ/kg°C]
$C_{p_{ss}}$	Capacidade calorífica do sólido seco	[kJ/kg°C]
K_{ss}	Condutividade térmica do sólido seco	[kJ/m°C]
K, K_0, K_1	Coefficiente de transferência de massa e calor	Adimensional
a, b, c, n	Coefficientes	Adimensional
A_{art}	Área do Artigo	[m ²]
ρ_{ar}	Densidade do ar	[kg/m ³]
ρ_{arseco}	Densidade do ar seco	[kg/m ³]
σ	Desvio padrão	Adimensional
$b, s.$	Base Seca	Adimensional
D	Difusividade Mássica	[m ² .s ⁻¹]
U	Energia interna	[kJ]
h_e	Entalpia de entrada	[kJ/kg]
h_s	Entalpia de saída	[kJ/kg]
e	Erro padrão	Adimensional
\dot{m}_{e,h_2o}	Fluxo de massa de entrada	[kg.s ⁻¹]
\dot{m}_{s,h_2o}	Fluxo de massa de saída	[kg.s ⁻¹]
\dot{m}_{h_2o}	Massa de H ₂ O	[kg]
m_{ss}	Massa de Solido Seco	[kg]
m_d	Mediana	Adimensional
$T_{ar,ent}$	Temperatura de ar na entrada	[°C]
$T_{ar,sai}$	Temperatura de ar na saída	[°C]
t	Tempo	[s]
X_c	Teor de umidade crítica	[kg _{água} /kg _{tec}]

X_e	Teor de umidade no equilíbrio	[kg _{água} /kg _{tec}]
X_0	Teor de umidade no instante zero	[kg _{água} /kg _{tec}]
X	Teor de umidade no tempo em base seca	[kg _{água} /kg _{tec}]
W	Trabalho	[watt]
UR	Umidade Relativa do ar	Adimensional
q_0	Vazão de ar	[m ³]
V_e	Velocidade de entrada	[m/s]
V_s	Velocidade de saída	[m/s]

1 INTRODUÇÃO

A importância do setor têxtil na economia mundial pode ser expressa pela satisfação que a moda gera no consumidor. Esse desejo é despertado em todas as classes sociais, culturas e faixas etárias, forçando assim a indústria têxtil a diminuir custos na forma de tempo, recursos e a melhoria da produtividade, afim de tentar conseguir atender satisfatoriamente todo esse nicho de mercado já existente e que continua em crescimento na geração de receitas.

Segundo a ABIT (Associação Brasileira da Indústria Têxtil) a produção de artigos têxteis em 2017 foi de 1,7 milhão de toneladas, contra 1,6 milhão de toneladas em 2016. O setor de varejo vendeu 6,71 bilhões de peças, contra 6,3 bilhões de peças em 2016, gerando 1,5 milhão de empregados diretos e 8 milhões se adicionarmos os indiretos para efeito renda, dos quais 75% são de mão de obra feminina.

Uma das etapas da cadeia produtiva têxtil é o setor de lavanderia Industrial, que se encontra espalhada em todo o Brasil, onde podemos citar os polos industriais de Toritama no estado de Pernambuco, Cianorte estado do Paraná e Brusque em Santa Catarina. Segundo a SINDILAV (Sindicato das Lavanderias de São Paulo), em 2017 haviam 8.500 lavanderias registradas no Brasil, sendo destas 2.000 no ramo industrial e as outras na área de serviço. A característica do ramo industrial constitui em um seguimento de indústria química, onde são empregadas enzimas (celulase, alamilase e lacase), peróxidos (hidrogênio), ácidos (sulfúrico, acético, oxálico, fluorídrico, sulfônico e graxos), bases (soda cáustica), carbonatos (cálcio, sódio), resinas (acrílicas) e polímeros (catiônicos e aniônicos) de baixa, média e alto peso molecular.

O jeans que é objeto do nosso estudo é utilizado por varias classes sociais, alem disso, é ser o tecido mais produzido no mundo. Segundo a IEMI (Estudos de Mercado de Marketing industrial) a produção brasileira de peças em jeans em 2012 foi de 349,8 milhões por volta 140 mil toneladas, o que não resulta em 2 peças por habitante brasileiro, mostrando o potencial de crescimento deste mercado.

Uma das etapas do processo de beneficiamento têxtil em lavanderias industriais, é a secagem das peças texteis. A operação de secagem nesse segmento tem a finalidade de eliminar grande parte da umidade (água) que provem residualmente dos processos de beneficiamento feito nas lavadoras industriais. Essa

secagem é realizada em secadores rotativos usando ar atmosférico aquecido em trocadores de calor utilizando vapor saturado, que são localizados na parte superior do equipamento, onde o ar ambiente é aquecido pela troca com vapor saturado.

A secagem em uma lavanderia é fundamental para a qualidade final das peças e conseqüentemente a sua aceitação pelo consumidor e comercialização, pois na fase final de beneficiamento determina em grande parte o “toque” da peça, que é a percepção do consumidor final no que diz respeito a maciez da peça. A secagem é empregada tanto na fase central do processo depois do benefício primário quanto na fase final. Em média na empresa onde foi coletada as amostras, 80% das peças são submetidas por duas secagens durante os processo de beneficiamento.

O gasto excessivo de energia eleva os custos de produção, diminuindo a capacidade competitiva das empresas da cadeia têxtil. Assim, é fundamental uma análise cuidadosa da operação de secagem a fim de reduzir o consumo de energia da operação.

A importância do rateio dos custos na indústria, se faz cada vez mais relevante para que a corporação seja mais competitiva, assim um estudo que analise os processo industriais é de suma importância para o setor. Poucos estudos são encontrados no ramo de secagem têxtil, sendo ainda mais escassos industrial, o estudo da cinética de secagem torna-se fundamental para a compreensão dos complexos fenômenos envolvidos na etapa de secagem. Para contribuir para diminuir essa deficiência, o tecidos jeans com características de no mínimo 97% de algodão e 3% de elastano foram submetidos as análises na planta industrial.

Foram obtidos então os dados para os perfis de umidades das amostras respeitando sempre os limites industriais, dos instrumentos de medida e dos equipamentos.

Os dados foram simulados em *software* para simulações, e os resultados foram analisados estatisticamente. Com isso, espera-se que o trabalho contribua para o melhor conhecimento da etapa de secagem no que diz respeito aos fenômenos transferência de calor e massa.

2 OBJETIVOS

O desenvolvimento do estudo visa principalmente tornar a secagem industrial de jeans mais conhecida com a obtenção dos perfis de secagem por meio das curvas de umidade obtidas.

A fim de viabilizar o estudo algumas etapas foram feitas. Essas estão descritas abaixo:

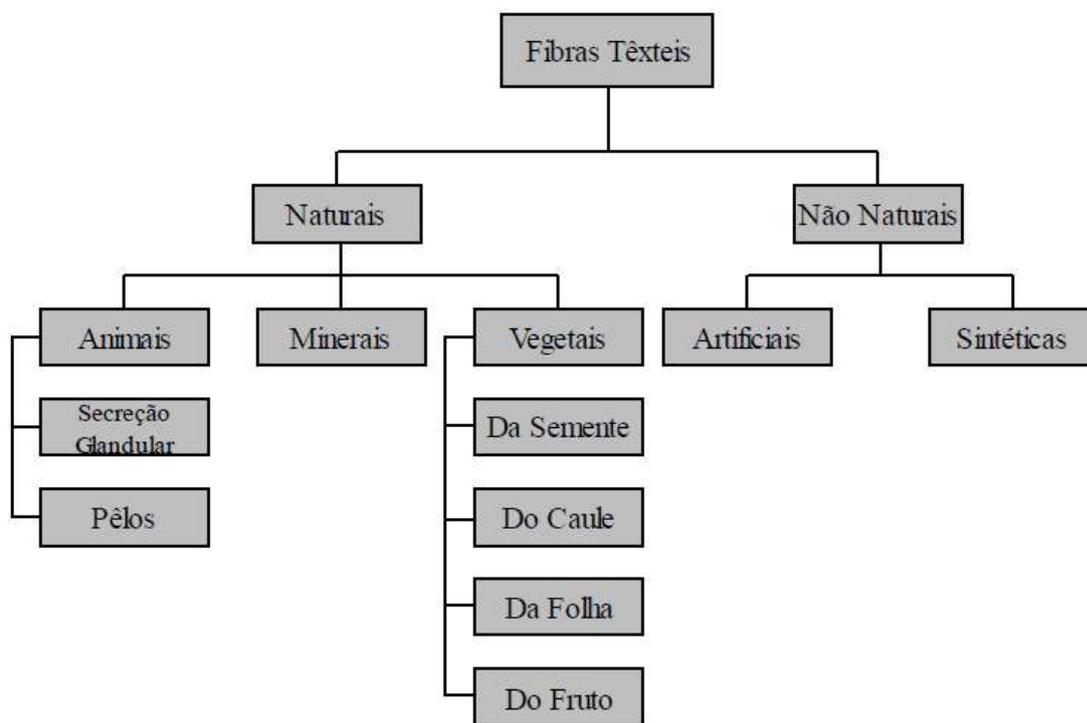
- Estudo e análise dos fenômenos de transferência de massa e calor que ocorrem entre o ar de secagem e o tecido jeans;
- ajuste dos parâmetros de secagem do modelo proposto;
- análise dos dados de secagem com modelos já consagrados na literatura e;
- validar o modelo de secagem em relação as medidas experimentais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A PRODUÇÃO DE TECIDOS

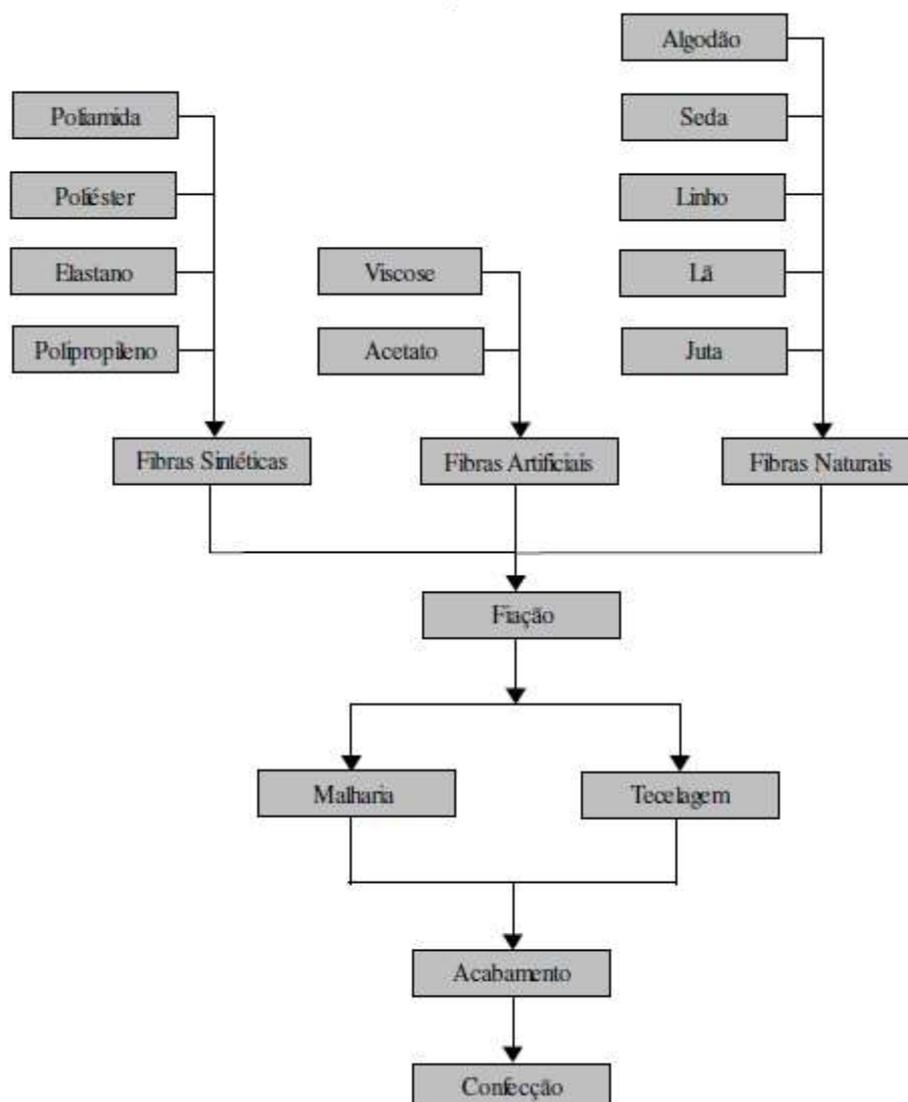
A cadeia têxtil conta com uma complexa logística empregada, já que os tecidos podem ser 100% naturais, como no caso do algodão, em Blends como no caso da mistura algodão lycra ou 100% artificiais ou sintéticos, como no caso de tecidos técnicos. No ramo da moda sua cadeia começa desde a coleta ou confecção da matéria prima, processos de obtenção de tecidos, manufatura de acabamento dos tecidos, confecção dos artigos e acabamentos destes. A Figura 1 apresenta os processo de obtenção das fibras, já a Figura 2, apresenta o processo de obtenção de tecidos e acabamentos destes. A origem dos tecidos são diversas, esses podem ser originados de sementes, de materiais minerais, de secreção glandular, de materiais sintéticos e materiais artificiais.

FIGURA 1 - ORIGEM DAS FIBRAS TÊXTEIS



FONTE: Fibra S. A.

FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DE PROCESSO DE FIOS E ACABAMENTO TÊXTIL



FONTE: IEL (2000).

Dentro dos tecidos podemos citar a existência de;

- Tecidos planos que é produzido pelo entrelaçamento do conjunto de fios de urdume (direção longitudinal) e a trama(formando um ângulo 90° ou próximo disso).

- As malhas que tem em sua fundamentação a laçada, que constitui-se de uma cabeça, duas pernas e dois pés. A carreira de malhas é a sucessão de laçadas consecutivas no sentido da largura do tecido. Já a coluna de malha é a sucessão de laçadas consecutivas no sentido do comprimento do tecido e;

- O não tecido, que é uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras, ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processos: mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico

(coesão) ou combinação destes. Na Figura 3 podemos visualizar as diferenças entre os 3 tipos de tecidos citados.

FIGURA 3 - TIPOS DE TECIDOS



a) Tecido Plano

b) Malha

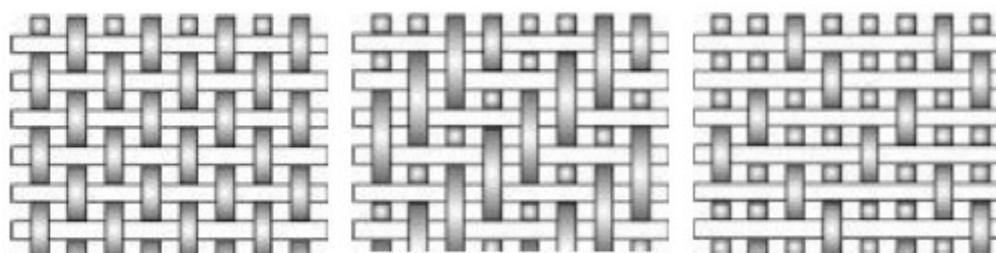
c) Não Tecido.

FONTE: Salem, de Marchei, & Meneses (2005).

O tecido plano é o produto final da tecelagem sendo classificado conforme a matéria prima empregada, a forma de entrelace dos fios, o número de fios por centímetro quadrado e também o peso.

“os fios no sentido do comprimento são conhecidos como fios de urdume, enquanto que os fios na direção da largura são conhecidos por fios de trama. As bordas do tecido no comprimento são as ourelas, que são facilmente distinguíveis do resto do material (DUPONT, 1991, p. 5)”.

São inúmeras as possibilidades de combinação entre fios e ligamentos. Seria impossível fazer-se um levantamento de todos os tipos de tecidos existentes, uma vez que todos os dias novas estruturas são criadas em todas as partes do mundo. Existem entretanto, certas construções que são bastante utilizadas em todas as tecelagens. Algumas das mais usuais, com a finalidade de possibilitar uma comparação entre os elementos que compõe esses tecidos está demonstrada na Figura 4. As estruturas mostradas na Figura 4, são típicas de diversos artigos apresentados com seu nome comercial. A maior parte tem ligamento TELA, seguido pela SARJA e, finalmente pelo CETIM, que são os ligamentos fundamentais.

FIGURA 4 - TIPOS DE TRAMAS

a) Tela

b) Sarja

c) Cetim ou Raso.

FONTE: O Autor (2018).

Para o nosso propósito o tipo de construção tela e sarja são os que serão considerados, pois são mais comumente utilizados na produção do jeans.

Na Tabela 01 são apresentadas algumas propriedades físicas do algodão e de outros materiais têxteis porosos e hidrofóbicos.

TABELA 1 – DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS LINEARES

Material	Densidade do Sólido Seco (g/cm ³) [ρ_{ss}]	Porosidade do sólido seco [ϵ_{ss}]	Calor específico do sólido Seco (J/g.°C) [$C_{p,ss}$]	Condutividade Térmica do Sólido Seco (J/m.K) [k_{ss}]
Lã	1,30	0,38	371,28	$7,33 \times 10^{-4}$
Seda	1,34	0,36	376,74	$7,33 \times 10^{-4}$
Algodão	1,55	0,34	330,33	$5,86 \times 10^{-4}$
Nylon	1,14	0,36	325,04	$9,16 \times 10^{-4}$
Polyester	1,39	0,29	365,82	$5,13 \times 10^{-4}$

FONTE: o Autor, adaptado Gibison e Charmchi (1997) (2017).

3.2 BENEFICIAMENTO TÊXTIL EM LAVANDERIAS INDUSTRIAIS

As peças confeccionadas chegam às lavanderias industriais para serem submetidas à transformação por meio de agentes físicos e químicos. Nelas são empregados enzimas, sabões, resinas, ácidos, bases, oxidantes, redutores além de passarem por lixamento, desbaste, estamparia a base de tinta e a base de laser, cura a temperaturas elevadas (190°C), centrifugação, secagem e passadoria. Na Figura 5 podemos observar os processos envolvidos na transformação do artigo.

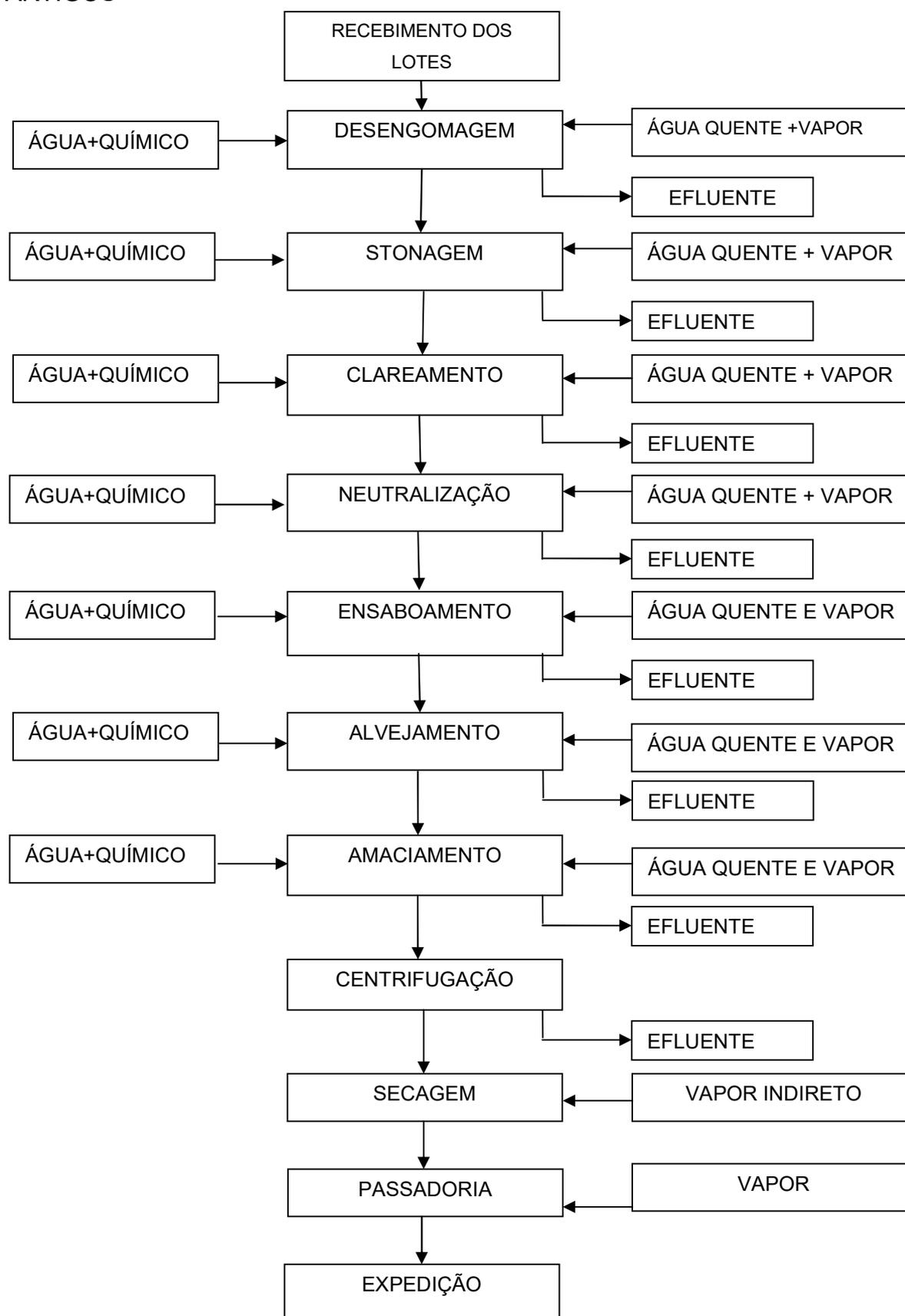
Pode-se ver que após o recebimento do lote, esse passa pelas lavadoras onde são submetidas aos processos de desengomagem e stonagem, podendo ser ou não clareado e neutralizado, após isso ele ainda pode ser enviado à centrifugação e

secagem, para que possa ser encaminhado a outros setores para passar por processos manuais ou físicos, donde então voltam as lavadoras para serem neutralizados e seguem adiante para serem ensaboados e completarem respectivamente o fluxo até a secagem e passadoria. O processo de secagem pode ser efetuado até duas vezes nas peças, que é o que acontece em 80% dos casos da empresa estudada.

O artigo confeccionado geralmente chega engomado, onde são utilizados enzima alamilase ou desengomantes sintéticos para a retirada desta goma, seguindo então para a stonagem onde em conjunto com os atritos entre o cesto e a peça e entre as peças resultam na stonagem propriamente dita.

Para o clareamento da peça são empregados hipocloritos (geralmente de cálcio ou sódio) e permanganato de potássio, que ocasionam a quebra de corante superficial, expondo gradativamente as camadas de corante mais internas, e dependendo de quão é necessário o grau de clareamento, acaba por expor a fibra do jeans. A neutralização destes oxidantes pode ser feita por metabissulfitos e bissulfitos. Na etapa do ensaboamento, geralmente é empregado ácido sulfônico e soda cáustica, dando na verdade um pré-alveamento nos artigos, pois o alveamento, propriamente dito, é feito à base de hipoclorito ou peróxidos (que também podem ser encontrados na forma de perboratos ou percarbonatos). O amaciamento é feito geralmente com ácidos graxos, bases quartenárias e emulsões acrílicas. A centrifugação das peças é feita em equipamento centrifugo com rotação de 800 rpm retirando em média 3 vezes peso da peça seca em água, mas ainda destinando ao secador o artigo com em média 50% de umidade residual em base seca. Nos secadores rotativos essas peças sofrem a transferência de massa em forma de água e calor por trocas convectivas e condutivas e de radiação.

As peças têm de estar no final da etapa de secagem não completamente secas para a percepção de qualidade do cliente, mas também com um grau de umidade que restringe o amarelamento e ocasionado pela quebra de corante pelo efeito Smog Fotoquímico e pelo resíduo de amaciante (mais frequente com amaciante graxo) que pode ser potencializada pela umidade da peça, e também o aparecimento de fungos e bactérias que potencializa a possível quebra da celulose em amido e posteriormente em glicose.

