

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

SECAGEM DE MATERIAIS TÊXTEIS

Chaiane Messa Caneda

São Carlos - SP

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

SECAGEM DE MATERIAIS TÊXTEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Chaiane Messa Caneda
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria do Carmo Ferreira

São Carlos - SP

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C221s Caneda, Chaiane Messa
Secagem de materiais têxteis / Chaiane Messa
Caneda. -- São Carlos : UFSCar, 2016.
115 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de
São Carlos, 2016.

1. Secagem convectiva. 2. Fibras têxteis. 3.
Resistência interfacial. I. Título.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE CHAIANE MESSA CANEDA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 08 DE ABRIL DE 2016.

BANCA EXAMINADORA:



Maria do Carmo Ferreira
Orientadora, UFSCar



Maisa Tonon Bitti Perazzini
UNIFEI



Gustavo Dias Maia
UFSCar

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Henrique e Sirlei, por toda confiança e apoio. Em especial ao meu avô Anacleto, pela insistência em mim e também pela ajuda nos momentos de “aperto”.

A minha orientadora professora Maria do Carmo Ferreira pela oportunidade, ensinamentos, orientação e principalmente pela paciência. Serei grata a tudo que me foi proporcionado.

Ao querido professor José Teixeira Freire pelo carinho e sugestões dadas durante o trabalho.

Ao meu amigo Marcos, que me acolheu nas primeiras semanas de São Carlos.

Aos meus amigos do Centro de Secagem, Marcos, Bira, Aline, Ariany e Robinho por estarem sempre dispostos a ajudar em qualquer situação.

Aos amigos que fiz em São Carlos, pelo carinho e companheirismo durante todo esse tempo, pois é como se fossem minha segunda família.

Aos amigos de Bagé que mesmo pela distancia, se fizeram presentes.

Aos Técnicos, Edilson Milaré, Oscar da Silva pelo apoio prestado.

A CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Os tecidos são originados a partir de fibras têxteis, a quais são divididas em grandes grupos: naturais (como o algodão) e químicas (como o rayon e o poliéster). No beneficiamento dos tecidos, a secagem é uma operação primordial, que contribui para o acabamento final e obtenção de um tecido com maior brilho e também melhor toque. Porém cada tipo de tecido possui características de estrutura e composição diferentes, o que pode influenciar sua capacidade de absorção e retenção de água. O objetivo deste trabalho foi analisar a secagem de tipos de tecidos (poliéster, atalhado e jeans), e avaliar como as características dos materiais e as condições operacionais influenciam no processo. Os ensaios experimentais foram conduzidos em estufa com convecção natural, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e também em secador de túnel com convecção forçada, nas condições de 1,0 e 2,0 m/s e temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Além disso, foram avaliados os ajustes das curvas generalizadas de secagem, às equações empíricas de cinética. Na avaliação da absorção de água em atmosfera saturada a 40 e 60 °C, observou-se que o poliéster é o tecido que menos absorve água, enquanto o jeans apresentou maior capacidade de absorção. Constatou-se também que a absorção aumenta com o aumento da temperatura, para os três tipos de tecidos. Ao analisar a influência das condições operacionais na secagem dos tecidos, a velocidade do ar foi a variável que apresentou maior influência na redução de umidade, indicando que a resistência superficial foi o mecanismo limitante na secagem. O modelo de Page (1949), foi o mais apropriado para representar as curvas de cinéticas generalizadas para os tecidos avaliados. A análise comparativa entre os tecidos mostrou que, apesar das diferenças significativas no tipo de fibra e estrutura do tecido, estas características não influenciaram a secagem do material, indicando que, na secagem de materiais com elevada área superficial, o processo é controlado pelas condições de escoamento.

ABSTRACT

The fabrics are derived from fibers, which are divided into two main groups: natural (like cotton) and chemical (such as rayon and polyester). In the processing of the fabric, drying is a major operation, contributing to the finishing and obtaining a fabric with greater brightness and also better touch. However, each tissue has a different structure and different composition which can influence its absorption capacity and retention of water. The aim of this study is to analyze the drying of 3 types of fabrics (polyester, toweling and jeans), and evaluate how the material characteristics and operating conditions influence the process. Experimental tests were conducted in oven with natural convection, with natural convection, at temperatures of 50, 60 and 70 ° C and also in a tunnel dryer with forced convection under the conditions of 1.0 and 2.0 m / s at the temperatures of 50, 60 and 70 ° C. Besides that, the adjustments of generalized curves of drying were evaluated, there are empirical equations of kinetics. In the evaluation of water absorption in saturated atmosphere at 40 to 60 ° C, it was observed that the polyester is the fabric that absorbs less water while the jeans had greater absorption capacity. It was also found that absorption increases with increasing temperature for all three fabrics. By analyzing the influence of operating conditions on the drying fabrics, the air speed was the variable that most influenced the moisture reduction, indicating that surface resistance was the limiting mechanism in drying. Page model (1949), was the most appropriate to represent the generalized kinetic curves for the fabrics evaluated. The comparative analysis of the fabrics showed that, although significant differences in the type of fiber and fabric structure, these characteristics do not influence the drying of the material, indicating that the drying of materials with high surface area, the process is controlled by the conditions flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1- Tipos de fibras e suas matérias-primas.....	20
Figura 2. 2- Morfologia do algodão.	23
Figura 2. 3- Estrutura de um tecido plano.	24
Figura 2. 4- Esboço dos fios de trama (a) e urdume (b) no tecido de malha.....	24
Figura 2. 5- Fluxograma do beneficiamento dos tecidos têxteis.	25
Figura 2. 6- Forma de atuação das microcápsulas.....	26
Figura 2. 7- Desenvolvimento da camada limite de velocidade (a), térmica (b) e de concentração (c) sobre uma superfície plana.....	28
Figura 2. 8- Curva típica da cinética de secagem (a) e taxa de secagem em função da umidade (b).....	30
Figura 2. 9- Formas características das isotermas de sorção.....	34
Figura 2. 10- Histerese das isotermas de sorção.....	35
Figura 2. 11- Isotermas de algumas fibras naturais e sintéticas.	37
Figura 3. 1- Amostras de tecido: (a) poliéster, (b) algodão do tipo atoalhado e (c) jeans.	39
Figura 3. 2- Estufa sem circulação forçada de ar, marca Tecnal, modelo TE-394/1. ...	40
Figura 3. 3- Secador de túnel com convecção forçada.	41
Figura 3. 4- Esboço de uma amostra de tecido jeans.	43
Figura 3. 5- Localização dos termopares para a verificação da uniformidade da temperatura do ar na entrada do secador.	44
Figura 3. 6- Esquema do posicionamento da distribuição dos termopares na amostra.	44
Figura 3. 7- Esquema do aparato experimental utilizado na obtenção de isotermas.....	45
Figura 3. 8- Umidificador.....	47
Figura 4. 1- Imagens das superfícies dos tecidos: (a) algodão-atoalhado; (b) algodão-jeans e (c) poliéster.	51
Figura 4. 2- Imagens das fibras de poliéster obtidas pelo MEV, com ampliação de: (a) 24X – 1 mm, (b) 54X - 500 μ m, (c) 500X – 50 μ m e (d) 5000X – 5 μ m.	53
Figura 4. 3- Imagens das fibras do tecido de algodão do tipo atoalhado obtidas pelo MEV, com ampliação de: (a) 27X – 1 mm, (b) 100X - 200 μ m, (c) 500X – 50 μ m e (d) 5000X – 5 μ m.....	53

Figura 4. 4- Imagens das fibras do tecido de algodão do tipo jeans obtidas pelo MEV, com ampliação de: (a) 24X – 1 mm, (b) 100X – 200 μm , (c) 500X – 50 μm e (4) 5000X – 5 μm	54
Figura 4. 5- Isotermas de dessorção para os tecidos de algodão.....	55
Figura 4. 6- Isoterma do tecido atoalhado ajustados no modelo de GAB (a) e Oswin (b) na temperatura de 30 $^{\circ}\text{C}$	58
Figura 4. 7- Isoterma do tecido jeans ajustados no modelo de GAB (a) e Oswin (b) na temperatura de 30 $^{\circ}\text{C}$	59
Figura 4. 8- Cinética de absorção nas temperaturas 40 e 60 $^{\circ}\text{C}$ para o tecido de poliéster.	60
Figura 4. 9- Cinética de absorção nas temperaturas 40 e 60 $^{\circ}\text{C}$ para o tecido atoalhado.	61
Figura 4. 10- Cinética de absorção nas temperaturas 40 e 60 $^{\circ}\text{C}$ para o tecido jeans... ..	62
Figura 4. 11- Umidade adimensional em função do tempo (ensaio e repetição) para os ensaios em estufa (a) e valores médios e desvios (b) na temperatura de 50 $^{\circ}\text{C}$ para o tecido de poliéster.....	64
Figura 4. 12- Curvas de umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em estufa para o tecido de poliéster.	65
Figura 4. 13- Taxa de secagem em função da umidade em base seca nas temperaturas avaliadas para o tecido de poliéster.	66
Figura 4. 14- Curvas de umidade adimensional em função do tempo (ensaio e repetição), realizados em estufa a temperatura de 60 $^{\circ}\text{C}$ e média dos ensaios cinéticos (b) para o tecido atoalhado.	67
Figura 4. 15- Curvas de umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em estufa para o tecido atoalhado.	68
Figura 4. 16- Taxa de secagem em função da umidade em base seca nas temperaturas avaliadas.	69
Figura 4. 17- Ilustração da metodologia utilizada para determinação da umidade crítica.	71
Figura 4. 18- Curva de umidade adimensional em função do tempo (a) e taxa de secagem em função da umidade em base seca (b) para o tecido de poliéster.	73

Figura 4. 19- Curvas de umidade adimensional em função do tempo (ensaio e repetição) na temperatura de 50 °C (a) e média dos ensaios (b) para o tecido de poliéster.	74
Figura 4. 20- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem parametrizada na velocidade para o tecido de poliéster, nas temperaturas de 60 (a) e 70 °C (b).	75
Figura 4. 21- Taxa de secagem em função da umidade em base seca nas velocidades avaliada.	77
Figura 4. 22- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem, parametrizadas na temperatura para o tecido de poliéster, nas velocidades de 1,0 (a) e 2,0 m/s (b).	78
Figura 4. 23- Curva de temperatura em função do tempo de secagem do poliéster na condição de 50 °C e velocidade de 2m/s (a) e taxa de secagem em função da umidade na mesma condição (b).	79
Figura 4. 24- Curvas generalizadas para o tecido de poliéster.	83
Figura 4. 25- Ajuste da curva generalizada de secagem pela equação de Page (1949): (a) função exponencial e (b) linear para o tecido de poliéster.	85
Figura 4. 26-- Umidade adimensional em função do tempo (ensaio e repetição) a 50 °C e 1,0 m/s (a); valores médios e desvios (b) para o tecido atoalhado.	86
Figura 4. 27- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem parametrizadas na velocidade, para o tecido de atoalhado nas temperaturas de 60 (a) e 70 °C (b).	87
Figura 4. 28- Taxa de secagem em função da umidade em base seca nas velocidades avaliadas.	88
Figura 4. 29- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem, parametrizadas na temperatura para o tecido atoalhado, nas velocidades de 1,0 (a) e 2,0 m/s (b).	89
Figura 4. 30- Curva de temperatura em função do tempo de secagem (a) na condição de 60 °C e velocidade de 1,0 m/s e taxa de secagem em função da umidade em base seca parametrizada na temperatura (a) para o tecido de algodão do tipo atoalhado.	90
Figura 4. 31- Curva generalizada do tecido de algodão do tipo atoalhado.	93
Figura 4. 32- Valores experimentais e ajustados pela equação de Page para o tecido atoalhado.	95

Figura 4. 33- Umidade adimensional em função do tempo (ensaio e repetição) a 70 °C e 1,0 m/s (a); e valores médios (b) para a secagem de tecido de algodão do tipo jeans. 95	
Figura 4. 34- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem parametrizadas na velocidade para o tecido jeans, nas temperaturas de 50 (a) e 70 °C (b).	97
Figura 4. 35- Taxa de secagem em função da umidade em base seca nas velocidades avaliada na temperatura de 50 e 70 °C para o tecido jeans.	98
Figura 4. 36- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem, parametrizadas na temperatura para o tecido de algodão do tipo jeans, nas velocidades de 1,0 (a) e 2,0 m/s (b).....	99
Figura 4. 37- Curva generalizada para o tecido jeans.	101
Figura 4. 38- Valores experimentais e ajustados pela equação de Page para o tecido jeans.....	103
Figura 4. 39- Curva generalizada dos três tipos de tecidos.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1- Características físicas e químicas.	21
Tabela 2. 2- Modelos matemáticos aplicados às curvas de secagem.	32
Tabela 2. 3- Modelos matemáticos para o ajuste de isotermas.	36
Tabela 3. 1- Valores de atividade de água para as concentrações de sais na temperatura de 30 °C.	46
Tabela 4. 1- Resultados da análise da gramatura média (g/m ²).	50
Tabela 4. 2- Espessura das amostras e razão entre comprimento e espessura para os três tipos de tecido.	52
Tabela 4. 3- Parâmetros de ajustes e coeficiente de determinação das isotermas do tecido atoalhado e jeans.	56
Tabela 4. 4- Absorção de água (%) das fibras de poliéster, atoalhado e jeans.	63
Tabela 4. 5- Razões entre a massa de água e a massa do tecido seco no instante inicial do processo.	70
Tabela 4. 6- Valores de umidade crítica determinadas através das curvas de Krischer.	71
Tabela 4. 7- Verificação da distribuição de temperatura antes do início do procedimento de secagem na temperatura de 50 °C na velocidade de 2,0 m/s.	72
Tabela 4. 8- Valores de umidade crítica estimadas para o tecido de poliéster.	81
Tabela 4. 9- Taxas de transferência de massa experimentais e estimadas para o período de secagem à taxa constante no tecido de poliéster.	82
Tabela 4. 10- Parâmetros ajustados e critérios estatísticos obtidos no ajuste de equações empíricas para o tecido de poliéster.	84
Tabela 4. 11- Valores de umidade crítica determinadas através das curvas de Krischer para o tecido atoalhado.	91
Tabela 4. 12- Taxas de transferência de massa experimentais e estimadas para o período de secagem à taxa constante no tecido atoalhado.	92
Tabela 4. 13- Parâmetros ajustados e critérios estatísticos obtidos no ajuste de equações empíricas para o tecido atoalhado.	94
Tabela 4. 14- Valores de umidade crítica determinadas através das curvas de Krischer para o tecido jeans.	100
Tabela 4. 15- Taxas de transferência de massa experimentais e estimadas para o período de secagem à taxa constante no tecido jeans.	101

Tabela 4. 16- Parâmetros ajustados e critérios estatísticos obtidos no ajuste de equações empíricas para o tecido jeans.....	102
Tabela 4. 17- Síntese dos resultados para os 3 tecidos.....	105

NOMENCLATURA

a, b, c, n, ct	constantes	[-]
A_s	área de superfície de troca térmica	[L]
a_w	atividade de água	[-]
C1, C2	constantes no escoamento laminar	[-]
E	espessura da amostra	[L]
\dot{E}	energia consumida no processo	[θ]
k	constante de secagem	[T ⁻¹]
k_m	coeficiente convectivo de transferência de massa	[L T ⁻¹]
L	comprimento dos fios	[L]
$m_{\text{água}}$	massa de água na amostra	[M]
$m_{\text{tecido úmido}}$	massa da amostra do tecido úmido	[M]
$m_{\text{tecido seco}}$	massa da amostra de tecido seco	[M]
$m_{\text{eq.}}$	massa da amostra no equilíbrio	[M]
m_{ss}	massa de sólido seco	[M]
MR	razão de umidade adimensional	[-]
N	taxa de secagem	[T ⁻¹]
n	número de camadas moleculares	[-]
NA	taxa de secagem experimental	[M T ⁻¹]
NA'	taxa de secagem estimada	[M T ⁻¹]
N_c	taxa constante	[T ⁻¹]
\dot{P}_{ot}	potencia consumida no processo	[θ T ⁻¹]
P_{sat}	pressão de saturação da água pura	[M L ⁻¹ T ⁻²]
P_w	pressão parcial de vapor em equilíbrio	[M L ⁻¹ T ⁻²]
R	constante dos gases ideais	[M L ²]
T	temperatura	[θ]
t	tempo	[T]
tad	tempo adimensional	[-]
t_{N_c}	tempo total do período de taxa	[T]

	constante	
t_{total}	tempo total da secagem	[T]
U	umidade dos tecidos em base úmida	[M M ⁻¹]
$U_{i\text{ média}}$	umidade inicial média das amostras no início da secagem	[M M ⁻¹]
UR	umidade relativa	[-]
X_{cr}	umidade crítica	[M M ⁻¹]
X_{eq}	umidade de equilíbrio	[M M ⁻¹]
X_m	umidade da monocamada do material	[M M ⁻¹]
X_o	umidade inicial	[M M ⁻¹]
Y	umidade adimensional	[-]

SÍMBOLOS GREGOS

ρ_A	massa específica da espécie A	[M L ³]
$\rho_{A,s}$	massa específica da espécie A na superfície	[M L ³]
ν	viscosidade cinemática	[L ² T ⁻¹]

NÚMEROS ADIMENSIONAIS

Nu	número de Nusselt	[-]
Re	número de Reynolds	[-]
Sc	número de Schimeted	[-]

SIGLAS

BET	Brunauer, Emmett e Teller
GAB	Guggenheim- Anderson- de Boer

b.u

base úmida

b.s

base seca

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	x
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Aspectos gerais de materiais têxteis	19
2.2 Inovações tecnológicas na fabricação de têxteis.....	26
2.3 Generalidades sobre secagem	27
2.4 Cinética de Secagem	29
2.5 Secagem de materiais têxteis	32
2.6 Isotermas de sorção.....	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 Amostras	39
3.2 Estufa convencional	40
3.3 Secador de túnel de convecção forçada	41
3.4 Caracterização do material.....	42
3.4.1 Gramatura (g/m^2).....	42
3.4.2 Espessura.....	43
3.4.3 Medidas de temperatura	43
3.4.5 Isotermas de sorção	45
3.4.6 Cinética de absorção.....	46
3.5 Análise e tratamento dos dados	47
3.5.1 Obtenção das taxas de secagem no período de secagem à taxa constante	47
3.5.2 Curvas generalizadas de secagem	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Caracterização dos tecidos.....	50
4.1.1 Gramatura (g/m^2).....	50
4.1.2 Espessura dos tecidos	52
4.1.3 Análise das fibras têxteis por microscopia eletrônica de varredura	52
4.1.4 Isotermas de sorção dos tecidos	55
(b)	59

4.1.5 Cinética de absorção.....	59
4.2 Secagem	63
4.2.1 Secagem em estufa de convecção natural	63
4.2.2 Secagem em túnel de convecção forçada	72
4.2.3 Análise comparativa da secagem dos tecidos	103
5 CONCLUSÕES	107
6 SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO	109
7 REFERÊNCIAS	110

1 INTRODUÇÃO

As indústrias têxteis e de vestuário constituem juntas, a quarta maior atividade econômica mundial (LEAL, 2002). É um dos setores de imensa importância na economia global de hoje e emprega intensiva mão-de-obra a baixo custo.

Para o desenvolvimento dos artigos têxteis, a matéria-prima essencial é a fibra. No mercado mundial de fibras têxteis, as fibras são divididas em dois grandes grupos: as fibras naturais e as fibras químicas, que são as produzidas pelo homem a partir de matérias-primas artificiais ou sintéticas. Um exemplo de fibra artificial é o rayon, o poliéster é uma fibra sintética, enquanto o algodão é um exemplo de fibra natural.

O poliéster é uma das fibras mais consumidas no setor têxtil, e também uma das mais baratas. Esse tipo de fibra, além de apresentar elevada resistência à tração e aos agentes químicos, é fortemente hidrofóbica, diferentemente das fibras naturais, que têm facilidade em absorver água. O algodão, por sua vez, é composto por celulose, formando longas cadeias de moléculas unidas pelo grupo hidroxilas. Essas cadeias são dispostas paralelamente na fibra, dando às fibras de algodão resistência e estabilidade (NUNES, SILVA e NUNES FILHO, 1999).

Os tecidos são formados a partir de um processo de entrelaçamento dos fios, conhecido como tecelagem. Depois da tecelagem, eles passam por um processo de beneficiamento, que inclui diversas operações que visam dar acabamento ao tecido, eliminando impurezas e melhorando suas características visuais e de toque. A secagem é uma operação presente na etapa de beneficiamento, sendo uma operação de alto consumo energético na indústria.

Os tecidos se caracterizam por serem materiais porosos com formato plano, espessura muito fina e área superficial muito grande em relação ao seu volume, que tende a zero. A água nesse tipo de material pode estar contida no interior das fibras (na forma quimicamente ligada ou como água livre) e também nos interstícios formados pelo entrelaçamento das mesmas.

A secagem pode ser feita pela exposição do tecido a uma corrente de ar aquecido. Nesta condição, estarão presentes diferentes mecanismos de transferência de calor e massa: o calor é transferido por convecção a partir da corrente de ar para a superfície do sólido e por condução no interior do material. A umidade, por sua vez, é transferida do interior do sólido para a superfície do tecido e removida por convecção

para a corrente de ar. Tanto as características da fibra, como a estrutura do tecido influenciam a forma como a água é retirada.

O objetivo deste trabalho foi analisar a secagem convectiva de tecidos compostos por fibras naturais (atoalhado e jeans) e sintéticas (poliéster) visando avaliar como as características dos materiais e as condições de operação influenciam o processo. Para cumprir estes objetivos, os tecidos foram caracterizados e feitos ensaios de secagem em estufa de convecção natural, variando-se a temperatura entre 50 e 70 °C e em estufa de convecção forçada, variando a velocidade do ar (1,0 e 2,0 m/s) e a temperatura (entre 50 e 70°C).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais de materiais têxteis

Tecido é um produto manufaturado em forma de lâmina flexível, resultante do entrelaçamento, de forma ordenada ou desordenada, de fios e fibras têxteis entre si, mantendo assim, uma estrutura dimensional (RIBEIRO, 1984). Os fios são materiais constituídos por fibras naturais ou químicas, que apresentam comprimento grande, formado mediante as diversas operações de fiação. Eles se caracterizam por sua regularidade, diâmetro e peso, sendo que essas duas últimas características determinam o título do fio.

No desenvolvimento da maioria dos artigos têxteis, a fibra é a principal matéria-prima utilizada. As fibras têxteis podem ser divididas em dois grandes grupos denominadas fibras naturais (como o algodão e linho) e químicas (rayon e poliéster), em que cada grupo possui subdivisões, conforme mostra a Figura 2.1.

As fibras naturais podem ser originadas de matérias-primas vegetais ou animais. As fibras artificiais são obtidas através do processamento de um polímero natural, em que como exemplos temos: fibras originadas da celulose, como a viscose (que é a celulose regenerada) e o cupramônio (um derivado da celulose). Já as fibras sintéticas são fibras não celulósicas originadas da petroquímica, que apresentam elevada resistência à umidade e aos agentes químicos (ácidos e álcalis), e também à tração. Por exemplo, os tecidos de poliéster, por serem formados por fibras sintéticas, apresentam algumas vantagens em relação aos tecidos de fibras naturais, como maior durabilidade, retenção de cor e resistência a rugosidades. Na produção desse material (etapa de beneficiamento) a policondensação do ácido tereftálico ou de um de seus éteres com glicol etilênico é realizada a vácuo em alta temperatura. Na etapa de fiação, os filamentos ocorrem por extrusão do polímero no estado fundido (VICUNHA, 2016).

Figura 2. 1- Tipos de fibras e suas matérias-primas.



Fonte: Messa, (2013) apud Pezzolo, (2007).

Na Tabela 2.1, de acordo com a NBR 08428 (1984), são mostradas as características físicas e químicas de um tecido de fibra sintética a base de polietileno tereftalato, em condições normais de temperatura, pressão e umidade relativa do ar.

Tabela 2. 1- Características físicas e químicas.

Características	Condições e valores
Base química	Polietileno tereftalato
Peso específico	1,38 g/cm ³
Tenacidade (resistência à tração)	2,4 – 4,5 cN/dtex (a seco ou molhado)
Alongamento	15 – 40 %
Elasticidade após alongar 1 %	98 % (perda da elasticidade com temperaturas acima de 230 °C)
Absorção de umidade	0,4 %
Comportamento a chama	queima lentamente com o odor aromático
Ponto de fusão	258 °C
Resistência ao calor	amolece entre 220° a 240°C
Resistência á luz solar	muito elevada
Resistência ao mofo	resistente, dentro de seu equilíbrio de umidade.
Resistência à tração	Resistente
Resistência ao álcali	resiste moderadamente a álcalis fortes à temperatura ambiente. Boa resistência a álcalis fracos.

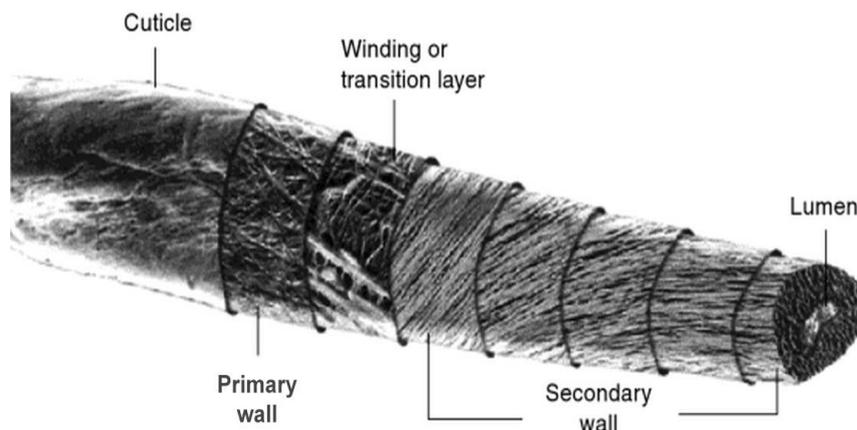
Ação do suor	nenhum efeito sobre a resistência
Ação dos ácidos	boa resistência aos ácidos concentrados frios e aos ácidos diluídos.
Ação dos solventes orgânicos	solúvel em nitrobenzol, metacrezol e fenol. Insolúvel na maioria dos álcalis, em benzeno, dioxano, dimetilformamida. Insolúvel nos solventes empregados na lavagem a seco
Ação dos oxidantes e redutores	boa resistência
Tingibilidade	corantes dispersos

Fonte: Vicunha Têxtil S.A. (2016).