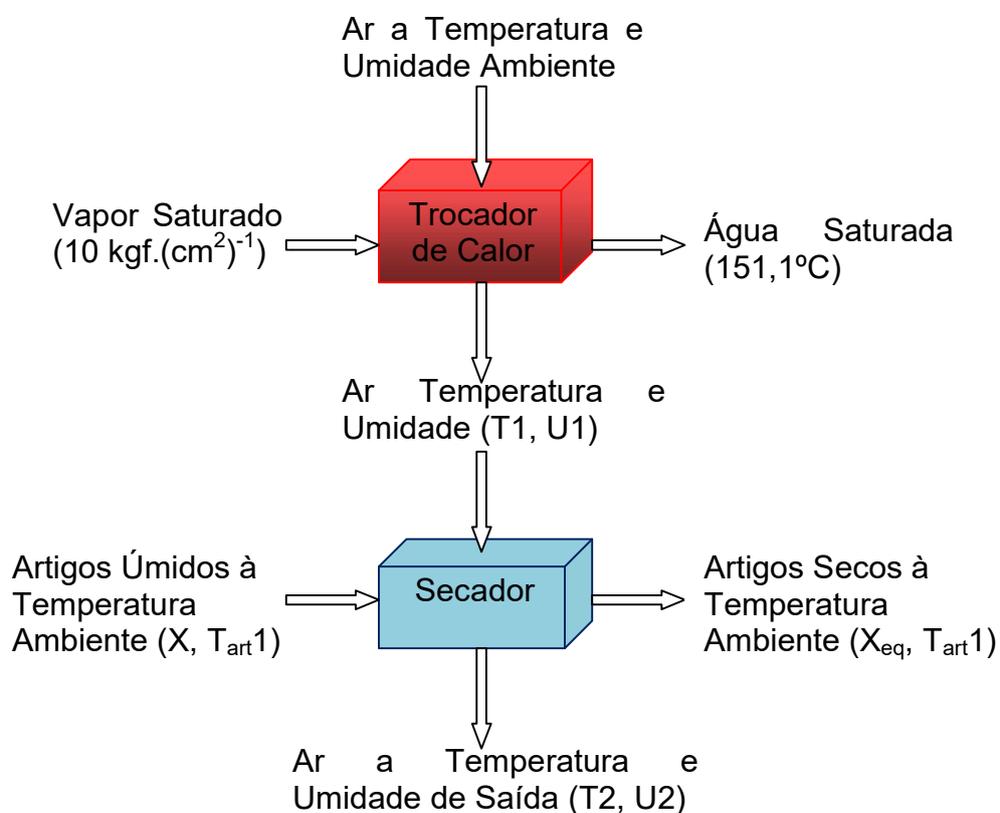
FIGURA 5 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DOS ARTIGOS

FONTE: O Autor (2018).

Por fim, a peça é passada de forma manual com o emprego de vapor saturado direto por meio de ferros industriais. Assim, a peça acabada segue para a expedição.

Como se observa no fluxograma apresentado na Figura 5, o processo de acabamento de materiais têxteis consome muita água e vapor no desenvolvimento das suas operações. Desta forma, a operação de secagem é de fundamental importância no acabamento e qualidade final do produto. No detalhe representado na Figura 6 é mostrado como ocorre a secagem de artigos têxteis em uma lavanderia industrial.

FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE SECAGEM



FONTE: O Autor (2018).

Observa-se que o vapor saturado aquece o ar ambiente num trocador de calor; em seguida, este ar entra em contato direto com o tecido num secador do tipo rotativo. O ar úmido é sugado por 2 exaustores alocados na parte inferior. O material seco é descarregado e enviado a para etapas posteriores.

3.3 O CONSUMO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA TÊXTIL

Atualmente os secadores rotativos têxteis disponíveis no mercado, utilizam 160 kg de vapor para a secagem de 70 kg de roupa em 1 hora de processo, com condições de entrada de temperatura de 25° C e umidade de 75%. No ramo de lavanderias industriais, cerca de 80% dos artigos precisam passar 2 vezes no processo de secagem demandando por volta de 3,87 kg de vapor por kg de artigo seco, na empresa estudada, o custo médio do vapor fica em torno de R\$ 0,05 por kg, a depender das condições da matéria prima da geração de energia, isso resulta o valor estimado de 11,9 milhões por ano para o segmento industrial. Cada secador tem em média 8,0 kW de potência elétrica instalada, considerando em motor padrão de 83,5% de eficiência e a média tarifária de R\$ 0,60 (incluindo as questões de demanda contratada e bandeira tarifária), chegamos ao consumo de R\$ 0,102 por kg de artigo, na soma de 24,31 milhões por ano só no ramo industrial. Vale ressaltar, que esses tipos de secadores são utilizados no ramo industrial, no de serviços e domésticos.

O consumo de energia na secagem têxtil depende de vários fatores como a umidade e temperatura do ar, a trama do tecido e a tensão superficial do tecido. Carter e Shah (2005) diminuíram a tensão superficial do tecido e conseqüentemente a umidade do tecido, em seus estudos a diminuição da tensão superficial resulta na diminuição da umidade do tecido e na quantidade de energia gasta na secagem, sendo diretamente proporcional essa correlação entre a umidade e quantidade de energia.

No consumo total de vapor de uma lavanderia industrial, o processo de secagem consome 70% da energia gerada em forma de vapor, sendo os 30% restantes utilizados no aquecimento nas máquinas lavadoras, na passadoria e em fornos.

Assim, melhorar a etapa de secagem é vital para uma melhor produtividade e redução de custos da empresa, o que a torna mais competitiva no mercado.

3.4 MATERIAIS TÊXTEIS

Os tecidos estão presentes em todos os ramos da indústria de manufatura, desde macacão de astronautas até em elementos filtrantes para diversos seguimentos.

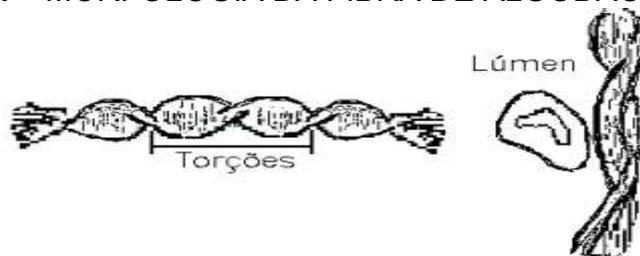
O material utilizado como objeto de estudo neste trabalho foi o jeans, no qual sua estrutura é composta por 97%, no mínimo, de algodão e 3% de elastano, onde o algodão fazia parte com no mínimo 97%, sendo os 3% o elastano. Os tecidos utilizados tinham gramatura que variavam entre 227 g/m² a 340 g/m² e sua espessura variava conforme a especificação do fabricante.

De acordo com Pita (1996), a fibra têxtil é todo o material que pode ser usado para fins têxteis, podendo ser um fio, malha, tecido, etc., sendo que cada fibra tem uma composição química única servindo para sua classificação e apresentando características e prioridades diferentes como elasticidade, massa específica e hidroafinidade. Elas apresentam, ainda, estruturas amorfas e cristalinas, sendo essas últimas as que conferem mais resistência quanto maior forem as suas orientações.

As fibras sintéticas mais comuns no ramo da moda são a poliamida (nylon, helanca), poliéster (tergal), acrílico, polipropileno e a lycra. No caso das fibras naturais são a seda e o algodão, este último que corresponde a produção do jeans. O algodão apresenta a vantagem por poder se aproveitar tudo, além da fibra pode-se extrair óleos. Sua fibra apresenta uma estrutura monomolecular, cuja a forma microscopia é espalmada com várias torções sobre o seu eixo (Figura 7), que em média ocorre em número de 5 milímetros de fibra.

A composição do algodão está apresentada na Tabela 2, na qual se pode observar que 85,5% do algodão é a celulose e que seus grupos hidroxilas conferem uma absorção de 50% em peso de água facilitando o tingimento. Sua absorção a 25°C e umidade relativa do ar de 100% é de 20 a 30% em peso (Sá, 2008).

FIGURA 7 - MORFOLOGIA DA FIBRA DE ALGODÃO



FONTE: Souza (2003).

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DO ALGODÃO

Material	Quantidade %
Celulose	85,5%
Óleos e Ceras	0,5%
Proteínas, pectoses e pigmentos	5,0%
Substancia mineral	1,0%
Água	8,0%

Fonte: Fibras Têxteis, Pita(1996).

O algodão não sofre decomposição até uma temperatura 150°C quando se apresenta estado de seco, mas em temperaturas maiores pode surgir uma coloração marrom. Para uma secagem satisfatória e com uma melhor qualidade no produto final a temperatura do artigo não pode ultrapassar 75°C.

3.5 SECAGEM E CINÉTICA DE SECAGEM

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, como na engenharia têxtil e química, no armazenamento e conservação de energia, no projeto de roupas funcionais, entre outros. Um gás aquecido aquece a superfície do material a ser seco, a umidade do sólido é evaporada e transferida para a corrente de gás, que se torna progressivamente mais úmido. A temperatura e a concentração de vapor de umidade na superfície do sólido são fatores que influenciam a taxa de secagem.

Para Keey (1992), a secagem é definida como a remoção de uma substância volátil (a umidade) usando calor, a partir de uma mistura, fornecendo um produto sólido. Para que a secagem ocorra, o material úmido deve receber calor de suas vizinhanças, a umidade no interior do sólido evapora e é transferida para uma fase gasosa. Quando um sólido úmido é submetido à secagem ocorrem basicamente dois fenômenos simultâneos. Um destes fenômenos é a transferência de calor do ambiente para evaporar a umidade superficial.

Esta transferência depende de condições externas de temperatura, umidade, vazão e direção do ar, área de exposição do sólido e pressão. O outro é a transferência de umidade, do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. O movimento interno da umidade no material é função da natureza física do sólido, sua temperatura e conteúdo de

umidade e pode ocorrer pelos mecanismos de difusão e capilaridade (Foust et al., 1980; McCabe; Smith; Harriot, 2005).

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. Para (Oktay; Hepbasli, 2002), a secagem é uma operação de energia intensiva e possui certa relevância nos países industrializados, uma vez que a energia despendida nesse processo contabiliza cerca de 7 a 15% da energia gerada com finalidade industrial e geralmente com eficiência térmica relativamente baixa.

Perazzini (2014) cita a difusão ordinária de vapor, difusão de Knudsen (quando os poros são muito pequenos, menores do que $1,0 \times 10^{-7}$ m), difusão de água líquida, migração de líquido por efeitos de capilaridade. Assim, o consumo de energia em um secador pode ser reduzido pela otimização do processo de secagem utilizando uma análise matemática da distribuição de temperatura e umidade no tecido, de tal modo que o desenvolvimento de um modelo adequado para prever o desempenho de um secador de forma precisa é importante para economia de energia do processo (Haghi, 2001).

Além de envolver as transferências de calor e massa entre o material a ser seco e o meio secante este também recebe influência do escoamento deste meio sobre o sólido, as transferências de calor e massa dependem das condições de temperatura, umidade, vazão e direção do fluido de secagem, bem como a natureza e as condições iniciais de umidade e temperatura do material (Park et al. 2008).

O processo de secagem apresenta três formas distintas de aquecimento do produto, sendo estas:

- Direta;
- Indireta e;
- Radiação.

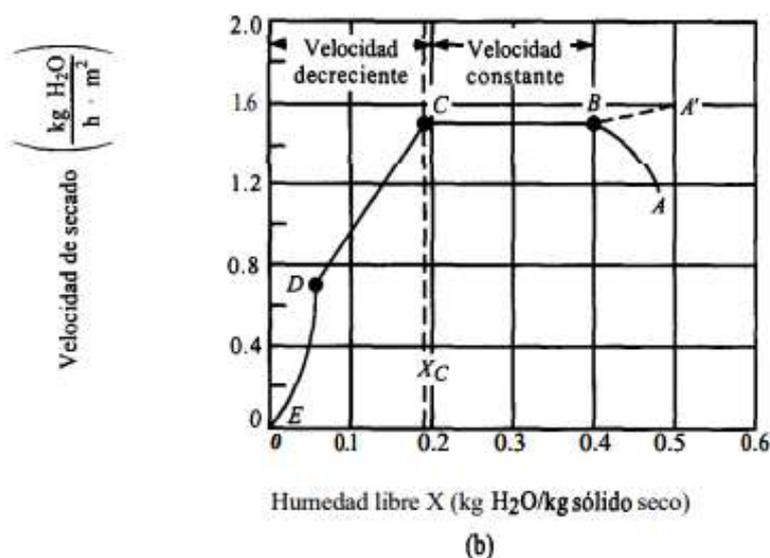
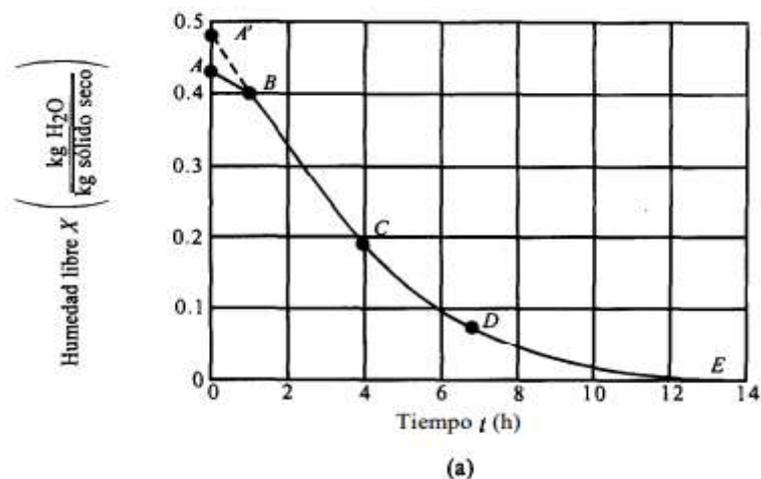
Na forma direta, há contato entre o gás e o sólido ocorrendo transferência de calor por convecção. Na indireta existe uma superfície condutora entre o gás e o sólido, ocorrendo transferência de calor tanto por condução quanto por convecção, além de o gás poder trocar calor com o sólido por meio de convecção natural ou forçada. Na secagem por radiação, o transporte de umidade e a difusão de vapor do sólido seguem as mesmas leis que a secagem por condução e convecção.

Geralmente, nos processos industriais é utilizada a convecção forçada para fins de otimização, pois há maiores taxas de transferência de calor e de massa (Perry e Green, 1998). O conteúdo de umidade de um material, durante um processo de secagem, apresenta o comportamento mostrado pela curva na Figura 8 (a) e a taxa de secagem do material em função do conteúdo de umidade em base seca é mostrada na Figura 8 (b) (Geankoplis, 1993).

Nas Figuras 8 (a) e (b) pode-se observar a ocorrência de diferentes períodos durante a secagem. Os segmentos BA' e BA correspondem ao período em que o material se adapta às condições de secagem e sua temperatura atinge um valor constante, sendo igual à temperatura de bulbo úmido do ar, enquanto a água livre estiver sendo evaporada (Celestino, 2010). Durante o período BC ocorre a secagem a taxa constante.

Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação a taxa de secagem será constante. Durante o período BC, a superfície exposta do material está saturada existindo um filme contínuo de água sobre o sólido que não encontra nenhuma resistência interna para migrar para a fase gasosa. A água removida nesse período é principalmente a água superficial se o sólido for não poroso (cereais, vegetais e outros), sendo curto esse período. Se o sólido for poroso, o período BC é um pouco mais longo, pois a água superficial vai sendo substituída pela do interior do sólido. Portanto, o período de secagem constante (segmento BC) é mais pronunciado em materiais com umidade elevada. O ponto C corresponde ao fim do período de secagem constante, e a umidade, nesse ponto, é conhecida como umidade crítica. A partir desse ponto, ocorre um aumento na resistência interna e o movimento de líquido do interior para a superfície do sólido é insuficiente para compensar o líquido que está sendo evaporado, iniciando-se o primeiro período decrescente (trecho CD). No segmento CD, cada vez menos líquido está disponível na superfície do sólido para evaporar, e essa se torna cada vez mais seca, podendo haver rachaduras na superfície do material. Do ponto D em diante, tem-se o segundo período de taxa decrescente, em que a umidade do material diminui até alcançar a umidade de equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa do ar. Quando a umidade de equilíbrio é atingida, termina o processo de secagem, pois nessa condição, a atividade de água no interior do material é igual à do ambiente.

FIGURA 8 - UMIDADE DE UM MATERIAL, DURANTE UM PROCESSO DE SECAGEM



FONTE: Geankopolis (1993).

Outro fato a ser ressaltado no processo de transferência de calor e de massa na secagem são os mecanismos envolvidos que estão a seguir:

- Transferência de calor do gás para o sólido por convecção;
- Transferência de calor por condução dentro do sólido;
- Evaporação do líquido presente no sólido;
- Transferência de massa do líquido até a superfície do sólido por escoamento capilar ou difusão interna;
- Transporte de massa do vapor na superfície do sólido para o gás;
- Transporte de massa do vapor por difusão ou por convecção (natural ou forçada) no sistema gasoso.

Para Neves *et al* (2015), um tecido deve ser modelado como material poroso feito de fibras, água contida nas fibras e ar em frações volumétricas, 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.

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.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 X}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 X}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 X}{\partial^2 z} \right) \quad 01$$

Onde D é difusividade mássica ($m^2.s^{-1}$) e X é o teor de umidade no tempo em base seca ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{tec}}$).

A homogeneidade do tecido, as dimensões constantes do tecido, a 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 à umidade relativa do ambiente, são fatores a serem considerados. Além disso, 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;
- Conteúdo inicial de umidade do material;
- Conteúdo final de umidade que o material pode chegar (umidade de equilíbrio), e;
- 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 01, considerando um sistema unidimensional e em coordenadas cartesianas tem-se a Equação 02:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \left(\frac{\partial X}{\partial x} \right) \right] \quad 02$$

Em que t é o tempo em segundos, x é a distância no sólido e D é o coeficiente de difusão do líquido através do sólido. A solução da Equação 02 é obtida quando a condição inicial e as condições de contorno das Equações 05, 06 e 07 são estabelecidas e que serão mostradas mais à frente. 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_{eq} .

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

Concomitantemente é importante analisar os fatores que podem limitar a secagem, dentre os quais estão os efeitos externos e internos. As características do gás estão relacionadas com os efeitos externos. Assim, a temperatura, a umidade e a vazão do gás são parâmetros que vão determinar se efeitos externos limitam o processo. Quando isso ocorre, geralmente se observa que a temperatura do sólido é constante, a saturação do sólido é atingida e há uma constante taxa de evaporação do líquido. (Perry e Green, 1998)

A secagem ocorre pela evaporação do líquido presente na fase sólida quando ele é aquecido por convecção, condução ou radiação. As condições externas referem-se às propriedades psicrométricas do ar de secagem. A psicrométrica é a ciência que estuda o envolvimento das propriedades do ar úmido, que é uma mistura de ar seco e

vapor d'água, e do processo que ele passa na mudança de temperatura ou de conteúdo de vapor d'água na mistura (Britto, 2010).

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

A umidade relativa é descrita pela razão entre a pressão parcial de vapor d'água do ar e a pressão de vapor de saturação, de acordo com a Equação 03.

$$UR = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad 03$$

Onde P_v é a pressão parcial de vapor d'água do ar e P_{sat} é a pressão de vapor de saturação. O teor de umidade é a relação direta entre a massa de água presente no material e a massa do mesmo. Esse parâmetro pode ser expresso em relação à massa seca do produto ou base seca (b.s.), dado pela Equação 04.

$$X = \frac{m_a}{m_{ss}} \quad 04$$

Onde m_a é a massa de água m_{ss} é a massa de sólido seco. O tecido é um meio poroso higroscópico, pois certa quantidade de líquido permanece fisicamente vinculada ao sólido, como umidade ligada (Mujundar, 2006). A umidade ligada se refere à água contida em um sólido que exerce uma pressão de vapor no equilíbrio menor que a do líquido puro a mesma temperatura.

Umidade não ligada refere-se à água contida no sólido que exerce pressão de vapor de equilíbrio igual 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). Essa umidade de equilíbrio corresponde àquela que permanece no meio sólido, depois de manter contato com o ar por um longo tempo, a uma dada temperatura. Ela depende essencialmente da natureza do material e é função da temperatura e da umidade do ar. A determinação da umidade de equilíbrio é importante para a secagem porque ela representa o limite máximo que o material pode ser seco ou armazenado de forma segura, para as condições de operação, temperatura e umidade relativa (Ceron, 2008).

Para Perry e Green (1998), os fatores internos estão relacionados com o transporte de massa do líquido no interior do sólido. Quando este efeito limita o processo, há um decaimento da taxa de evaporação do líquido com o tempo e há um aumento da temperatura do sólido. Os mecanismos internos podem ocorrer por difusão em sólidos ou por escoamentos por contração, capilar, por gradientes de pressão, por gravidade e ou em virtude da vaporização-condensação.

Para McCabe(1993), na maioria dos processos de secagem adiabáticos, as taxas de secagem são mais dependentes dos coeficientes de transferência de calor do que dos coeficientes de transferência de massa. Assim, os efeitos difusivos de transporte de massa podem ocorrer, mas geralmente não limitam o processo.

3.6 SECADORES ROTATIVOS

Os secadores rotativos são muito utilizados pela indústria para a secagem de sólidos em regime contínuo e em batelada, por se tratar de um equipamento de baixo custo de implantação, manutenção e sua facilidade de operação (Vieira, 1996). São constituídos por um tambor cilíndrico com chicanas no seu interior, pode ter uma leve inclinação ou não e a rotação dos mesmos fazem com que o material seque de forma mais homogênea possível. A relação entre comprimento e diâmetro varia entre 4 e 15 e a velocidade de rotação entre 3 e 8 rpm (Vieira, 1996).

Os secadores rotativos podem ser utilizados em diversos processos (produção de fertilizantes, secagem de madeira, secagem de soja, secagem têxtil, produção de açúcar, desidratação de vegetais polpas e papel) e em vários ramos (alimentício, agroindústria, estações de tratamento de efluentes).

A alimentação de um secador rotativo pode ser em contracorrente ou concorrente, ou seja, o material e o gás de secagem podem ou não ser alimentados do mesmo lado (Cao; Langrish, 2000), contínuo ou intermitente. Há secadores rotativos de aquecimento direto e de aquecimento indireto dependendo de como se dá a transferência de calor (Luz et al., 2010). No caso de aquecimento indireto, o vapor de água ou os gases de aquecimento circulam em tubos dispostos axialmente no interior do equipamento (Luz et al., 2010), enquanto que nos tambores de aquecimento direto ocorre o contato direto entre o material e o gás de secagem (Perazinni, 2011).

Geralmente, a taxa de secagem é controlada apenas pelas condições externas. Em processos convectivos de secagem, a taxa de perda de umidade do material é controlada por fatores como velocidade, temperatura e umidade do ar e propriedades higroscópicas do material. Para Alvarez e Blasco (1999), a natureza do material determina se parâmetros externos ou estruturais são mais importantes para a secagem. No caso de sólidos porosos, a taxa de secagem é determinada principalmente pela difusão interna e conseqüentemente afetada pela estrutura do sólido, umidade e tamanho da partícula, entre outros parâmetros. As condições externas de secagem, o conhecimento dos mecanismos internos de transferência de calor e massa são bastante importantes para a modelagem desses processos.

O equipamento analisado, opera com capacidade nominal de 100 kg de roupa, é constituído de 2 trocadores de calor com capacidade total de 530.000,00 kJ/hr, com vazão de 6.000,00 m³/hora e área total de 26,04 m² de troca. As características de entrada do ar atmosférico eram de 20°C de temperatura e umidade de 60%, após a troca de calor o ar aquecido atmosférico entra em contato com as peças com temperatura de 99°C e umidade de 1,5%.

O secador ainda é constituído de controle automatizado de temperatura com sensores em PT 100 na saída do ar aquecido e que teve previamente contato com as peças, medidor de temperatura após a troca térmica e inversores de frequência para controle de velocidade de rotação do cesto e dos exaustores. As Figuras 09 a 13 apresentam a foto e os esquemas simplificados do secador.