Ao contrário dos tecidos sintéticos, as fibras naturais têm grandes vantagens em termos de absorção de umidade e condução de eletricidade estática, porém requerem cuidados com o controle da temperatura no processo de secagem, pois além de acarretar danos ao tecido, se realizado incorretamente o processo pode provocar o desenvolvimento de microrganismos nas fibras (ALBUQUERQUE, 2011).

Quimicamente o algodão é constituído de celulose pura, contendo pequena percentagem de impurezas que incluem ceras naturais, pectina e compostos de azoto. Estas impurezas são removidas por lavagem e branqueamento antes da tinturaria e do acabamento. A composição dessas fibras é de celulose pura, as quais aparecem em longas cadeias de moléculas unidas pelo grupo OH. Estas cadeias são dispostas paralelamente na fibra, formando uma espiral, conferindo às fibras de algodão grande resistência à tração e estabilidade dimensional (NUNES, SILVA e NUNES FILHO, 1999). Na Figura 2.2 é mostrada a estrutura da fibra de algodão, na forma macroscópica, constituída por tubos de filamentos achatados que sofrem inúmeras torções.

Figura 2. 2- Morfologia do algodão.

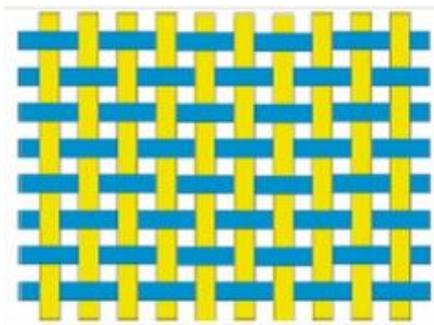


Fonte: Asian Textile Studies, (2016).

As fibras são limpas e passam por máquinas de estiramento e torção para então serem fiadas e transformadas em fio. Na sequência, a matéria-prima é tecida, transformando-se em um tecido de aspecto cru. Em seguida o beneficiamento têxtil é iniciado e o tecido é preparado para o tingimento e outros acabamentos. Para dar origem a um tecido do tipo atalhado felpudo, são realizadas as mesmas etapas descritas anteriormente, porém com uma diferença: a adição de malha felpuda é feita em máquinas circulares. Essas felpas são produzidas de algodão puro, porém dependendo do tipo de tecido que se quer obter, a base de fixação destas pode conter fios de poliéster ou poliamida (náilon), ambos texturizados. Segundo Karahan (2007), os tecidos felpudos têm propriedades de absorção de água superiores em relação a outros tipos de tecidos, pois em sua utilização final é exigida essa característica. A capacidade de absorção de água de um tecido felpudo é dependente do tipo de fibra, do tipo de fio e da construção do tecido.

A classificação dos tecidos difere no método pelo qual ele é estruturado, onde são divididos em tecidos planos, malhas, rendas e os não-tecidos. Os classificados como tecidos planos (Figura 2.3) são compostos por uma estrutura típica de entrelaçamento de vários fios de urdume e um único fio de trama, sendo que os fios de urdume determinam o tipo de tecido.

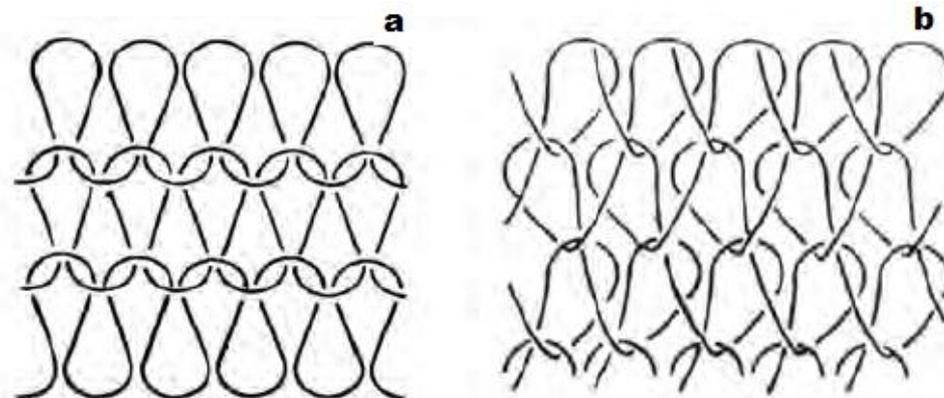
Figura 2. 3- Estrutura de um tecido plano.



Fonte: CSERI, (2015).

Os tecidos de malha que podem ser feitos por um só fio (como exemplo o tricô, onde o fio corre horizontalmente) ou por vários fios, um por agulha (meia malha, em que o fio corre longitudinalmente, assumindo a forma de laçadas, de formas curvas, que se sustentam entre si), como pode ser visto na Figura 2.4. As laçadas desse tipo de tecido são livres para se movimentar quando submetidas a alguma tensão, tornando o tecido de malha capaz de se adaptar a diversos tipos de formas, retornando à sua forma original ao fim da tensão (PEZZOLO, 2007).

Figura 2. 4- Esboço dos fios de trama (a) e urdume (b) no tecido de malha.

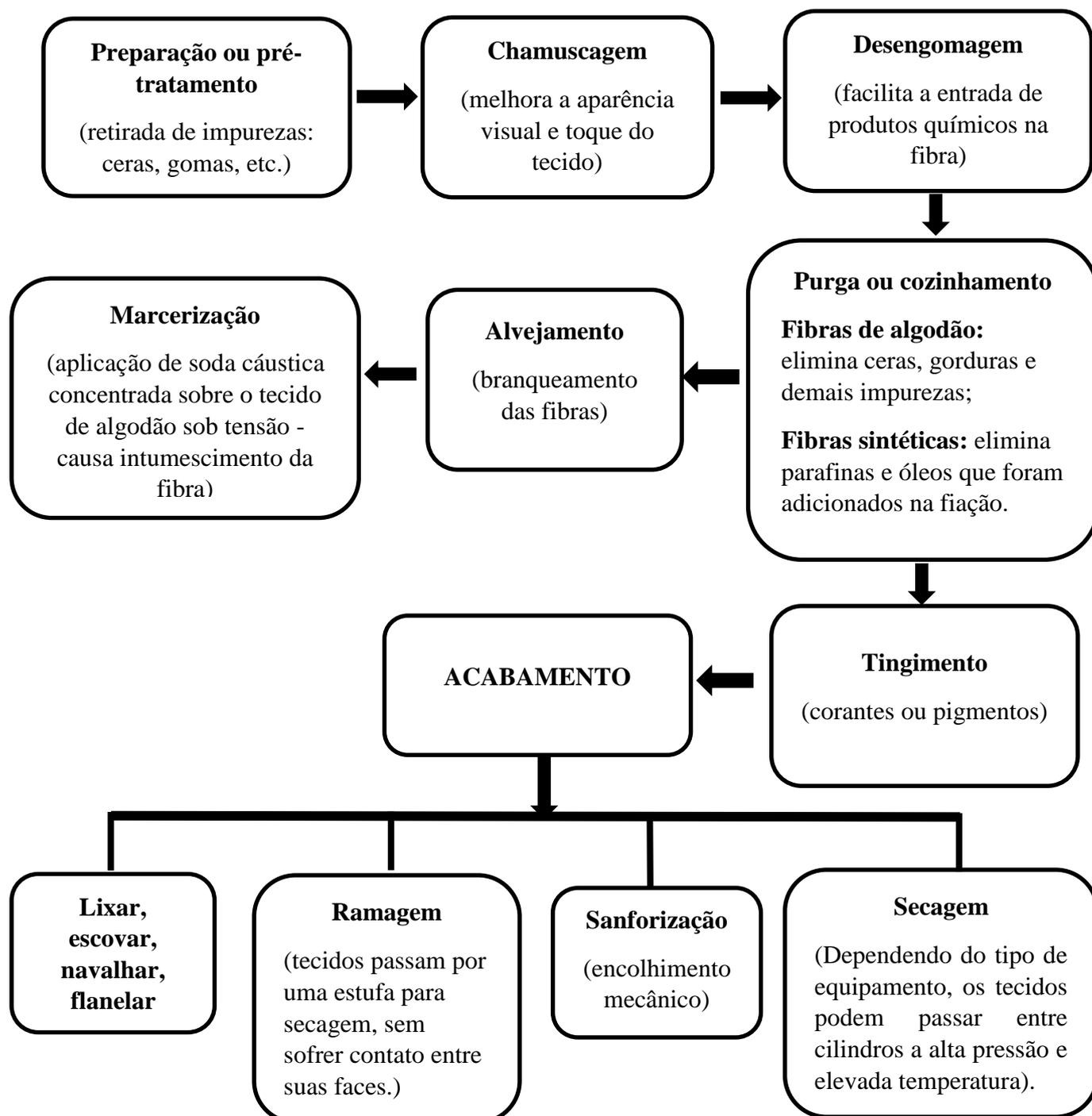


Fonte: Cartilha ABIT, (2013).

Nos tecidos de renda, a estrutura forma nós nos pontos em os fios se interceptam, formando uma teia. Já os não-tecidos, de acordo com a NBR-13370, são formados por uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) e combinações destes.

Um fluxograma representando um processo típico de beneficiamento de tecidos, ou seja, todos os processos que o tecido é submetido após o tear, com a finalidade de melhorar as características visuais e de toque. Na Figura 2.5 é apresentado o fluxograma dessas etapas.

Figura 2. 5- Fluxograma do beneficiamento dos tecidos têxteis.



Fonte: Fremplast, (2016).

2.2 Inovações tecnológicas na fabricação de têxteis

Atualmente as indústrias têxteis vêm buscando tecnologias para melhorar as características dos produtos têxteis, possibilitando o desenvolvimento de produtos diferenciados tecnologicamente. Dentro dessas melhorias estão os tecidos tecnológicos ou tecidos inteligentes, que possuem alta qualidade, durabilidade e conforto. Do mesmo modo que um tecido comum é elaborado, os tecidos tecnológicos são produzidos com as mesmas etapas e com qualquer tipo de trama, a diferença está nos componentes e acabamentos utilizados nos fios ou no tecido.

As fibras inteligentes que compõem os tecidos inteligentes, podem apresentar o comportamento que as caracteriza devido à incorporação em seu interior de "microcápsulas ou zeólitas". As zeólitas são compostos inorgânicos derivados do silício e em seu interior são introduzidos os compostos ativos sensíveis às variações da luz, temperatura etc., onde esses compostos são inseridos no interior das fibras (SÁNCHEZ, 2006). A inserção das zeólitas nas fibras é feita mediante algumas etapas: polimerização, emulsão juntamente com dissolução ou fusão do polímero, dependendo do tipo de fiação, ficando as microcápsulas retidas na fibra durante a coagulação e mediante extrusão de gotas por difusores incorporados à fiadeira (BONET, 2003). A liberação do princípio ativo presente nas zeólitas sobre a pele é feita mediante a fricção ou pela deformação do tecido durante seu uso. Na Figura 2.6 é mostrada como atuam as microcápsulas.

Figura 2. 6- Forma de atuação das microcápsulas.



Fonte: Sánchez, (2006).

Entre as diversas características inovadoras desse tipo de tecido, há desde peças que protegem dos raios UV até as que ajudam a tratar a celulite (BALEN E TISSIAN, 2011). Inicialmente, os tecidos tecnológicos foram desenvolvidos para as roupas esportivas ou para as usadas em climas rigorosos, no entanto, atualmente, são empregados no vestuário de moda e nos uniformes (UDALE, 2009).

No desenvolvimento dessas fibras de alta tecnologia é apresentada a fibra *life dry*, que de acordo com Falcon têxtil, (2015) foi desenvolvida para transportar o suor do corpo para a camada mais externa, facilitando a rápida evaporação da umidade o que proporciona um melhor desempenho no treino, no caso de atletas.

Segundo Pitta, (2008) apud Balen e Tissian (2011), outra opção de tecido tecnológico é a fibra de bambu, onde serve como um antibiótico natural e possuem boa higroscopicidade e permeabilidade. Os tecidos originados, são suaves, moles e anti- raios ultravioletas. Também ajudam a repelir insetos, ácaros (efeitos do bambu).

2.3 Generalidades sobre secagem

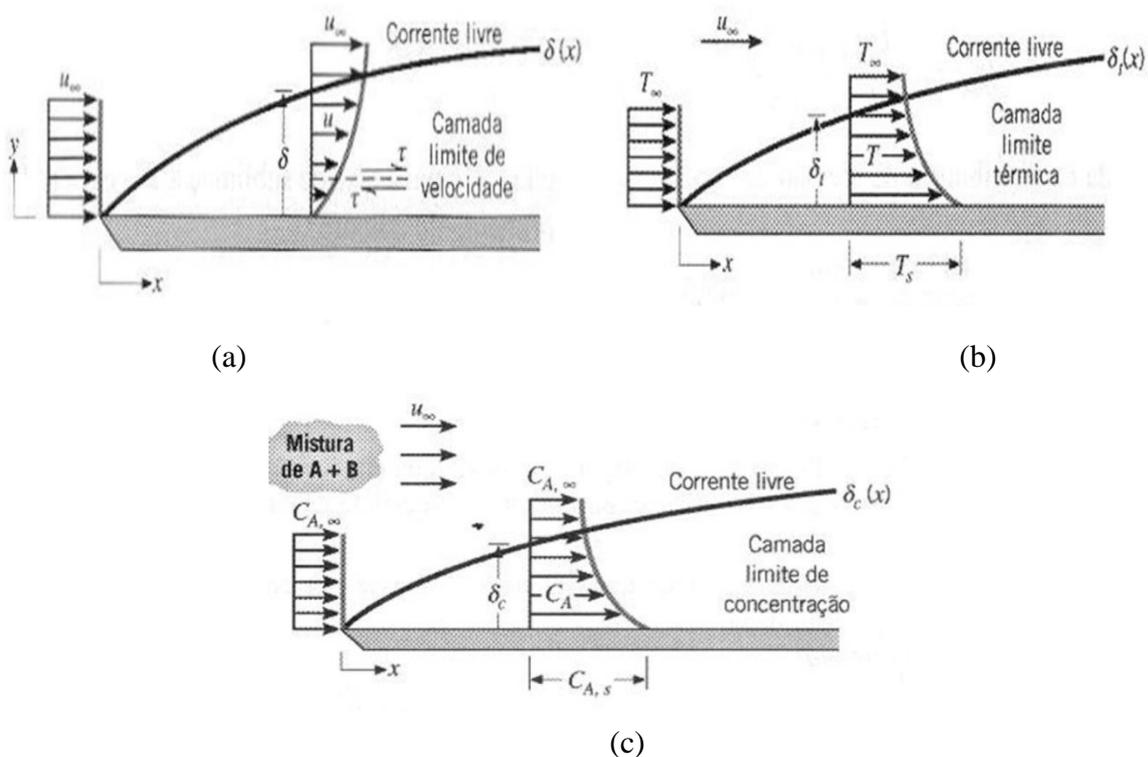
Segundo Keey (1992), a secagem é definida como a remoção de uma substância volátil (a umidade) usando calor, a partir de uma mistura, fornecendo um produto sólido. Para que a secagem ocorra, o material úmido deve receber calor de suas vizinhanças, a umidade no interior do sólido evapora e é transferida para uma fase gasosa. Por exemplo, 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 torna-se progressivamente mais úmido. A temperatura e a concentração de vapor de umidade na superfície do sólido são fatores que influenciam a taxa de secagem.

Quando a secagem envolve um sólido poroso, a remoção de umidade do interior do sólido para a superfície pode ocorrer por diferentes mecanismos, dependendo do tamanho dos poros e estrutura interna do material. Entre os mecanismos possíveis, 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. Quando estes mecanismos são limitantes na remoção de umidade, o processo pode ser descrito com base em uma equação baseada na equação de Fick da difusão ordinária, definindo-se uma difusividade efetiva de umidade no sólido para incorporar os diferentes mecanismos

físicos envolvidos. Estes mecanismos de transporte de umidade são relevantes na secagem de sólidos porosos granulares, como sementes ou grãos, nos quais a resistência interna ao transporte de umidade é significativa. Em sólidos porosos com geometria plana e elevada área superficial em relação ao volume, como é o caso dos tecidos, a resistência interna ao transporte de umidade tende a ser pouco significativa, em razão da pequena espessura e elevada área disponível para a transferência. A maior parte da umidade presente nestes materiais encontra-se na forma de água livre e próxima à superfície do material. Nestas condições, o processo passa a ser controlado pela resistência externa na superfície do sólido, em que as condições das camadas-limite são determinantes para as taxas de secagem.

No escoamento externo de um fluido sobre uma superfície plana, as camadas-limite de velocidade, térmica e de concentração desenvolvem-se livremente, sem restrições impostas por superfícies adjacentes. A Figura 2.7, ilustra o desenvolvimento das camadas limite de velocidade, térmica e de concentração, considerando o escoamento sobre uma superfície plana.

Figura 2. 7- Desenvolvimento da camada limite de velocidade (a), térmica (b) e de concentração (c) sobre uma superfície plana.



Fonte: Incropera et al., (2005).

No interior das camadas-limite concentram-se as resistências superficiais para o transporte de calor e massa no processo de secagem. No interior destas, os perfis de velocidade, temperatura e concentração variam localmente em função da posição. Os conceitos associados ao desenvolvimento das camadas-limite são bem conhecidos e apresentados em detalhes em diversos livros didáticos, como um exemplo, INCROPERA et al., 2005, portanto não serão detalhados aqui. No escoamento forçado de um fluido sobre uma superfície, com remoção de água livre (não-ligada à estrutura do material), a taxa de secagem total associada à secagem de um sólido com área superficial A_s , pode ser expressa pela Equação 2.1:

$$NA' = k_m \cdot A_s (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.1)$$

O coeficiente convectivo médio de transferência de massa (k_m) pode ser estimado a partir de soluções exatas ou aproximadas das equações de conservação de massa aplicadas à camada-limite, ou de correlações empíricas. No caso de escoamento sobre superfícies planas, o coeficiente pode ser obtido a partir da Equação 2.2:

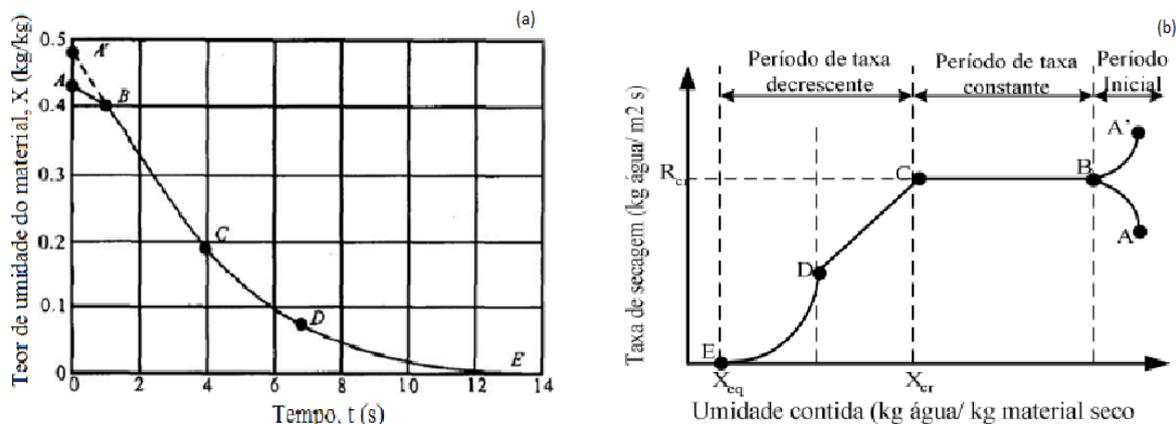
$$Nu = C_1 \cdot Re^{C_2} \cdot Sc^{1/3} \quad (2.2)$$

Esta equação é obtida por analogia com a solução obtida para a camada-limite hidrodinâmica em placas planas, e os valores dos coeficientes C_1 e C_2 dependem do regime de escoamento estabelecido. Para escoamento laminar ($Re < 3 \times 10^5$), os valores são respectivamente, 0,664 e 0,5.

2.4 Cinética de Secagem

O conteúdo de umidade de um material, durante um processo de secagem, apresenta o comportamento mostrado pela curva na Figura 2.8 (a) e a taxa de secagem do material em função do conteúdo de umidade em base seca é mostrada na Figura 2.8 (b) (GEANKOPLIS, 1993).

Figura 2. 8- Curva típica da cinética de secagem (a) e taxa de secagem em função da umidade (b).



Fonte: Geankoplis, (1993).

Nas Figuras 2.8 (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 em período a taxa constante, em que a transferência de massa e de calor é equivalente. 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, há 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.

A cinética de secagem de vários produtos pode ser descrita por equações semi-empíricas ou empíricas. As equações semi-empíricas e empíricas se baseiam na analogia com a Lei de Newton para o resfriamento, aplicada à transferência de massa. Em processos controlados pela resistência interna ao transporte de umidade, é comum o uso da equação obtida a partir da solução da equação da difusão baseada na segunda Lei de Fick (FIORENTIN et al., 2012), que relaciona a umidade média e o tempo, sendo que o parâmetro ajustado é a difusividade efetiva.

Pode-se utilizar uma equação análoga à lei do resfriamento de Newton, que considera apenas a resistência superficial no sólido e assume que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de umidade em um determinado tempo e o teor de umidade de equilíbrio, (GHAZANFARI, et al., 2006 apud FIORENTIN et al., 2012) de acordo com a Equação 2.3:

$$-\frac{dX}{dt} = k (X - X_{eq}) \quad (2.3)$$

O coeficiente k presente na Equação 2.3 representa uma constante de proporcionalidade, denominada constante de secagem. A dependência dessa constante pode estar representada em função apenas da temperatura do ar, através de uma equação do tipo Arrhenius. Entretanto esta equação não possui significado físico, visto que o conceito da energia de ativação não explica nenhum dos fenômenos físicos presentes no processo de secagem (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992 apud COSTA, 2013).

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.4)$$

Há diversas equações empíricas e semi-empíricas, com parâmetros ajustáveis, sendo que nestes parâmetros estão agregadas as resistências às transferências de massa e

calor e as características do material. Alguns exemplos de equações usualmente utilizadas no ajuste de dados de cinética de secagem, são mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2. 2- Equações matemáticas aplicadas às curvas de secagem.

Modelo	Equações
Page (1949)	$MR = \exp(-k \cdot t_{ad}^n)$ (2.5)
Lewis (1921)	$MR = \exp(-k \cdot t_{ad})$ (2.6)
Overhults et al., (1973)	$MR = \exp(-k \cdot t_{ad})^n$ (2.7)

Fonte: Autor, (2016).

As equações de Page (1949) e Overhults et al., (1973) vieram de alterações empíricas da equação de Lewis, que possui um único parâmetro (k). A equação de Lewis (1921) assume que a resistência ao transporte de água está toda na superfície da partícula, e é representado por uma equação semelhante à da Lei de Newton para o resfriamento (TEMPLE & BOXTEL, 1999).

2.5 Secagem de materiais têxteis

A operação de secagem tem aplicação em vários segmentos industriais na preparação de pós, sólidos granulares, alimentos, produtos químicos, têxteis, etc. Dentre os objetivos da secagem, pode-se ressaltar: a preservação do produto; redução de peso e volume do material, facilitando assim o seu transporte.

Na indústria têxtil, após a fabricação do tecido, este é lavado, purgado, tingido e submetido à secagem. Do ponto de vista físico, a secagem de tecidos pode ser definida como uma transferência simultânea de calor, da corrente de ar para a superfície do tecido, e de massa, ocorrendo transporte da umidade da superfície do tecido para a corrente de ar.

Existem poucos trabalhos reportados na literatura sobre a secagem de têxteis, e foram incluídos também nesta revisão alguns trabalhos que abordam a secagem térmica de papel. Eles contribuem com informações úteis para o trabalho desenvolvido, porque possuem características em comum com os tecidos, ou seja, elevada área superficial e pequeno volume.

Sousa et al., (2004), na análise da distribuição da umidade em tecidos de fibras de algodão submetidos à secagem convectiva, verificaram a variação de umidade dos tecidos com a posição em que estes, foram analisados e comparados com a umidade média do tecido. Os ensaios foram realizados na condição de 50 e 70 °C, com velocidade do ar de secagem de 0,5 e 1,5 m/s. Os resultados mostraram que as variações na umidade ao longo do processo ocorreram de maneira uniforme, tanto em relação à posição quanto ao tempo.

Vieira (2006), secou polpa de celulose através da secagem natural e de um secador convectivo desenvolvido, visando obter papel reciclado do tipo cartão. As temperaturas utilizadas na secagem de convecção forçada foram de 70, 80 e 90 °C, com velocidades do ar 0,30, 0,50 e 0,70 m/s. Foi verificado um aumento significativo do tempo de secagem e uma forte dependência do teor de umidade final e das taxas de secagem com a umidade relativa do ambiente na secagem natural. Na secagem com convecção forçada, durante a cinética foi observada a fase inicial à taxa de secagem constante, seguida de um pequeno período de taxa decrescente e o material foi classificado como um material capilar-poroso, com uma grande área superficial de evaporação.

Albuquerque (2011), analisou os fenômenos de transferência de calor e massa na secagem convectiva do tecido tipo jeans, com variação de temperatura de 50 a 110 °C, onde foi verificado que ocorreu uma alteração dimensional nas amostras, causando um aumento no comprimento (urdume) e diminuição na largura (trama). Também foi constatado que não houve variação nas áreas superficiais das amostras de tecido (fato que pode estar relacionado com o tipo de estrutura do material).

2.6 Isotermas de sorção

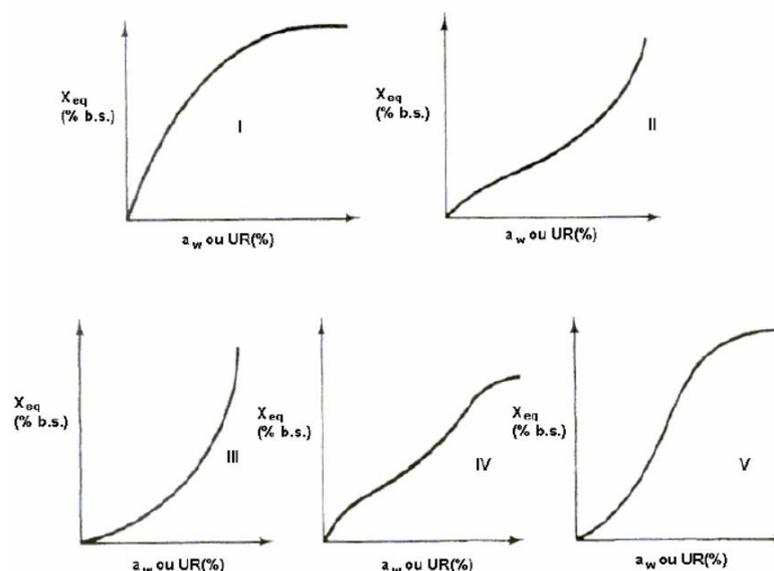
Quando um material é submetido à secagem, tanto seu conteúdo de umidade como a atividade de água se alteram ao longo do processo devido a relação entre a umidade de equilíbrio do produto e a umidade relativa do ar. Portanto, o estudo desses parâmetros é de grande importância para o desenvolvimento de um processo de secagem, haja vista que especifica o teor de umidade que o material pode atingir sob quaisquer condições do ar de secagem. Essa relação entre a umidade do material e a

atividade de água, a_w , a uma determinada temperatura, pode ser determinada mediante a avaliação das isotermas de equilíbrio.

As curvas de sorção ou isotermas são úteis na análise e no controle do processo de secagem, seleção de equipamento adequado para secagem, no material da embalagem e na previsão da estabilidade durante a vida útil de armazenamento e transporte do produto (PAGLARINI et al., 2013). Uma isoterma de adsorção pode ser obtida experimentalmente quando o material seco é exposto à várias atmosferas com diferentes umidades relativas, monitorando-se o ganho de peso devido ao ganho de água. Já a isoterma de dessorção é obtida quando o material úmido é colocado sob as mesmas condições descritas anteriormente, só que ocorre a medição da perda de peso devido à retirada de água.

Existem curvas características das isotermas de sorção que podem ser classificadas em diversos tipos. A classificação foi proposta por Brunauer et al., (1938), como mostra as Figura 2.9.

Figura 2. 9- Formas características das isotermas de sorção



Fonte: Brunauer et al., (1938).

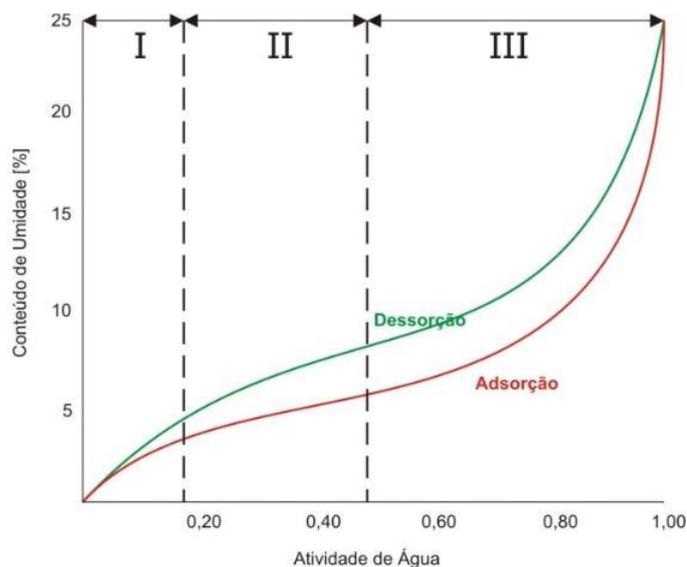
As isotermas do tipo I são do tipo Langmuir, característica de uma adsorção pura em camada. As do tipo II e III são curvas característica de formação de multicamadas de moléculas adsorvidas sobre a superfície do sólido. Frequentemente encontrada em

sólidos não porosos ou com poros maiores do que microporos (BRUNAUER et al., 1938).

Isotermas do tipo IV são obtidas com adsorventes mesoporosos. E por fim, as do tipo V, em que as atrações entre as moléculas adsorvidas são mais fortes que as interações sorbato-superfície (HAM, 2013).

Quando as curvas das isotermas de adsorção e dessorção não coincidem, ocorre o fenômeno denominado histerese, como mostra a Figura 2.10. O fenômeno de histerese pode ser atribuído à pressão capilar, a qual impede que o vapor condensado nos poros das partículas de dessorver à mesma condição de pressão a que ocorre na adsorção (PERAZZINI, 2014).

Figura 2. 10- Histerese das isotermas de sorção.



Fonte: Dias, (2013).

Segundo Dias (2013), a primeira região (I) representa a água presente na monocamada (a_w até 0,2). A segunda região (II, policamada) representa a umidade presente nas diversas camadas, nas quais se encontram dissolvidos diversos solutos (a_w entre 0,2 a 0,7) e a terceira região (III, onde ocorre a condensação seguida da dissolução de materiais solúveis) constitui a água livre retida na estrutura capilar do material. Esta água encontra-se fracamente ligada e é eliminada facilmente na secagem (a_w acima de 0,7).

No equilíbrio, a atividade da água em um sólido é expressa pela Equação 2.8:

$$a_w = \frac{P_w}{P_{sat}(T)} = \frac{UR}{100} \quad (2.8)$$

Para a determinação das isotermas de equilíbrio, são utilizadas duas técnicas experimentais: método gravimétrico (estático) e o método dinâmico. No método estático, o equilíbrio higroscópico entre o produto e o ambiente sob condições controladas é atingido sem movimentação do ar. Já no dinâmico, o material é submetido a fluxos de ar com temperatura e umidade relativa controlada, até atingir o equilíbrio.

Com o intuito de prever o comportamento das isotermas, diversos autores propuseram modelos matemáticos para as isotermas de sorção. Estas equações são úteis no conhecimento das características dos produtos, abaixo são citados alguns dos modelos utilizados.

Tabela 2. 3- Equações matemáticas para o ajuste de isotermas.

Modelo	Equações
Oswin	$X_{eq} = a \left(\frac{a_w}{1-a_w} \right)^b \quad (2.9)$
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1-K \cdot a_w)(1-K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \quad (2.10)$
BET	$X_{eq} = \left[\frac{(X_m \cdot c \cdot e^{b/T \cdot a_w}) \cdot [1 - (n+1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1}]}{(1-a_w) \cdot [1 + (e^{b/T} - 1) \cdot a_w - e^{b/T \cdot a_w^{n+1}}]} \right] \quad (2.11)$

Fonte: Autor, (2016).

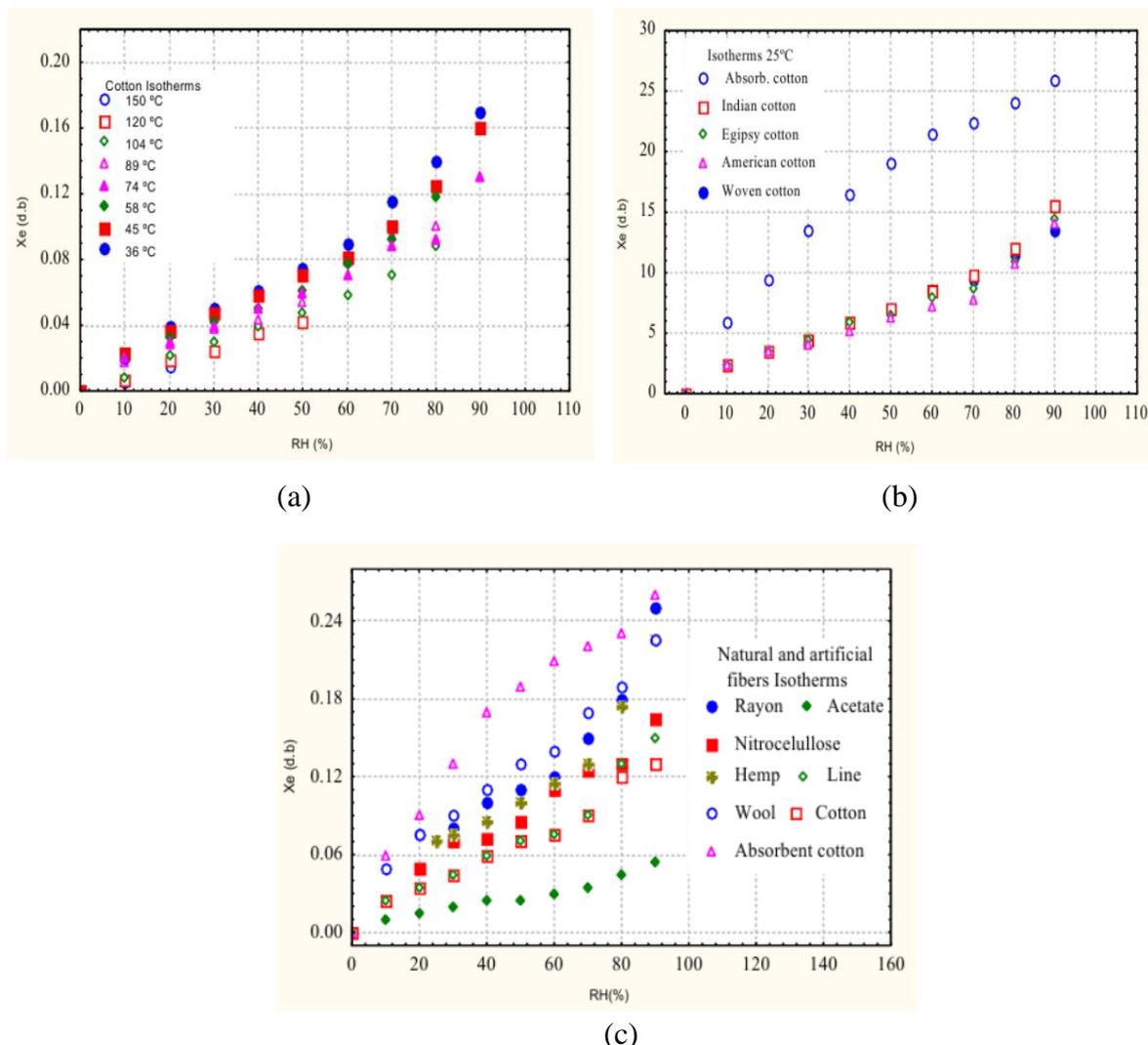
Para Gomes, Figueirêdo e Queiroz (2002), o modelo de Oswin é um dos modelos empíricos bastante utilizado para a predição das isotermas, em que este, é baseado na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal.

O modelo de GAB (Guggenheim–Anderson–de Boer) é utilizado para umidades relativas de até 95 % e também é possível obter valores de umidade e do calor de sorção da monocamada.

O modelo de BET (1938), Equação 2.11, é bastante utilizado para fornecer uma estimativa de umidade na monocamada com valores de atividade de água em torno de 0,6.

Dos poucos trabalhos reportados na literatura sobre dados de equilíbrio de têxteis, Sousa et al., (2001), reporta a determinação das isotermas de equilíbrio de alguns têxteis, que são apresentadas nas Figuras 2.11 (a),(b) e (c).

Figura 2. 11-Isotermas de algumas fibras naturais e sintéticas.



Fonte: Foust et al., (1982).

Na determinação das isotermas das fibras apresentadas nas Figuras 2.11, Foust et al, (1982), verificou que para as isotermas de algodão cru (100% algodão) o conteúdo de umidade de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura. Já para o algodão absorvente, as umidades de equilíbrio são elevadas e o formato das curvas se inverte, possivelmente devido a sua grande capacidade de absorção de umidade.

Na Figura 2.11 (c), que mostra as isotermas das fibras naturais e artificiais, pode-se perceber que as características individuais de cada tecido influenciam as umidades equilíbrio.

Santos et al., (2008) estudaram a cinética de secagem e o comportamento das isotermas de sorção de um tecido composto por poliéster e algodão. Os autores ajustaram os dados experimentais à equações e correlações disponíveis na literatura e avaliados estatisticamente. Na comparação da avaliação das curvas generalizadas da cinética de secagem, a equação que melhor se ajustou aos dados foi a proposta por de Motta Lima et al., (2002.a) e em relação as isotermas, as equações que melhor a caracterizaram foram o de Henderson modificado e Motta Lima (2003.b).

Como pode ser visto, foram apresentados até o momento poucos trabalhos reportados na literatura sobre o assunto, possivelmente se deve á escassez de estudos voltados nessa área (secagem de têxteis), e em virtude disso, tentou-se justificar e mostrar a relevância de tal estudo. Para uma melhor contribuição do assunto, foram reportados também neste estudo, trabalhos sobre a secagem de materiais que apresentam geometria similar aos tecidos, como por exemplo o papel.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas a metodologia utilizada para o desenvolvimento dos procedimentos experimentais, bem como os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios.

A cinética de secagem dos tecidos foi estudada em dois tipos de secadores: um em estufa sem convecção forçada e em um secador convectivo com escoamento de ar paralelo a amostra.

3.1 Amostras

Das amostras utilizadas para os procedimentos, o algodão do tipo jeans possui em sua composição 97 % de algodão e 3 % de elastano, enquanto o atalhado é composto por 100 % algodão. As amostras, tanto as de algodão como as de poliéster (Figura 3.1, 3.2 e 3.3), foram adquiridas no mercado local na cidade de São Carlos-SP. As amostras foram cortadas em pedaços de 8 x 8 cm.

Figura 3. 1- Amostras de tecido: (a) poliéster, (b) algodão do tipo atalhado e (c) jeans.



Fonte: Autor, (2015).

Antes do início do processo de secagem, as amostras foram lavadas (de acordo com a NBR- 8428) com água fervente e mergulhadas em água destilada durante 2 h.

3.2 Estufa convencional

Na Figura 3.2, é mostrada a estufa (sem circulação de ar) de escala laboratorial da marca Tecnal, modelo TE-394/1, disponível no Centro de Secagem/ DEQ, utilizada na realização dos experimentos para convecção natural.

Figura 3. 2- Estufa sem circulação forçada de ar, marca Tecnal, modelo TE-394/1.



Fonte: Autor, (2016).

Durante a secagem, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, a medida da perda de massa das amostras, era monitorada através de uma balança analítica da marca GEHAKA modelo 440, com precisão de 0,001 g. Para esse monitoramento, as amostras eram posicionadas em um suporte, onde este era suspenso por uma haste, o qual esse conjunto (suporte + haste), era acoplado na balança analítica,

Com os dados obtidos foram calculados a razão de umidade (MR) e taxa de secagem (N), através das equações 3.1 e 3.2 respectivamente. Em seguida foram construídas curvas de umidade adimensional em função do tempo e taxa de secagem em função do tempo.

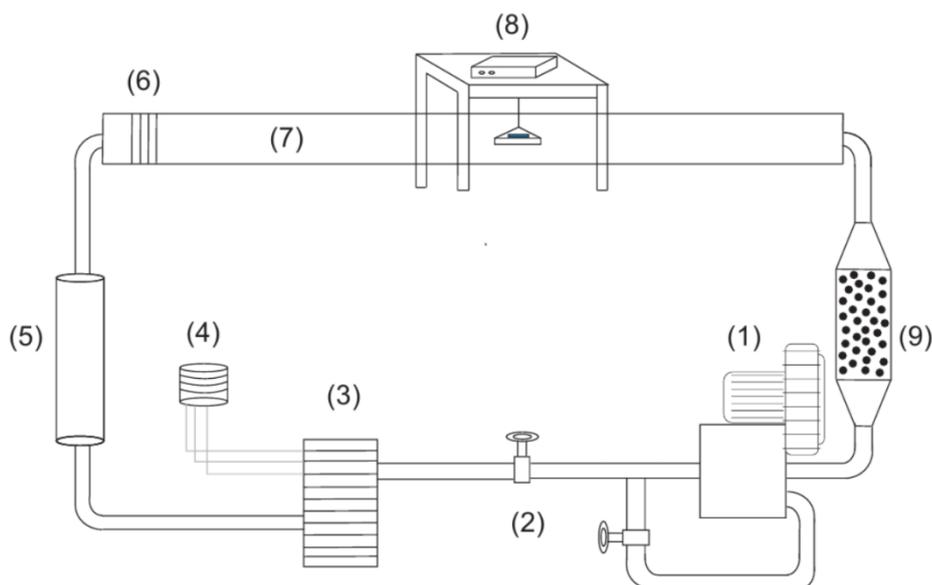
$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \quad (3.1)$$

$$N = \frac{X_{t+dt} - X_t}{dt} \quad (3.2)$$

3.3 Secador de túnel de convecção forçada

Na Figura 3.3 é mostrado o secador de túnel de convecção forçada de ar desenvolvido no centro de secagem do DEQ/UFSCar.

Figura 3. 3- Secador de túnel com convecção forçada.



Fonte: Cassandre et al., (2001).

A linha experimental consiste de um sistema de escoamento de ar, circuitos de aquecimento, resfriamento e desumidificador do fluido, bem como os aparelhos para as medidas e determinações de temperatura, umidade e velocidade do fluido de secagem, além da câmara de secagem.

O sistema de escoamento do fluido de secagem é constituído por um soprador (1) do tipo compressor radial (IBRAN) de 0,75 HP que impulsiona ar para as duas válvulas (2) do tipo gaveta, em que uma é usada para regular a vazão do ar e a outra para regular a vazão que retorna através de um reciclo para a tubulação de alimentação do soprador. O ar é aquecido em um aquecedor elétrico (3) dotado de 3 resistências

elétricas de 750 W cada uma conectada a um variador de potência VARIVOLT (4). Quando houve a necessidade do resfriamento do ar de secagem, foi utilizado um trocador de calor (5) do tipo aletas. Este trocador é constituído por 5 fileiras de 3 tubos aletados (6) com arranjo de geometria triangular. A tubulação é de ferro galvanizado com diâmetro interno de $26,6 \times 10^{-3}$ m, o tubo possui 25 aletas de seção circular de chapa galvanizada com diâmetro externo de $55,5 \times 10^{-3}$ m, aproximadamente, e espessura de $0,45 \times 10^{-3}$ m. Com o ar passando pelo leito (7), a medição da perda de massa da amostra suspensa, foi feita através de uma balança analítica digital (8) da marca GEHAKA, modelo BG 440 de precisão de 0,0001 g. Após escoar pelo leito, o ar passa por um desumidificador (9), que consiste de um leito fixo de sílica gel com diâmetro interno de aproximadamente $15,24 \times 10^{-2}$ m.

As condições de operação utilizadas foram: velocidade do ar de secagem de 1,0 e 2,0 m/s, monitoradas com o auxílio de um anemômetro digital da marca ALNOR. Para o monitoramento da temperatura (50, 60 e 70 °C) no processo, foram instalados termopares do tipo J no interior da câmara de secagem, próximos a amostra.

3.4 Caracterização do material

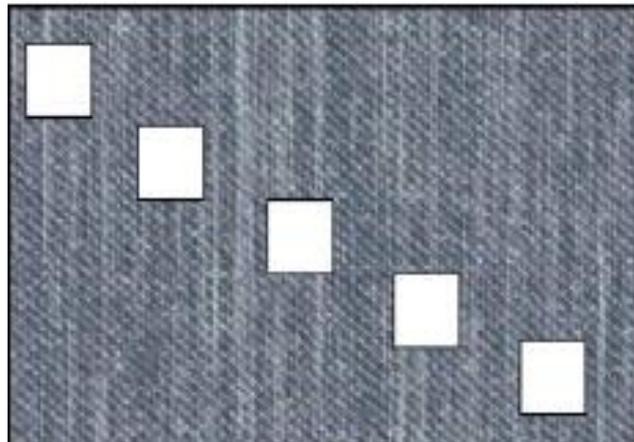
Foram determinadas as principais propriedades físicas de cada material como a espessura, gramatura e massa específica.

3.4.1 Gramatura (g/m^2)

A gramatura é a característica que permite a avaliação da textura do tecido e é determinada a partir da norma NBR-10591. A determinação da gramatura dos tecidos, baseia-se na quantidade de massa por unidade de área.

São retirados 5 corpos de prova, partes do tecido, (Figura 3.4) medindo 100 x 100 mm de diferentes partes da amostra e pesados em uma balança. A determinação dessa grandeza (g/cm^2) é feita pela média das pesagens. Foram realizadas cinco medidas de cada amostra e calculada a média aritmética e o desvio padrão para cada amostra.

Figura 3. 4- Esboço de uma amostra de tecido jeans.



Fonte: Albuquerque, (2011).

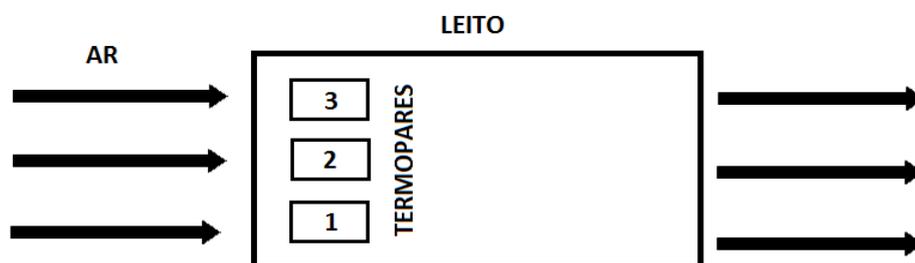
3.4.2 Espessura

A espessura dos tecidos foi medida através de um micrômetro com precisão de medida igual a 0,01mm. Foram realizadas 5 medidas de cada amostra e calculada a média aritmética e o desvio padrão.

3.4.3 Medidas de temperatura

Antes do início de cada procedimento experimental no secador de convecção forçada, foi verificada a uniformidade da temperatura do ar de secagem, através de medidores de termopares do tipo J, que foram distribuídos na entrada da câmara de secagem. Na Figura 3.5 é mostrado um esquema com a localização dos termopares para esta verificação.

Figura 3. 5- Localização dos termopares para a verificação da uniformidade da temperatura do ar na entrada do secador.

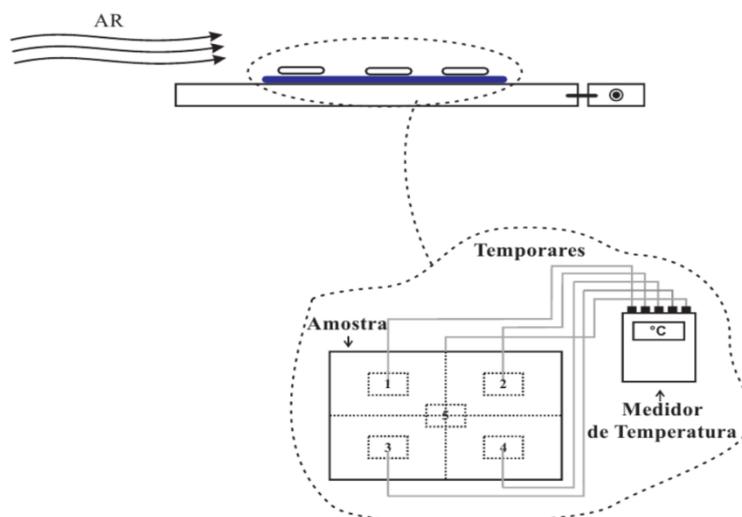


Fonte: Autor, (2015).

Foram realizadas 5 medições em intervalos de tempo determinados nas posições mostradas na Figura 3.5.

Foram feitos ensaios (não simultâneos com a obtenção da umidade em função do tempo de secagem) específicos para medir a distribuição das temperaturas em cada amostra ao longo do tempo durante a secagem. Termopares do tipo J foram posicionados na superfície dos tecidos e conectados a um leitor digital da marca Cole-Parmer Instrument Co., modelo IL 60010, usado para registrar os valores de temperatura nas diferentes posições e tempo de secagem. Os termopares foram previamente calibrados em um calibrador da marca Black, modelo DB-35L, e a precisão da medida do sensor é de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Figura 3. 6- Esquema do posicionamento da distribuição dos termopares na amostra.



Fonte: Autor, (2015).

3.4.5 Isotermas de sorção

Isotermas de equilíbrio de sorção descrevem a relação entre o conteúdo de umidade de equilíbrio e a umidade relativa (ou atividade de água) a uma temperatura específica. Dessa forma, a determinação foi realizada através do método estático na temperatura de $30 \pm 0,2$ °C na estufa da marca Binder. As análises foram realizadas em duplicatas, utilizando-se vidros fechados, com tampa de metal, suporte conforme mostra a Figura 3.7.

Figura 3. 7- Esquema do aparato experimental utilizado na obtenção de isotermas.



Fonte: Autor, (2016).

Inicialmente, no interior dos recipientes que armazenaram as amostras, foram inseridas as soluções salinas saturadas. O objetivo do uso dessas soluções é obter uma faixa de umidade relativa do ar entre 10 e 85%. Na Tabela 3.1 são mostrados os valores de atividade de água para cada concentração de sal, na temperatura de 30 °C.

Tabela 3. 1- Valores de atividade de água para as concentrações de sais na temperatura de 30 °C.

Solução salina	a_w
KOH	0,082
CH ₃ CO ₂ K	0,216
MgCl ₂	0,324
K ₂ CO ₃	0,432
Mg(NO ₃) ₂	0,514
NaNO ₂	0,635
NaCl	0,75
KCl	0,834

Fonte: Perry e Chilton, (1980).

Após a inserção das amostras nas soluções, os frascos foram colocados em estufa sob a temperatura de 30°C, sendo as amostras pesadas em intervalos regulares no décimo dia, décimo quarto e décimo sétimo dia, até que o peso se mantivesse constante, indicando a condição de equilíbrio higroscópico. Após a condição de equilíbrio alcançada, o teor de umidade de equilíbrio foi calculado conforme a Equação 3.3:

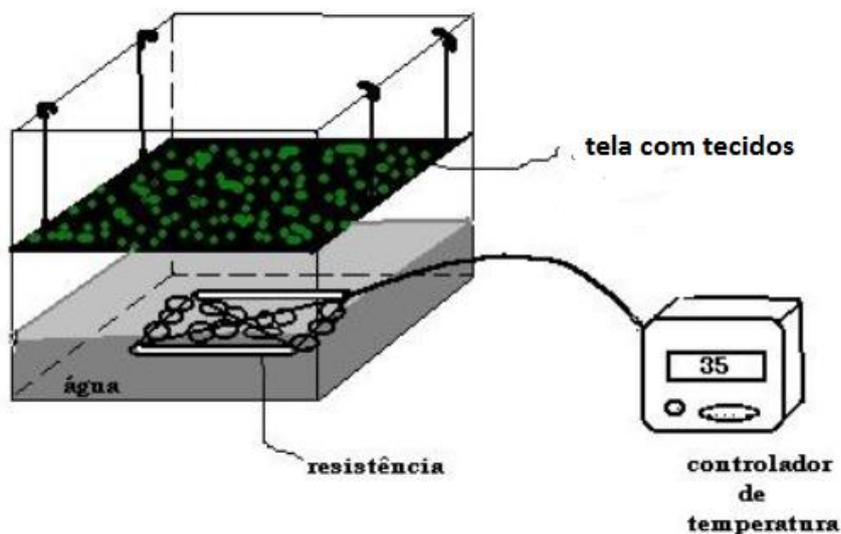
$$X_{(b.s)} = \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{seca}} \quad (3.3)$$

a diferença entre a massa da amostra no equilíbrio mássico e a massa da amostra seca, foi determinada através do método gravimétrico recomendado pela AOAC, (1997).