O cesto tem as dimensões de 1,15 m de profundidade e 1,70 m de diâmetro, resultando num volume útil de 2,61 m³. O volume final de artigos fica em torno de ¼ do volume do cesto. O cesto tem uma área total de 3,32m², com uma área de abertura de passagem do ar de 1,1177 m², mas essa abertura de fluxo de ar se divide ao meio devido que no cesto o ar incide na parte superior e saindo na parte inferior, consistindo na abertura de fluxo de 0,5589 m².

3.7 MODELOS MATEMÁTICOS DE SECAGEM

O projeto de um secador consiste em entender o modo do comportamento da secagem do material, com isso os modelos matemáticos de processo de secagem

são usados para projetar novos sistemas de secagem ou melhorar os existentes, ou mesmo para o controle do processo.

As condições anteriormente citadas são usadas para a composição e propostas de modelos matemáticos que representem a secagem em relação ao tempo.

Crank (1975), por sua vez, tomou as considerações já citadas e a condição inicial e as condições de contorno conforme são apresentadas pelas Equações 05, 06 e 07:

$$X(x, 0) = X_0 \text{ para } 0 < x < l \quad 05$$

$$X(0, t) = X_c \text{ para } t > 0 \quad 06$$

$$X(l, y) = X_c \text{ para } t > 0 \quad 07$$

Levando em conta as hipóteses apresentadas, a solução analítica da equação diferencial apresentada por Crank (1975) é dada pela Equação 8:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{e^{\left[-D \frac{(2j+1)^2 \pi^2 t}{l^2}\right]}}{(2j+1)^2} \quad 08$$

Onde X é o teor de umidade no tempo em base seca ($\text{Kg}_{\text{água}}/\text{Kg}_{\text{tec}}$), X_e é o teor de umidade no equilíbrio ($\text{Kg}_{\text{água}}/\text{Kg}_{\text{tec}}$) e X_0 Teor de umidade no instante zero ($\text{Kg}_{\text{água}}/\text{Kg}_{\text{tec}}$). Além do modelo de Crank que é um modelo teórico, existem vários outros modelos de secagem em camada fina, esses são os mais amplamente utilizados para descrever o comportamento de produtos agrícolas durante a secagem, podendo ser categorizados em teóricos, semiteóricos e empíricos (Doymaz, 2011; Yun et al., 2013). Alguns desses modelos estão listados na Tabela 3, onde as equações descrevem RX (razão de umidade, adimensional) em função do tempo t (Gómez de La Cruz et al., 2015).

TABELA 3 - MODELOS MATEMÁTICOS DE SECAGEM

Modelo	Autor
$RX = 1 + a * t^1 + b * t^2$	Wang e Singh
$RX = a * \exp(-K * t) + (1 - a) * \exp(-K1 * t)$	Verna
$RX = \exp(-K * t^n)$	Page
$RX = \exp(-K * t)$	Newton
$RX = a * \exp(-K * t^n) + b * t$	Midilli
$RX = a * \exp(-K * t) + b$	Logarítmico
$RX = a * \exp(-K * t)$	Henderson e Pabis
$RX = a * \exp(-K0 * t) + b * \exp(-K0 * t) + c * \exp(-K1 * t)$	Henderson e Pabis Modificado
$RX = a * \exp(-K * t) + (1 - a) * \exp(-K * a * t)$	Exponencial de Dois Termos
$RX = a * \exp(-K0 * t) + b * \exp(-K1 * t)$	Dois Termos
$RX = a * \exp(-K * t) + (1 - a) * \exp(-K * b * t)$	Aproximação da Difusão

FONTE: Gómez de La Cruze at (2015).

Onde t é tempo de secagem(s), K , $K0$, $K1$ são constantes de secagem, (s^{-1}) e a , b , c , n são coeficientes dos modelos.

A razão de umidade é definida por:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad 09$$

O conteúdo de água instantâneo X é definido como a razão entre a quantidade de água no produto num dado momento e a quantidade de sólidos secos e é expresso como:

$$X = \frac{m - m_{ss}}{m_{ss}} \quad 10$$

Onde m é a massa instantânea total da amostra, m_{ss} é a massa de sólidos secos, e X é expresso como massa instantânea de água/massa de sólidos secos.

O conteúdo de água de equilíbrio X_e pode ser determinado a partir de dados de isotermas de dessecção (Yun et al., 2013).

O modelo de Page foi relatado como o mais indicado para a secagem de pistache, arilo de romã e cereja doce. O modelo de Henderson e Pabis foi considerado o mais apropriado para descrever as curvas de secagem da banana, manga e mandioca. O Logarítmico mostrou ser adequado para descrever a cinética

de secagem de ameixa, bagaço de maçã, rabanete, semente de abóbora e figos (Yun et al., 2013).

Os modelos apresentados foram desenvolvidos sob condições constantes do ar de secagem (velocidade, temperatura e umidade relativa) e camada fina de produto. Não foram considerados a resistência ao movimento da água e seus gradientes dentro do material, o efeito do encolhimento e o efeito da diferença no tamanho ou forma do produto (PAGE,1949; Saleh; Badran, 2009). O efeito do encolhimento geralmente é negligenciado em modelos por inserir uma considerável complexidade em sua solução. Em razão dos modelos serem geralmente desenvolvidos para condições constantes, eles podem apresentar uma limitação para o caso da modelagem da secagem solar, onde as condições do ar de secagem variam com o tempo (Ratti; Mujundar, 1997).

Apesar das limitações consideradas, a literatura relata bons ajustes de curvas de secagem com utilização desses modelos tanto com uso de secador como ao ar livre. É importante notar, contudo, que para o ajuste das curvas, é necessário encontrar os parâmetros das equações experimentalmente; e isso vai variar para cada modelo de secagem em camada fina ajustados em condições de temperatura variável.

3.8 AVALIAÇÕES DO MODELO

O teste de hipóteses ao valor de dispersão de duas variáveis categóricas nominais tem por objetivo avaliar a associação entre as variáveis qualitativas, sendo um teste não paramétrico no caso do Teste de Qui-Quadrado (χ^2). Podemos, ainda, citar o REQM (Raiz do Erro Quadrado Médio) que é uma medida de desempenho de um estimador em relação ao objetivo de revelar o valor do parâmetro de interesse. E, por fim, a eficiência do modelo (EF), visa a avaliação do mesmo quanto os dados calculados estão dentro da centralidade (alvo). Para Meisami-asl *et al.* (2010), o valor do Qui-Quadrado reduzido determina o quão bom foi o ajuste e representa a raiz quadrada do desvio entre os dados experimentais e os calculados pelo modelo, sendo o melhor valor para χ^2 é o menor valor possível, o valor de $REQM$ representa o desvio entre os valores experimentais e os estimados pelo modelo e EF está relacionada com o quanto pode o modelo descrever o sistema. Tomando o menor o valor de $REQM$ e 1,0 para o valor de EF .

$$\chi^2 = \frac{\sum(X_{cal} - X_{exp})^2}{X_{exp}} \quad 11$$

$$REQM = \left(\frac{1}{no} \sum (X_{cal} - X_{exp})^2 \right)^{1/2} \quad 12$$

$$EF = \frac{\sum(X_{exp} - \bar{X}_{exp})^2 - \sum(X_{cal} - X_{exp})^2}{(X_{exp} - \bar{X}_{exp})^2} \quad 13$$

3.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para Perry e Green (1998), os fatores internos estão relacionados com o transporte de massa do líquido no interior do sólido. Quando este efeito limita o processo há um decaimento da taxa de evaporação do líquido com o tempo e um aumento da temperatura do sólido. Os mecanismos internos podem ocorrer por difusão em sólidos ou por escoamentos por contração capilar, por gradientes de pressão, por gravidade e ou em virtude da vaporização-condensação.

Para McCabe (1993), na maioria dos processos de secagem adiabáticos, as taxas de secagem são mais dependentes dos coeficientes de transferência de calor do que dos coeficientes de transferência de massa. Assim, os efeitos difusivos de transporte de massa podem ocorrer, mas geralmente não limitam o processo.

Assim, as perdas por falhas de projeto serão absorvidas pelo parâmetro cinético nas simulações não dando uma realidade de eficiência real do equipamento e condições operacionais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo se descreve as características técnicas do tecido Jeans, do secador utilizado na secagem dos artigos, o levantamento de dados experimentais da secagem industrial e o desenvolvimento do modelo fenomenológico da secagem industrial. Os dados obtidos foram levantados nas dependências de uma lavanderia industrial localizada na região de Maringá-PR.

4.1 MATERIAIS

O material utilizado neste trabalho referente à secagem foi o tecido jeans, uma vez que esse produto é um dos mais utilizados para acabamento nas lavanderias industriais. Os outros materiais utilizados foram:

- Secador Rotativo Têxtil Industrial com capacidade de 100 kg de roupa seca;
- Anemômetro digital Instrutherm TD-500, faixa de medição de 0,3 a 45 m/s e erro de 3%;
- Balança digital Digi-Tron com precisão de 5g;
- Trena e;
- Termo-higrômetro HT-600 Instrutherm com faixa de medição de -30 a 70°C e 20 a 99% e precisão de 1°C e 5% UR

4.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

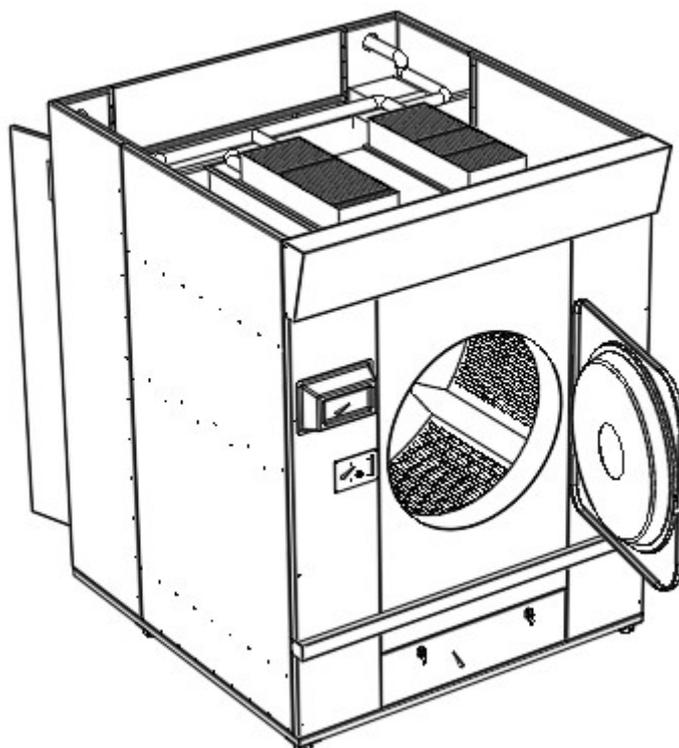
Os dados experimentais utilizados foram obtidos de um secador industrial do tipo rotativo com aquecimento direto numa indústria da Região Metropolitana de Maringá Paraná. O secador é do tipo rotativo com aquecimento direto e sua configuração física é apresentada conforme as Figuras 9 a 14 a seguir:

FIGURA 9 - FOTO FRONTAL DO SECADOR ROTATIVO

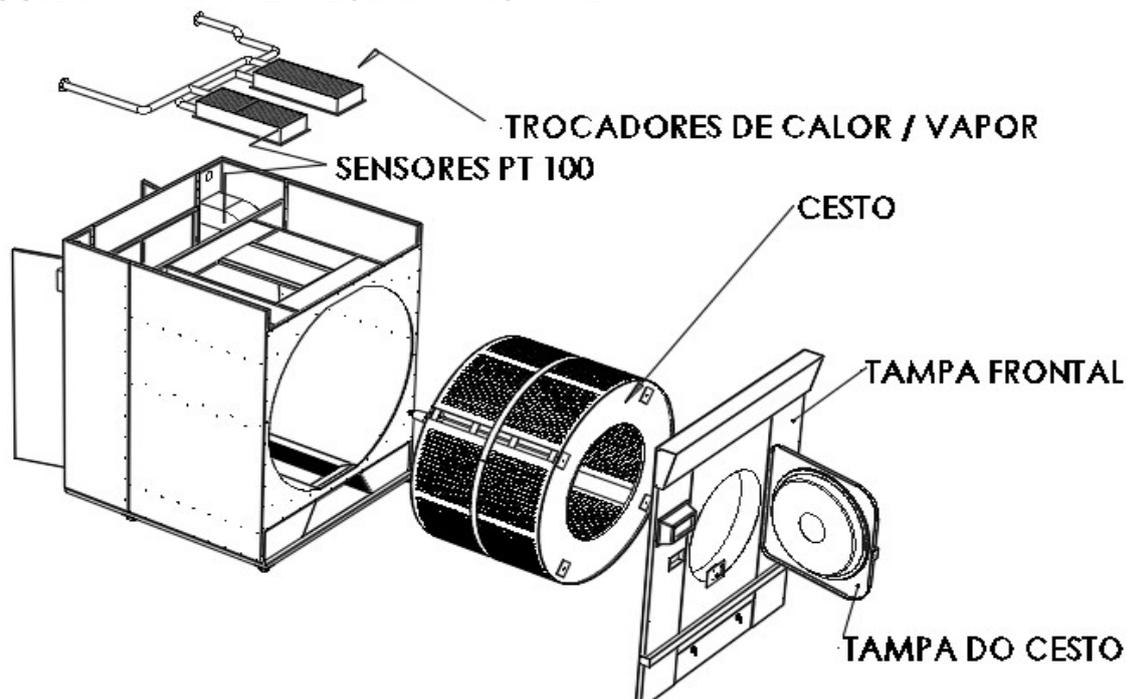


FONTE: O AUTOR (2018).

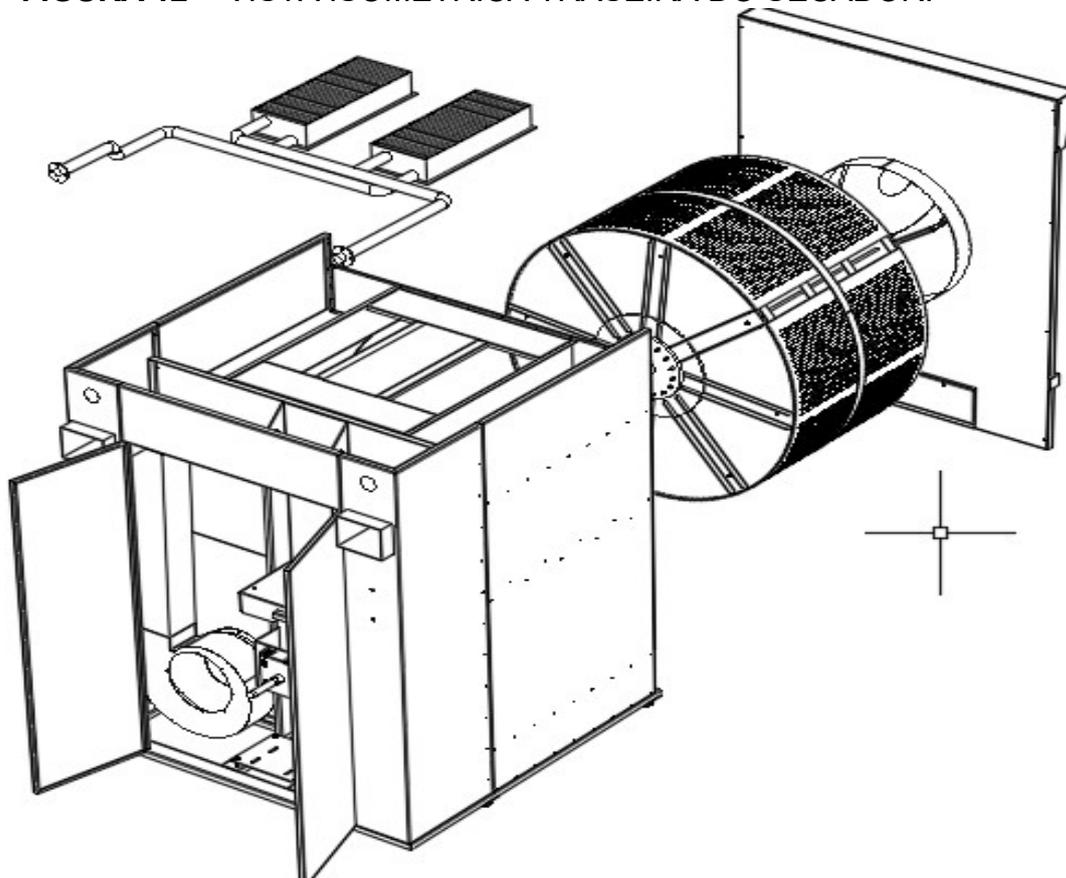
FIGURA 10 - VISTA ISOMÉTRICA FRONTAL DO SECADOR



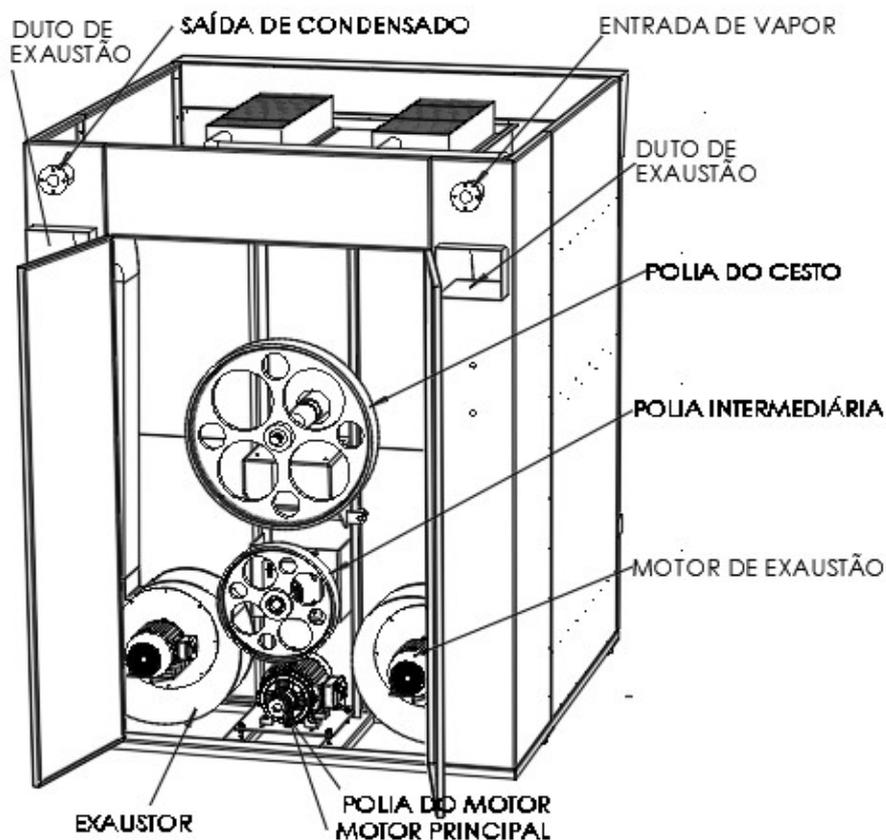
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 11 - VISTA EXPLODIDA FRONTAL

FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 12 - VISTA ISOMÉTRICA TRASEIRA DO SECADOR.

FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 13 - VISTA TRASEIRA DO SECADOR.

FONTE: O Autor (2018).

Neste equipamento, uma quantidade de tecido é colocada no cesto rotativo de forma aleatória e em seguida o ar aquecido é colocado em contato com a carga de tecido durante um determinado período de tempo. O final da operação é determinado por uma análise sensorial do operador. A vazão do ar utilizada no equipamento depende da quantidade de peças e da área da peça de tecido.

O ar ambiente sofre troca térmica na parte superior do secador, donde esse gás aquecido transpõe o cesto perfurado com rotação constante e percola nas peças de jeans, fazendo com que haja a transferência de calor e massa e consequentemente a secagem das peças.

Os dados obtidos neste secador foram os seguintes:

- massa das peças em jeans;
- área das peças em jeans;
- vazão de ar;
- temperatura do ar ambiente;
- umidade do ar ambiente;

- temperatura do ar na saída do trocador de calor e;
- temperatura do ar na saída do secador.

Para a determinação vazão foi utilizado o anemômetro, sendo este equipamento alocado na saída do secador já carregado com artigos, donde foi regulado o inversor de frequência dos exaustores até chegar à velocidade desejada de saída do ar, multiplicando assim com a área dos dutos e conseguindo a vazão.

4.2.1 Coleta dos Dados no Secador Industrial

Uma amostra da batelada antes de carregada foi escolhida tendo como critério uma numeração que fique no meio da grade dos produtos, esta foi caracterizada com uma tag, que consiste em uma abraçadeira de plástico com um número de identificação, para que possa ser identificada e coletada para a pesagem durante a secagem industrial. Esta amostra escolhida foi pesada depois da centrifugação na balança já especificada, medida alguns pontos estratégicos e calculado sua área.

Próximo a porta do secador industrial ficaram alocados a balança, que possibilitou a coleta e a pesagem da amostra identificada a 5 minutos. Ainda, próximo a porta, ficou alocado o Termo-higrômetro HT-600 para a medição de temperatura e umidade ambiente.

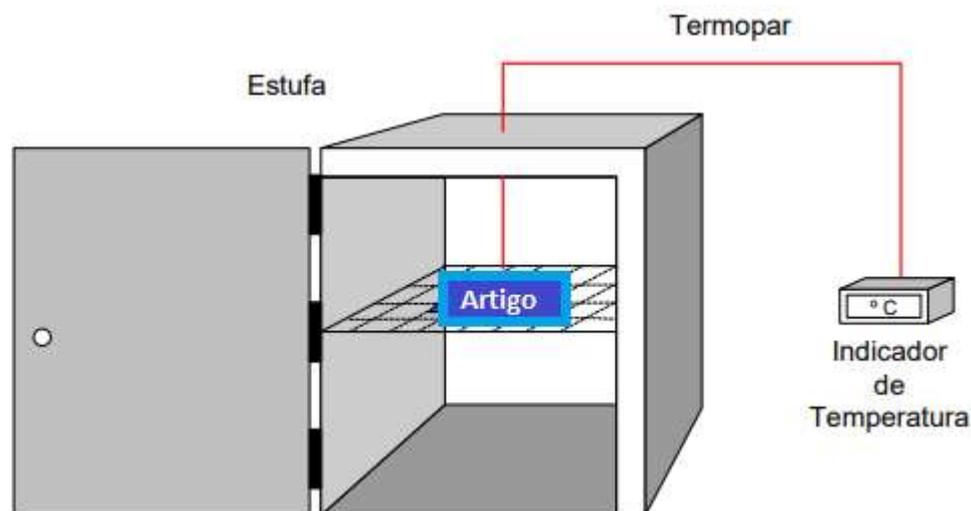
No secador se encontravam dois controladores on-off de temperatura inova 31101 com sensores tipos PT 100, no qual um controlava a temperatura de saída do ar de secagem para que este não ultrapassasse 75°C, e o outro, media a temperatura de saída logo após a troca de calor do ar ambiente no trocador de calor. Essa temperatura depois da troca de calor variava entre 82 a 98°C.

O artigo centrifugado, pesado e medido sua área e levado ao secador com o restante da batelada, onde em intervalos de 5 min foram medidos o seu peso e a temperatura de entrada e saída do sistema. A velocidade de saída de ar nos dutos foram ajustadas anteriormente a isso, possibilitando o cálculo da vazão do secador. A vazão de exaustão foi regulada em 3 faixas ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Considerou-se a temperatura da peça igual à da saída do sistema. Para encontrar o X_e que é o peso da peça com concentração de água no equilíbrio, tomou-se uma peça considerada seca, e terminou o processo de secagem em um forno a 104°C por 48 horas chegando assim a peça realmente seco.

O forno era dotado de resistência elétrica e um controlador de temperatura com termopar tipo PT 100, conforme a Figura 14.

FIGURA 14 - FORNO DE SECAGEM



FONTE: O Autor (2017).