3.4.6 Cinética de absorção

Esse método consistiu em expor os tecidos em ambiente fechado e saturado sob temperaturas de 40 e 60 °C. O equipamento utilizado para promover o ambiente fechado e saturado foi um umidificador, conforme mostrado na Figura 3.8. Nele a água é aquecida através de resistências elétricas acopladas a um controlador de temperatura, gerando vapor, que mantém o ambiente saturado.

Figura 3. 8- Umidificador.



Fonte: Chicaroni et al.,(1998) apud Corrêa, (2012).

Os tecidos são apoiados sobre uma tela de sustentação, e mantidos nessa atmosfera, monitorando-se o ganho de massa até atingir um valor constante. Para a pesagem das amostras (em intervalos de tempos determinados) utilizou-se uma balança analítica do modelo HR-120 e marca AND com precisão de $\pm 0,0001$ g.

A umidade dos tecidos em base úmida foi calculada pela Equação 3.4:

$$U = \frac{m_{\text{tecido úmido}}}{m_{\text{tecido seco}}} \quad (3.4)$$

A massa de água foi determinada segundo a Equação 3.5:

$$m_{\text{água}} = m_{\text{tecido úmido}} - m_{\text{tecido seco}} \quad (3.5)$$

3.5 Análise e tratamento dos dados

3.5.1 Obtenção das taxas de secagem no período de secagem à taxa constante

Foram determinadas duas taxas de secagem no período de taxa constante: a taxa experimental (NA) e uma taxa estimada (NA'), visando comparar os resultados. A taxa

experimental foi calculada com base na tangente da reta ajustada aos pontos na região linear da curvas de U_{bs} em função do tempo. Foram feitos ajustes lineares, desprezando-se pontos a partir do final da secagem (comportamento não-linear), até a obtenção de um ajuste com coeficiente de correlação $R^2 \geq 0,99$. Foi então obtido o coeficiente angular da reta ajustada, que fornecia a quantidade de água evaporada, por massa de sólido seco e por unidade de tempo. Multiplicando-se a tangente pela massa de sólido seco, era obtida a taxa de secagem

Para a determinação da taxa estimada teoricamente, foram utilizadas as Equações (2.1) e (2.2), assumindo-se que os tecidos se comportam na secagem como sólidos de geometria plana com superfície lisa e isotérmica. A área de troca foi calculada a partir das dimensões lineares das amostras. A temperatura da superfície sólida foi estimada com base em valores determinados experimentalmente, e a concentração de vapor d'água foi calculada assumindo-se condição de saturação, obtendo-se o volume específico a pressão atmosférica e temperatura determinada em tabelas termodinâmicas (WYLEN,SONNTAG, e BROGNAKKE, 2006).

3.5.2 Curvas generalizadas de secagem

Após obter os resultados da secagem convectiva dos tecidos, foi aplicada a metodologia de generalização das curvas de secagem como forma de ajustar os dados das cinéticas em diferentes condições operacionais a uma curva única. Segundo Keey (1992), esta abordagem permite relacionar a umidade das amostras adimensionalizada através da umidade inicial (Equação 3.6) e uma variável adimensional de tempo (Equação 3.7), definida a partir da taxa constante de secagem e da umidade inicial (Motta Lima et al., 2003).

$$Y = \frac{X}{X_o} \quad (3.6)$$

$$t_{ad} = \frac{N_c \cdot t}{X_o} \quad (3.7)$$

Para o ajuste dos dados dessas curvas, foram avaliadas as equações 2.5, 2.6 e 2.7 apresentadas no item 2.4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os materiais utilizados neste estudo (poliéster, atalhado e jeans), apresentam em comum uma geometria de elevada área superficial para transferência de calor e massa, e pequeno volume. Porém, cada tipo de tecido possui características de superfície diferentes no que se refere à estrutura do arranjo e composição das fibras, o que pode influenciar na remoção da água. Para a análise do comportamento de cada um desses tecidos durante o processo de secagem foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- Caracterização do material, no que se refere à geometria e dimensão. Também foram determinadas as isotermas de sorção para os três tecidos utilizando o método estático na temperatura de 30 °C; cinética de absorção de água em cada material em uma atmosfera de vapor saturado nas temperaturas de 40 e 60 °C;
- Cinética de secagem em estufa de convecção natural, onde o deslocamento de ar ocorre pela ação de forças de empuxo, e a temperatura do ar de secagem é a única variável que pode ser manipulada no processo. O estudo experimental foi desenvolvido nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.
- Cinética de secagem em túnel de convecção forçada, nas velocidades de 1,0 e 2,0 m/s e também três temperaturas: 50, 60 e 70 °C.

São apresentados inicialmente os resultados referentes a caracterização dos materiais têxteis. Posteriormente, apresenta-se a análise da secagem separadamente, para cada tipo de tecido, e por fim é mostrada a comparativa para os diferentes tecidos.

4.1 Caracterização dos tecidos

4.1.1 Gramatura (g/m²)

A gramatura dos tecidos foi determinada a partir de uma média de cinco medidas realizadas para cada tipo de tecido (poliéster, atalhado e jeans), utilizando amostras do ensaio realizado a 50°C em 2,0 m/s, comparando-a com a amostra antes de ser seca. As gramaturas de cada tecido, determinadas experimentalmente, são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1- Resultados da análise da gramatura média (g/m²).

Material	*Gramatura (g/m ²)	**Gramatura (g/m ²)
Poliéster	211,50 ± 0,24	194,80 ± 0,33
Atoalhado	308,50 ± 0,35	308,60 ± 0,30
Jeans	375,75 ± 0,06	333,00 ± 0,17

*antes da secagem (sem umidificar)

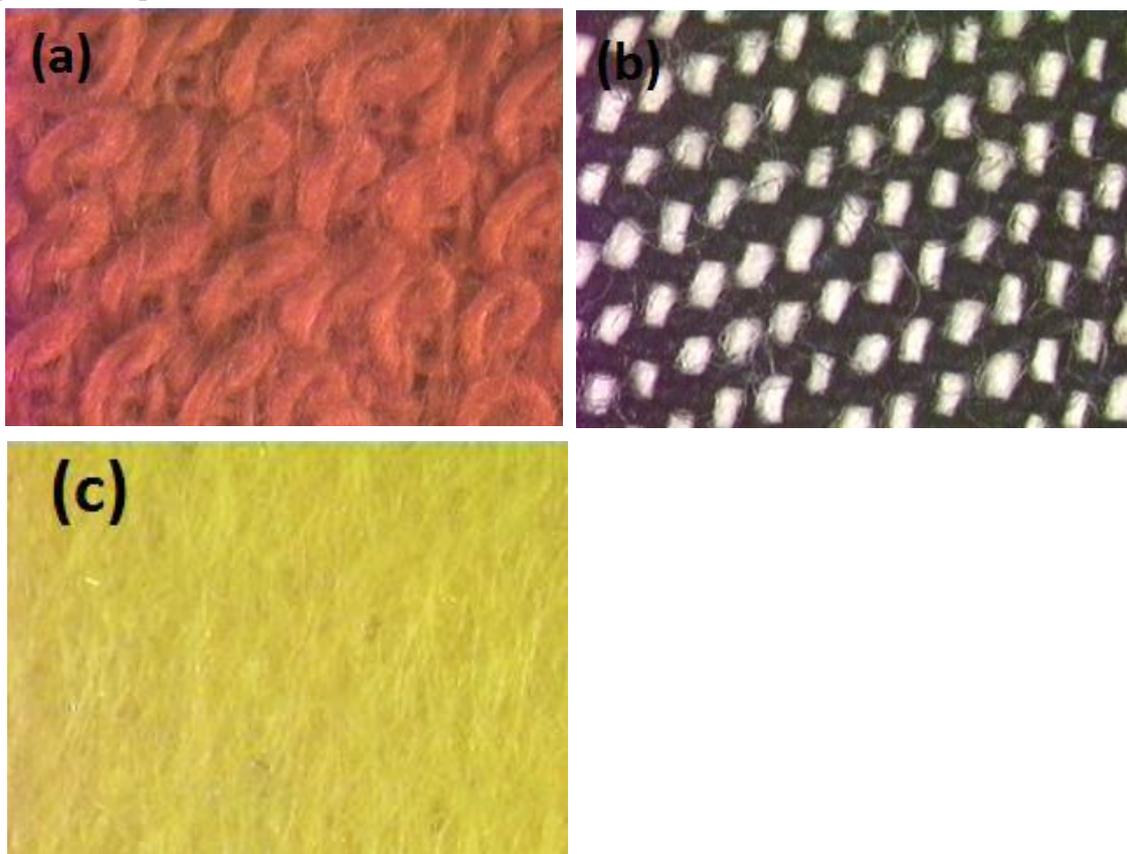
**Após a secagem

Fonte: Autor, (2016).

De acordo com a Tabela 4.1, o tecido de algodão do tipo jeans apresenta uma gramatura maior quando comparado ao atalhado e o de fibra sintética. Também é o tecido que apresentou uma maior diferença na gramatura depois de submetido à secagem, cerca de 11%. Para o poliéster a variação foi de aproximadamente 8 %. No caso do tecido atalhado, depois que o tecido foi umidificado e seco, não houve diferença nessa variável.

Na Figura 4.1 são mostradas imagens dos tecidos obtidas através de um microscópio óptico, onde é possível observar as diferentes texturas superficiais.

Figura 4. 1- Imagens das superfícies dos tecidos: (a) algodão-atoalhado; (b) algodão-jeans e (c) poliéster.



Fonte: Autor, (2016).

Na Figura 4.1 (a), percebe-se que o tecido de algodão atoalhado apresenta uma estrutura composta sobre uma estrutura base, onde os fios em forma de laços que emergem da estrutura básica dão efeito felpudo na face superior. Já na Figura 4.1 (b), pode-se observar que o tecido de algodão do tipo jeans é um tecido plano que apresenta uma estrutura de entrelaçamento dos fios (trama e urdume) do tipo tela, proporcionando menores espaços entre os fios. No caso do tecido de poliéster, por se tratar de uma fibra sintética, não é possível identificar um arranjo ordenado das fibras com base nas imagens.

4.1.2 Espessura dos tecidos

A espessura média dos tecidos foi determinada a partir de uma média aritmética de três medidas. Os valores das espessuras e razão entre o comprimento e a espessura estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2- Espessura das amostras e razão entre comprimento e espessura para os três tipos de tecido.

Tecido	Espessura (mm)	L/E
Poliéster	$0,52 \pm 0,03$	154,38
Atoalhado	$0,60 \pm 0,01$	133,33
Jeans	$0,59 \pm 0,01$	135,56

Fonte: Autor, 2015.

Verifica-se através da Tabela 4.2, uma diferença pouco expressiva entre os valores médios das espessuras dos tecidos. Nota-se que o tecido de algodão do tipo atoalhado apresentou a maior espessura entre os tecidos avaliados e a diferença entre a maior e menor espessura foi de 14,4 %.

4.1.3 Análise das fibras têxteis por microscopia eletrônica de varredura

As fibras dos tecidos foram analisadas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) (modelo XL 30 FEG) instalado no Laboratório de Caracterização (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais/UFSCar. As análises têm o objetivo de visualizar o arranjo das fibras e também suas características superficiais.

As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos tecidos de poliéster, algodão e jeans, respectivamente.

Figura 4. 2- Imagens das fibras de poliéster obtidas pelo MEV, com ampliação de: (a) 24X – 1 mm, (b) 54X - 500 μm , (c) 500X – 50 μm e (d) 5000X – 5 μm .

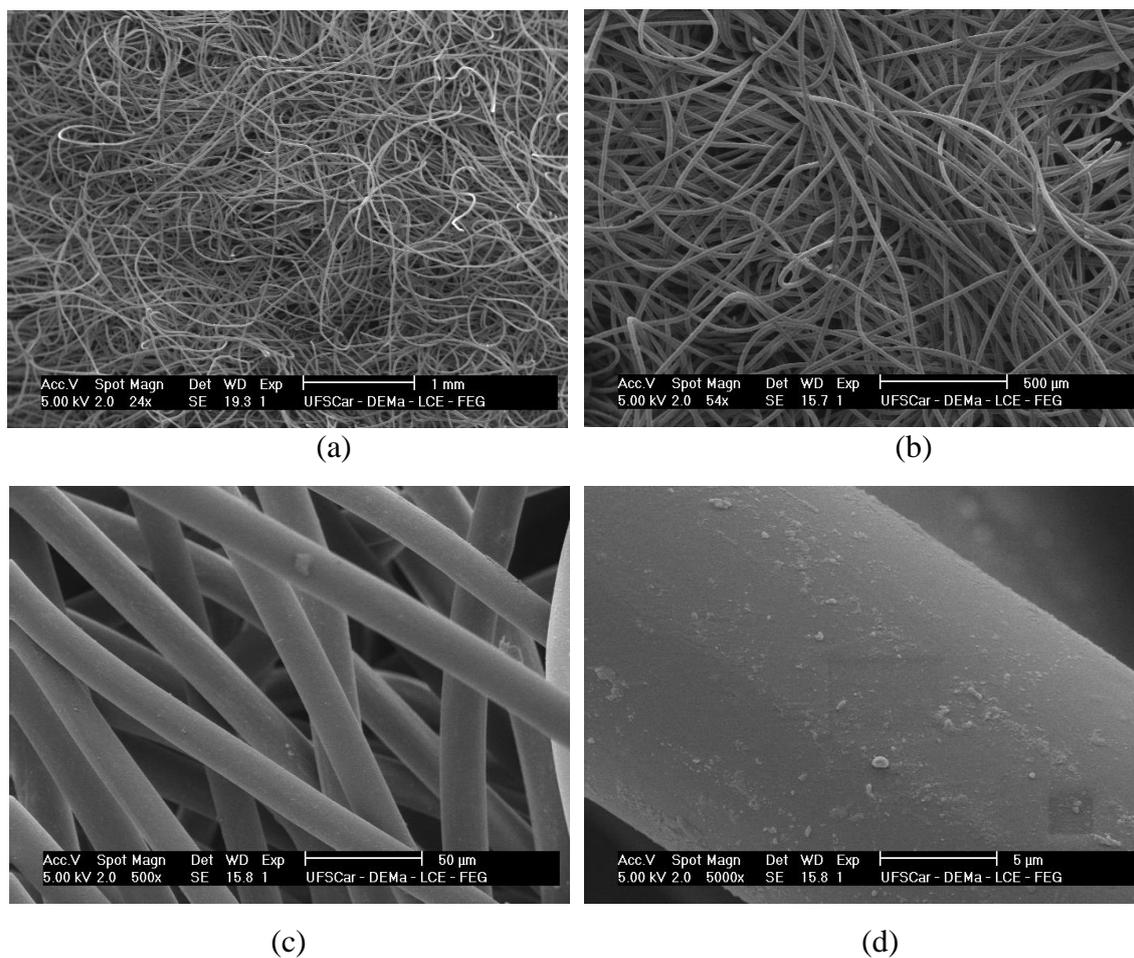
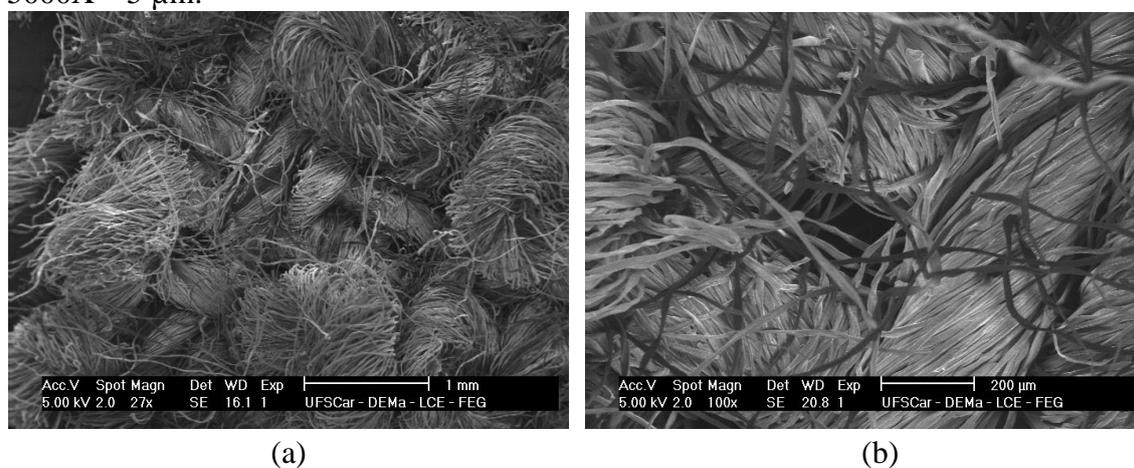
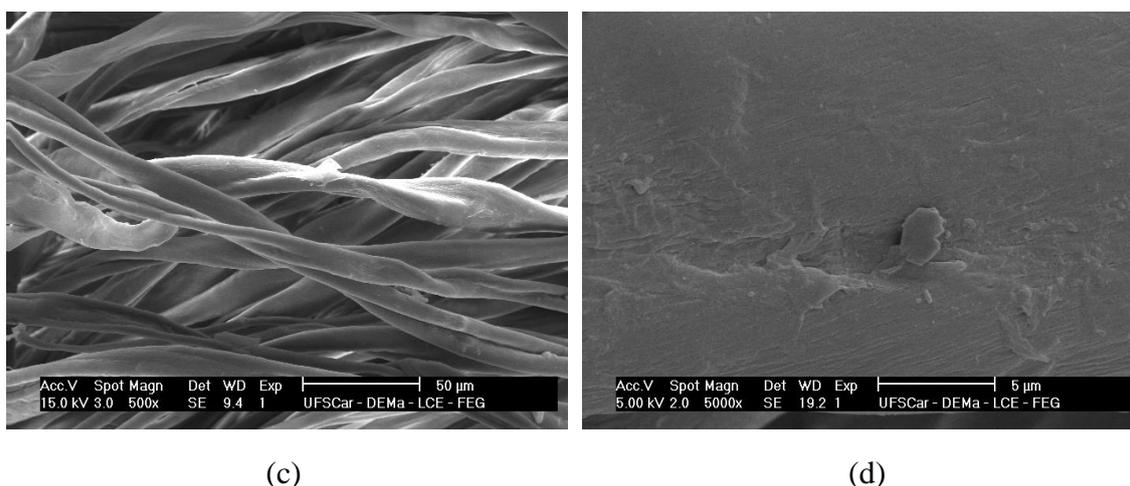


Figura 4. 3- Imagens das fibras do tecido de algodão do tipo atoalhado obtidas pelo MEV, com ampliação de: (a) 27X – 1 mm, (b) 100X - 200 μm , (c) 500X – 50 μm e (d) 5000X – 5 μm .

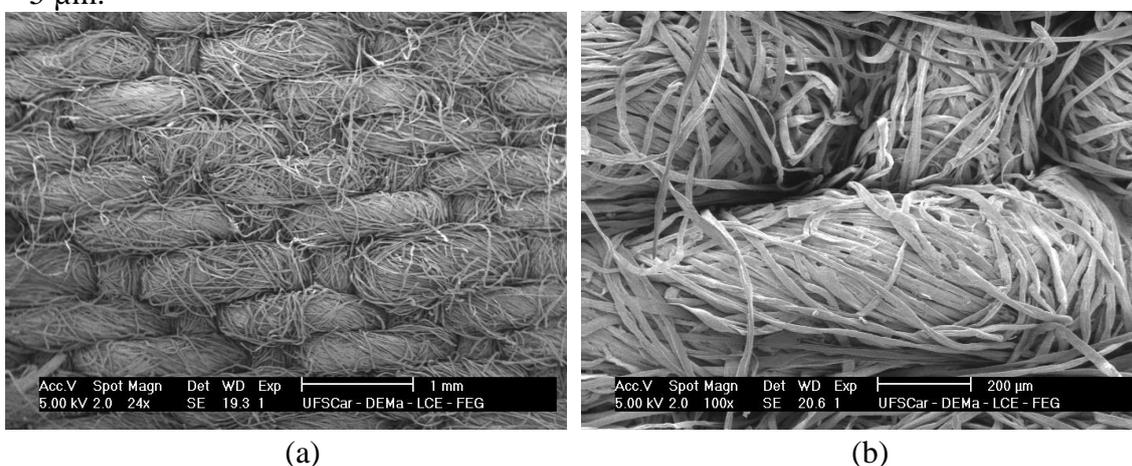




(c)

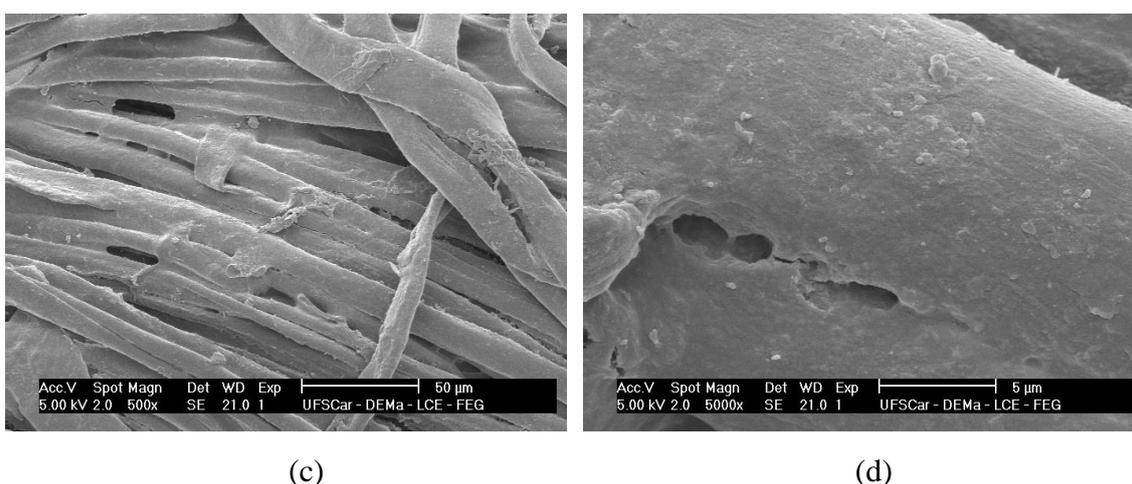
(d)

Figura 4. 4- Imagens das fibras do tecido de algodão do tipo jeans obtidas pelo MEV, com ampliação de: (a) 24X – 1 mm, (b) 100X – 200 µm, (c) 500X – 50 µm e (4) 5000X – 5 µm.



(a)

(b)



(c)

(d)

Observa-se através das figuras, que os tecidos apresentam muita diferença em sua estrutura e no entrelaçamento das fibras dos materiais, principalmente nas de poliéster quando comparadas ao do atoalhado e jeans. As fibras do poliéster apresentam um arranjo desordenado, com muitos espaços vazios entre elas e, portanto muito porosas, enquanto as de algodão (atoalhado e jeans) formam uma estrutura mais regular,

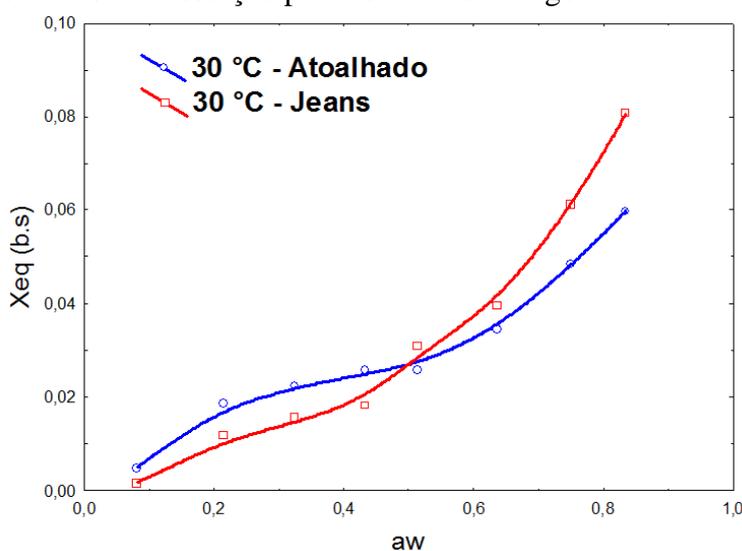
com fios finos unidos em feixes, que são trançados entre si. As fibras do tecido atoalhado apresentam o entrelaçamento dos fios de maneira mais ordenada, com felpas não muito altas e nem espessas, resultando num contato direto entre os fios e pouco espaço vazio entre eles. As fibras do tecido jeans quando comparada às do tecido atoalhado mostram-se mais unidas, formando um feixe de espessura maior, provavelmente devido ao elastano existente na composição do jeans.

4.1.4 Isotermas de sorção dos tecidos

As isotermas de sorção permitem determinar o teor de água de materiais em condições de equilíbrio. Foram obtidas as isotermas dos tecidos de algodão do tipo atoalhado e jeans na temperatura de 30 °C, um valor próximo da condição ambiente, para se ter uma avaliação da afinidade da água com cada material. Não foi possível obter resultados para o tecido de poliéster. Este tecido possui uma baixa hidrofiliade (capacidade de absorção de água), e na temperatura de 30 °C, não foi detectada nenhuma variação de massa que permitisse estimar a umidade de equilíbrio na faixa de atividades avaliada.

Na Figura 4.5 são apresentados os dados de umidade de equilíbrio em função da atividade de água para os tecidos de algodão do tipo atoalhado e jeans na temperatura de 30 °C.