4.3 METODOLOGIA NUMÉRICA

4.3.1 Obtenção do Modelo Matemático

O desenvolvimento do modelo para descrever a secagem industrial de tecidos é baseado no fenômeno de transferência de massa. Os secadores rotativos funcionam em batelada, tendo em sua parte superior trocadores de calor que aquecem o ar de forma indireta com vapor saturado. O ar saturado é retirado por dois exaustores posicionados na parte inferior. As peças em bateladas são colocadas no tambor rotativo no sentido de giro horário. Em média os secadores demoram de 40 a 50 minutos para a secagem das peças.

Para desenvolver o modelo matemático aplicou-se os balanços de massa e energia ao sistema para que encontrássemos as equações governantes do processo. Assim, aplicando a lei de conservação de massa no secador tem-se:

$$\dot{A} = \dot{E} - \dot{S}$$

Onde \dot{A} é o acúmulo mássico de água no sistema, \dot{E} é o fluxo mássico de água e \dot{S} é a saída mássica de água do sistema. Assim, verifica-se:

$$\frac{d\dot{m}_{h20}}{dt}_{sist} = \sum \dot{m}_{e,h20} - \sum \dot{m}_{s,h20} \quad 15$$

Sendo \dot{m}_{h20} o fluxo mássico total de água no sistema;

O $\sum \dot{m}_{e,h20}$ somatório do fluxo mássico de água na entrada;

O $\sum \dot{m}_{s,h20}$ somatório do fluxo mássico de água na saída.

O fluxo mássico de água que entra no sistema junto com o fluxo mássico de ar pode ser desprezado. Com isso o somatório de saída de água do secador fica:

$$\sum \dot{m}_{s,h20} = q_0 \rho_{arumido} = A_{art} * (X - X_{eq}) * K \quad 16$$

A_{art} área da peça (m^2) total da batelada;

K coeficiente de transferência de massa e calor ($Kg_{H2O} \cdot (Kg_{ss} \cdot m^2 \cdot s)^{-1}$);

X umidade em base seca ($Kg_{H2O} \cdot Kg_{ss}^{-1}$) total da batelada e;

X_{eq} umidade de equilíbrio ($Kg_{H2O} \cdot Kg_{ss}^{-1}$) total da batelada.

Pode-se relacionar a massa de água na peça com a umidade em base seca. A massa de água a ser retirada no sistema é constante por ser feito o carregamento em uma única vez e não mais adicionado material ao sistema. Isso pode ser expresso em função da vazão e a densidade do ar úmido na entrada e a massa de água na entrada.

Na saída deste processo as concentrações de água na peça podem ser expressos pelo X e o X_{eq} , o primeiro representa o artigo úmido e último a peça seca no seu valor de equilíbrio. Também se pode ver que este depende da área do artigo e uma constante que absorva todas as variações fenomenológicas do sistema. Tendo isso em mente, tem-se que:

$$\frac{d(m_{ss}X)}{dt}_{sist} = KA_{art}(X - X_{eq}) \quad 17$$

Sendo m_{ss} constante:

$$\frac{d(X)}{dt}_{sist} = \frac{KA_{art}(X - X_{eq})}{m_{ss}} \quad 18$$

Para o ajuste vamos considerar o K como implementação linear e exponencial para que, assim, se possa fazer o ajuste e achar qual o modelo mais adequado para a aplicação.

Considerando $K_{exp} = (B1 + B2 * \exp^{(B3*X)})$ e $K_{linear} = (A1 + A2 * X)$.

Obtém-se:

$$\frac{d(X)}{dt}_{sist} = \frac{K_{linear}(X - X_{eq})A_{art}}{m_{ss}} \quad 19$$

$$\frac{d(X)}{dt}_{sist} = \frac{K_{exp}(X - X_{eq})A_{art}}{m_{ss}} \quad 20$$

O ajuste do parâmetro foi efetuado utilizando-se a função objetivo definida pela Equação 20, minimizando o resíduo quadrático a partir da rotina `fminsearch` implementada no software Matlab®.

$$FO = \sum (X - Xf)^2 \quad 21$$

4.3.2 Solução Numérica

Para a solução numérica do modelo proposto utilizou-se uma rotina no software Matlab®, encontrando assim os perfis de ajustes dos parâmetros com auxílio da função ODE45 e uma rotina de minimização do erro.

As rotinas avaliaram a função erro com intuito de minimizar esta diferença, além de plotar os gráficos de avaliações dos dados colhidos e os ajustes. Dois fatores primordiais devem ser relacionados, que são a margem de erro que é o intervalo de valor pelo qual espera-se encontrar no universo amostral e o nível de confiança que é a certeza de que os dados estavam dentro da margem de erro.

Nesse contexto os parâmetros de margem de erro, nível de confiança e tamanho das amostras, estão intimamente relacionados. A modificação de qualquer um dos 3 parâmetros alterará os restantes, portanto, reduzir a margem de erro e o nível de confiança obrigará a aumentar o tamanho da amostra.

Para Montgomery (2003) o conjunto de todos os resultados possíveis de um experimento aleatório é chamado de espaço amostral. Esse tamanho amostral é de suma importância para validação dos resultados. O conjunto de teoremas conhecidos como LEI DOS GRANDES NÚMEROS dá base para estimar o número de amostras a serem coletadas. Estes teoremas são os que dão suporte matemático à ideia de que a média de uma amostra aleatória de uma população grande tenderá a estar próxima da média da população completa. Contudo, o teorema do limite central mostra que em condições gerais soma de muitas variáveis aleatórias se aproxima a uma distribuição normal (também chamada curva de Gauss).

Para Devory (2006), quando os elementos são distribuídos normalmente a média também é para cada tamanho de amostra. O cálculo da média produz uma distribuição em forma de sino mais acentuada do que está servindo como amostra. Uma hipótese razoável é que se o tamanho da amostra for grande, uma curva normal adequada aproximará a distribuição real de média.

Graças ao teorema do limite central, quando calculado uma média ou uma proporção de uma amostra, sabe-se qual é a probabilidade de que o universo tenha esse mesmo valor ou um valor parecido. O valor que calcular-se para a amostra será o mais provável para o universo trabalhado e conforme distancia-se deste valor (para cima ou para baixo), estes serão valores cada vez menos prováveis. O fato da

probabilidade diminuir conforme se distância da média é o que caracteriza uma distribuição gaussiana.

Por fim, a fim de validar o modelo é necessária a estimativa do coeficiente de transferência de massa (K).

4.3.3 Determinação do coeficiente de massa K

Para a determinação do K foram consideradas duas abordagens:

- O K varia linearmente com o teor de umidade do tecido;
- O K varia exponencialmente com o teor de umidade do tecido.

Como visto na seção anterior os dados coletados serão analisados para encontrar em qual tipo de ajuste representa melhor o modelo, após encontrar qual é esse modelo serão calculados os valores dos parâmetros e para estimar o coeficiente de transferência de massa para a melhor forma de ajuste. Com o valor calculado de K em mãos, esse será utilizado para a simulação nos modelos já consagrados. Os modelos foram ajustados através do software Matlab®, onde o modelo matemático proposto foi aplicado e encontrado os valores dos parâmetros. Também foi utilizada a mesma forma de aplicação para os ajustes dos modelos consagrados na literatura.

Os parâmetros do modelo das Equações 19 e 20, foram ajustados com os dados da quantidade de água evaporada para os experimentos em operação com modulação apenas da vazão do ar. No total são 72 experimentos pertencentes a este grupo, foram desconsiderados os experimentos com resultados que não estavam dentro de uma razoabilidade, no total, foram utilizados 53 experimentos. Esta metodologia foi tomada inicialmente devido ao grande número de dados a serem comparados e de equações resultantes do método das diferenças finitas a serem resolvidas. A função objetivo minimizada durante o ajuste dos parâmetros está representada com a Equação 21.

$$\frac{d(X)}{dt}_{sist} = \frac{K_{linear}(X - X_{eq})A_{art}}{m_{ss}}$$

$$\frac{d(X)}{dt}_{sist} = \frac{K_{exp}(X - X_{eq})A_{art}}{m_{ss}}$$

$$FO = \sum (X - Xf)^2$$

Esta equação é somatório dos mínimos quadrados. Os valores do qui-quadrado reduzido, da raiz do erro quadrático médio e da eficiência do modelo foram calculados para avaliar a qualidade do ajuste, estas estão representados pelas Equações a seguir.

$$\chi^2 = \frac{\sum (Xcal - Xexp)^2}{Xexp}$$

$$REQM = \left(\frac{1}{no} \sum (Xcal - Xexp)^2 \right)^{1/2}$$

$$EF = \frac{\sum (Xexp - \bar{Xexp})^2 - \sum (Xcal - Xexp)^2}{(\sum (Xexp - \bar{Xexp})^2)}$$

4.4 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Os dados experimentais foram confrontados com modelos já consagrados na literatura, assim dando sustentação de que os dados eram confiáveis. De posse dos ajustes foram implementados o modelo proposto nos dados experimentais para a verificação do mesmo. Com a sustentação dos modelos consagrados pode-se analisar a viabilidade do modelo proposto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação da secagem consiste em identificar quais situações o fenômeno ocorre com melhor eficiência no equipamento testado. Para tanto avaliamos a secagem em 3 vazões distintas em que o equipamento suportaria as condições resultantes. Essas vazões foram implementadas, retirando, deste modo, os dados para a análise e compilação dos mesmos. Para tanto, foram considerados os seguintes dados do material:

- Área das peças;
- Quantidade de peças da batelada e;
- Peso das peças úmidas.

Em relação ao secador industrial, foram considerados os dados de entrada que são:

- Umidade relativa do ar;
- Temperatura ambiente;
- Umidade relativa do ar ambiente e;
- Tempo.

E os dados de saída que são:

- Vazão do ar quente e úmido e;
- Temperatura do ar quente e úmido.

Esses dados coletados foram utilizados para os cálculos da constante de transferência de massa K para os casos de ajustes lineares e exponenciais.

5.1 DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NO SECADOR INDUSTRIAL

Os dados coletados na entrada e saída do secador encontram-se demonstrados nas Tabelas 4 a 6. Nelas pode-se observar a variedade de áreas de tecido de jeans por peça, quantidade de peças na batelada, umidade relativa do ar ambiente, peso total da batelada, temperatura ambiente, concentração X da umidade por peça e a massa na base seca por peça.

Devido às condições de logística do processo, não se conseguiu ter um padrão de peso e amostragem dos artigos e das bateladas e, por condições ambientais óbvias, não se conseguiu ter padrões de umidade e temperatura do ar

ambiente. Isso torna o estudo mais relevante e desafiador, pois se retratado dia a dia do tipo de indústria estudada.

TABELA 4 - DADOS EXPERIMENTAIS ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Batelada	Área(m ²)	Qtd. Pç	UR Ar	Bat. (Kg)	Ar Amb.(°C)	X(kg/kg)	Mss(kg)
1	0,75	140	30%	79,80	29	0,583	0,360
2	0,80	150	70%	92,25	30	0,618	0,380
3	0,90	103	70%	72,62	25	0,549	0,455
4	0,85	104	70%	78,00	25	0,515	0,495
5	0,35	216	66%	105,84	37	0,420	0,345
6	0,70	142	44%	90,17	27	0,549	0,410
7	0,80	111	62%	56,06	31	0,471	0,340
8	0,80	217	54%	128,03	31	0,475	0,400
9	1,00	140	36%	92,40	25	0,517	0,435
10	0,80	140	33%	65,10	33	0,550	0,300
11	0,80	142	30%	65,32	35	0,453	0,320
12	0,85	146	56%	96,36	36	0,535	0,430
13	0,75	55	30%	37,68	24	0,457	0,470
14	1,10	105	41%	53,03	18	0,347	0,375
15	1,05	146	35%	111,69	27	0,471	0,520
16	0,90	172	61%	105,78	28	0,557	0,395
17	0,90	141	25%	93,06	25	0,588	0,400

FONTE: O Autor (2018).

TABELA 5 - DADOS EXPERIMENTAIS (1,00 m³.s⁻¹).

Batelada	Área(m ²)	Qtd. Pç	UR Ar	Bat. (Kg)	Ar Amb.(°C)	X(kg/kg)	Mss(kg)
1	1,50	100	35%	80,00	36	0,5094	0,530
2	0,85	167	37%	91,02	37	0,4156	0,85
3	0,70	152	25%	109,44	36	0,6364	0,440
4	0,90	103	61%	69,38	27	0,4416	0,385
5	1,10	146	62%	104,39	27	0,5053	0,475
6	0,50	107	60%	56,71	28	0,4930	0,355
7	1,00	70	62%	46,55	28	0,4944	0,445
8	1,15	87	52%	66,56	27	0,5300	0,500
9	1,35	99	52%	0,10	30	0,6154	0,650
10	0,65	170	81%	73,10	24	0,5926	0,270
11	0,55	261	78%	105,71	23	0,3636	0,440
12	0,50	163	62%	82,32	28	0,3649	0,370
13	1,00	145	64%	89,90	24	0,4762	0,420
14	1,20	140	46%	91,00	24	0,5476	0,420
15	1,00	114	59%	87,78	25	0,4528	0,530
16	1,25	104	47%	99,84	26	0,6552	0,580
17	1,25	91	38%	84,63	27	0,6034	0,580

Fonte: O Autor (2018).

TABELA 6 - DADOS EXPERIMENTAIS (1,25 m³.s⁻¹).

Batelada	Área(m ²)	Qtd. Pç	UR Ar	Bat. (Kg)	Ar Amb.(°C)	X(kg/kg)	Mss(kg)
1	1,3	113	51%	77,97	25	0,4681	0,470
2	1,05	97	43%	89,73	30	0,5417	0,600
3	1,00	105	51%	66,15	34	0,4824	0,425
4	0,50	209	40%	93,01	35	0,4355	0,310
5	0,55	255	61%	110,93	29	0,4032	0,310
6	0,45	221	67%	93,93	27	0,4912	0,285
7	1,20	111	68%	83,25	27	0,5000	0,500
8	1,00	148	78%	91,02	25	0,5357	0,420
9	1,20	172	27%	102,34	25	0,5347	0,505
10	1,10	100	46%	100,00	30	0,5113	0,665
11	1,10	146	70%	114,61	25	0,5288	0,520
12	1,10	120	78%	119,40	27	0,5547	0,640
13	1,05	110	56%	84,15	30	0,5149	0,505
14	1,10	138	68%	108,33	30	0,5545	0,505
15	1,10	71	42%	81,65	29	0,687	0,655
16	1,00	117	66%	86,58	28	0,4653	0,505
17	0,75	134	79%	92,46	29	0,4375	0,480
18	1,05	115	65%	89,70	31	0,4444	0,540

FONTE: O Autor (2018).

Pode se observar que todos os dados experimentais de entrada, independente da vazão, não tinham como ser controlados, isso dificultou a simulação do modelo, tornando o trabalho mais difícil.

5.2 DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA (K) A PARTIR DOS DADOS EXPERIMENTAIS

O coeficiente de transferência de massa K é vital para o projeto de qualquer tipo de secador. Ele incorpora influências físicas de transferência de calor e massa, facilitando uma análise confiável do fenômeno de transferência de massa no equipamento e ou processo estudado.

5.2.1 Avaliação dos Ajustes Linear e Exponencial

Os dados coletados nas bateladas e nas respectivas vazões de $0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, foram utilizados nos cálculos e na rotina de programação para se encontrar o ajuste dos modelos linear e experimental. Esses ajustes consistiram em adequar os dados coletados de cada batelada aos modelos linear e exponencial de K, visando verificar qual o modelo de ajuste seria mais representativo. Após os ajustes das curvas do modelo proposto nas formas linear e exponencial, descobriu-se qual o melhor modelo que representaria o processo de secagem, esse então foi considerado para uma análise mais aprofundada. Os dados coletados, os parâmetros ajustados e o erro de ajuste de cada batelada, estão mostrados nas Tabelas 7 e 8 para a vazão de $0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, nas Tabelas 9 e 10 para a vazão de $1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e 11 e 12 para a vazão de $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Resumidamente, para cada batelada a uma determinada vazão foram ajustados os dados e encontrados os erros, esse procedimento foi executado em 24 amostras para cada vazão, e em cada amostra foi analisada qual ajuste seria o melhor, foram desconsiderados os dados que apresentavam erros muito grandes.

TABELA 7 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS LINEARES ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Batelada	Área	Qtd. Pç	UR Ar	Bat. (Kg)	A1	A2	Erro
1	0,75	140	30%	79,80	-0,0004	0,0007	175,73
2	0,80	150	70%	92,25	0,0082	0,0085	367,80
3	0,90	103	70%	72,62	0,0120	0,0123	98,99
4	0,85	104	70%	78,00	0,0140	0,0107	64,75
5	0,35	216	66%	105,84	0,0195	0,0202	193,66
6	0,70	142	44%	90,17	0,0118	0,0113	230,89
7	0,80	111	62%	56,06	0,0124	0,0124	97,93
8	0,80	217	54%	128,03	-0,1879	-0,3754	132,72
9	1,00	140	36%	92,40	0,0082	0,0079	139,03
10	0,80	140	33%	65,10	-0,0003	-0,0005	97,85
11	0,80	142	30%	65,32	-0,0019	-0,0024	88,45
12	0,85	146	56%	96,36	0,0035	0,0023	518,24
13	0,75	55	30%	37,68	-0,0094	-0,0110	14,42
14	1,10	105	41%	53,03	0,0070	0,0063	20,95
15	1,05	146	35%	111,69	0,0028	0,0023	121,17
16	0,90	172	61%	105,78	-0,1404	-0,1404	156,50
17	0,90	141	25%	93,06	-0,0987	-0,4737	94,46

FONTE: O Autor (2018).

TABELA 8 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS EXPONENCIAIS ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Batelada	Área	Qtd. Pç	UR Ar	Bat. (Kg)	B1	B2	B3	Erro
1	0,75	140	30%	79,80	0,0186	0,2889	-0,0637	136,53
2	0,80	150	70%	92,25	0,0245	0,3136	-0,0809	41,76
3	0,90	103	70%	72,62	0,0276	0,6040	-0,1094	30,01
4	0,85	104	70%	78,00	0,0321	0,3945	-0,1244	45,31
5	0,35	216	66%	105,84	0,0538	0,9686	-0,0753	18,73
6	0,70	142	44%	90,17	0,0066	0,1571	-0,0307	136,36
7	0,80	111	62%	56,06	0,0017	0,2972	-0,0556	15,21
8	0,80	217	54%	128,03	0,0198	0,9160	-0,0945	73,57
9	1,00	140	36%	92,40	0,0066	0,2148	-0,0485	103,71
10	0,80	140	33%	65,10	0,0275	1,0066	-0,1026	33,32
11	0,80	142	30%	65,32	0,0291	0,4085	-0,1081	30,16
12	0,85	146	56%	96,36	0,0148	0,1048	-0,0366	145,44
13	0,75	55	30%	37,68	0,0500	0,7149	-0,1367	19,19
14	1,10	105	41%	53,03	0,0313	0,4627	-0,1527	2,58
15	1,05	146	35%	111,69	0,0126	0,3924	-0,0774	62,79
16	0,90	172	61%	105,78	0,0159	0,1606	-0,0517	59,67
17	0,90	141	25%	93,06	0,0162	0,2329	-0,0552	45,21

FONTE: O Autor (2018).

TABELA 9 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS LINEARES (1,00 m³.s⁻¹)

Batelada	Área Pç	Qtd. Pç	UR Ar	Bat. (Kg)	A1	A2	Erro
1	1,50	100	35%	80,00	0,0109	0,0105	57,38
2	0,85	167	37%	91,02	0,0099	0,0101	102,55
3	0,70	152	25%	109,44	0,0102	0,0096	161,00
4	0,90	103	61%	69,38	0,0155	0,0162	59,69
5	1,10	146	62%	104,39	0,0083	0,0082	62,56
6	0,50	107	60%	56,71	0,0240	0,0237	63,95
7	1,00	70	62%	46,55	0,0233	0,0243	15,88
8	1,15	87	52%	66,56	0,0152	0,0153	52,07
9	1,35	99	52%	0,10	-0,0001	-0,0001	126,82
10	0,65	170	81%	73,10	0,0093	0,0093	197,59
11	0,55	261	78%	105,71	-0,0007	-0,0005	196,46
12	0,50	163	62%	82,32	0,0193	0,0188	53,58
13	1,00	145	64%	89,90	0,0102	0,0076	81,92
14	1,20	140	46%	91,00	0,0077	0,0069	121,03
15	1,00	114	59%	87,78	0,0146	0,0131	42,23
16	1,25	104	47%	99,84	0,0109	0,0107	99,92
17	1,25	91	38%	84,63	0,0129	0,0117	54,96
18	1,25	130	79%	106,60	0,0081	0,0089	81,88

FONTE: O Autor (2018).

TABELA 10 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS EXPONENCIAIS (1,00 m³.s⁻¹)

Batelada	Área	Qtd. Pç	UR Ar	Bat. (Kg)	B1	B2	B3	Erro
1	1,50	100	35%	80,00	0,0110	0,2563	-0,0669	36,66
2	0,85	167	37%	91,02	0,0168	0,0210	-0,0273	102,55
3	0,70	152	25%	109,44	0,0107	0,2187	-0,0354	106,39
4	0,90	103	61%	69,38	0,0204	0,4614	-0,0878	13,44
5	1,10	146	62%	104,39	0,0049	0,1769	-0,0407	32,76
6	0,50	107	60%	56,71	-0,0043	0,4452	-0,0440	59,12
7	1,00	70	62%	46,55	0,0397	0,7176	-0,1298	8,39
8	1,15	87	52%	66,56	0,0277	0,6035	-0,1115	27,35
9	1,35	99	52%	0,10	0,0296	0,6072	-0,1173	19,92
10	0,65	170	81%	73,10	0,0218	0,5163	-0,0646	29,69
11	0,55	261	78%	105,71	0,0053	0,5356	-0,0360	87,23
12	0,50	163	62%	82,32	0,0093	0,4603	-0,0523	14,02
13	1,00	145	64%	89,90	0,0192	0,2719	-0,0741	57,57
14	1,20	140	46%	91,00	0,0205	1,1294	-0,1272	84,58
15	1,00	114	59%	87,78	0,0315	0,6994	-0,1195	44,75
16	1,25	104	47%	99,84	0,0132	0,2752	-0,0542	87,23
17	1,25	91	38%	84,63	0,0182	0,5690	-0,0851	52,23
18	1,25	130	79%	106,60	0,0094	0,2161	-0,0538	14,02

FONTE: O Autor (2018).

TABELA 11 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS LINEARES ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Amostra	Área	Qtd. Pç	UR Ar	Bat. (Kg)	A1	A2	Erro
1	1,3	113	51%	77,97	0,0150	0,0154	104,65
2	1,05	97	43%	89,73	0,0189	0,0191	33,95
3	1,00	105	51%	66,15	0,0101	-0,0632	639,87
4	0,50	209	40%	93,01	0,0175	0,0165	142,56
5	0,55	255	61%	110,93	0,0118	0,0118	218,37
6	0,45	221	67%	93,93	0,0079	0,0079	357,73
7	1,20	111	68%	83,25	0,0146	0,0140	59,63
8	1,00	148	78%	91,02	0,0104	0,0099	232,72
9	1,20	172	27%	102,34	0,0080	0,0083	351,25
10	1,10	100	46%	100,00	0,0124	0,0239	72,41
11	1,10	146	70%	114,61	0,0107	0,0101	77,94
12	1,10	120	78%	119,40	0,0131	0,0131	58,75
13	1,05	110	56%	84,15	0,0170	0,0160	39,79
14	1,10	138	68%	108,33	0,0099	0,0104	137,75
15	1,10	71	42%	81,65	0,0225	0,0225	83,32
16	1,00	117	66%	86,58	0,0150	0,0144	84,19
17	0,75	134	79%	92,46	0,0173	0,0173	60,46
18	1,05	115	65%	89,70	0,0149	0,0150	136,26

FONTE: O Autor (2018).