Figura 4. 5- Isotermas de dessorção para os tecidos de algodão.



Fonte: Autor, (2016).

Nota-se através da Figura 4.5, que segundo a classificação apresentada na Figura 2.9 as isotermas dos tecidos são do tipo II, a qual é caracterizada pela presença de multicamadas de moléculas de água adsorvidas sobre a superfície do sólido. É observada que as curvas para os dois tecidos apresentam comportamentos similares, sendo que até aproximadamente 43 % de atividade de água, os valores de umidade de equilíbrio do tecido atalhado são levemente superiores aos do jeans, e esta tendência se inverte para atividades acima de 50 %. Mas em geral os valores não diferem muito entre si, e na faixa de atividade de água abaixo de 0,2, que caracteriza a região em que a umidade está mais fortemente ligada ao material, os valores de umidade de equilíbrio são baixos para os dois tecidos.

Com o objetivo de identificar um modelo que englobe os estágios identificados nas isotermas e determinar parâmetros, foram ajustados os modelos teóricos, semi-empíricos e empíricos (GAB, BET e Oswin) apresentados anteriormente na Tabela 2.2. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores desses parâmetros e os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para cada modelo ajustado aos dados experimentais.

Tabela 4. 3- Parâmetros de ajustes e coeficiente de determinação das isotermas do tecido atalhado e jeans.

Tecido	Modelo	Parâmetro	Valor do parâmetro	R^2	
Atalhado	GAB	X_m	0,07	0,97	
		c	1,70		
		k	0,45		
	BET	X_m	0,03	0,70	
		c	0,46		
		n	1,73		
	Oswin		a	0,03	0,98
			b	0,47	

		X_m	0,10	
	GAB	c	0,44	0,99
		k	0,67	
		X_m	0,17	
Jeans	BET	c	0,09	0,96
		n	2,19	
	Oswin	a	0,03	
		b	0,70	0,99

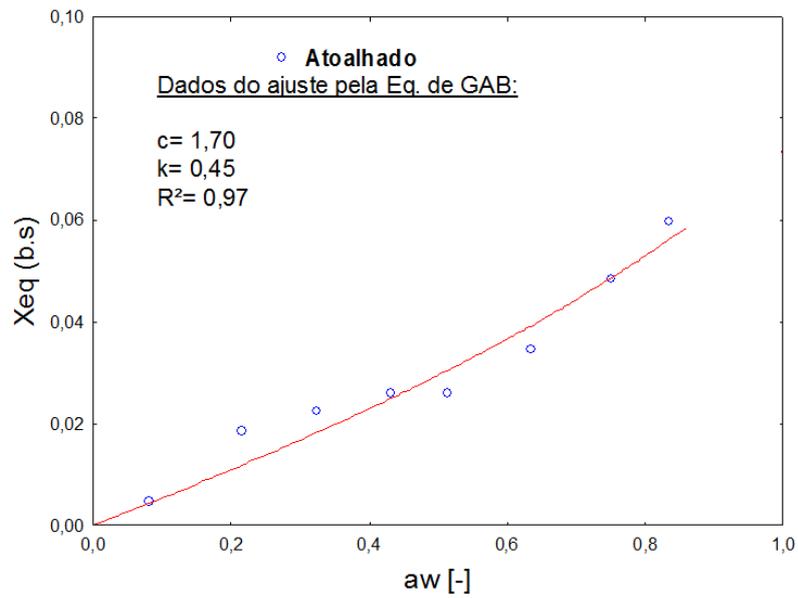
Fonte: Autor, (2016).

Através da Tabela 4.3 percebe-se que tanto o modelo de GAB quanto o de Oswin descreveram satisfatoriamente as isotermas, apresentando um bom ajuste aos dados experimentais para ambos os tecidos. O valor do R^2 para o tecido atoalhado nos modelos de GAB e Oswin foi de 0,97 e 0,98, enquanto para o jeans, 0,99 e 0,99, respectivamente. O valor de X_m , que representa a umidade na monocamada foi de 0,07 kg/kg_{ss} (atoalhado) e 0,10 kg/kg_{ss} (jeans).

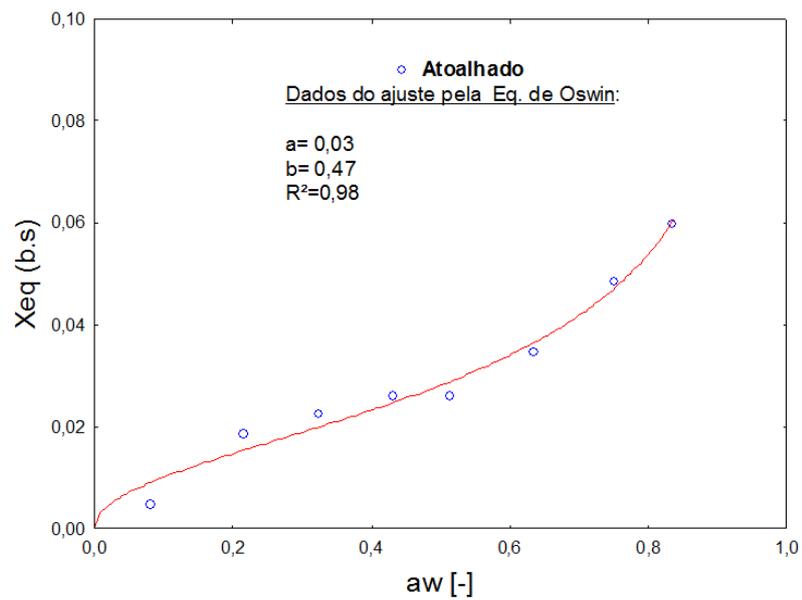
Por fim, o modelo que pior se ajustou aos dados foi o de BET para ambos os tecidos. O valor da umidade, X_m , na monocamada para o atoalhado e jeans foi de 0,03 e 0,17 kg/kg_{ss}. O fato do modelo não ter bom ajuste comparado aos outros modelos, pode estar associado a restrição de atividade de água na monocamada, visto que, esse modelo compreende em torno de até 0,6.

Na Figura 4.6, é mostrado o melhor ajuste através do modelo de Oswin para ambos os tecidos de algodão.

Figura 4. 6- Isoterma do tecido atalhado ajustados no modelo de GAB (a) e Oswin (b) na temperatura de 30 °C.

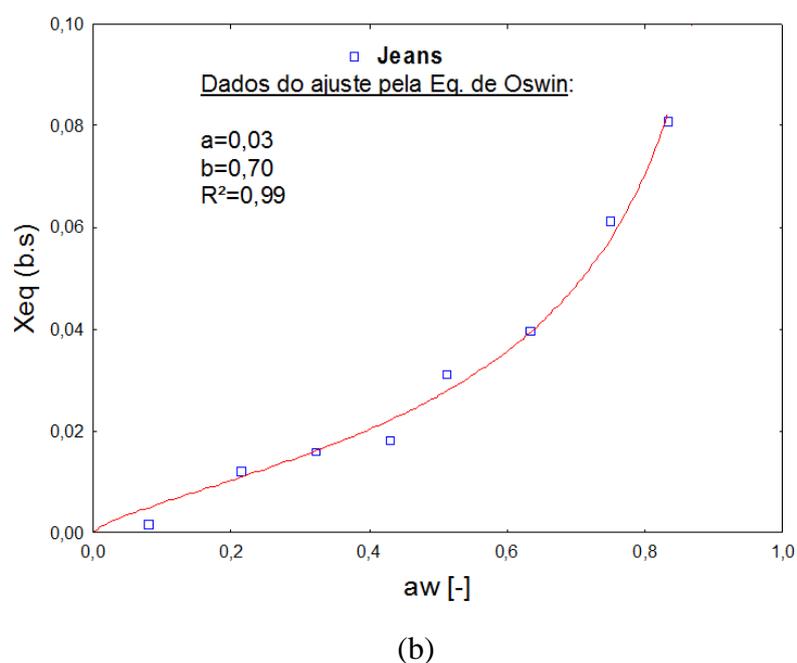
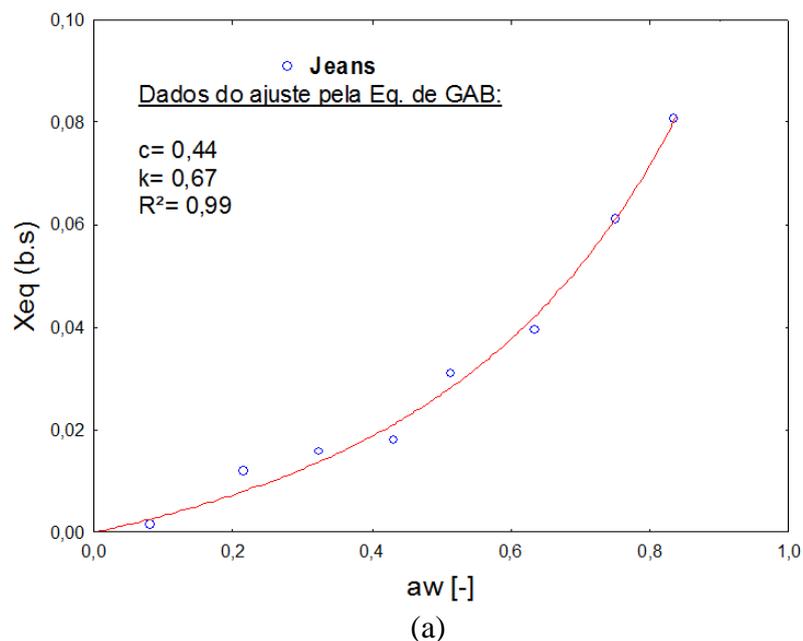


(a)



Fonte: Autor, (2016).

Figura 4. 7- Isoterma do tecido jeans ajustados no modelo de GAB (a) e Oswin (b) na temperatura de 30 °C.



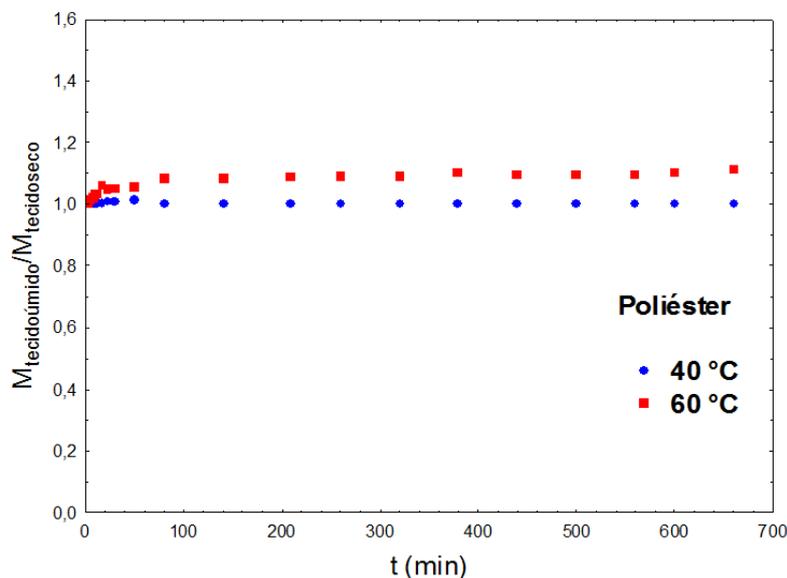
Fonte: Autor, (2016).

4.1.5 Cinética de absorção

Para avaliar a capacidade de absorção de água dos tecidos, foi utilizada a metodologia apresentada no item 3.4.6. Na Figura 4.8 são mostrados os resultados das curvas da razão entre a massa de tecido úmido e a massa de tecido seco, em função do tempo de absorção, realizadas nas temperaturas de 40 e 60 °C para o tecido de fibra

sintética. Os resultados permitem observar o ganho de água do material ao longo do tempo.

Figura 4. 8- Cinética de absorção nas temperaturas 40 e 60 °C para o tecido de poliéster.

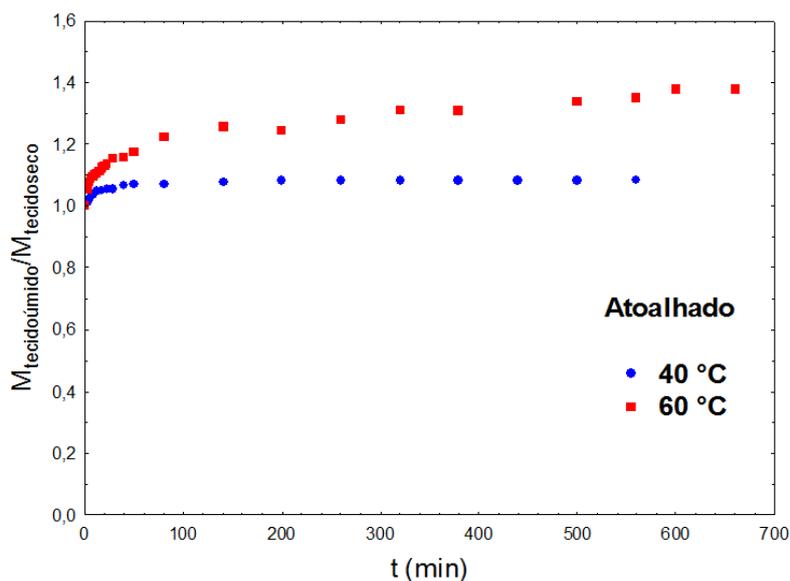


Fonte: Autor, (2016).

Conforme a Figura 4.8, percebe-se que a 40 °C, o tecido de poliéster praticamente não absorve umidade, já que a razão entre a massa de água acumulada e a massa de tecido úmido se mantém constante e igual a 1 ao longo do tempo. O aumento da temperatura para 60 °C resultou em uma absorção levemente superior, com um acréscimo de cerca de 10 % na massa de água em relação à massa de do tecido. A baixa capacidade de absorção de água é consistente com a característica hidrofóbica do material.

Na Figura 4.9 são mostrados os resultados para o tecido de algodão do tipo atoalhado.

Figura 4.9- Cinética de absorção nas temperaturas 40 e 60 °C para o tecido atoalhado.



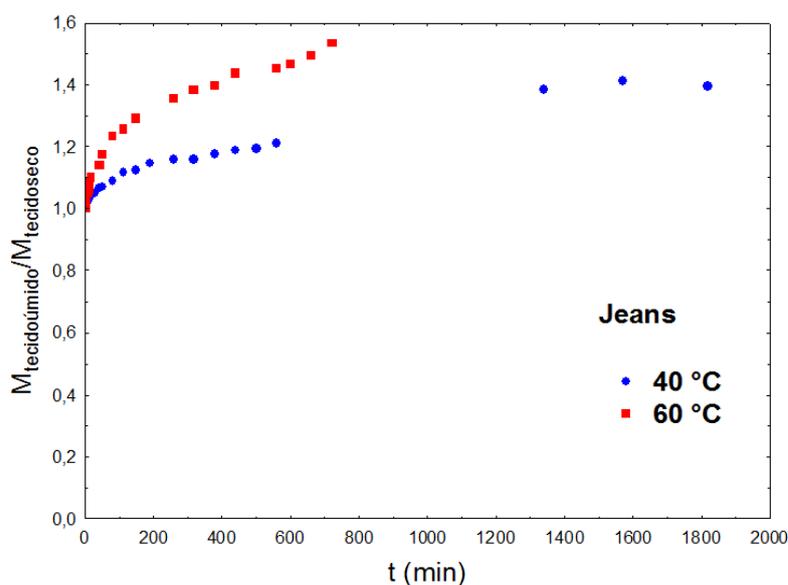
Fonte: Autor, (2016).

Percebe-se através da Figura 4.9 que na temperatura de 40 °C a absorção do tecido de algodão do tipo atoalhado foi de cerca 8 % em peso, na condição de saturação, sendo que a saturação foi atingida logo no início do processo e a massa manteve-se constante já a partir de 100 min. Com o aumento da temperatura para 60 °C ocorreu uma maior absorção de umidade, e ao final de 700 min, o ganho foi de aproximadamente 40 % em massa, mais significativo do que na condição de menor temperatura. A saturação do tecido foi alcançada para um tempo maior, cerca de 600 min. O aumento da temperatura favorece o processo, porque a concentração de vapor no ambiente aumenta e com o aumento da pressão de vapor, os poros das fibras começam a ser preenchidos por umidade através da condensação capilar até atingirem a saturação completa, quando torna-se constante a absorção (DUCREUX e NEDEZ, 2011).

Uma maior absorção de água para esse tipo de fibra era esperado, pois trata-se de um material constituído por fibras naturais celulósicas, que são hidrofílicas. De acordo com Alcântara e Daltin, (1995), o algodão é formado basicamente por celulose, ceras naturais e proteínas. O grande número de grupos de hidroxilas da celulose propicia uma grande capacidade de absorver água, em até cerca 50 % do seu peso.

Na Figura 4.10 são mostrados os resultados para o tecido jeans.

Figura 4. 10- Cinética de absorção nas temperaturas 40 e 60 °C para o tecido jeans.



Fonte: Autor, (2016).

A partir da Figura 4.10 observa-se que a 40 °C ocorreu um ganho expressivo de massa de água, sendo que na condição de saturação, observada para tempos maiores do que 1200 min, o ganho de massa chega a 40%, o maior valor observado para todos os tecidos nesta temperatura. Aumentando a temperatura para 60 °C, foi observado um acréscimo de massa de água de cerca de 60% após aproximadamente 800 min. Por dificuldades experimentais, nesta temperatura não foram obtidos dados até a condição de saturação, mas a tendência é bem representada pelos dados. Os resultados mostram que o aumento da temperatura para 60 °C novamente favoreceu o processo.

Assim como o tecido atalhado, o jeans é constituído por fibras de algodão, portanto hidrofílica, de forma que este comportamento é consistente com o esperado.

Para uma análise comparativa do comportamento da cinética de absorção dos três tecidos, são mostradas na Tabela 4.4 a porcentagem de umidade (b.u) absorvida em cada tecido, para as temperaturas avaliadas, em dois intervalos de tempo.

Tabela 4. 4- Absorção de água (%) das fibras de poliéster, atalhado e jeans.

Tecido	T (°C)	t=140 min	t=560 min
Poliéster	40	0,13 %	0,14 %
	60	8,0 %	9,30 %
Atoalhado	40	7,8 %	8,30 %
	60	25,6 %	35,0 %
Jeans	40	12,7 %	21,10 %
	60	26,0 %	41,0 %

Fonte: Autor, (2016).

Através da Tabela 4.4, observa-se que todos os tecidos absorveram umidade quando expostos a uma atmosfera saturada, e que a quantidade de água absorvida aumenta com o aumento da temperatura. O tecido jeans foi o que mostrou mais afinidade com a água, enquanto o poliéster foi o que mostrou menor capacidade de absorção.

4.2 Secagem

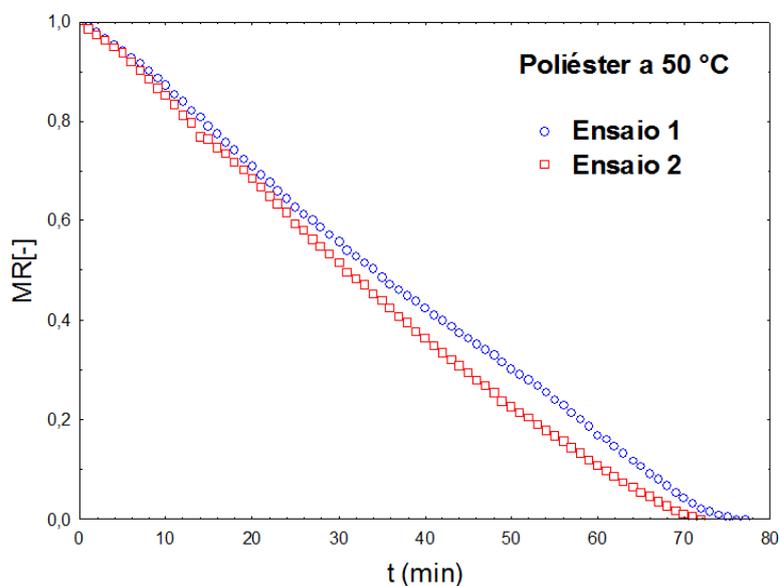
Os resultados obtidos nos ensaios de secagem serão apresentados e discutidos para cada tipo de tecido, avaliando-se primeiro a secagem em estufa de convecção natural (para os tecidos de poliéster e atalhado) e depois a secagem em túnel de convecção forçada (para os três tecidos).

4.2.1 Secagem em estufa de convecção natural

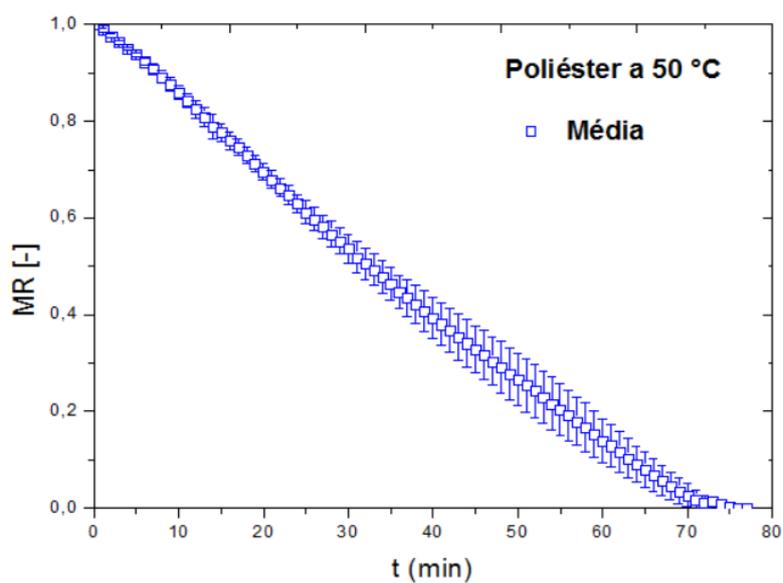
A reprodutibilidade dos experimentos foi avaliada para diversas condições escolhidas de forma aleatória, e dentre as condições avaliadas, algumas serão apresentadas aqui.

Na Figura 4.11 é apresentada a razão de umidade, definida de acordo com a Equação (3.1) em função do tempo de secagem para o tecido de poliéster na temperatura de 50 °C.

Figura 4. 11- Umidade adimensional em função do tempo (ensaio e repetição) para os ensaios em estufa (a) e valores médios e desvios (b) na temperatura de 50 °C para o tecido de poliéster.



(a)



(b)

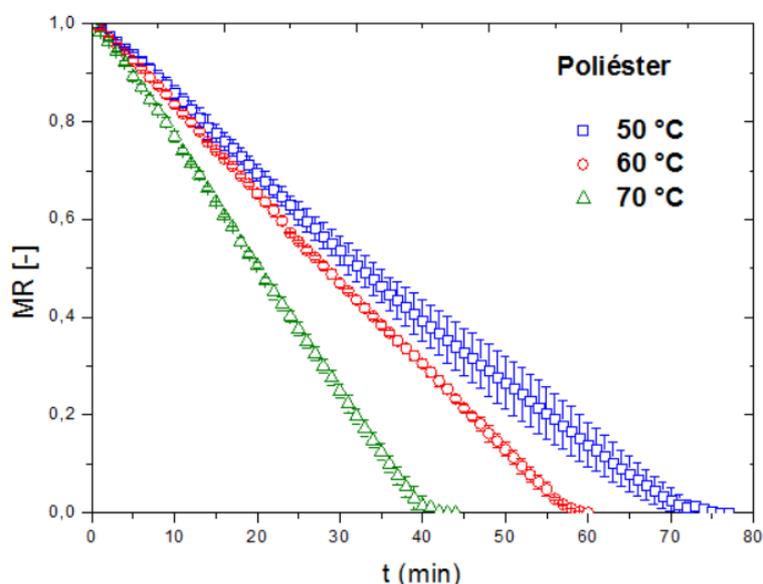
Fonte: Autor, (2016).

Nota-se através da Figura 4.10 (a) e (b) uma boa reprodutibilidade dos dados para esse tipo de tecido, pois além de ser constatada visualmente a proximidade das curvas do adimensional de umidade em função do tempo, apresentou um desvio padrão em média, de $\pm 0,007$. Nas demais condições operacionais (60 e 70 °C) também foi

verificada uma boa reprodutibilidade dos dados, com desvios médios em torno de $\pm 0,002$ e $\pm 0,03$, respectivamente.

Verificada a reprodutibilidade dos dados experimentais, a análise e discussão dos dados serão baseadas em valores médios das condições para a construção das curvas de cinética de secagem para o tecido de poliéster. Na Figura 4.12 são mostrados os resultados típicos do adimensional de umidade em função do tempo de secagem, realizadas nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C para o tecido de poliéster.

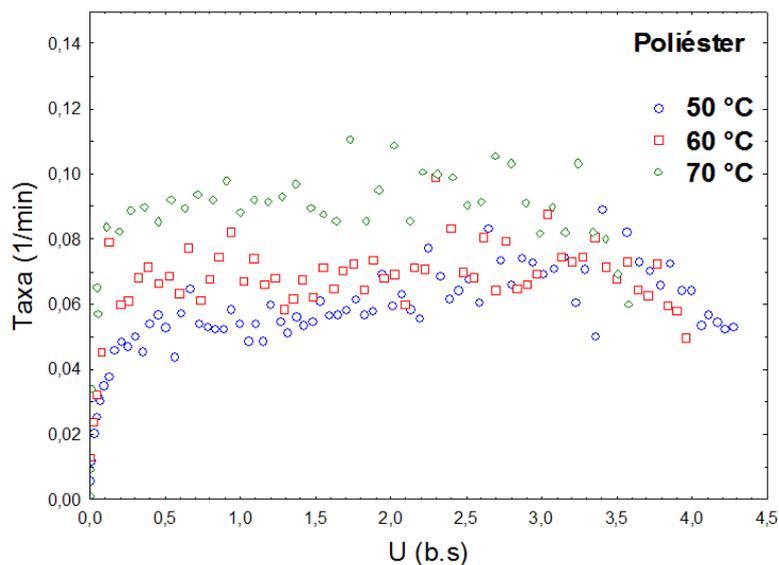
Figura 4. 12- Curvas de umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em estufa para o tecido de poliéster.



Fonte: Autor, (2016).