TABELA 12 - DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS EXPONENCIAIS ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

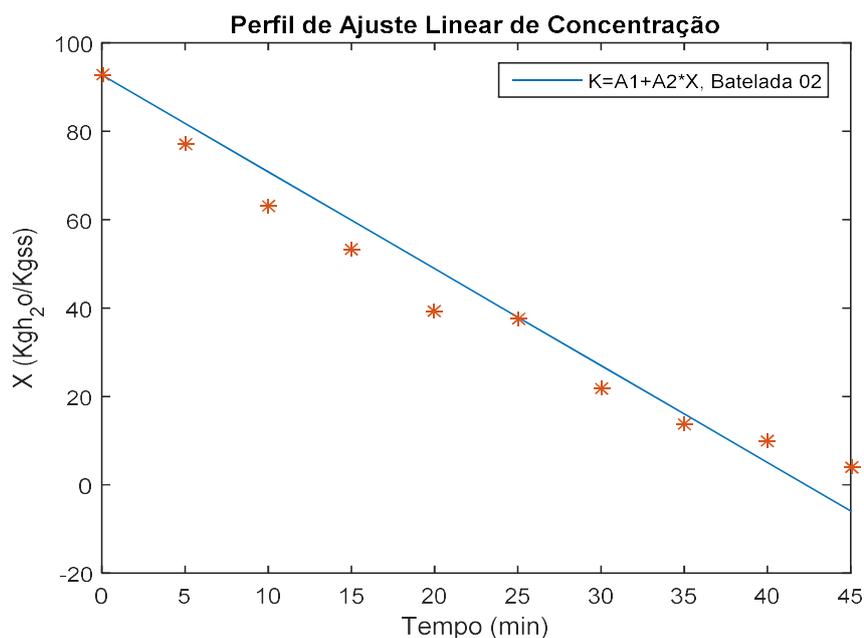
Amostra	Área	Qtd. Pç	UR Ar	Bat. (Kg)	B1	B2	B3	Erro
1	1,3	113	51%	77,97	-0,0344	0,2457	-0,0267	54,10
2	1,05	97	43%	89,73	0,0358	0,0431	-0,0563	16,83
3	1,00	105	51%	66,15	0,0150	0,3408	-0,0538	36,86
4	0,50	209	40%	93,01	0,0046	0,2766	-0,0264	124,09
5	0,55	255	61%	110,93	0,0263	0,4690	-0,0360	43,84
6	0,45	221	67%	93,93	0,0240	0,3707	-0,0396	149,20
7	1,20	111	68%	83,25	0,0093	0,3531	-0,0576	36,00
8	1,00	148	78%	91,02	0,0002	0,2681	-0,0365	77,73
9	1,20	172	27%	102,34	-0,0255	0,1810	-0,0178	74,17
10	1,10	100	46%	100,00	0,0362	0,9091	-0,1107	27,94
11	1,10	146	70%	114,61	0,0165	0,4150	-0,0617	19,74
12	1,10	120	78%	119,40	0,0293	0,7358	-0,0956	62,30
13	1,05	110	56%	84,15	0,0341	1,2601	-0,1161	31,61
14	1,10	138	68%	108,33	0,0091	0,2868	-0,0477	37,97
15	1,10	71	42%	81,65	0,0462	0,9293	-0,1115	22,85
16	1,00	117	66%	86,58	0,0255	0,7683	-0,1017	30,24
17	0,75	134	79%	92,46	0,0314	0,7645	-0,0951	25,91
18	1,05	115	65%	89,70	0,0207	0,6400	-0,0924	38,46

FONTE: O Autor (2018).

Pode-se observar que os ajustes exponenciais apresentam menores erros de ajuste, o que evidencia que o modelo exponencial se adequa melhor a representação de secagem do secador industrial.

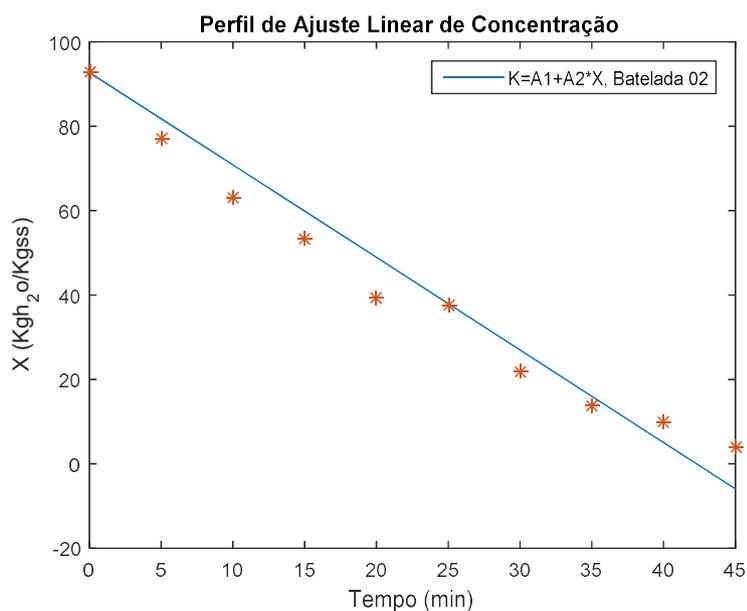
A seguir estão demonstradas amostras dos perfis de ajuste exponencial e linear para cada vazão, esses perfis ajudam a mostrar de forma visual qual o melhor ajuste do modelo para cada vazão. Essas estão apresentadas a seguir nas Figuras 15 a 20.

FIGURA 15 – AJUSTE MODELO LINEAR ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

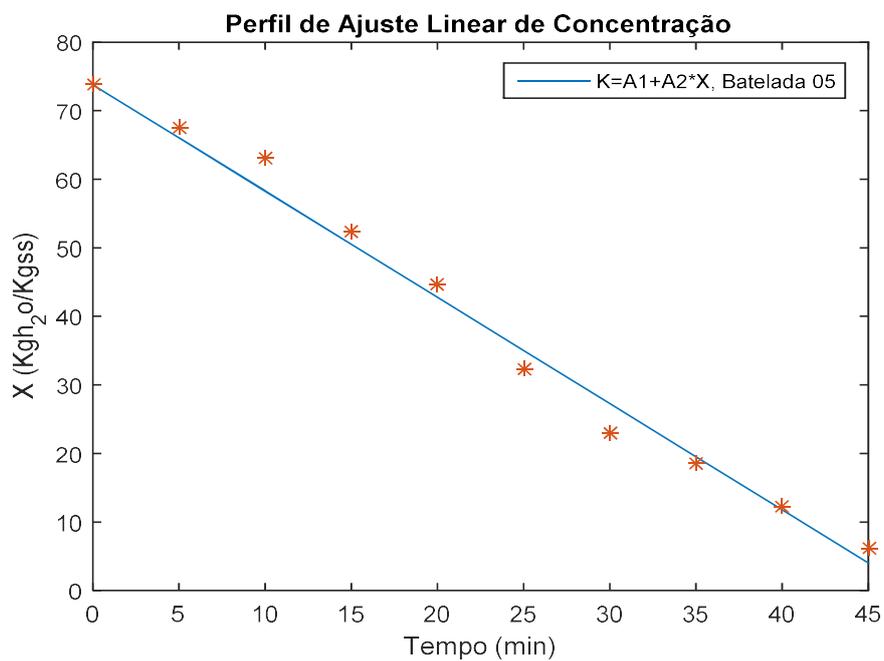


FONTE: O Autor (2018).

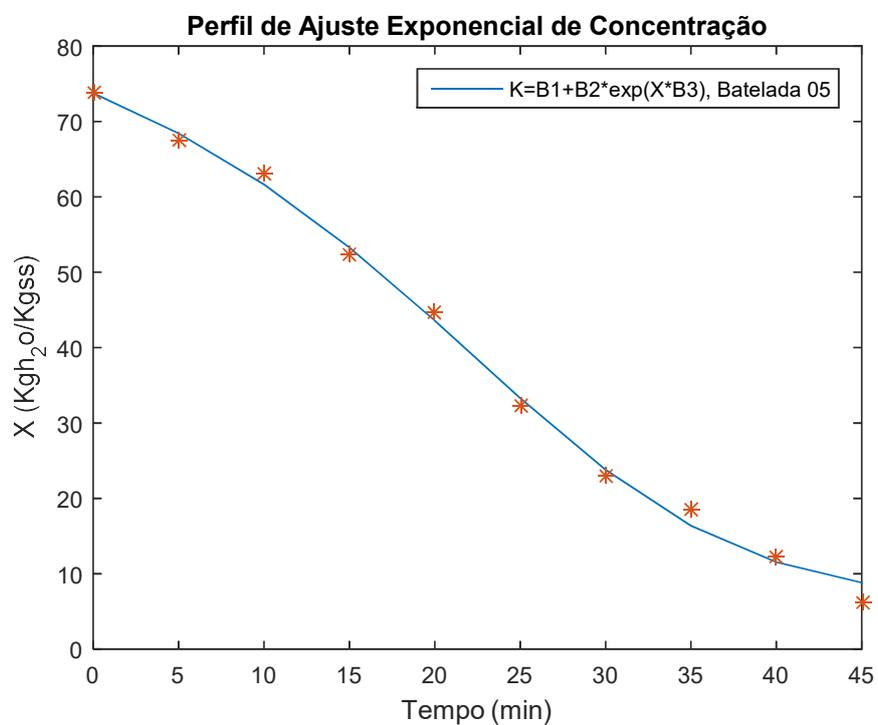
FIGURA 16 - AJUSTE MODELO EXPONENCIAL ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)



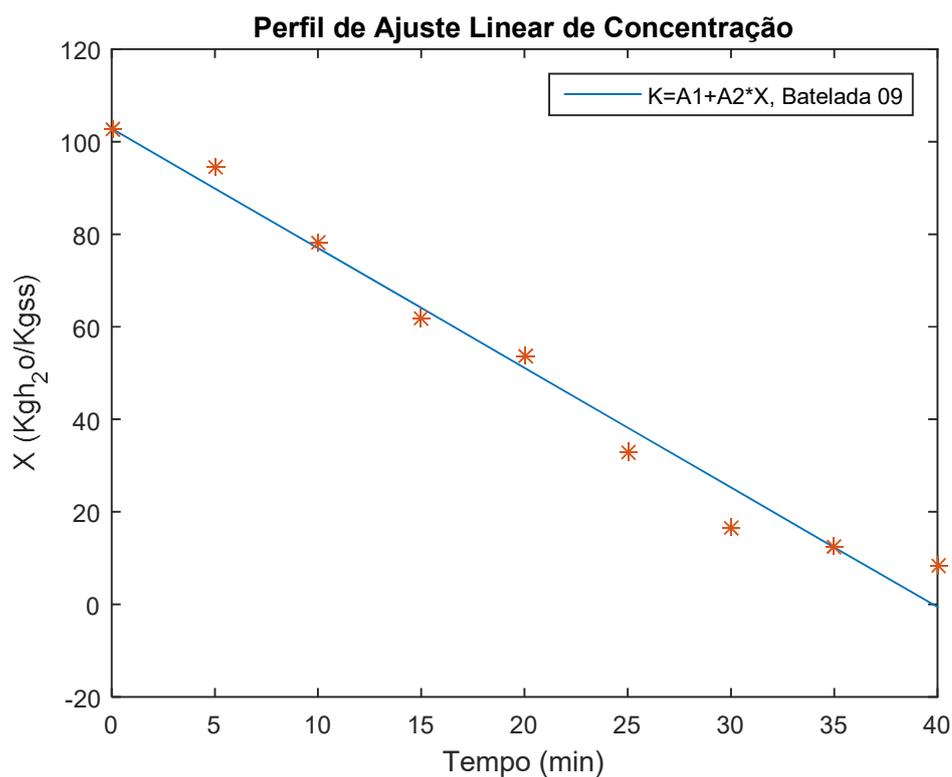
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 17 - AJUSTE MODELO LINEAR ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

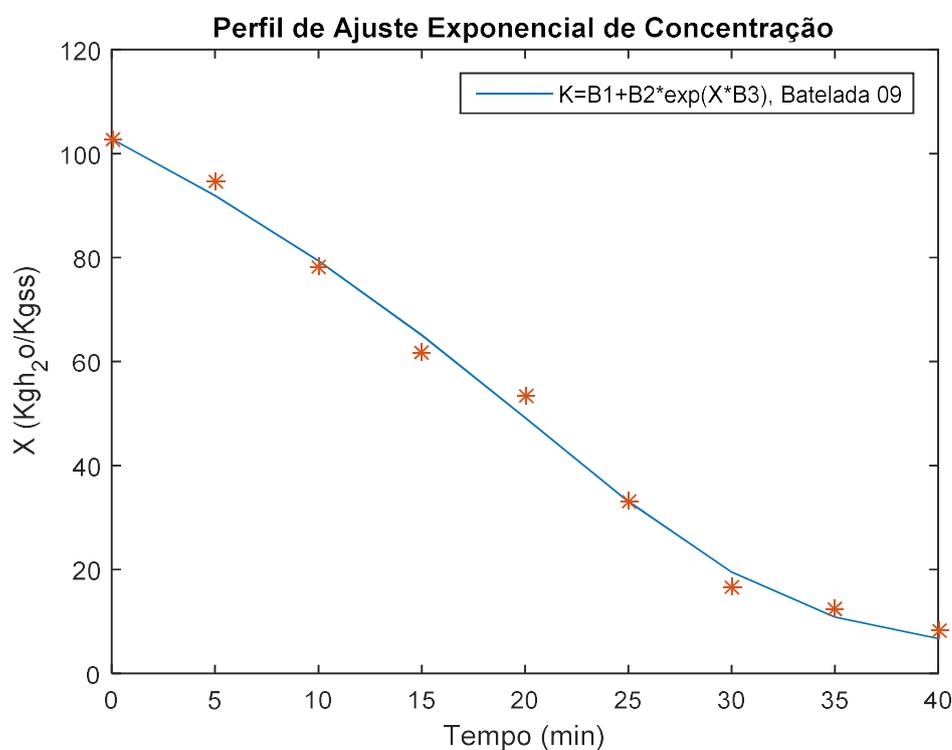
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 18 - AJUSTE MODELO EXPONENCIAL ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 19 - AJUSTE MODELO LINEAR ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 20 - AJUSTE MODELO EXPONENCIAL ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

FONTE: O Autor (2018).

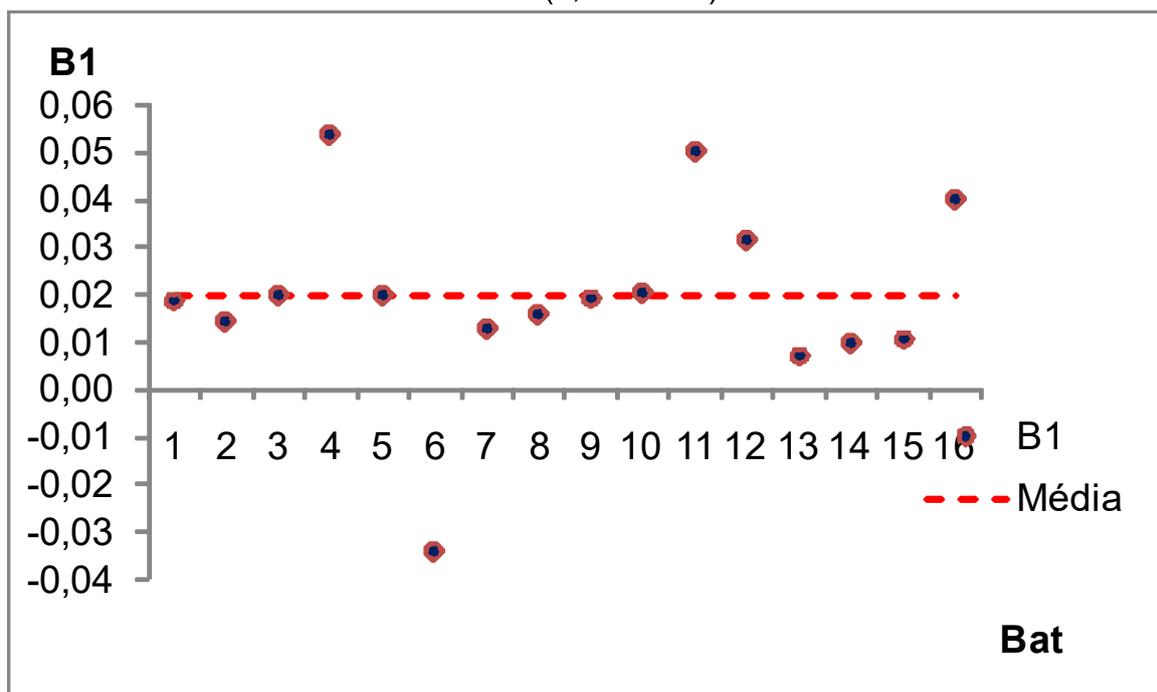
Observa-se que a redução de umidade com o tempo apresenta comportamento linear em praticamente todo o tempo de secagem, independentemente da vazão avaliada. Isso ocorre pela pressão de vapor de equilíbrio igual do líquido puro. A redução linear da umidade é um comportamento característico da remoção de água livre, que é água não-ligada quimicamente à estrutura do material, onde a energia fornecida é consumida essencialmente como calor latente para a evaporação da água. O processo de secagem dos artigos têxteis ocorre à taxa constante nos primeiros 2/3, apenas no 1/3 final da secagem, quando a umidade tende X_{eq} , é notado o período de secagem à taxa decrescente.

O tecido por ser um meio poroso higroscópico, faz que certa quantidade de líquido permanece fisicamente vinculada ao sólido, como umidade ligada correspondente no processo de secagem ao X_{eq} . Essa umidade ligada exerce uma pressão de vapor no equilíbrio menor que a do líquido puro a mesma temperatura. Ela ainda permanece no meio sólido, depois de manter contato com o ar por um longo tempo, a uma dada temperatura.

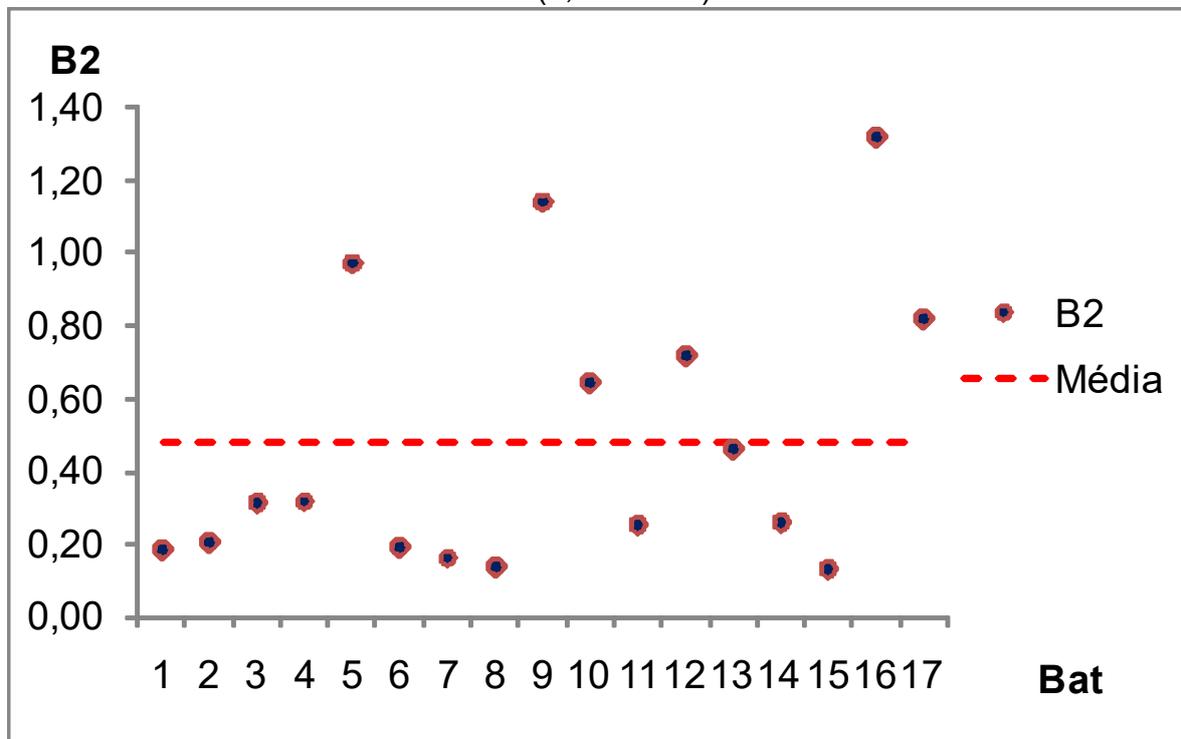
Pode-se observar que esse processo de secagem convectivo, a taxa de perda de umidade do material é controlada principalmente pela velocidade, temperatura e umidade do ar após a troca de calor na superior do secador.

5.2.2 Cálculos dos Parâmetros dos Ajustes

Após se encontrar o melhor modelo de ajuste (no caso o exponencial) determinou-se os parâmetros B1, B2 e B3, isso para cada vazão, possibilitando o cálculo da constante de secagem K e posteriormente simular em qual das vazões seria a melhor taxa de secagem. A seguir, são mostradas as Figuras de 21 a 29 que mostraram graficamente a média dos parâmetros e, por fim, a Tabela 13 trará um resumo dos valores dos parâmetros encontrados.

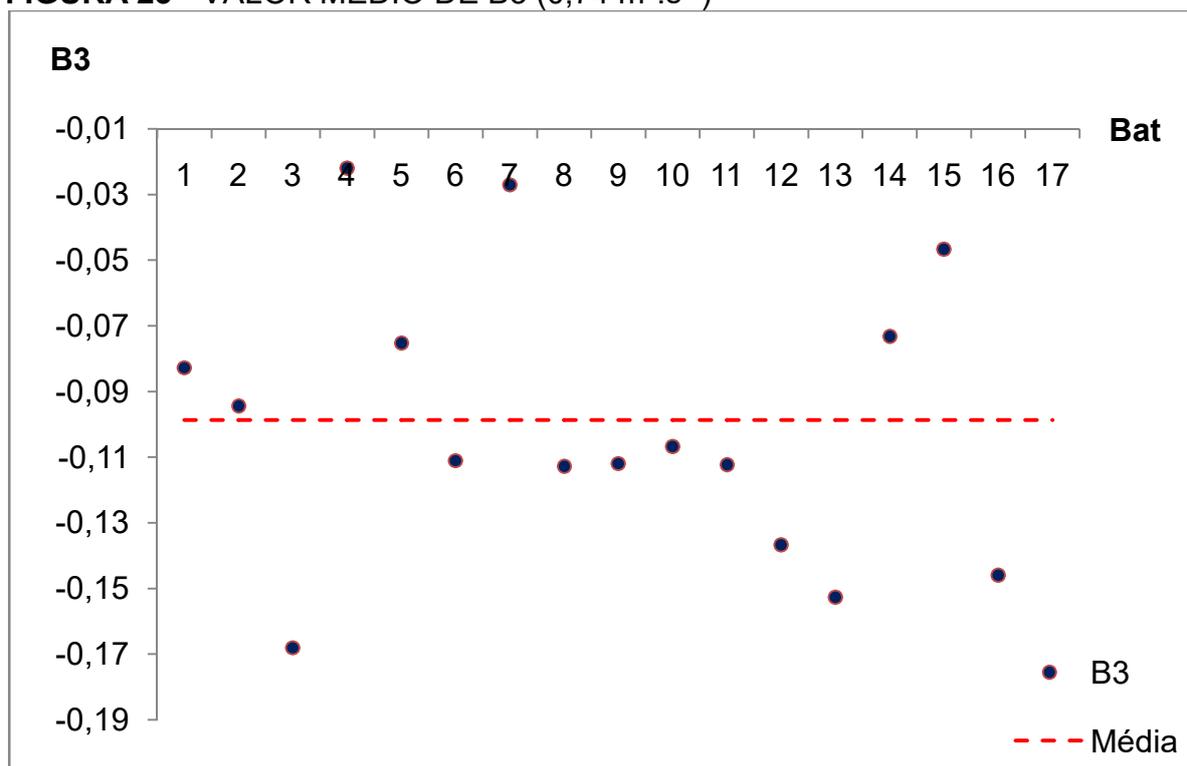
FIGURA 21 – VALOR MÉDIO DE B1 ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 22 - VALOR MÉDIO DE B2 ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

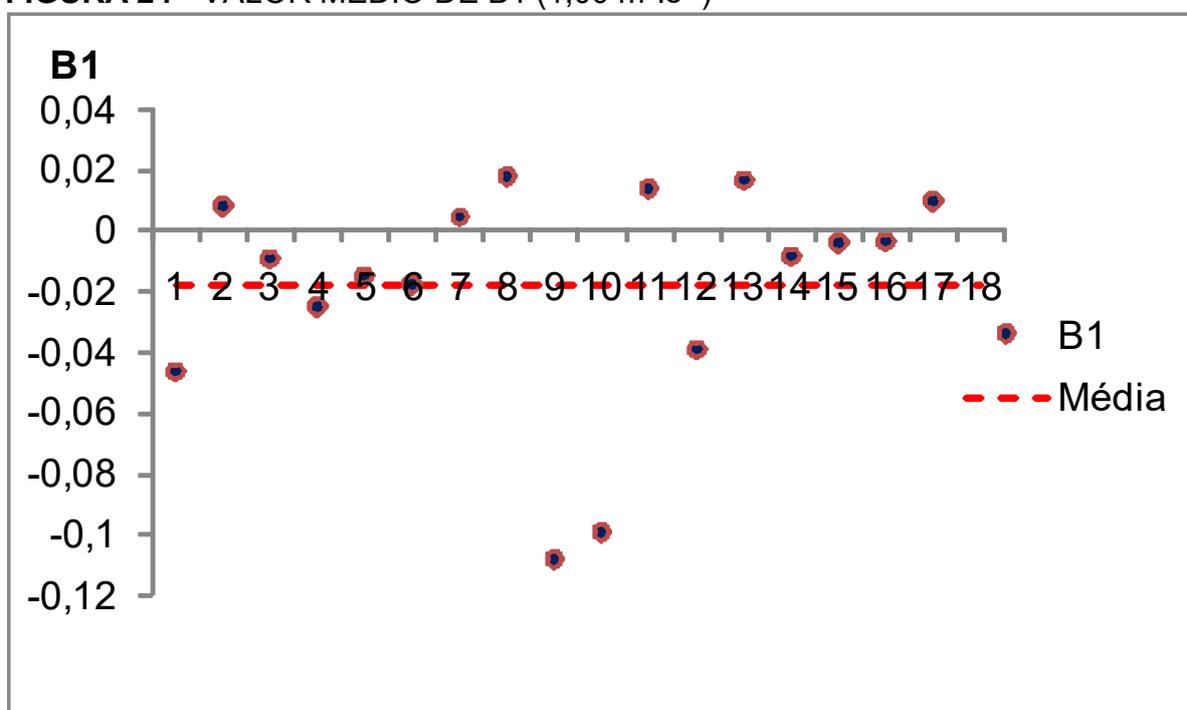
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 23 - VALOR MÉDIO DE B3 ($0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

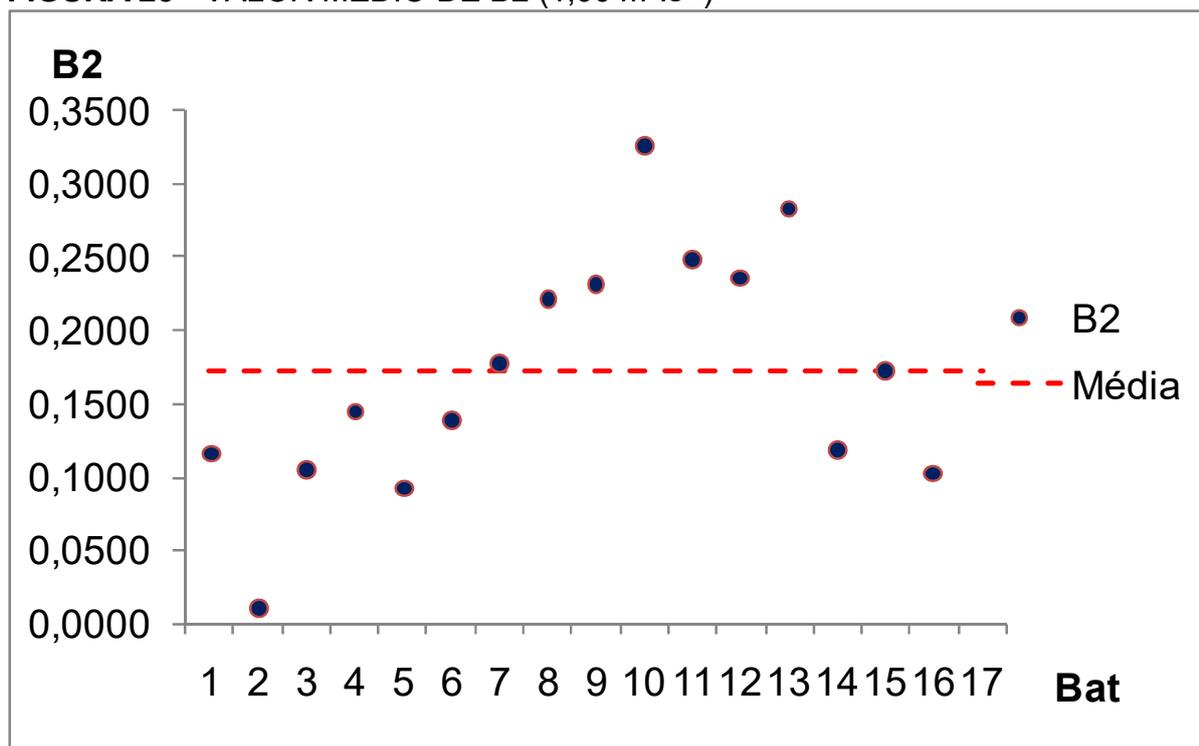


FONTE: O AUTOR (2018).

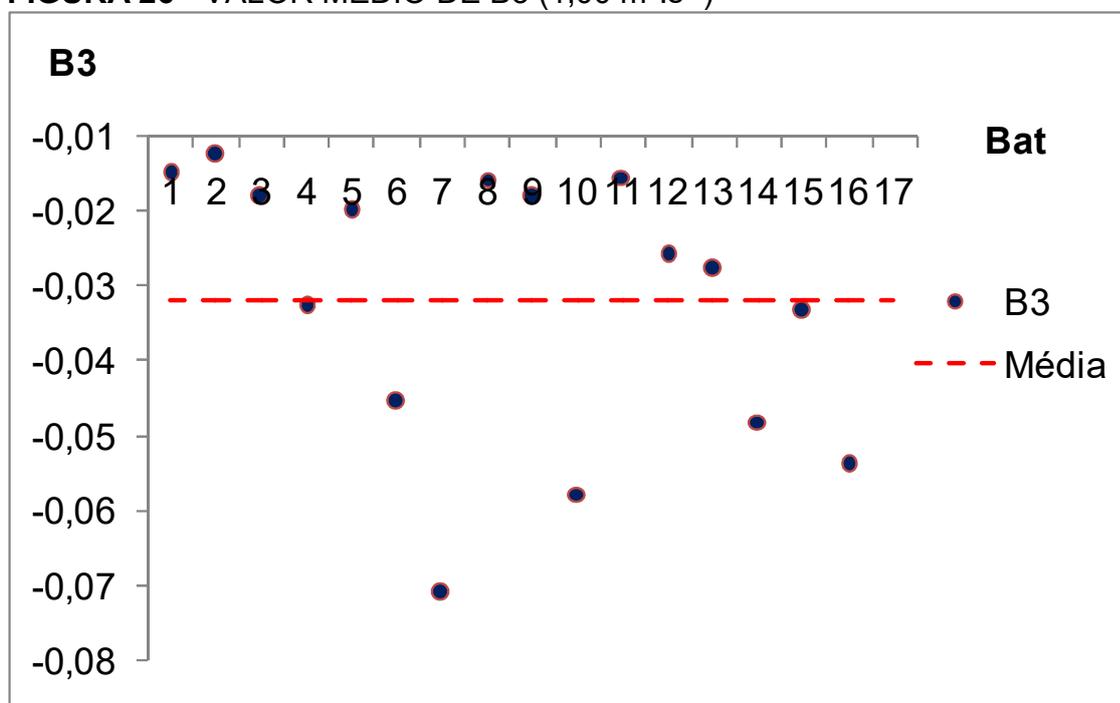
FIGURA 24 - VALOR MÉDIO DE B1 ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)



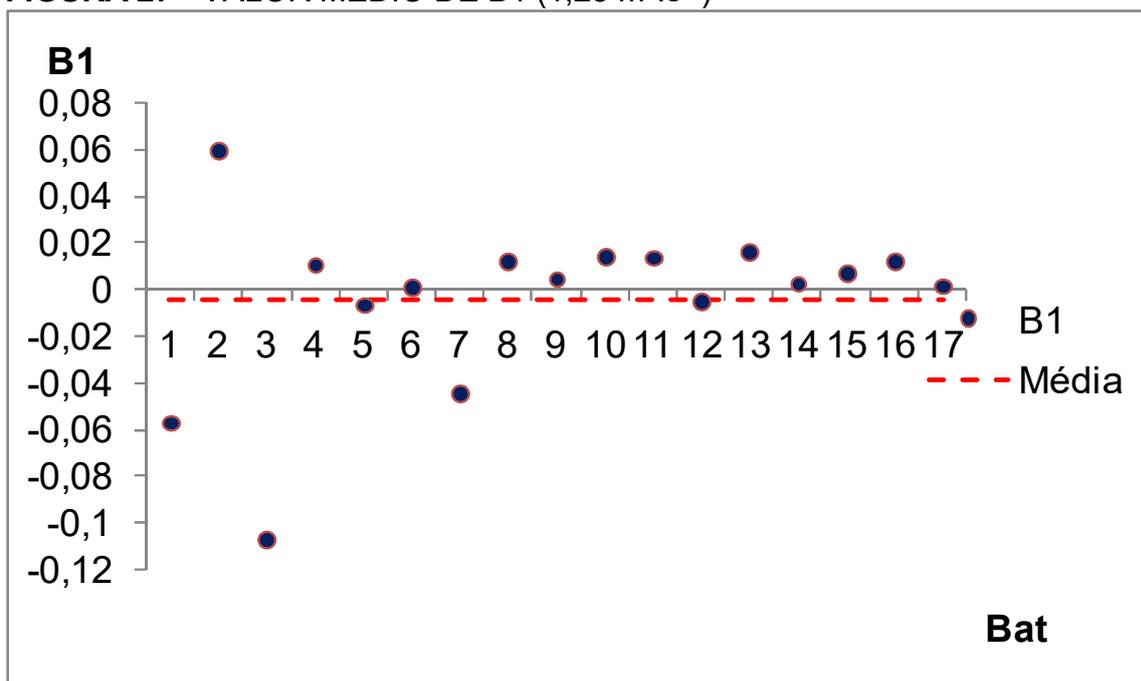
FONTE: O AUTOR (2018).

FIGURA 25 - VALOR MÉDIO DE B2 ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

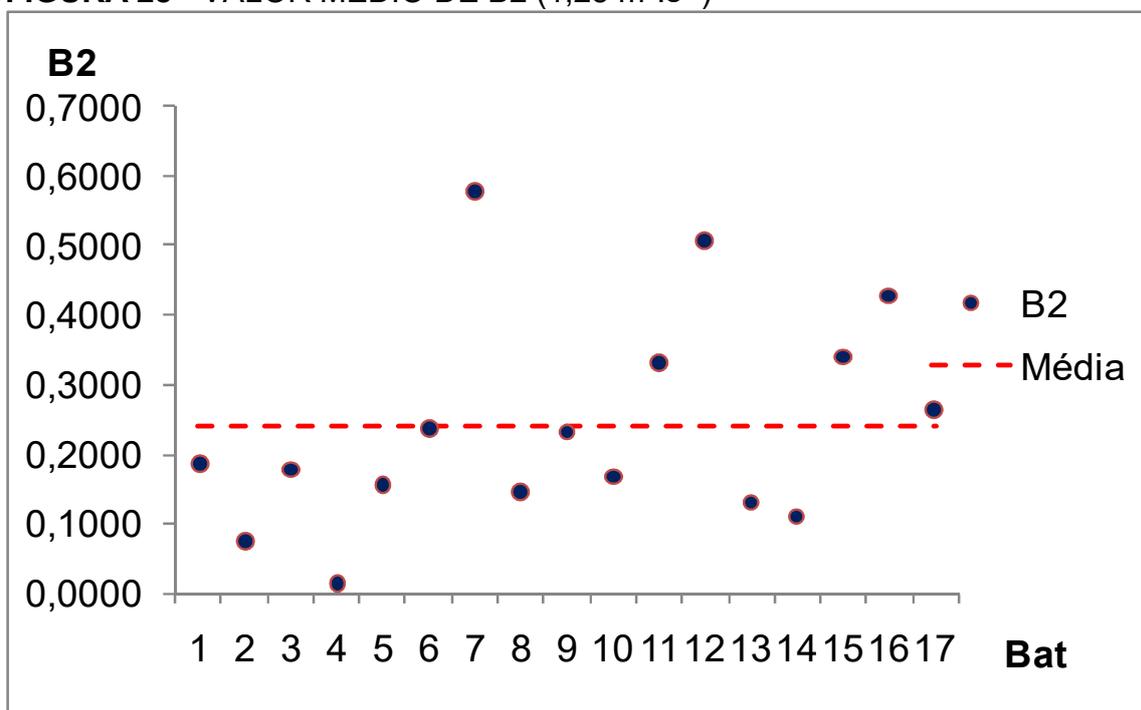
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 26 - VALOR MÉDIO DE B3 ($1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

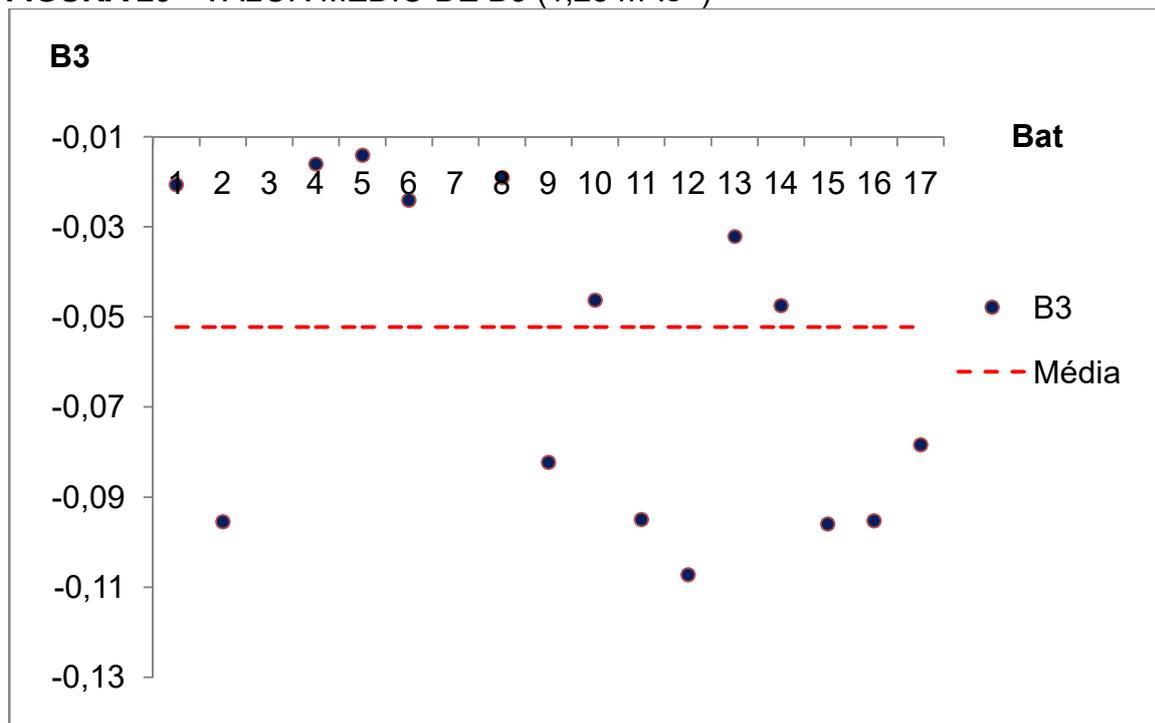
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 27 - VALOR MÉDIO DE B1 ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 28 - VALOR MÉDIO DE B2 ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 29 - VALOR MÉDIO DE B3 ($1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

FONTE:O Autor (2018).

Com base em cálculos efetuados pode-se então apresentar a Tabela 13 onde constam as médias calculadas e seus descritivos estatísticos.

TABELA 13 - RESUMO ESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS EXPONENCIAIS

Vazão /Parâmetro /Indicador	$0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			$1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			$1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
Média	0,0192	0,4825	-0,0987	-0,0183	0,1732	-0,0319	-0,0041	0,2397	-0,0522
Erro Padrão	0,0050	0,0922	0,0107	0,0090	0,0196	0,0045	0,0089	0,0373	0,0090
Mediana	0,0187	0,3130	-0,1089	-0,0086	0,1726	-0,0269	0,0042	0,1850	-0,0463
Desvio Padrão	0,0200	0,3802	0,0427	0,0372	0,0809	0,0180	0,0365	0,1540	0,0370
Variancia	0,0004	0,1445	0,0018	0,0014	0,0065	0,0003	0,0013	0,0237	0,0014
Nível de Conf. 95%	0,0107	0,1955	0,0228	0,0191	0,0416	0,0096	0,0188	0,0792	0,0190

FONTE:O Autor (2018).

Nota-se que as variações dos parâmetros em relação às vazões são pequenas, mas os mesmos não podem ser desprezados sem a certeza de quais são seus efeitos na secagem. Mais adiante, veremos se esses efeitos são relevantes ou não.

5.2.3 Cálculo de K_{exp} , Simulação e Análise das Condições Operacionais do Secador

Com os valores dos parâmetros em mãos, substituiu-se os valores na Equação 20 e no modelo de K_{exp} obtendo assim os valores da taxa de secagem em relação ao tempo. Na Tabela 14 estão apresentados os Parâmetros encontrados considerados e na Tabela 15 estão mostrados os valores de K_{exp} calculados para cada vazão.

$$\frac{d(X)}{dt}_{sist} = \beta - \frac{K_{exp}(X - X_{eq})A_{art}}{m_{ss}}$$

$$K_{exp} = (B1 + B2 * \exp^{(B3*X)})$$

TABELA 14 – RESUMO DOS PARÂMETROS EXPONENCIAIS E DADOS PARA CÁLCULOS

Parâmetros e Dados Para Cálculos						
Vazão	B1	B2	B3	Batelada Seca (kg)	Batelada Úmida (kg)	Área Total Batelada (m ²)
0,74 m ³ .s ⁻¹	0,0192	0,4825	-0,0987	68,12	93,62	126,21
1,00 m ³ .s ⁻¹	-0,0183	0,1732	-0,0319	65,27	80,28	120,98
1,25 m ³ .s ⁻¹	-0,0041	-0,0041	-0,0522	71,14	83,72	113,23

FONTE: O Autor (2018).

TABELA 15 - K_{exp} ENCONTRADOS

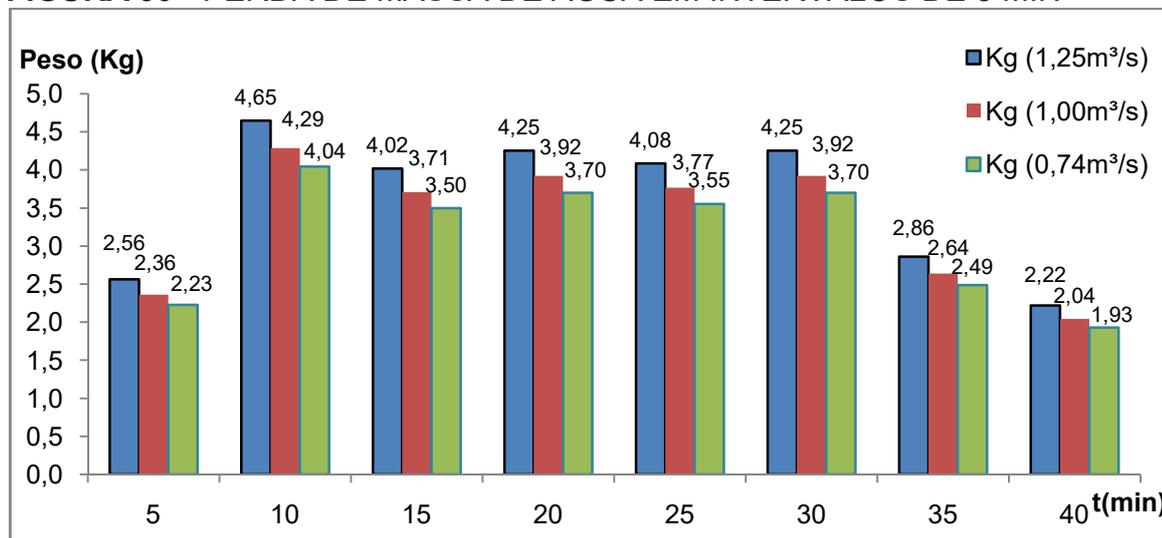
Parâmetros K_{exp}	
Vazão	K_{exp}
0,74 m ³ .s ⁻¹	0,0192
1,00 m ³ .s ⁻¹	0,0023
1,25 m ³ .s ⁻¹	0,0027

FONTE: O Autor (2018).

Para avaliação de qual vazão apresentaria um melhor rendimento de secagem, simulou-se com os três K_{exp} encontrados.

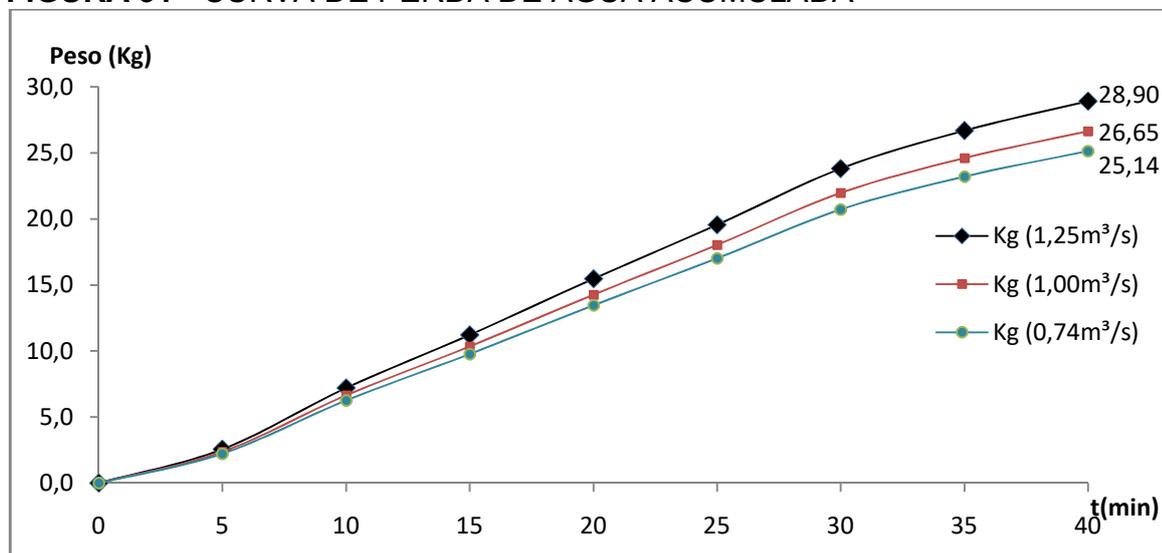
Para encontrar a taxa de variação de perda de água no sistema, substituir-se os valores dos parâmetros, e em X impor uma variação de uma amostra qualquer. Feito isso estão apresentados os resultados nas Figuras 30 e 31.

FIGURA 30 - PERDA DE MASSA DE ÁGUA EM INTERVALOS DE 5 MIN



FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 31 - CURVA DE PERDA DE ÁGUA ACUMULADA



FONTE: O Autor (2018).