Observa-se que a redução de umidade com o tempo apresenta comportamento linear em praticamente todo o tempo de secagem, para as três temperaturas avaliadas. A redução linear da umidade é um comportamento característico da remoção de água livre (água não-ligada quimicamente à estrutura do material), em que a energia fornecida é consumida essencialmente como calor latente para a evaporação da água. O processo de secagem ocorre praticamente no período de taxa constante. Apenas no final da secagem, quando a umidade tende a zero, é notado um pequeno período de secagem à taxa decrescente. O período de taxa constante pode ser observado também nas curvas da Figura 4.13, que mostra as taxas de secagem em função da umidade em base seca nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Figura 4. 13- Taxa de secagem em função da umidade em base seca nas temperaturas avaliadas para o tecido de poliéster.



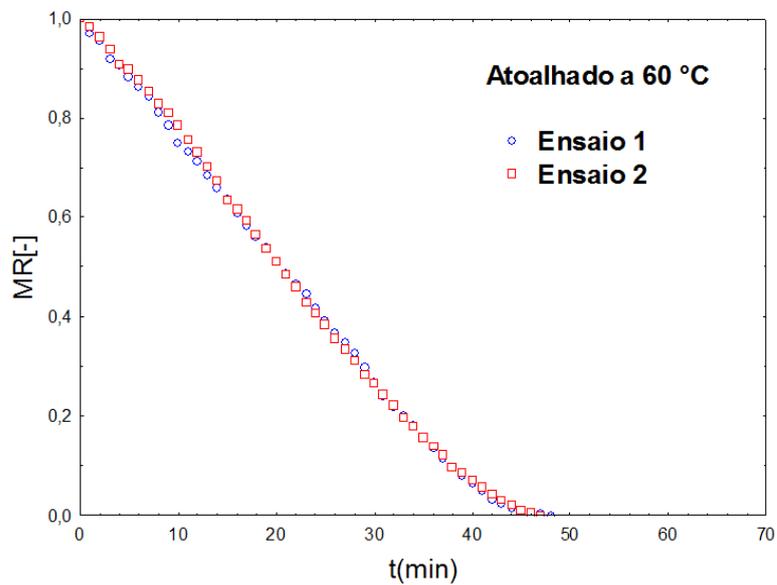
Fonte: Autor, (2016).

Observa-se através da Figura 4.13 que nas três temperaturas fica bem caracterizado um período de aquecimento inicial, após o qual observa-se a região de secagem à taxa constante (umidades aproximadamente entre 0,5 e 3,5 (b.s)). Este período dura até que o material atinja a chamada umidade crítica, a partir da qual a secagem ocorre a taxas que decrescem rapidamente até conteúdos de umidade próximos de zero.

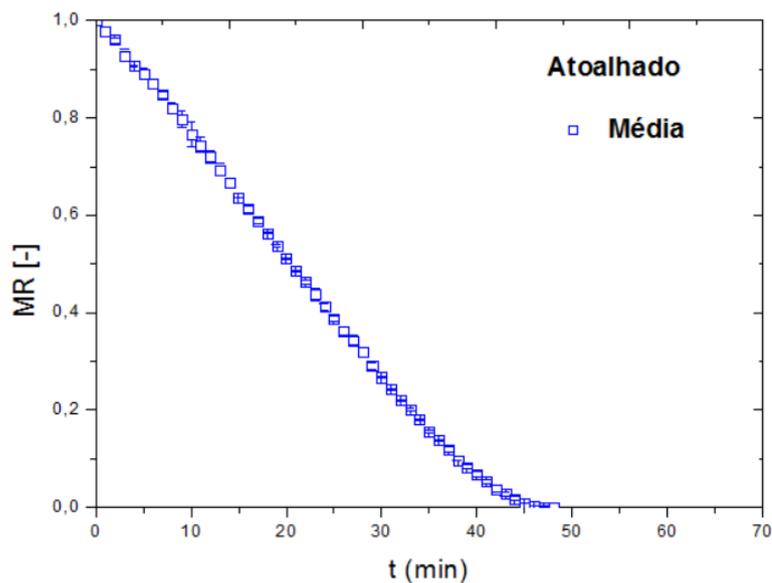
De acordo com os resultados mostrados nas Figuras 4.12 e 4.13, percebe-se um claro efeito da temperatura no aumento das taxas de secagem. Por exemplo, aumentando-se a temperatura de 50 para 70 °C, o tempo de secagem foi reduzido de 75 min para cerca de 40 min, uma redução de 53 %. À temperaturas mais altas, o ar possui maior energia térmica para ser usada na evaporação, e, além disso, a pressão de vapor da água aumenta com o aumento da temperatura, o que favorece a transferência de massa devido ao aumento da diferença de concentração entre a superfície do sólido e a corrente de ar.

Também para a avaliação da reprodutibilidade dos ensaios experimentais do tecido de algodão do tipo atalhado, escolheu-se aleatoriamente algumas condições para serem analisadas. Nas Figuras 4.14 (a) e (b), são mostrados os resultados de um ensaio e sua repetição, com dados de umidade adimensional em função do tempo para a temperatura de 60 °C.

Figura 4. 14- Curvas de umidade adimensional em função do tempo (ensaio e repetição), realizados em estufa a temperatura de 60 °C e média dos ensaios cinéticos (b) para o tecido atalhado.



(a)



(b)

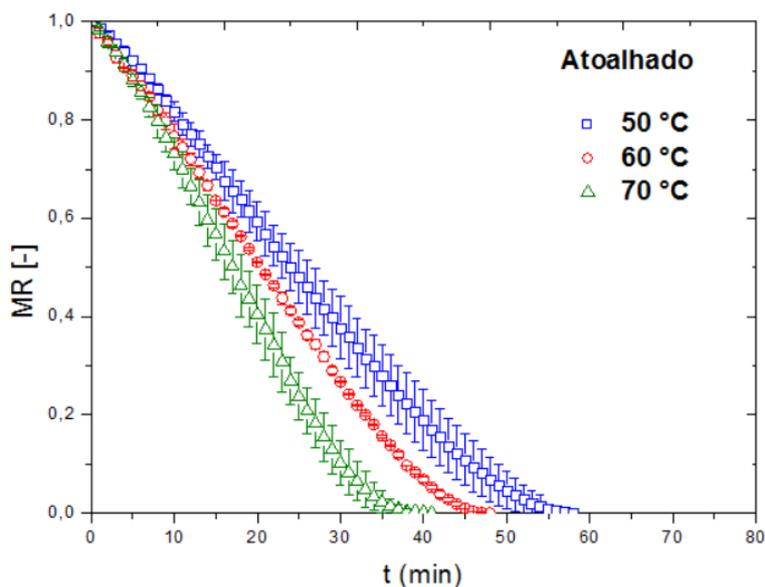
Fonte: Autor, (2016).

Através das Figuras 4.14 (a) e (b), observa-se uma excelente reprodutibilidade nesta condição, com desvio-padrão em média de $\pm 0,002$. Para as demais condições (50 e 70 °C), as curvas proporcionaram desvios entre as repetições em torno de $\pm 0,010$ e $\pm 0,012$, respectivamente, também considerados aceitáveis para a análise pretendida.

Na Figura 4.15 são mostrados os resultados, baseados em valores médios, do adimensional de umidade em função do tempo de secagem, realizadas nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, e na Figura 4.16, podem ser observadas as curvas de taxas de secagem em função da umidade correspondente.

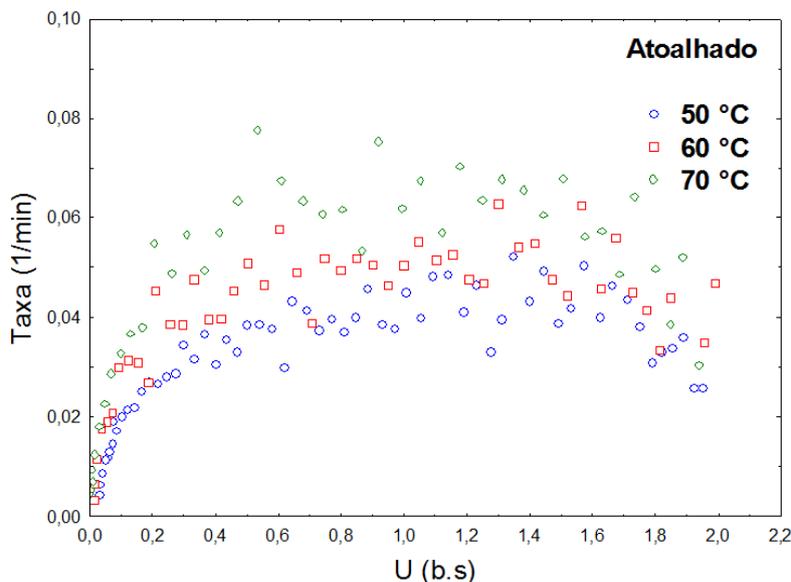
Observa-se na Figura 4.15, comportamentos qualitativamente similares aos observados e discutidos anteriormente para a secagem do poliéster. Na maior parte do tempo, a umidade diminui linearmente com o tempo, comportamento característico da secagem a taxa constante. Na Figura 4.14, podem ser observados o período de aquecimento inicial, o período de secagem a taxa constante e o período de secagem à taxa decrescente no final do processo. Também é observado o aumento das taxas de secagem com o aumento da temperatura. Os mecanismos envolvidos são os mesmos discutidos anteriormente e a discussão não será repetida aqui.

Figura 4. 15- Curvas de umidade adimensional em função do tempo para os ensaios realizados em estufa para o tecido atalhado.



Fonte: Autor, (2016).

Figura 4. 16- Taxa de secagem em função da umidade em base seca nas temperaturas avaliadas.



Fonte: Autor, (2016).

Ao se comparar os tempos de secagem, observa-se que para uma dada temperatura, a secagem do tecido atoalhado é mais rápida do que o tecido de poliéster. Por exemplo, na secagem a 60 °C, o tempo de secagem foi de 60 min para o poliéster e 48 min para o atoalhado, portanto 20 % inferior. Em uma primeira análise, isto parece contraditório, pois como foi demonstrado no item 4.1.5, onde foram analisadas as cinéticas de absorção de água, o tecido atoalhado tem maior capacidade de absorção do que o poliéster. Além disto, embora os 2 tecidos tenham espessuras similares (0,52 mm e 0,60 mm para o poliéster e atoalhado, respectivamente), a gramatura do tecido atoalhado (309 g/m²) é cerca de 46 % maior do que a do poliéster (211 g/m²). Contudo, as amostras utilizadas nos ensaios de secagem eram umedecidas por imersão em água e não em ambiente de vapor saturado. No processo de imersão, observou-se que o tecido de poliéster retém maior quantidade de água do que o atoalhado, resultando em um material com umidade inicial em base seca muito superior. A Tabela 4.5 mostra a umidade em base seca dos dois tecidos no instante inicial. Comparando-se os valores, observa-se que, em média, a umidade inicial da amostra de tecido de poliéster foi de 1,4 a 2,2 vezes maior do que a tecido atoalhado. A maior capacidade de retenção do tecido de poliéster deve-se, possivelmente, à sua estrutura. Como pode ser observado nas Figuras 4.2, o tecido de poliéster é formado por um arranjo desordenado de fibras, com muitos espaços vazios entre elas, o que provavelmente favorece o acúmulo de água nos

interstícios do tecido. Já no tecido atalhado (Figura 4.3), não se observa visualmente espaços vazios entre as fibras, que são trançadas entre si, resultando em menor capacidade de retenção de água. Como a quantidade de água a ser evaporada no tecido de poliéster é maior, a secagem requer mais tempo, ainda que os mecanismos de transporte sejam similares para os dois tecidos.

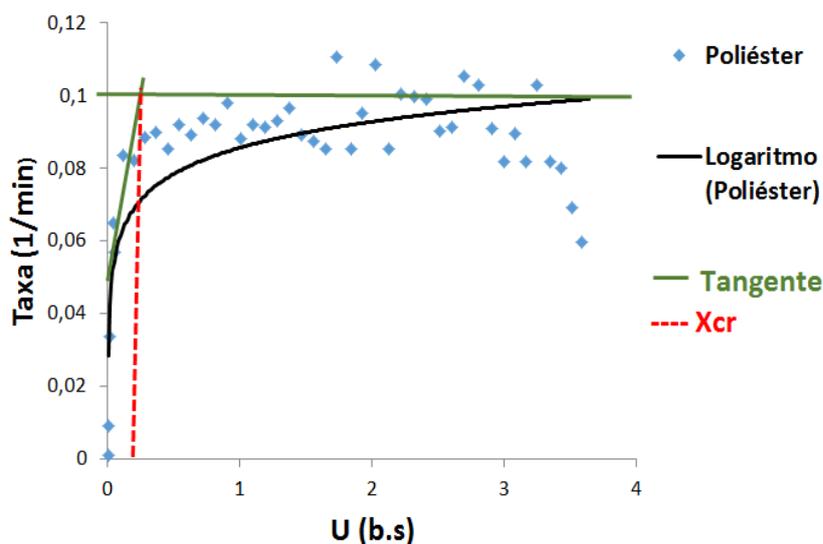
Tabela 4. 5- Razões entre a massa de água e a massa do tecido seco no instante inicial do processo.

Temperatura (°C)	Tecido	$U_{b. s}(t = 0)$
50	Poliéster	4,33
	Atoalhado	1,98
60	Poliéster	4,01
	Atoalhado	2,04
70	Poliéster	3,63
	Atoalhado	2,54

Fonte: Autor, (2016).

Como já mencionado, o período de taxa constante termina quando o material atinge a umidade crítica. Para a determinação da umidade crítica, foi utilizado o método gráfico proposto por Key (1978), conhecido como curvas de Krischer. Nesta metodologia é aplicado um ajuste através de uma curva que representa a tendência dos dados experimentais, e são traçadas duas tangentes a esta curva, nas regiões de taxas constante e decrescente. A umidade crítica é a determinada no ponto de intersecção entre as curvas, conforme ilustrado na Figura 4.17. Na Tabela 4.2 são mostrados os valores de umidade crítica para cada tecido nas respectivas condições.

Figura 4. 17- Ilustração da metodologia utilizada para determinação da umidade crítica.



Fonte: Autor, (2016).

Observa-se na Tabela 4.6 que para um dado tecido, a umidade crítica apresentada tende a diminuir com o aumento da temperatura. A umidade crítica indica a condição limite em que a água superficial é insuficiente para manter um filme contínuo cobrindo a área a ser seca. Ela depende das características do material e também das condições de secagem.

Tabela 4. 6- Valores de umidade crítica determinadas através das curvas de Krischer.

Temperatura (°C)	Tecido	X_{cr}
50	Poliéster	0,30
	Atoalhado	0,22
60	Poliéster	0,20
	Atoalhado	0,21
70	Poliéster	0,11
	Atoalhado	0,16

Fonte: Autor, (2016).

4.2.2 Secagem em túnel de convecção forçada

Antes do início dos experimentos, foi verificada a uniformidade do escoamento de ar na entrada do túnel de secagem, através de medidas de temperatura realizadas em diferentes posições. Foi constatado que a distribuição de temperatura do fluido entre as posições manteve-se em valores bem próximos, como pode ser visto na Tabela 4.7. Com base nas medidas de temperatura, assumiu-se que a distribuição de velocidades na entrada do secador também era uniforme.

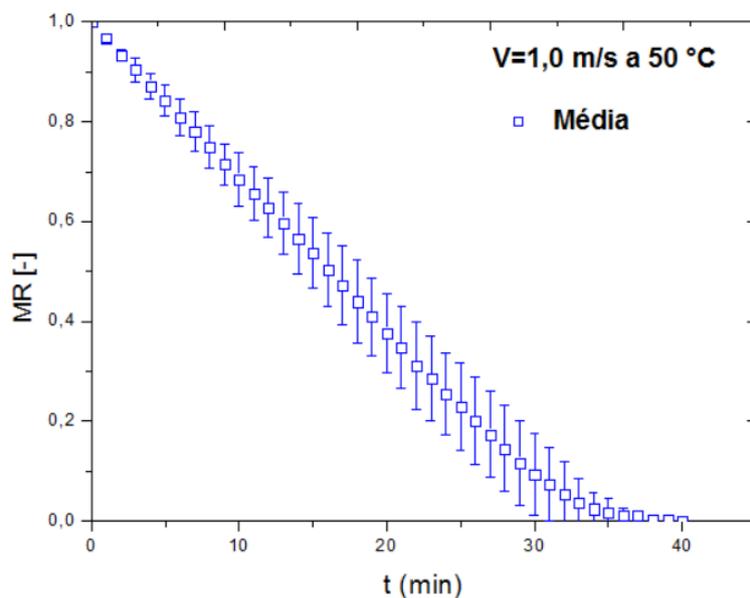
Tabela 4. 7- Verificação da distribuição de temperatura antes do início do procedimento de secagem na temperatura de 50 °C na velocidade de 2,0 m/s.

	Média ± desvio padrão
Posição 1	52,4 ± 0,7
Posição 2	51,6 ± 0,7
Posição 3	52,2 ± 0,7

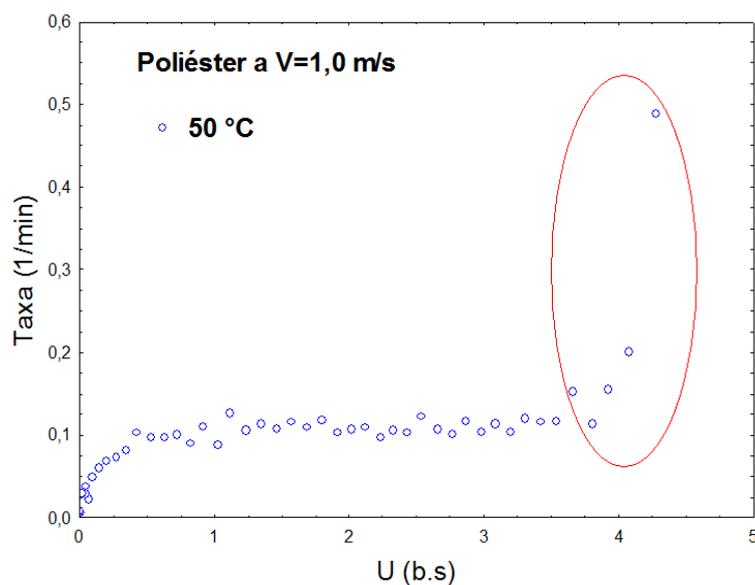
Fonte: Autor, (2016).

Antes de analisar os resultados obtidos na secagem com convecção forçada, serão feitas algumas considerações prévias referentes a um comportamento atípico observado nos dados de cinética. Para ilustrar tal comportamento, vamos considerar os dados obtidos na secagem de poliéster a 50 °C e 1,0 m/s. Na Figura 4.18 (a) são apresentados os dados de razão de umidade em função do tempo e na Figura 4.18 (b), os dados de taxa de secagem em função da umidade para essa condição. Considerou-se valores médios de 2 repetições e as barras verticais indicam os desvios entre as medidas.

Figura 4. 18- Curva de umidade adimensional em função do tempo (a) e taxa de secagem em função da umidade em base seca (b) para o tecido de poliéster.



(a)



(b)

Fonte: Autor, (2016).

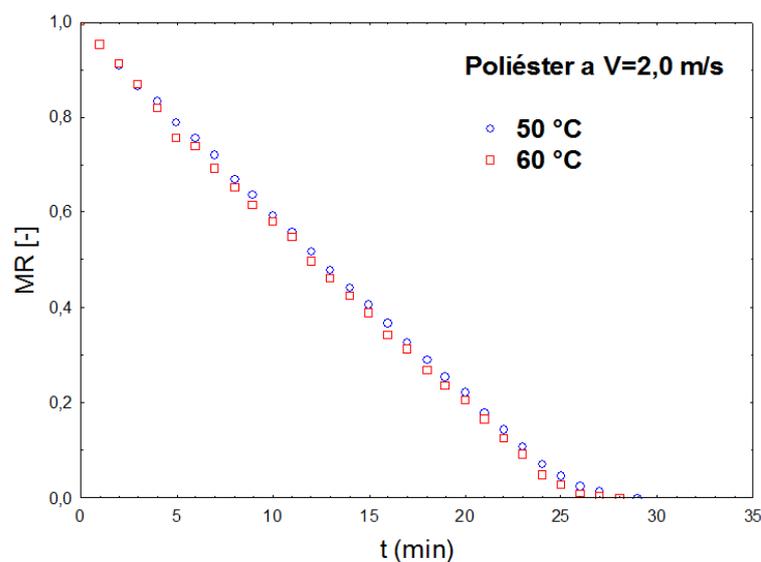
Na Figura 4.18 (b), observa-se nos instantes iniciais da secagem (circulado em vermelho), alguns valores de taxas de secagem muito superiores às observadas no período caracterizado como secagem à taxa constante. Estes valores chamam atenção, pois a condição de taxa constante representa um limite superior para a evaporação de água livre a uma dada temperatura e velocidade do ar. Ainda assim, a presença de taxas

superiores no início da secagem se repetiu para a maioria das condições experimentais nos tecidos e apareceu de forma consistente nas diferentes repetições. Uma possível explicação para esse comportamento, é que, como no início da secagem as fibras dos tecidos encontram-se saturadas de água, o transporte de água nos instantes iniciais pode ocorrer por arraste devido ao escoamento do fluido em contato com o sólido, e não por evaporação. Como o objetivo aqui é avaliar o comportamento dos tecidos na secagem, optou-se por desconsiderar este período inicial na análise dos dados. Assim, sempre que este comportamento foi observado, o que ocorreu para a maioria das condições investigadas, esses pontos em que os valores das taxas eram maiores do que os caracterizados como taxa constante foram desprezados.

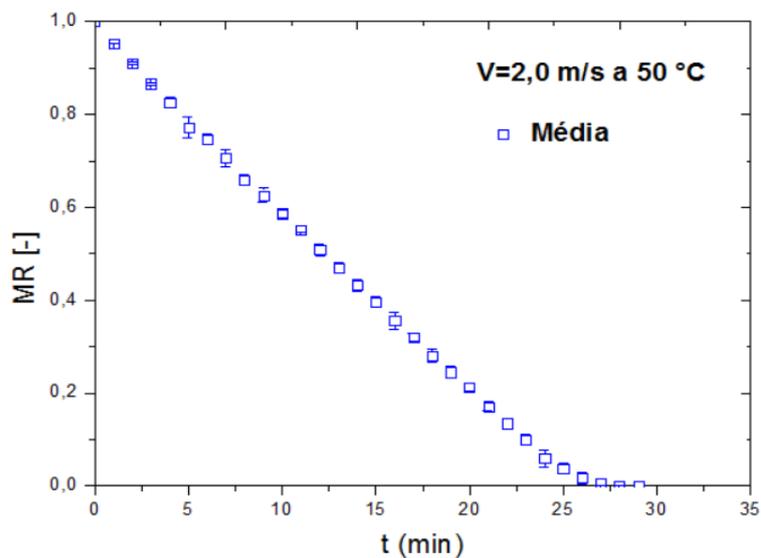
A seguir são apresentados e discutidos os dados de secagem por convecção forçada para os 3 tecidos avaliados.

Para verificação da reprodutibilidade dos experimentos, na Figura 4.19 (a) são mostrados os dados de um ensaio e de sua repetição, e na Figura 4.19(b) os valores médios, na secagem do tecido de poliéster, na condição experimental de 50 °C e 2,0 m/s. Estes dados representam o comportamento típico observado também nas demais condições.

Figura 4. 19- Curvas de umidade adimensional em função do tempo (ensaio e repetição) na temperatura de 50 °C (a) e média dos ensaios (b) para o tecido de poliéster.



(a)



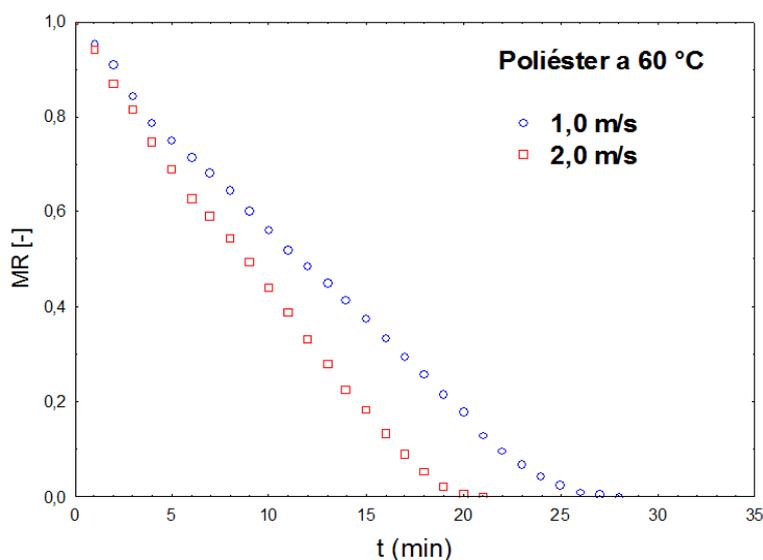
(b)

Fonte: Autor, (2016).

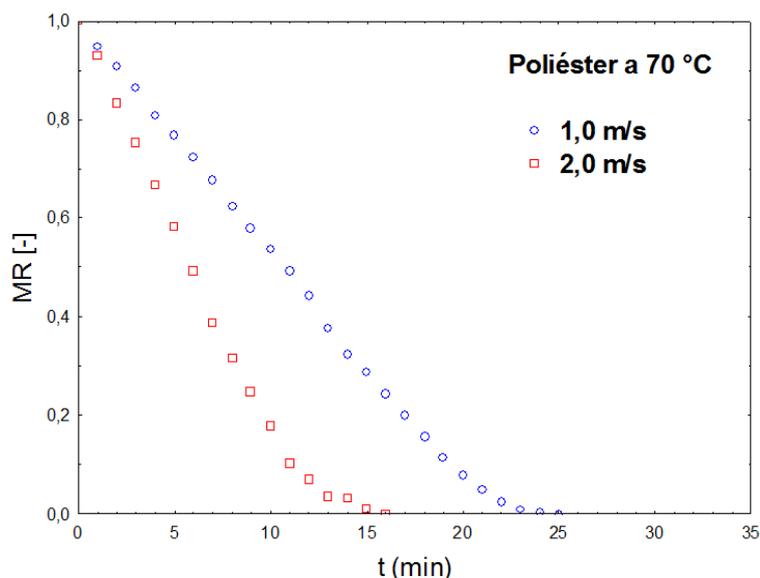
Para a condição ilustrada, os desvios observados foram pequenos, em média de $\pm 0,004$, e confirmam a boa reprodutibilidade dos dados experimentais. As análises foram efetuadas com base nos valores médios das repetições.