Nota-se que a melhor condição de trabalho se encontra na vazão de $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, apresentando uma melhor taxa de secagem em relação ao tempo. Na Figura 30, observar-se que quanto maior o fluxo mássico de ar maior a perda de massa de água em relação ao tempo, assim a vazão de $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ retorna a melhor

taxa de secagem em todos os intervalos de tempos de 5 min. Isso é correto visto que a área de troca térmica permanece a mesma para qualquer uma das três vazões e a transferência convectiva de massa está ligada intimamente a turbulência do ar em contato com os artigos. O perfil de secagem mostrado na Figura 31 ocorre similarmente em todas as vazões, apresentando uma maior intensidade no que diz respeito à perda de água na vazão de $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

A Seguir, a Tabela 16 apresenta em percentual a diferença entre as perdas de massa de H_2O em relação às vazões nos intervalos de 5 min.

TABELA 16 – DIFERENÇA PERCENTUAL DE SECAGEM ENTRE VAZÕES

Diferença Percentual de Secagem Entre Vazões		
$1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} - 0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$1,25 \text{ m}^3/\text{s} - 1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$1,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} - 0,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
14,96%	8,45%	6,00%

FONTE: O Autor (2018).

Portanto, pode-se afirmar que o melhor regime de secagem encontra-se na vazão de $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ apresentando um melhor resultado de secagem em relação ao tempo.

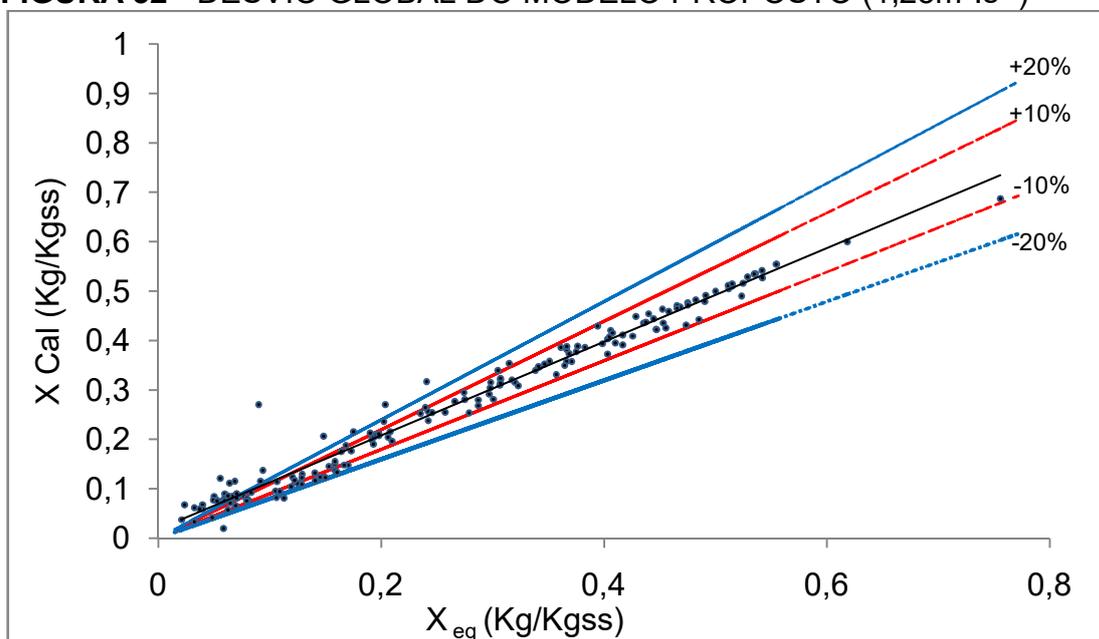
5.3 VALIDAÇÃO DO MODELO FENOMENOLÓGICO PROPOSTO

Para a avaliação do modelo proposto utilizou-se os dados experimentais e os resultados obtidos pelo mesmo. O modelo ajustado generalizado apresentou um erro global de 50,55% com todos os experimentos a $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. A Figura 32 a seguir, demonstra a relação de concentração de água dos dados calculados pelo modelo e os valores experimentais. Esse tipo de ajuste mostra a confiabilidade do modelo, já que indiretamente avalia o erro que está implícito no experimento, haja visto que se os dados calculados pelo modelo estiverem alinhados com experimentais a linha média deslocada por uma margem de erro (erro global) compreenderá uma grande parte dos dados resultantes. Ainda na Figura 32, pode-se ver que para os erros globais de 10% e 20%, grande parte dos dados estão dentro destes limites, apresentando respectivamente as porcentagens de dados constantes nesses limites de 67,66%, e 81,44% respectivamente.

Estatisticamente esses valores balizam os resultados conseguidos experimentalmente, neles ainda foram feitos teste de hipóteses Qui-Quadrado χ^2 ,

REQM (Raiz do Erro Médio) e EF (Eficiência do Modelo), resultando em 1,9256, 0,3499 e 0,9738 respectivamente.

FIGURA 32 - DESVIO GLOBAL DO MODELO PROPOSTO ($1,25\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)



FONTE:O Autor (2018).

A integração numérica do modelo proposto é um tanto quanto trabalhosa visto que o K é dependente da função da concentração em relação ao tempo e a própria função também em seu termo que multiplica a exponencial. Assim sendo, os dados coletados podem ser confrontados e simulados em programa estatístico para encontrar um perfil que se ajuste a eles. No modelo proposto observa-se que a taxa de variação de secagem é igual à multiplicação do coeficiente de transferência de massa K por um fator constante (resultado da divisão da área do artigo e a massa da base seca), subtraída de uma função do tempo (X) por uma constante (X_{eq}). O trato desse modelo não é simples, o que prejudica muito na hora de simular projetos reais.

$$\frac{d(X)}{dt}_{sist} = - \frac{K_{exp}(X - X_{eq})A_{art}}{m_{ss}}$$

Para simplificar o trato podemos considerar o K constante e dizer que o ajuste será feito na forma exponencial em seu termo de variação de concentração que varia com o tempo, assim pode-se apresentar as equações a seguir:

$$Rx_{sist} = K * \exp(-a * t) \quad 22$$

$$Rx_{sist} = a * \exp(-K * t^n) \quad 23$$

Onde a , e n são constantes, K é coeficiente de transferência de massa e calor e t é o tempo em minutos. Observa-se que os modelos propostos são mais simples que o modelo inicial.

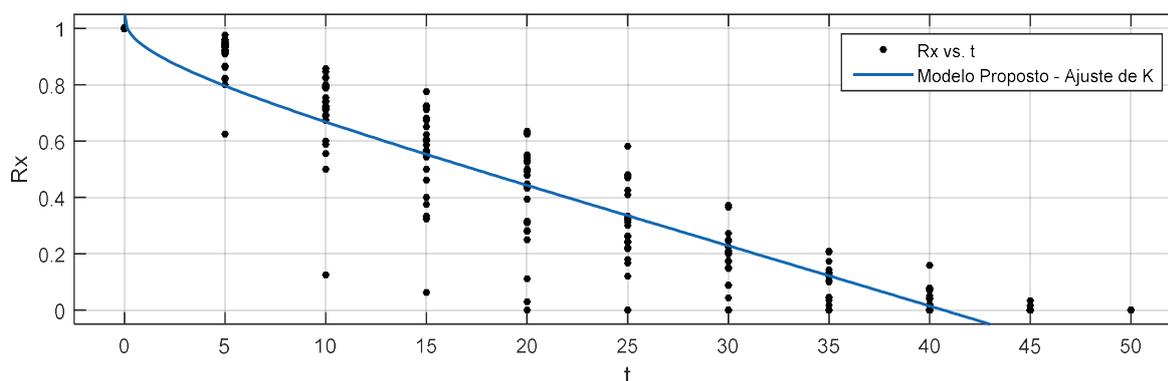
5.4 AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS SOBRE OS MODELOS SIMPLIFICADOS E OUTROS MODELOS

Pode se então fazer duas análises, a primeira com o os modelos propostos e da literatura ajustando os parâmetros e também o K , e a outra ajustando os parâmetros e testando o K experimental, isso abre o as possibilidades de quando se tem ou não o K experimental.

5.4.1 Ajuste dos Parâmetros e do K

A Figura 33 apresenta a curva de ajuste do modelo proposto pela Equação 22, sua curva de ajuste apesar de parecer interessante é desacreditada quando se analisa o valor de R-square apresentado na Tabela 17.

FIGURA 33 - AJUSTE DE DADOS PARA MODELO PROPOSTO SIMPLIFICADO (EQ. 22)



FONTE: O Autor (2018).

TABELA 17 - AJUSTE DO MODELO PROPOSTO SIMPLIFICADO (EQ. 22)

Parâmetros	Modelo
K	0,0676
n	0,2786
a	1,1190
SSE	3,5580
R-square	0,8634
Adjusted R-square	0,8621
RMSE	0,1317

FORNTE: O Autor (2018).

Para uma análise mais detalhada dos dados experimentais, pode-se testá-los para vários modelos já consagrados na literatura, utilizando todos os dados considerados e levando em conta o K encontrado pelos modelos. Com isso, a intenção é testar a metodologia de coleta de dados, além dos resultados mostrarem o quão confiável é o modelo proposto. Assim, pode se concluir quais dos modelos podem ser empregados no projeto de secadores do tipo estudado.

Na Tabela 18 apresentam-se os resultados de ajuste feito através do software Matlab®.

TABELA 18 - APLICAÇÃO DE VÁRIOS MODELOS NOS DADOS COLETADOS

Mod./Parâm.	Page	Wang e Sing	Henderson e Pabis
K	0,0046		0,0516
n	1,7500		
a		0,0492	1,0890
b		-0,0744	
SSE	1,3710	0,1872	3,7330
R-square	0,9474	0,9065	0,8567
djusted R-square	0,9471	0,9060	0,8560
RMSE	0,0816	0,1087	0,1346

FORNTE:O Autor (2018).

TABELA 18 - APLICAÇÃO DE VÁRIOS MODELOS NOS DADOS COLETADOS (CONTINUAÇÃO)

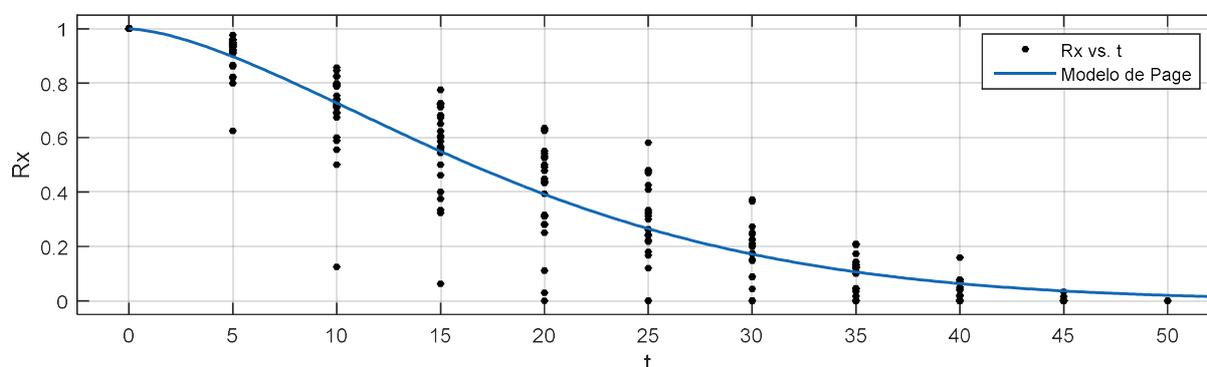
Mod./Parâm.	H e P modificado	Midilli	Dois Termos
k	5,718	-0,1133	0,05172
k1	0,0902		4,656
k2	0,1295		
n		0,6676	
a	0,3371	0,9994	1,342
b	5,136	-0,0937	-0,3424
c	4,474		
SSE	0,2968	1,3590	0,4659
R-square	0,9605	0,9478	0,9258
djusted R-quare	0,9569	0,9471	0,9210
RMSE	0,07413	0,0812	0.1006

FONTE: O Autor (2018).

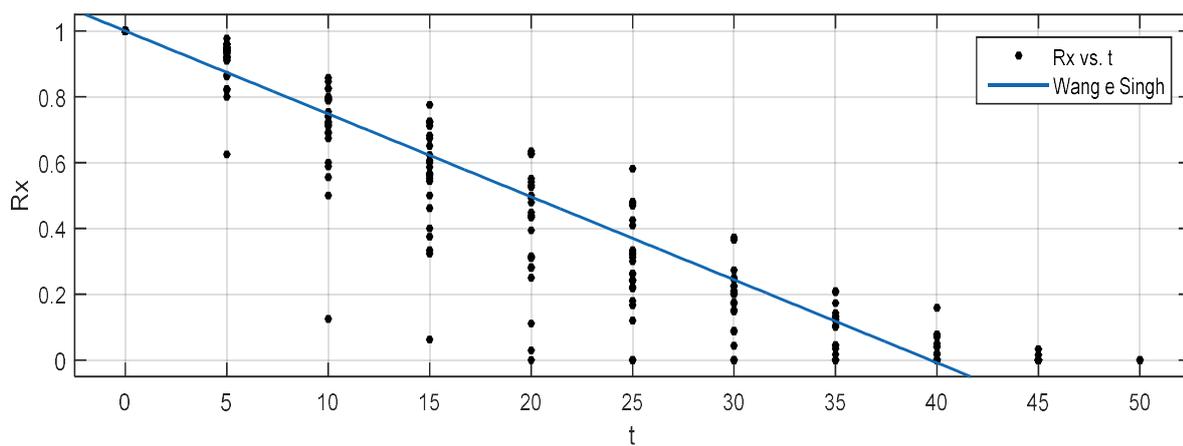
Confrontando os valores da Tabela 17 com os valores da Tabela 18, constata-se que a melhor opção é a utilização dos Page, Midilli e Handerson e Pabis Modificado.

Nos modelos de Page, Midilli e Henderson e Pabis Modificado apresentaram um R-Square de 0,9605 (Henderson e Pabis Modificado), 0,9478 (Midilli) e 0,9474 (Page), sendo então indicados para os ajustes da curva de secagem quando não se tem o K.

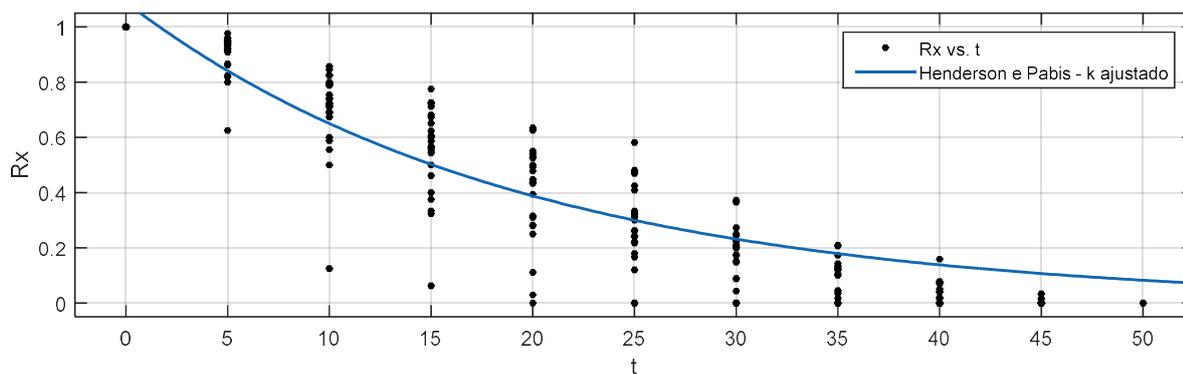
Na sequência, são apresentadas as Figuras 34 a 40 onde se podem ver graficamente os ajustes conseguidos pelos os modelos.

FIGURA 34 - AJUSTE DE DADOS PARA PAGE

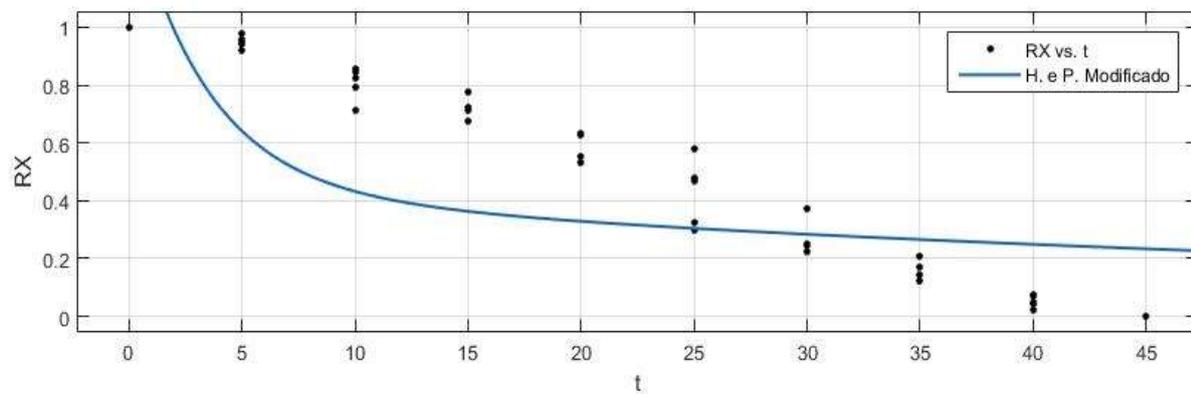
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 35 - AJUSTE DE DADOS PARA WANG E SING

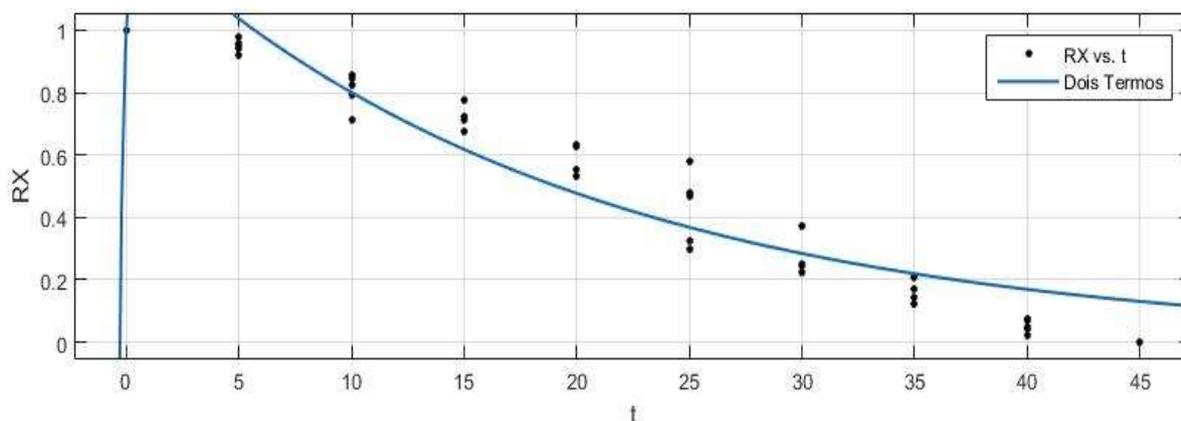
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 36 -AJUSTE DE DADOS PARA HANDERSON E PABIS

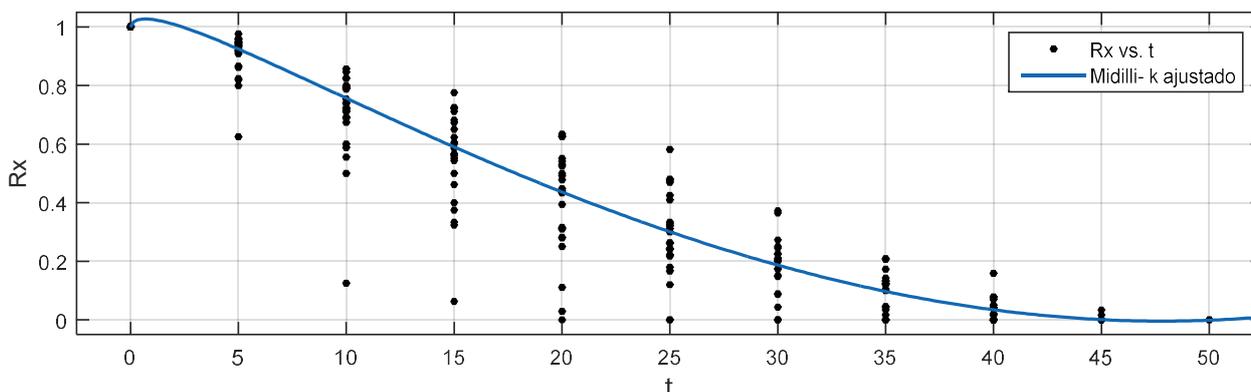
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 37 -AJUSTE DE DADOS PARA H. P. MODIFICADO

FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 38 - AJUSTE DE DADOS PARA DOIS TERMOS

FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 39 - AJUSTE DE DADOS PARA MIDILLI

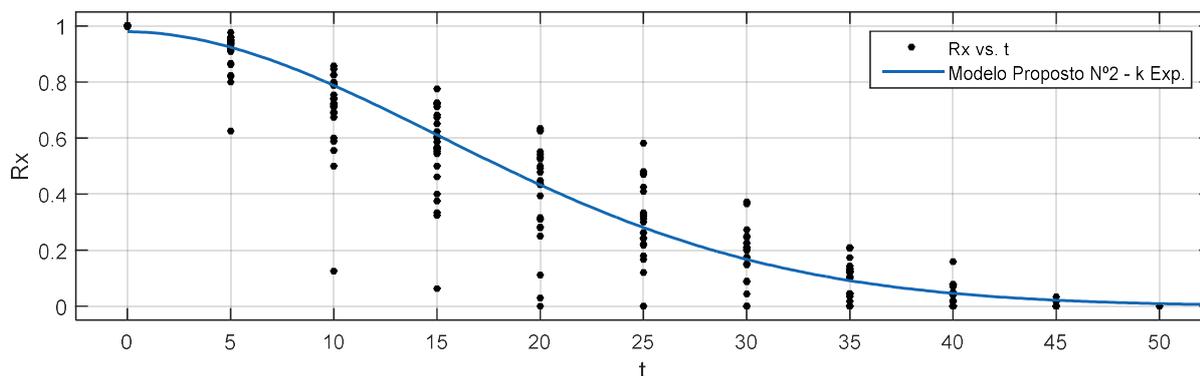
FONTE: O Autor (2018).

Com o exposto pode-se afirmar que modelo proposto representado pela Equação 22 não se apresenta como alternativa para avaliação do tipo de secagem e os modelos de Page, Midilli e Handerson e Pabis Modificado, apresentam satisfatoriamente os perfis de secagem dos dados do secador têxtil rotativo industrial quando não se tem os valores de K experimental.

5.4.2 Ajuste dos Parâmetros com K Experimental.

A Figura 41 a seguir, apresenta a curva de ajuste do modelo proposto simplificado proposto pela Equação 23.

FIGURA 40 - AJUSTE DE DADOS PARA MODELO PROPOSTO SIMPLIFICADO (EQ. 23)



FONTE: O Autor (2018).

O mesmo procedimento para a validação foi empregado ao modelo proposto pela Equação 23, testando-o assim para vários modelos já consagrados na literatura, utilizando todos os dados considerados e levando em conta o K encontrado experimentalmente. As Tabelas 19 e 20 apresentam os resultados de ajuste feito através do software Matlab®.

A Tabela 19 apresenta os resultados de ajuste nas simulações do modelo proposto (Equação 23). Pode-se ver que o SSE, R-square, Adjusted R-square e RMSE, o modelo proposto em análise se apresenta melhor que os modelos Logarítmico e Midilli quando é aplicado o valor de K experimental.

TABELA 19 - AJUSTE DO MODELO PROPOSTO SIMPLIFICADO K EXPERIMENTAL (EQ. 23)

Parâmetros	Modelo
K	0,0027
n	1,907
a	0,9795
SSE	1,442
R-square	0,9446
Adjusted R-square	0,9444
RMSE	0,0837

FONTE: O Autor (2018).

TABELA 20 - APLICAÇÃO DE VÁRIOS MODELOS NOS DADOS COLETADOS K EXPERIMENTAL

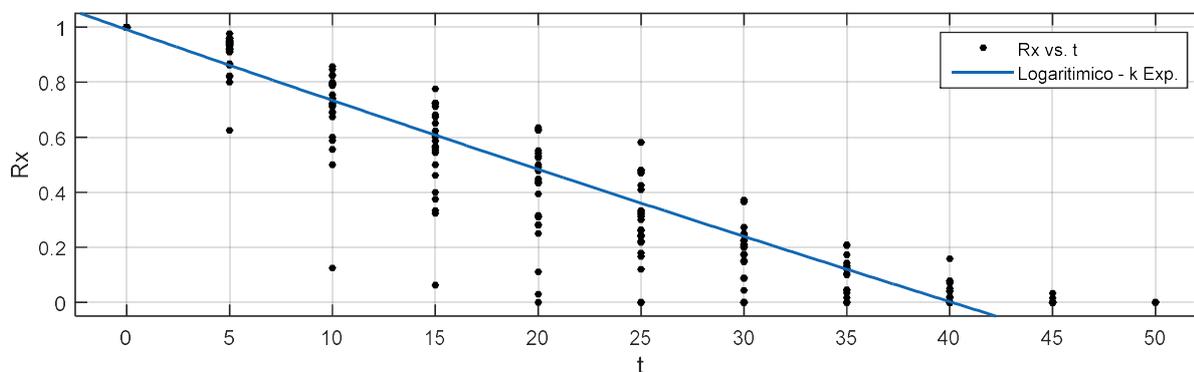
Mod./Parâm.	Logarítmico	Midilli
K	0,0027	0,0027
n		0,7844
a	9,6590	0,9863
b	-8,668	-0,0235
SSE	2,3670	2,5040
R-square	0,9091	0,9039
djusted R-quare	0,9087	0,9029
RMSE	0,1072	0,1105

FONTE: O Autor (2018).

Os modelos de Logarítmico e Midilli apresentaram um R-Square que variou entre 0,9091 (Logarítmico) e 0,9039 (Midilli), enquanto o modelo proposto pela Equação 23 apresentou um R-Square de 0,9446.

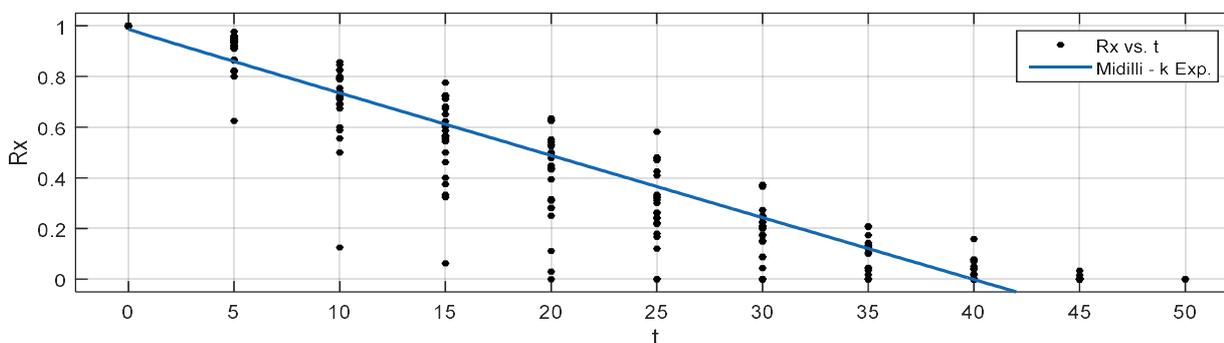
Na sequência, são apresentadas as Figuras 42 e 43 onde se podem ver graficamente os ajustes conseguidos pelos os modelos.

FIGURA 41 - AJUSTE DE DADOS PARA LOGARÍTMICO (K EXP.)



FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 42 - AJUSTE DE DADOS PARA MIDILLI (K EXP.)



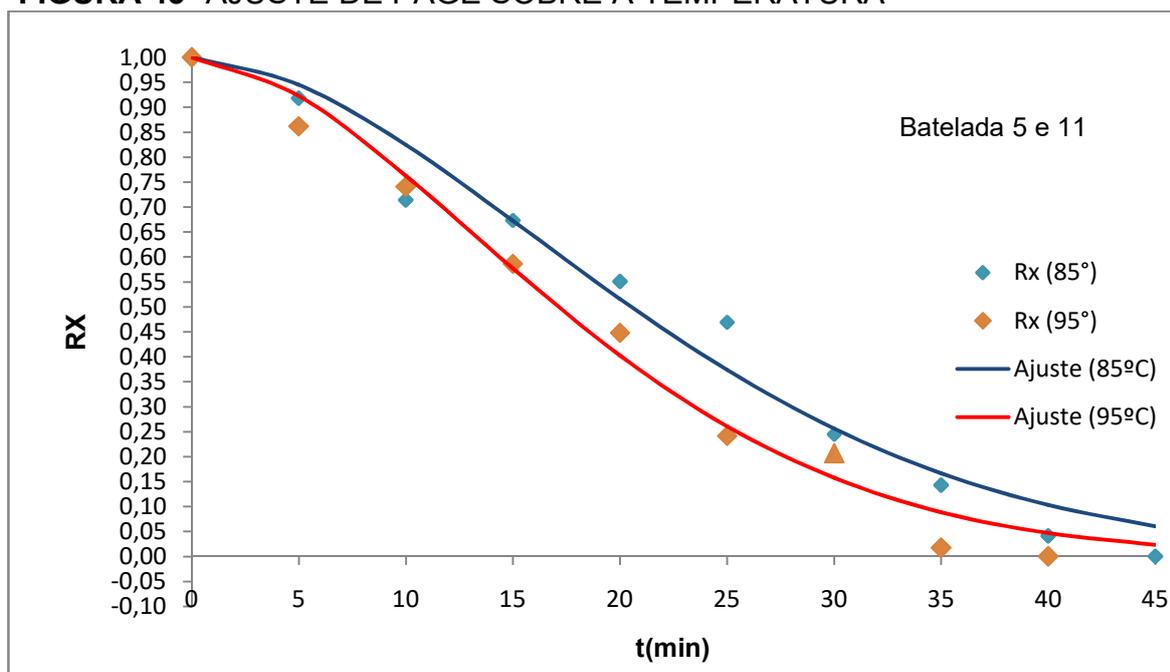
FONTE: O Autor (2018).

Diante o exposto, pode-se afirmar que os modelos Logarítmico e Midilli apresentam perfis de secagem dos dados do secador têxtil rotativo industrial e resultados de ajustes inferiores ao modelo proposto pela Equação 23. Também é certo afirmar que o K resultante do modelo desenvolvido também está dentro de uma faixa satisfatória, já que aplicado nos modelos consagrados conseguiu bom ajustes aos modelos.

5.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

A influência da temperatura é amplamente descrita na literatura, os modelos consagrados descrevem com confiabilidade os perfis de secagem de processos reais. A fim de demonstrar a influência da temperatura no processo de secagem de peças em jeans, a seguir são apresentadas as Figuras 42 e 43 de ajuste nas temperaturas de 85°C e 95°C, para os modelos de Page e Midilli. Os ajustes foram feitos em dados coletados a mesma vazão de 1,25 m³/s. Isso denota que a possibilidade de poder usar dois dos modelos de secagem mais conhecidos na literatura, o que torna mais fácil o projeto de futuros equipamentos mais eficientes para o mercado.

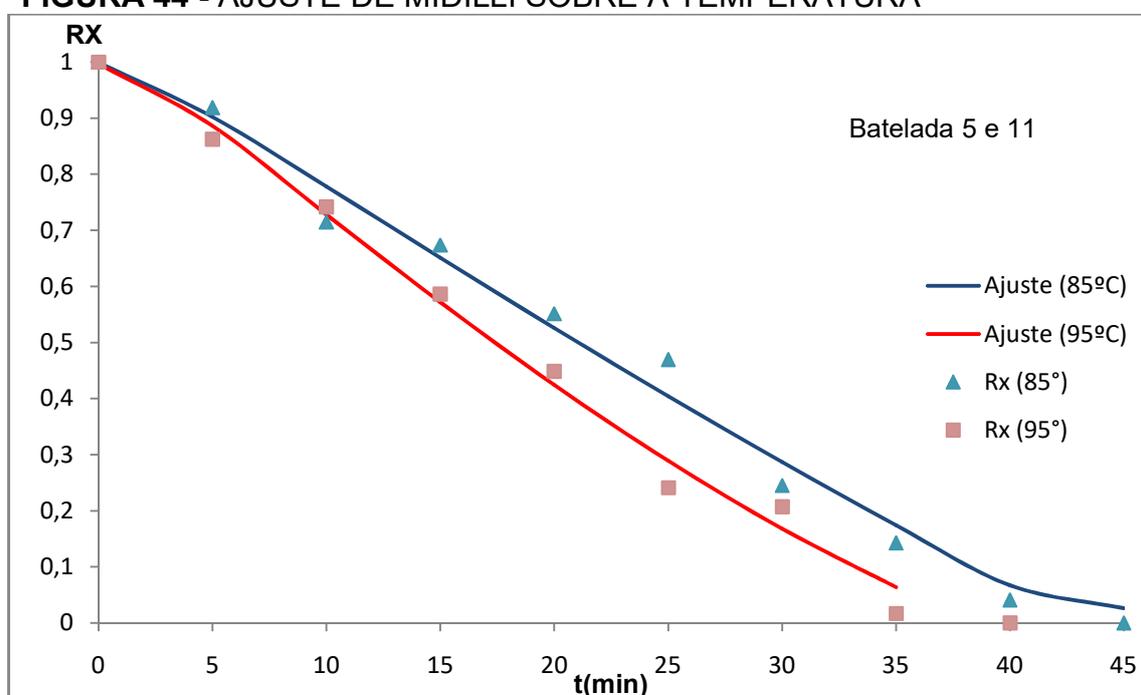
FIGURA 43 -AJUSTE DE PAGE SOBRE A TEMPERATURA



FONTE:O Autor (2018).

Pode-se ver que os modelos apresentaram bons ajustes e como se era de esperar a temperatura intervém sim sobre a secagem dos artigos. Isso é correto visto que depois da vazão a temperatura é o parâmetro que mais interfere na troca térmica e de massa. Dentre os modelos analisados, pode-se ver pela Tabela 19 que o modelo de Midilli representa ligeiramente melhor o ajuste sobre os dados experimentais. Mas que não é significativo para questões de projeto. Contudo, o aumento da temperatura se dá devido ao aumento da temperatura ambiente já que este é uma variável não controlável. Sendo a área de troca térmica e condições do vapor saturado constante, pode se afirmar à relevante influência da temperatura do ar atmosférico sobre a velocidade de secagem.

FIGURA 44 - AJUSTE DE MIDILLI SOBRE A TEMPERATURA



FONTE: O Autor (2018).

TABELA 21 - VALORES DE ERRO E DE QUI-QUADRADO

Modelo/Resultados	Page (85°C)	Page (95°C)	Midilli (85°C)	Midilli (95°C)
Erro	0,0316	0,0170	0,0138	0,0075
Qui-Quadrado	0,0150	0,0400	0,0053	0,0180

FONTE: O Autor (2018).

6 CONCLUSÕES

Com o exposto pode-se afirmar que o modelo de ajuste exponencial para o K é melhor para a caracterização do modelo de secagem do Secador Rotativo Industrial Têxtil, e que a fluxo mássico de ar de $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ apresenta a melhor eficiência de secagem com o tempo. Isso significa uma secagem mais rápida, usando menos recursos de energia elétrica e mão de obra, já que os motores mesmo com o acréscimo de rotação diminuem significativamente os tempos.

Os modelos propostos simplificados que levam em consideração o tempo da batelada para ajustes dos perfis, apresentam duas conclusões que são, quando não se tem o valor de K experimental, onde a Equação 22, se apresenta um desempenho menos satisfatório do que os modelos de Page, Midilli e Henderson e Pabis Modificado, e quando se tem o K experimental, no qual o modelo proposto representado pela Equação 23, demonstrou-se com um melhor ajuste que os modelos Logarítmico e Midilli, sendo mais indicado para quando se tem o valor de K.

A secagem dos artigos sofre interferência significativa da temperatura do ar atmosférico, pois partindo do princípio que a capacidade de troca é constante a temperatura do ar é um fator determinante para a eficácia da secagem dos artigos. Ainda o modelo proposto, apresentou-se como uma boa opção para a simulação do processo de secagem em secadores rotativos industriais têxteis, podendo assim ser usado para análise de projetos desse tipo de equipamento.

Observou-se que a temperatura interfere favoravelmente na velocidade de secagem dos artigos, ou seja, quanto maior a temperatura maior a velocidade de secagem.

O modelo proposto para o ajuste apresentou resultado satisfatório quando analisado com erro global de 10% e 20%, na comparação dos dados experimentais com os resultados dos modelos. Ainda o K calculado pelo modelo proposto apresentou um bom ajuste nos dados consagrados na literatura reafirmando o satisfatório resultado do modelo.

O modelo proposto simplificado apresentado pela Equação 23 apresentou resultados muito similares aos modelos consagrados na literatura, calçando a afirmativa que o modelo simplificado também pode ser utilizado para projetos desse tipo de equipamento.

Nesta direção, pode-se concluir que:

1. O modelo matemático exponencial descreve o comportamento de secagem de um secador rotativo têxtil com melhor eficiência e menor erro;
2. A melhor vazão foi a de $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, sendo que a equação do modelo de secagem tomou a forma representada pela Equação 23;
3. A temperatura de secagem interfere na secagem dos artigos têxteis;
4. O modelo apresentou uma boa relação entre os dados experimentais e os calculados;
5. A temperatura do ar atmosférico interfere significativamente no tempo de secagem;
6. Os modelos de Midilli, Page e Logarítmico apresentam-se satisfatoriamente para o projeto de secadores rotativos em cada uma das suas particularidades e;
7. O modelo proposto simplificado pode ser usado para os projetos de secadores rotativos.

Para os estudos posteriores, indica-se alguns possíveis direcionamentos, tais como:

1. Aumento da área de troca de calor do equipamento para analisar uma possível melhora do equipamento;
2. Aumento da vazão de Ar do equipamento;
3. Análise possíveis rotas de fuga de Ar de secagem no equipamento;
4. Análise energética do equipamento e;
5. Automação do equipamento a fim de que este mantenha a temperatura de secagem controlada independente das condições ambientais.

REFERÊNCIAS

- ABIT, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA TEXTIL/0. **PERFIL DO SETOR**. [S.l.: s.n.], 2017. 1 p. Disponível em: <<http://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>. Acesso em: 19 dez. 2017.
- ADS BRASIL.. ESTUDO SOBRE PRODUÇÃO BRASILEIRA DE JEANS, São Paulo, 28out. 2013. Disponível em: http://www.textilia.net/materias/ler/textil/conjuntura/iemi_divulga_estudo_sobre_producao_brasileira_de_jeans. Acesso em: 14março. 2016.
- BARBOSA,R.M.**CÁLCULO NUMÉRICO. CÁLCULO DE DIFERENÇAS FINITAS**.EditoraLivrariaNobel,1970.
- BENETTI,D.; CHRISTOFORO,A.L.**APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS NA RESOLUÇÃO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ELÍPTICAS REFERENTE À DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS EM PONTOS INTERIORES DE UMA CHAPA**.Anais doCNMAC v.2.UNEMAT– MT.
- BIAGI,J.D.;BERTOL,R.;CARNEIRO,M,C.**SECAGEM DE GRÃOS PARA UNIDADES CENTRAIS DE ARMAZENAMENTO**.In:LORINI,I;MIKE,L.H.; SCUSSEL,V.M. *ArmazenagemdeGrãos*.IBG, Campinas, SP. 2002. Cap.5.2, p289–307.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **DEFINITIONS OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS**.*TRANSPORT PHENOMENA*. John Wiley Sons, Inc. Second Edition. 2002, p. 425.
- BONTEMPI, A. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECADORES INDUSTRIAIS: ANÁLISE E PROPOSTAS EXPERIMENTAIS**.Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2004.
- BORREMANS, D.; RODE, S.; WILD, G. **LIQUID FLOW DISTRIBUTION AND PARTICLE-FLUID HEAT TRANSFER INTRICKLE-BEDREACTORS: THE INFLUENCE OF PERIODIC OPERATION**. *Chemical Engineeringand Processing*. 43(2004)1403-1410.
- BOYCE, D. S. **GRAIN MOISTUREAND TEMPERATURE CHANGES WITH POSITION AND TIME DURING THROUGH DRYING**. *J. Agric. Res.*,v.10,n.4, p.333-341,1965.
- BRITO-PELEGRINI, N. N.; PELEGRINI, R. T. **TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTILCONTENDO CORANTE REATIVO BLUE BLACK POR PROCESSO FOTOCATALÍTICO, UTILIZANDO TIO₂/UV**. *Química Têxtil*, n. 81, 2005. 38-42.

BRITTO, J. M.; RANGEL, M. D. C. **PROCESSOS AVANÇADOS DE OXIDAÇÃO DE COMPOSTOS FENÓLICOS EM EFLUENTE INDUSTRIAIS. QUÍMICA NOVA**, V.31, n. 1., 2008. 114-122.

CALADO, V. M. **DEA. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SECADORES EM LEITOS FIXO E DESLIZANTE. PEQ/COPPE/UFRJ, RiodeJaneiro-RJ. 1993** (Tese de Doutorado).

CALÇADA, L. A. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SECADORES EM LEITO FIXO. PEQ/COPPE/UFRJ, RiodeJaneiro-RJ. 1994** (Dissertação de Mestrado).

CALÇADA, L. A. **SECAGEM DE MATERIAIS GRANULARES POROSOS. ScPEQ/COPPE/UFRJ, RiodeJaneiro, RJ. 1998.** (Tese de Doutorado)

CALÇADA, L. A.; BISCAIA Jr, E. C.; MASSARANI, G., **SECAGEM DE MATERIAL PARTICULADO: MODELO ATRÉS FASES.** Artigo Publicado no anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. 2002

CARTER, L. D. E SHAH, O. D. **THE ROLE OF SURFACE TENSION ON THE RESIDUAL WATER CONTENT OF FABRICS.** Journal of surfactants and detergents. v. 8, n. 1, 2005.

CASTILLO-ARAIZA, C. O.; JIMÉNEZ-ISLAS, H.; LÓPEZ-ISUNZA, F. **HEAT-TRANSFER STUDIES IN PACKED-BED CATALYTIC REACTOR SOF LOW TUBE/PARTICLE DIAMETER RATIO.** Ind. Eng. Chem. Res. v. 46, p. 426-7435, 2007.

CELESTINO, S. M. C. **PRINCÍPIOS DE SECAGEM DE ALIMENTOS.** p. 19-20, 1ª ed. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2010.

CONCEIÇÃO, W. A. S.; PARAÍSO, P. R.; ANDRADE, C. M. G.; COUTINHO, M. R., JORGE, L. M. M. **MATLAB APLICADO À SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE INTRODUÇÃO À ENGENHARIA QUÍMICA, TERMODINÂMICA E FENÔMENOS DE TRANSPORTE.** Editorada Universidade Estadual de Maringá, 2009

CONCEIÇÃO, W. A. S.; PARAÍSO, P. R.; ANDRADE, C. M. G.; COUTINHO, M. R., JORGE, L. M. M. **INTRODUÇÃO AO MATLAB PARA ENGENHARIAS.** Editorada Universidade Estadual de Maringá, 2009.

CORREA, S. M. B. B.; **PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA.** 2ª ed.. Belo Horizonte. PUC Minas Virtual, 2003, pág. 8.

COUTINHO, M. R. **MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA HIDRATAÇÃO D EGRÃOS DE SOJA.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UEM. 2006

COUTINHO, M. R.; OMOTO, E. S.; OLIVEIRA, U. G.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M. – **MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DE UM**

SIMULADOR PARA AQUECEDORES ELÉTRICOS DE AR. ActaScientiarum.Technology.Maringá,v.26,no.1p.33-37,2004.

COUTINHO,M.R.; ROMERO,J.A.S.; CONCEIÇÃO,W.A.S.,PARAÍSO,P.R.; JORGE,L.M.M.**SECAGEM DE SOJA EM LEITO FIXO:MODELO A DUAS FASES.** XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. ENEMP, 2009.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion.** 2ª Ed., Oxford: Clarendon Press, 1975.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D.; MONKENE SILVA, L. H.;KOLLING, E. **FIXED-BED DRYING SIMULATION OF AGRICULTURAL PRODUCTS USING A NEW BACK WARD FINITE DIFFERENCES CHEM. APPLIED MATHEMATICS AND COMPUTATION,** v.25, n.2, p.675-684.

DEVORE, J. L.**Probabilidade E ESTATÍSTICA PARA ENGENHARIA E CIÊNCIAS.** São Paulo: Cengage Learning, 2006. Pag. 209.

FOUST, A.S.;CLUMP, C.W.;WENZEL, L.A.. **PRINCIPIOS DE OPERAÇÕES UNITÁRIAS.** Rio de Janeiro: LTC, 1982. p. 403.

GEANKOPLIS, C. J.; **TRANSPORT PROCESSES AND UNIT OPERATIONS.** pg. 754-794, 3a ed. Prentice Hall, 1993.

GOMES, P. M. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. **CARACTERIZAÇÃO E ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DE UMIDADE DA POLPA DE ACEROLA EM PÓ.** REVISTA BRASILEIRA DE PRODUTOS AGROINDUSTRIAIS, CAMPINA GRANDE- PB, vol. 4, n° 2, pg. 157-165, 2002.

HAGHI, A. K. **SIMULTANEOUS MOISTURE AND HEAT TRANSFER IN POROUS SYSTEMS. JOURNAL OF COMPUTACIONAL AND APPLIED MECHANICS,** vol. 2, n. 2, p. 195-204, 2001.

LIMA, O. C. da M. **ESTIMATION OF HEAT AND MASS TRANSFER COEFFICIENT SINCROSS-FLOW SLIDING BED DRYING GRAINS.** Acta Scientiarum.Maringá,v.23,n.6, p. 1421-1425,2001.

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.

LUZ,G.R.**MODELAGEM MATEMÁTICA E ANÁLISE DO SECADOR ROTATIVO DE FARELO DE SOJA. PEQUENA.** Dissertação de Mestrado.Maringá,2006.

LUZ, G.R. ET AL. **ESTUDO DAS ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO DO FARELO DE SOJA.** CIENC. TECNOL. ALIM., CAMPINAS, V. 26, N. 2, P. 408-413, 2006.

LUZ, G.R. **MODELAGEM MATEMÁTICA E ANÁLISE DO SECADOR ROTATIVO DE FARELO DE SOJA**. 2006. DISSERTAÇÃO MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA)–UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ, MARINGÁ, 2006.

MCCABE, W. L. **UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING**. Editora Mc Graw-Hill, 1993.5ªEdição.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **ESTATÍSTICA APLICADA E PROBABILIDADE PARA ENGENHEIROS**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. Pag. 12.

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.

PERAZZINI, H. **SECAGEM DE SÓLIDOS POROSOS GRANULARES**. 2014. 6 PG. TESE (DOUTORADO EM ENGENHARIA QUÍMICA) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, SÃO CARLOS - SP, pg. 15 2014.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK**. EDITORA MCGRAW-HILL, 1998. 7ª Edição.

SINDILAV. **PANORAMA DO MERCADO DE LAVANDERIAS**. São Paulo, Disponível em: < <http://www.sindilav.com.br/mercado-panorama.php>>. Acesso em: 13março. 2016.

SMITH, J. M.; VAN HESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **INTRODUÇÃO À TERMODINÂMICA DA ENGENHARIA QUÍMICA**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

VIEIRA, M. G. A. **ANÁLISE DA SECAGEM DE POLPA DE CELULOSE PARA A OBTENÇÃO DE PAPEL RECILADO**. 2006. TESE (DOUTORADO EM ENGENHARIA QUÍMICA)- UNICAMP, CAMPINAS-SP, pg. 17, 2006.

Vieira, R. K. Estudo de casqueamento de Solidos em tambor rotativo. Dissertação de mestrado – UFSCar, PPG/EQ, 1996

YUN, M.T.; PUSPASARI.; TASIRIN, M.S.; TALIB, M.Z.M.; DAUD, W.R.W.; YAAKOB, Z; **DRYNG OF PALM FROND PARTICLES IN A FLUIDIZED BED DRYER WITH INERT MEDIUM**. Chemichal Industry na Chemical Engineering Quarterly, v.19, n. 4, p. 593-603, 2013.