Avaliou-se a influência da adição de um escoamento forçado de ar no transporte de calor e massa durante a secagem do tecido de poliéster. Para verificar o efeito da velocidade do ar de secagem neste material, são mostradas nas Figuras 4.19(a) e (b), curvas de razão de umidade em função do tempo parametrizada na velocidade do ar de secagem a uma temperatura constante.

Figura 4. 20- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem parametrizada na velocidade para o tecido de poliéster, nas temperaturas de 60 (a) e 70 °C (b).



(a)



(b)

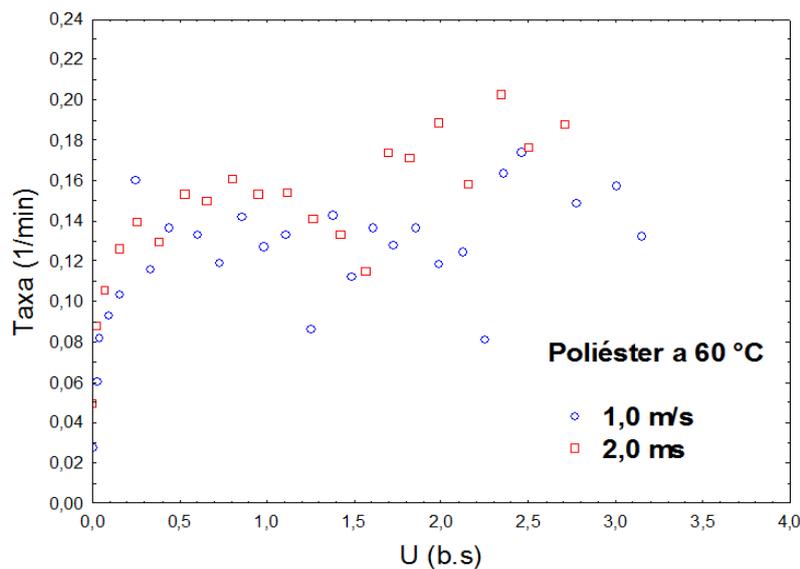
Fonte: Autor, (2016).

Nota-se que a umidade diminui linearmente com o aumento do tempo, em praticamente todo o tempo de secagem, repetindo o comportamento observado na secagem em estufa de convecção natural. Com a adição do escoamento, os tempos de secagem sofreram redução significativa: a 60 °C, o tempo de secagem em estufa foi de aproximadamente 60 min, e para a mesma temperatura o tempo foi reduzido em cerca de 26 min com escoamento a 1,0 m/s, e 20 minutos com escoamento a 2,0 m/s. Como já foi demonstrado, esta secagem é controlada pela resistência superficial e portanto a velocidade de escoamento influencia fortemente o processo. Sabe-se que o aumento da velocidade de escoamento ocasiona a diminuição da espessura da camada limite formada na superfície do sólido e o aumento do gradiente de concentração, logo, o coeficiente de transferência de massa aumenta e diminui a resistência interfacial ao transporte de massa. Com isto, aumenta a taxa de evaporação de água.

Na Figura 4.21 são mostrados os dados de taxa de secagem em função da umidade para as condições operacionais da Figura 4.20 (a), visando ilustrar o comportamento das taxas. Observa-se que os dados de secagem apresentam elevada dispersão, que dificulta inclusive a visualização do efeito da velocidade do ar na secagem. A dispersão elevada é resultado da estimativa das taxas serem baseadas no cálculo de derivadas, e erros pequenos na determinação da umidade em função do tempo tendem a ser ampliados na estimativa das taxas. Em geral, a dispersão foi mais acentuada nos ensaios efetuados no túnel de convecção forçada, em que as condições

dos experimentos estavam mais sujeitas a erros experimentais, no que na secagem em estufa, em que as condições são mais controladas. Nota-se na figura, que fica caracterizado o período de taxa constante do início até praticamente o final da secagem do tecido. As taxas decrescentes são observadas para umidades abaixo de 0,4. Este mesmo comportamento foi observado para as demais condições analisadas.

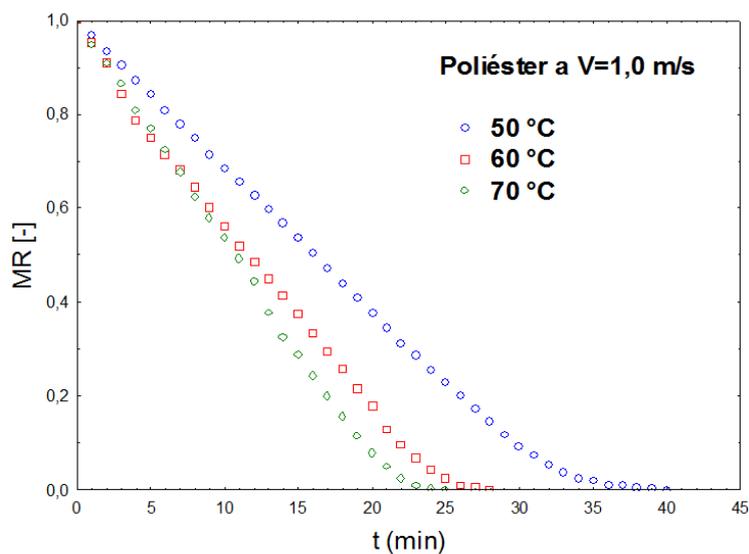
Figura 4. 21- Taxa de secagem em função da umidade em base seca nas velocidades avaliada.



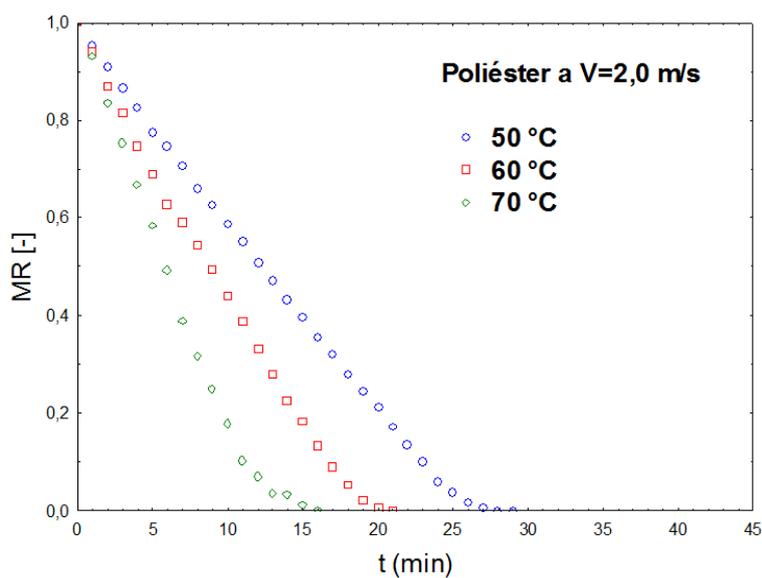
Fonte: Autor, (2016).

Para avaliar o efeito do aumento da temperatura do ar na secagem com convecção forçada, nas Figuras 4.22 (a) e (b) são mostradas a curva de adimensional de umidade em função do tempo nas condições de 1,0 e 2,0 m/s respectivamente, para o tecido de poliéster.

Figura 4. 22- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem, parametrizadas na temperatura para o tecido de poliéster, nas velocidades de 1,0 (a) e 2,0 m/s (b).



(a)



(b)

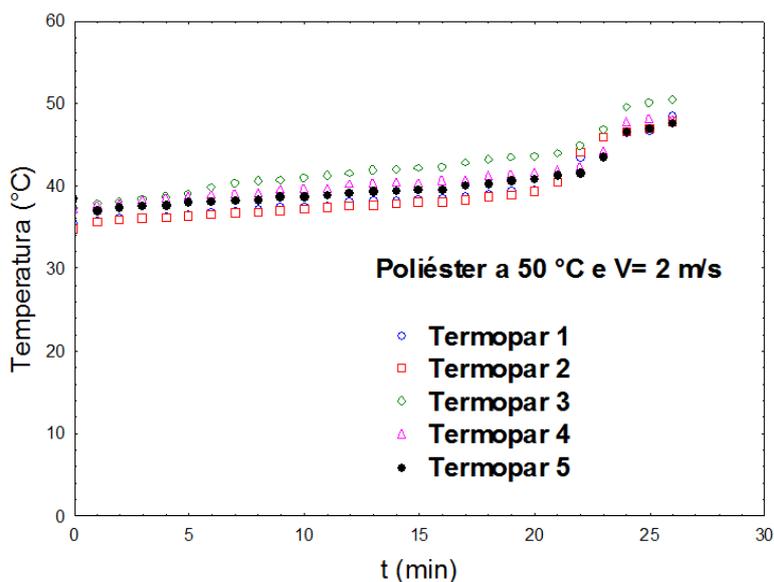
Fonte: Autor, (2016).

A partir das Figuras 4.22 (a) e (b), é possível observar que o aumento de temperatura do ar, mantendo-se a velocidade do ar constante, também contribui para o aumento da velocidade de secagem. Aumentando a velocidade de 50 para 70 °C a uma velocidade de 1,0 m/s, a diminuição no tempo de secagem foi de aproximadamente 38 %, e na velocidade de 2,0 m/s nessas mesmas temperaturas, obteve-se uma redução no tempo de secagem de aproximadamente 45 %. Nota-se também que o efeito da

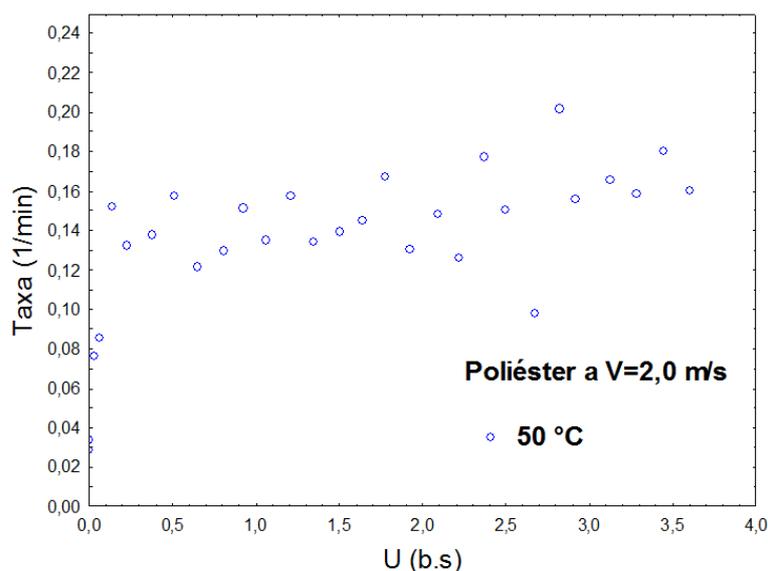
temperatura tende a ser maior no final da secagem, quando o mecanismo de remoção de água superficial passa a dar lugar à remoção da água que se encontra no interior do material.

Foram feitos ensaios para obter a variação da temperatura em diferentes posições das amostras durante a secagem. Nas Figuras 4.23 (a) e (b) são mostrados respectivamente, os resultados típicos deste comportamento e a taxa de secagem em função da umidade obtidos em condições idênticas de temperatura e velocidade do ar. Os termopares foram posicionados segundo o esquema mostrado na Figura 3.6, sendo os termopares 1 e 2 localizados na parte frontal da amostra (em relação ao escoamento do ar), os termopares 3 e 4 na parte traseira e o termopar 5 no centro geométrico.

Figura 4. 23- Curva de temperatura em função do tempo de secagem do poliéster na condição de 50 °C e velocidade de 2m/s (a) e taxa de secagem em função da umidade na mesma condição (b).



(a)



(b)

Fonte: Autor: (2016).

Inicialmente avaliou-se a variação da temperatura registrada pelo termopar localizado na posição 5, que está posicionado no centro da amostra e pode ser considerado como um indicativo do comportamento da sua temperatura média. Nota-se, na Figura 4.23 (a), que no início da secagem a temperatura do material registrada é inferior a da temperatura do ar de secagem, o que é consistente com o fenômeno de resfriamento evaporativo, em que a temperatura do sólido diminui em razão das trocas simultâneas de calor e massa. Do instante inicial até um tempo de aproximadamente 23 minutos, a temperatura aumenta muito lentamente, de 36 °C no instante inicial até cerca de 40 °C. Este período corresponde ao período de taxa de secagem constante, observado na Figura 4.23 (b). No final da secagem, quando as taxas passam a apresentar tendência decrescente, a temperatura do sólido aumenta de forma significativa, até atingir cerca de 50 °C, ou seja a temperatura de equilíbrio com a ar. Assim, a variação da temperatura corrobora o comportamento descrito anteriormente, e mostrou-se consistente com os fenômenos observados. Observa-se também na Figura 4.23 (a) que a distribuição de temperatura na superfície do sólido mostra-se bem uniforme no início da secagem (tempos inferiores a 5 min), em que os valores nas diferentes posições (1 a 4) são bem próximos. A variação, contudo, tende a se acentuar ao longo do tempo, e no final do período de taxa constante os valores entre os termopares situados nas posições 1 a 4 atingem diferenças de até 4 °C.

Para a determinação dos valores de umidade crítica, foi utilizado novamente o a metodologia baseada nas curvas de Krischer, já descrita. Na Tabela 4.8 são mostrados os valores de umidade crítica para o tecido de poliéster. Nota-se que a umidade crítica mostrou tendência de diminuição com o aumento da temperatura e com o aumento da velocidade, sendo que o efeito da velocidade foi mais expressivo do que o efeito da temperatura.

Tabela 4. 8- Valores de umidade crítica estimadas para o tecido de poliéster.

Temperatura (°C)	V (m/s)	X_{cr}
50	1,0	0,43
60	1,0	0,39
70	1,0	0,34
50	2,0	0,30
60	2,0	0,26
70	2,0	0,20

Fonte: Autor, (2016).

No período de taxa de secagem constante, que se mostrou significativo para todas as condições avaliadas na secagem de poliéster, a taxa de secagem pode ser estimada a partir das Equações (2.1) e (2.2), conforme descrito na seção 3.5.1. Assumindo que a correlação para o cálculo do coeficiente convectivo médio de transferência de massa em uma placa plana com superfície lisa pode ser aplicada na secagem do tecido. Em todas as condições experimentais, os valores de números de Reynolds foram inferiores a $3,0 \times 10^5$, portanto, na Equação (2.2) foram usados os coeficientes para escoamento em regime laminar. O número de Nusselt mássico foi calculado com base na Equação (2.2), com as propriedades físicas na temperatura de filme, e a taxa de transferência de massa foi estimada pela Equação (2.1), assumindo-se que a corrente de ar tem concentração de vapor igual a zero usando como área de referência o valor nominal calculado com base nas dimensões das amostras. Os resultados experimentais e estimados são mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4. 9- Taxas de transferência de massa experimentais e estimadas para o período de secagem à taxa constante no tecido de poliéster.

T (°C)	V (m/s)	NA (gH ₂ O/min)	NA' (gH ₂ O/min)	Desvio (%)
50	1,0	0,12	0,21	42
50	2,0	0,16	0,37	57
60	1,0	0,15	0,30	50
60	2,0	0,20	0,42	55
70	1,0	0,16	0,32	49
70	2,0	0,24	0,28	18

Fonte: Autor, (2016).

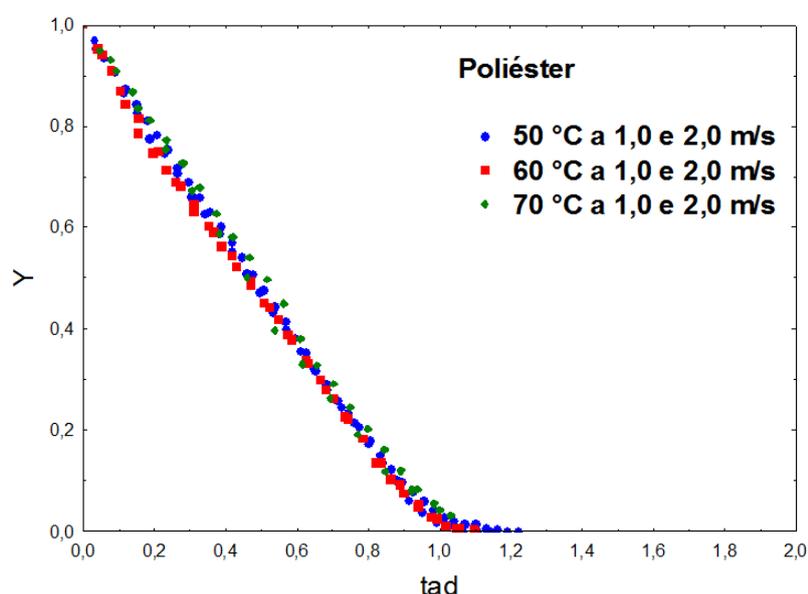
Os valores experimentais são sempre inferiores aos estimados, em média os erros são da ordem de 50 %. Além das incertezas experimentais envolvidas nas diversas medidas, várias suposições admitidas na obtenção da Equação (2.1) não são observadas na condição real. Entre elas, pode-se citar: **(i)** as taxas de transferência são significativas e a consideração de que o processo de transferência de massa não afeta os perfis de velocidade na camada-limite hidrodinâmica possivelmente não se aplica; **(ii)** foi verificado experimentalmente que a temperatura na superfície do sólido varia com a posição durante parte significativa da secagem, e portanto a superfície não é isotérmica. Por fim, **(iii)** o uso da área nominal, calculada com base nas dimensões do tecido, possivelmente não é adequada para caracterizar a superfície real de troca disponível para as transferências de calor e massa. Isto porque a superfície do tecido é bastante irregular, pelo fato de ser formada por um conjunto de fibras, como pode ser observado nas fotos das Figuras 4.1 e 4.2. De fato, a área real de transferência de massa é um dado difícil de ser determinado, pois depende das características do tecido. Assim, embora a equação (2.1) possa ser utilizada para se obter uma estimativa do limite superior de taxa em que é possível remover água, ela não é adequada para a estimativa dessas taxas.

Deve-se considerar também, que erros experimentais na medida da temperatura na superfície do sólido podem levar a diferenças expressivas na estimativa da concentração de vapor de saturação e, portanto, nas taxas calculadas. Isto pode explicar, por exemplo, o fato de que a taxa estimada na temperatura de 70 °C e 2,0 m/s é inferior aos valores estimados a 50 e 60 °C nesta mesma velocidade, o que não é consistente fisicamente. Qualitativamente, o comportamento fisicamente esperado é um aumento

das taxas com o aumento da temperatura e velocidade do ar, o que foi observado em todos os outros casos, exceto nesta condição em particular.

Visando obter uma equação empírica que permita a estimativa das taxas de secagem do tecido de poliéster, os dados cinéticos foram adimensionalizados com base na metodologia proposta por Keeey (1972) apresentada no item 3.5.2, e aplicada por Motta Lima, Pereira e Mendes, (2003) para a secagem de papel, com o propósito de reunir os dados das três temperaturas (50, 60 e 70°C) e duas velocidades (1,0 e 2,0 m/s) em curvas únicas.

Figura 4. 24- Curvas generalizadas para o tecido de poliéster.



Fonte: Autor, (2016).

A Figura 4.24 mostra que a metodologia permitiu agrupar os dados cinéticos na secagem de poliéster, ficando bem caracterizado o período de taxa constante até um tempo adimensional de aproximadamente 0,98. Posteriormente realizou-se o ajuste dos dados adimensionalizados às Equações (2.5), (2.6) e (2.7), e os parâmetros estimados, coeficientes de correlação e soma dos quadrados dos resíduos são apresentados na Tabela 4.10.

Observa-se através da Figura 4.25 (a), que apesar do coeficiente de correlação ser elevado, o ajuste dos dados não foi bom, sendo que ele superestima os dados no início e também no final da secagem. A equação de Page é uma função exponencial, que acrescenta um parâmetro adicional n à equação de Lewis, que possui um único

parâmetro k . Na secagem do poliéster, a resistência ao transporte de umidade no interior do material mostrou-se desprezível, e a umidade variou linearmente em função do tempo ao longo de praticamente todo o processo. Neste caso, um ajuste linear simples, que assume que a taxa de secagem é proporcional à diferença de concentração entre a superfície do material e a concentração de equilíbrio é mais adequado para descrever o processo, e o parâmetro k é definido como a taxa de secagem, sendo assim, foi testado um ajuste usando uma função linear. Por apresentar um ótimo ajuste do R^2 e menores valores de SQR, cerca de 0,99 e 0,285 respectivamente, a equação de Page (1949) nessa forma, foi a que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais. O parâmetro ajustado, k , foi obtido um valor de 0,91

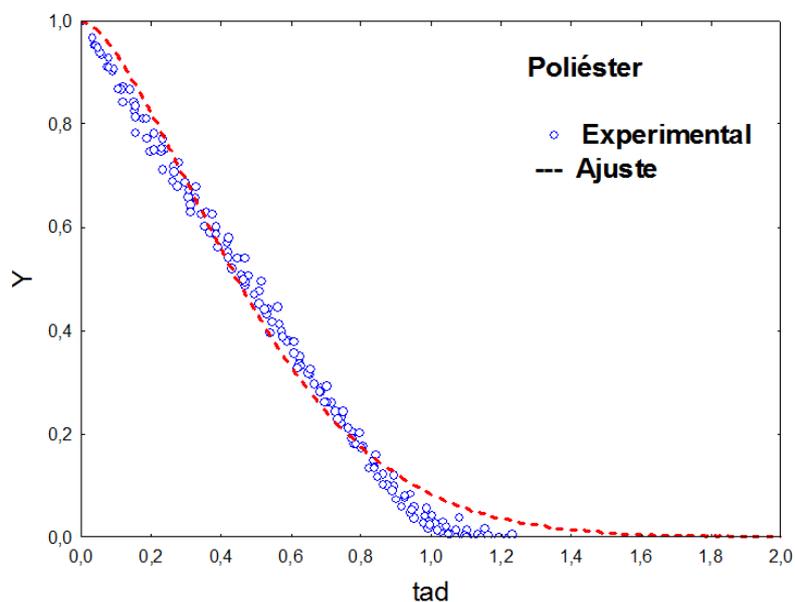
Na Figura 4.24 (a) pode ser visualizado o ajuste desta equação aos dados.

Tabela 4. 10-Parâmetros ajustados e critérios estatísticos obtidos no ajuste de equações empíricas para o tecido de poliéster.

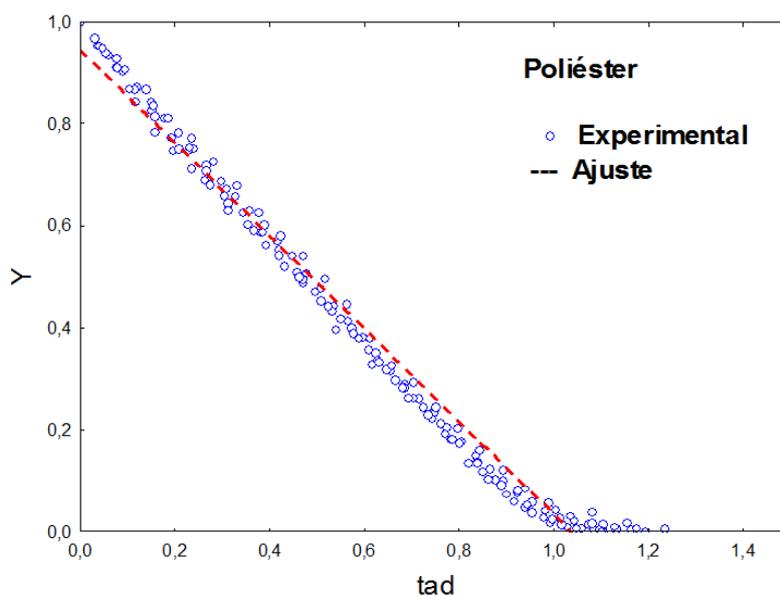
Equação	Parâmetro	Valores
Page (1949)	k	2,48
	n	1,58
	R^2	0,99
	SQR	0,25
Lewis (1921)	k	1,82
	R^2	0,96
	SQR	1,08
Overhultz et al., (1973)	k	1,34
	n	1,34
	R^2	0,96
	SQR	1,18

Fonte: Autor, (2016).

Figura 4. 25- Ajuste da curva generalizada de secagem pela equação de Page (1949): (a) função exponencial e (b) linear para o tecido de poliéster.



(a)

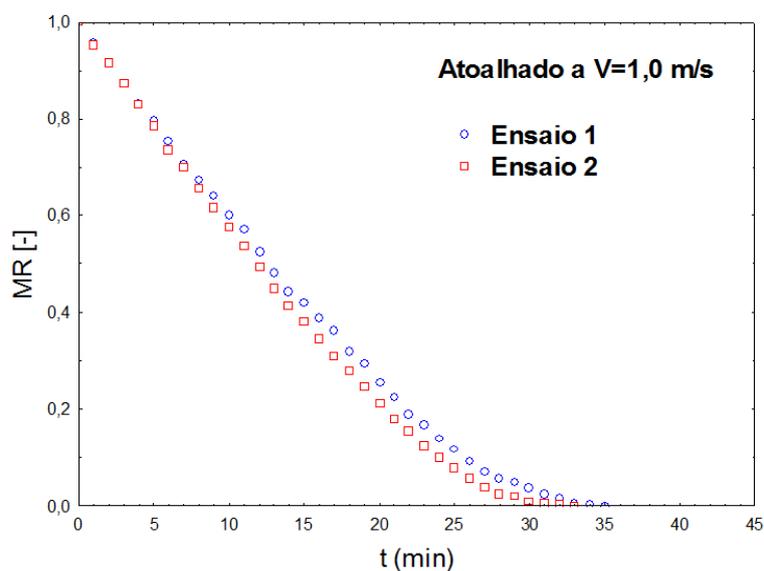


(b)

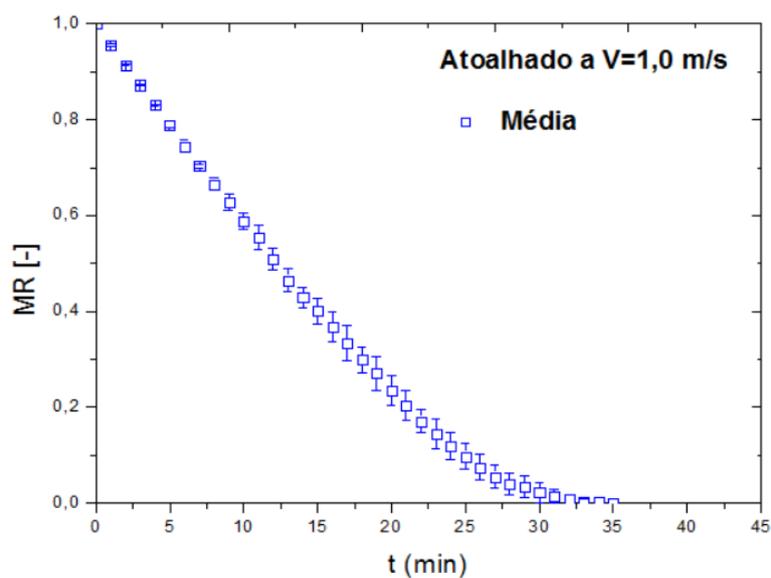
Fonte: Autor, (2016).

A seguir, são analisados os resultados obtidos na secagem do algodão atalhado. A boa reprodutibilidade dos ensaios pode ser observada nas Figuras 4.26, em que são mostrados os dados de um ensaio e réplica a 50 °C e 1,0 m/s (Figura 4.26 a), que ilustra um comportamento típico. Os valores médios com a indicação dos desvios são mostrados na Figura 4.26 (b). O desvio padrão entre as curvas, foi em média de $\pm 0,007$ e na condição de 50 °C e 2,0 m/s, o desvio em média foi de $\pm 0,03$.

Figura 4. 26-- Umidade adimensional em função do tempo (ensaio e repetição) a 50 °C e 1,0 m/s (a); valores médios e desvios (b) para o tecido atalhado.



(a)

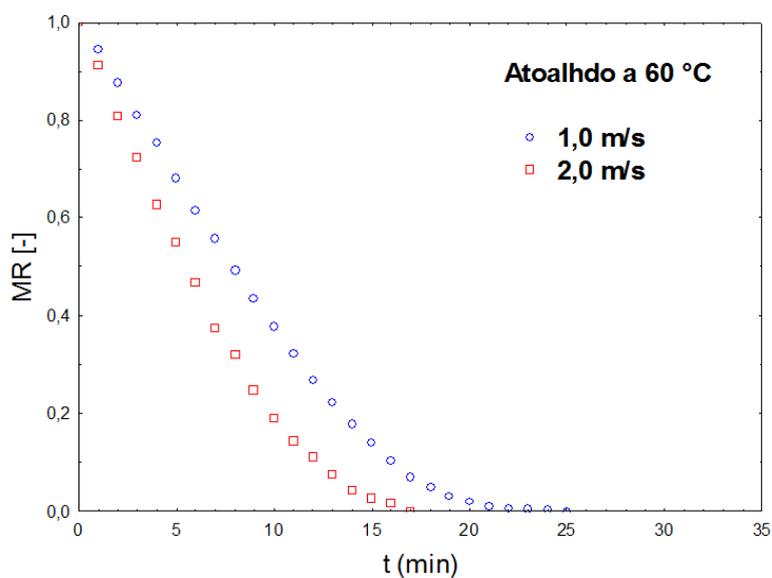


(b)

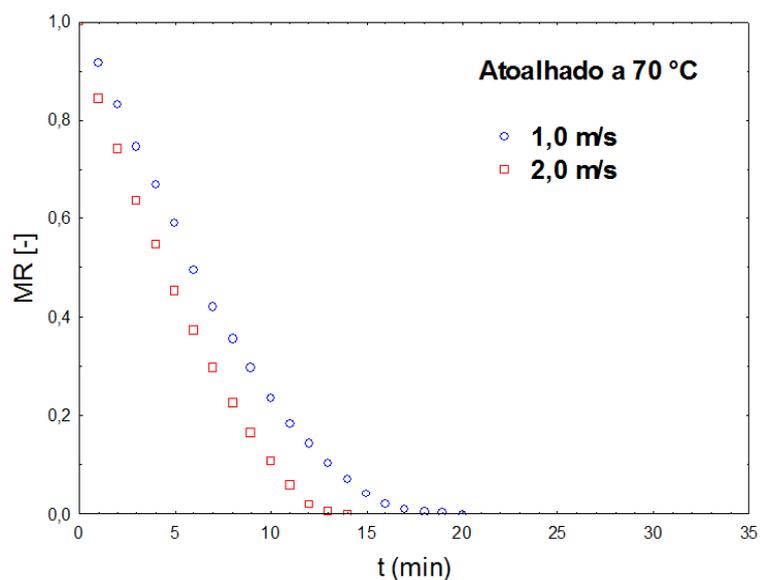
Fonte: Autor, (2016).

Nas Figuras 4.27 (a) e (b), são mostradas curvas de umidade adimensional em função do tempo em duas diferentes temperaturas, para a avaliação do efeito de velocidade na secagem do tecido de algodão do tipo atalhado.

Figura 4. 27- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem parametrizadas na velocidade, para o tecido de atalhado nas temperaturas de 60 (a) e 70 °C (b).



(a)



(b)

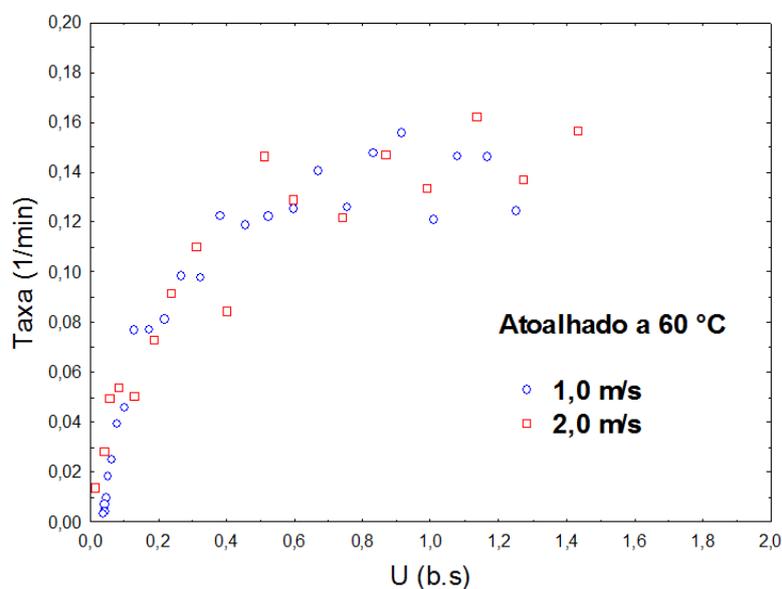
Fonte: Autor, (2016).

O comportamento qualitativo da secagem do tecido atalhado foi similar ao observado na secagem do poliéster. Também neste caso pode-se observar o decréscimo linear da umidade em função do tempo, na maior parte do tempo de secagem e o aumento da velocidade favoreceu o processo. Na secagem em estufa a 60 °C, o tempo de secagem do tecido atalhado foi de aproximadamente 45 min, e para essa mesma

temperatura o tempo foi reduzido para cerca de 25 min com escoamento a 1,0 m/s e para 17 minutos com escoamento a 2,0 m/s. O efeito da velocidade na taxa de secagem foi menos acentuado na temperatura de 70 °C, mas também neste caso, o tempo foi reduzido em cerca de 30 % (de 18 para 13 minutos) com o aumento da velocidade. As justificativas para este comportamento são as mesmas apresentadas na discussão da secagem de poliéster. Este mesmo padrão de comportamento se reproduziu para as demais condições avaliadas.

Na Figura 4.28, são mostrados dados de taxas de secagem em função da umidade para a secagem na temperatura de 60 °C, nas duas velocidades avaliadas.

Figura 4. 28- Taxa de secagem em função da umidade em base seca nas velocidades avaliadas.

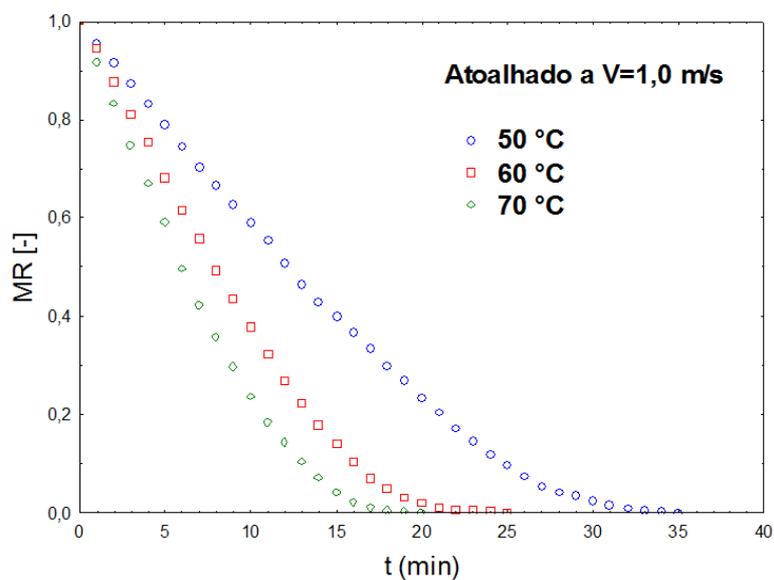


Fonte: Autor, (2016).

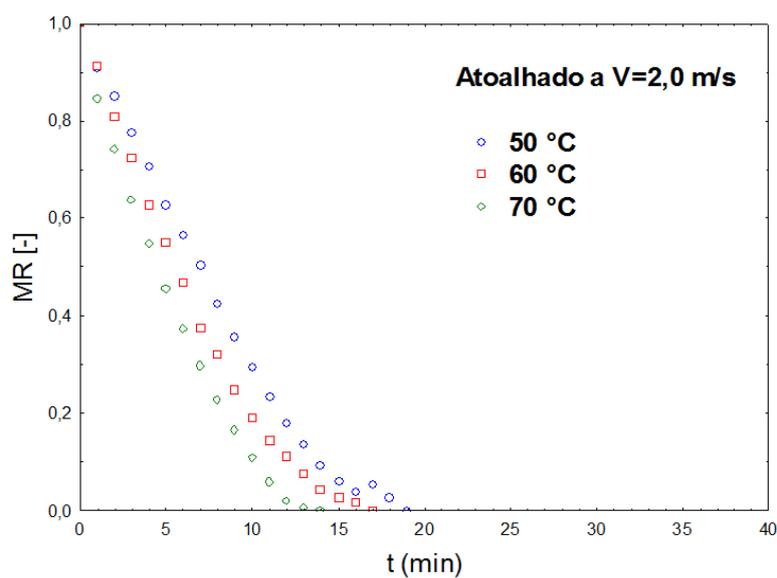
É possível identificar o período de taxa constante seguido do período decrescente em ambas às curvas. Novamente os dados apresentaram elevada dispersão, particularmente a 2,0 m/s, o que também foi observado na secagem do poliéster na velocidade mais alta (Figura 4.22 b).

O efeito da temperatura do ar na secagem pode ser observado nas curvas mostradas nas Figuras 4.29 (a) e (b).

Figura 4. 29- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem, parametrizadas na temperatura para o tecido atalhado, nas velocidades de 1,0 (a) e 2,0 m/s (b).



(a)



(b)

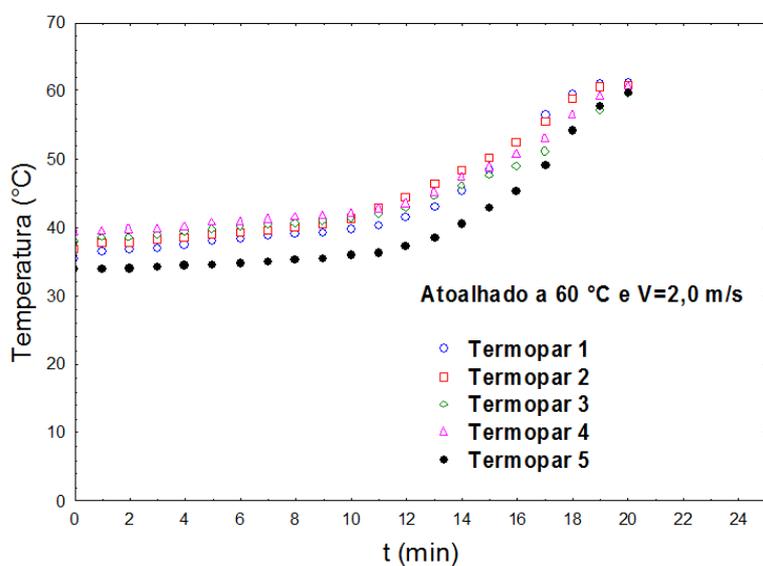
Fonte: Autor, (2016).

Através das Figuras 4.29 (a) e (b), é possível verificar que o efeito da temperatura também é perceptível, com uma redução do tempo de secagem quando a temperatura aumentou. Para a secagem a 1,0 m/s, o tempo de secagem diminuiu de 35 min a 50 °C para 21 min a 70 °C. Na secagem a 2,0 m/s o efeito da temperatura foi pequeno. De modo geral, a influência da temperatura na taxa de secagem é menor do

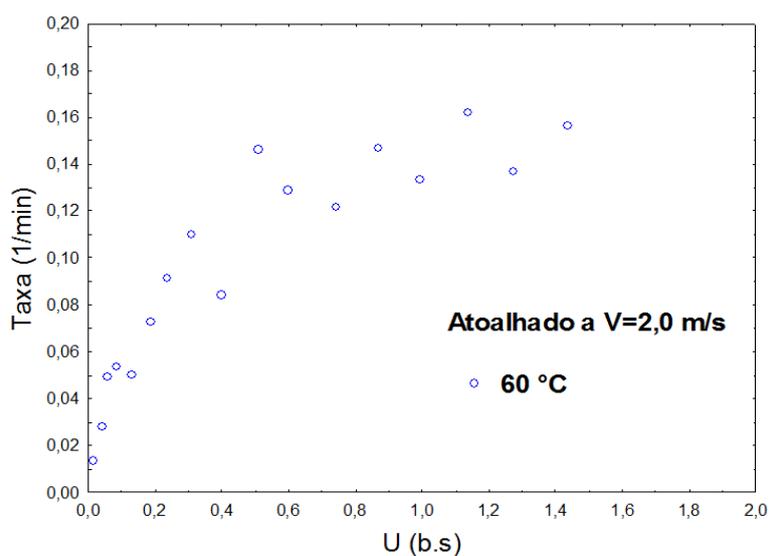
que a influência da velocidade, o que é consistente com o fato do processo ser controlado pela resistência interfacial e não pelo transporte de umidade no interior do material.

Os dados referentes às medidas da distribuição de temperaturas em função do tempo são mostrados na Figura 4.30 (a), e (b) são mostradas as taxas de secagem para esta condição.

Figura 4. 30- Curva de temperatura em função do tempo de secagem (a) na condição de 60 °C e velocidade de 1,0 m/s e taxa de secagem em função da umidade em base seca parametrizada na temperatura (a) para o tecido de algodão do tipo atalhado.



(a)



(b)

Fonte: Autor, (2016).

O tempo total de secagem do tecido atoalhado com o ar a 60 °C e 2,0 m/s é de aproximadamente 17 min (Figura 4.28 b). Baseando-se na Figura 4.29 (a) a variação da temperatura do termopar localizado na posição central do tecido (termopar 5), observa-se que a temperatura ar se mantém aproximadamente constante em um valor de 35°C até um tempo de 10 min, e a partir deste tempo apresenta tendência de aumento, primeiro gradual e depois mais acentuada, até atingir a temperatura de equilíbrio com a do ar, em cerca de 19 min. O período de aumento da temperatura coincide com o tempo em que a secagem ocorre à taxa decrescente, para umidades inferiores a 0,40 (b.s.) (Figura 4.28 b). No período de secagem a taxa constante a energia do fluido é usada apenas para a evaporação da água, enquanto no período à taxa decrescente, parte da energia é usada no aquecimento do material. Pode-se notar também que os valores medidos nos diferentes termopares diferem em cerca de 4,0 °C entre as diferentes posições. O comportamento mostrado na Figura 4.29 é representativo das demais condições avaliadas.

Para a determinação dos valores de umidade crítica, foi aplicado o método das curvas de Krischer, e os valores são apresentados na Tabela 4.6.

Nota-se na Tabela 4.11 que a umidade crítica diminui com o aumento da velocidade do ar, porém o aumento da temperatura teve pouca influência nos valores estimados.

Tabela 4. 11- Valores de umidade crítica determinadas através das curvas de Krischer para o tecido atoalhado.

Temperatura (°C)	V (m/s)	X_{cr}
50	1,0	0,35
60	1,0	0,27
70	1,0	0,26
50	2,0	0,24
60	2,0	0,24
70	2,0	0,19

Fonte: Autor, (2016).

Na Tabela 4.12 é mostrada a comparação entre as taxas observadas no período de secagem à taxa constante e os valores estimados pelas Equações (2.1) e (2.2),

segundo procedimento já descrito para o poliéster. Observa-se novamente que os valores estimados pelas equações são muito superiores aos obtidos experimentalmente, e que os desvios observados são em geral da ordem de 40 a 50%, assim como os obtidos na secagem do poliéster. A análise anterior, de que a área nominal utilizada no cálculo das taxas não descreve a área real da superfície dos tecidos também se aplica a este caso, já que o comportamento dos dois tecidos na secagem apresentou muitas similaridades, apesar das diferenças de espessura, gramatura e características superficiais.

Tabela 4. 12- Taxas de transferência de massa experimentais e estimadas para o período de secagem à taxa constante no tecido atoalhado.

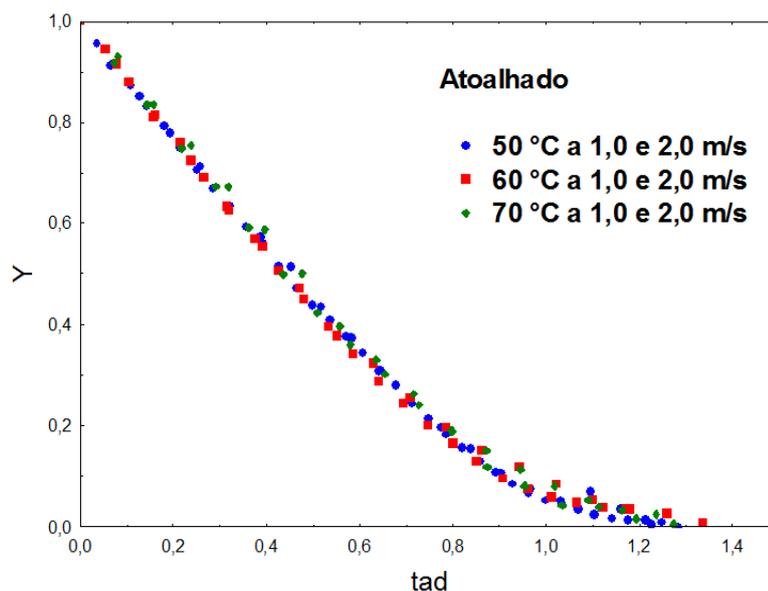
T (°C)	V (m/s)	NA (gH ₂ O/min)	NA' (gH ₂ O/min)	Desvio (%)
50	1,0	0,12	0,21	44
50	2,0	0,19	0,33	43
60	1,0	0,10	0,23	46
60	2,0	0,22	0,38	42
70	1,0	0,17	0,24	27
70	2,0	0,32	0,63	49

Fonte: Autor, (2016).

A partir dos resultados apresentados da cinética de secagem do tecido atoalhado, também foi aplicada a metodologia das curvas generalizadas nas condições de 50, 60 e 70 °C a 1,0 e 2,0 m/s. Os dados foram ajustados às Equações 3.6 e 3.7. Na Figura 4.31 são mostradas as curvas generalizadas para o tecido atoalhado.

Nota-se que o comportamento linear é observado até um tempo adimensional de aproximadamente 0,8, ligeiramente inferior ao obtido para o tecido de poliéster.

Figura 4. 31- Curva generalizada do tecido de algodão do tipo atoalhado.



Fonte: Autor, (2016).

Os parâmetros ajustados e critérios estatísticos para avaliar o ajuste são mostrados na Tabela 4.13. Dentre as equações testadas, a que melhor se ajustou aos dados experimentais, com coeficiente de correlação (R^2) mais próximo à unidade e menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR), foi a equação de Page. Os valores dos parâmetros k e n (2,40 e 1,47) são próximos dos valores ajustados para a secagem de poliéster nas mesmas condições (2,48 e 1,58).

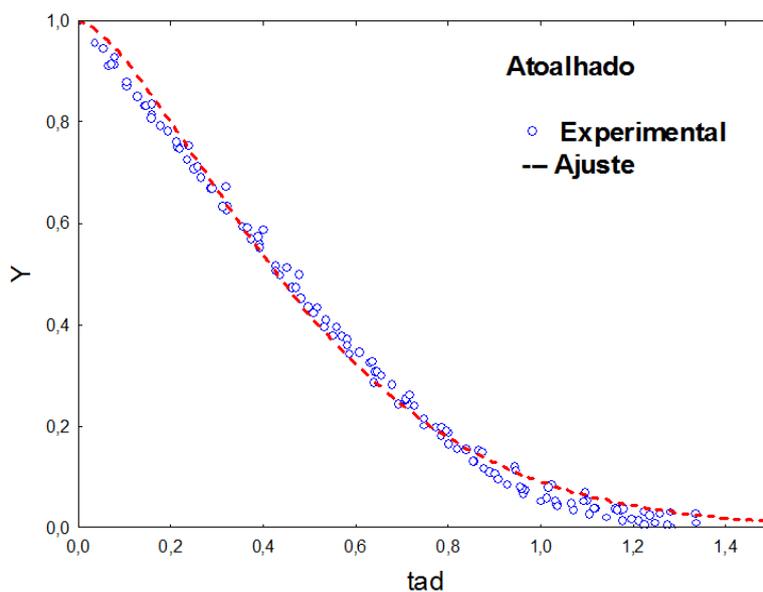
Tabela 4. 13- Parâmetros ajustados e critérios estatísticos obtidos no ajuste de equações empíricas para o tecido atoalhado.

Modelo	Parâmetro	Valores
Page (1949)	k	2,40
	n	1,47
	R^2	0,99
	SQR	0,09
Lewis	k	1,90
	R^2	0,98
	SQR	0,63
Overhultz et al., (1973)	k	1,37
	n	1,37
	R^2	0,98
	SQR	0,63

Fonte: Autor,(2016).

A Figura 4.32 mostra a comparação dos dados experimentais com a equação ajustada, onde pode ser observado o ajuste dos dados. Também neste caso, a equação superestima os dados experimentais no início da secagem e também no final. Porém, na secagem do tecido atoalhado foi observado um período de taxa decrescente mais longo do que na secagem do poliéster (para $0,8 < t_{ad} < 1,4$), o ajuste da equação foi superior, o que é evidenciado pelos menores valores de SQR.

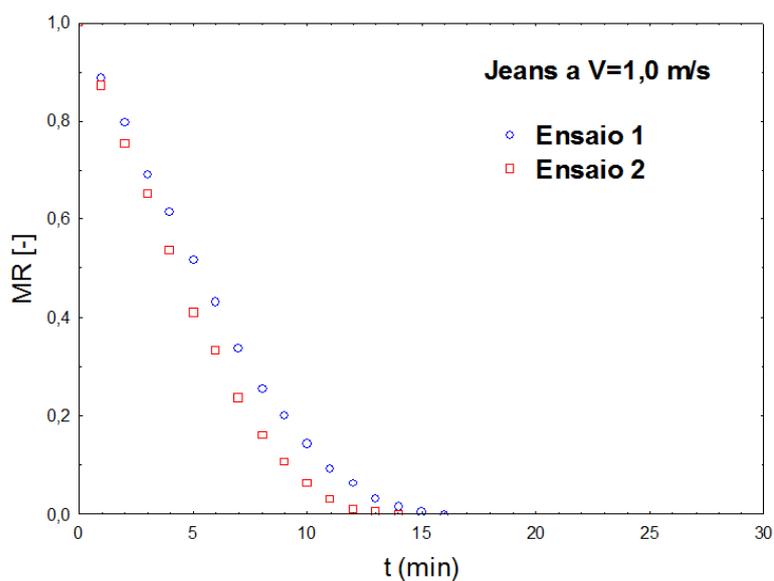
Figura 4. 32- Valores experimentais e ajustados pela equação de Page para o tecido atalhado.



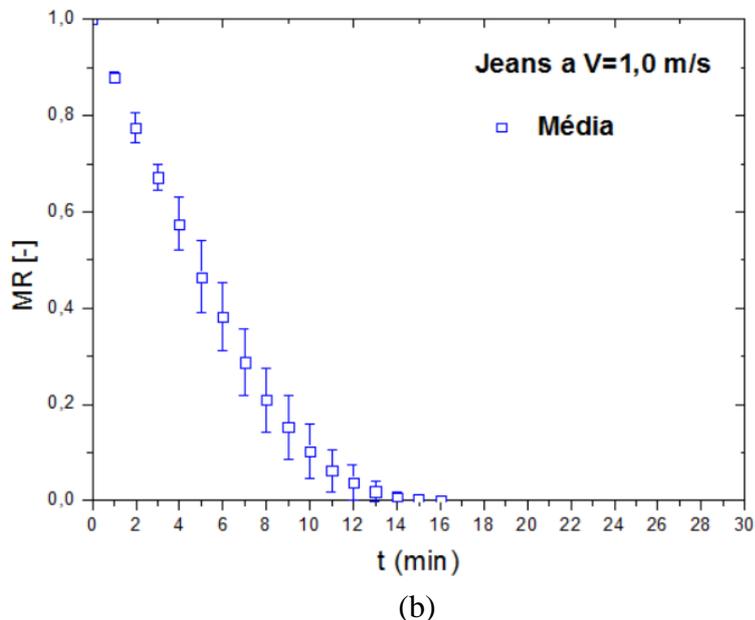
Fonte: Autor, (2016).

Na Figura 4.33 são apresentados os dados uma cinética de secagem e sua repetição (a), e a média dos valores dos ensaios (b), para a condição de 70°C e ,1,0 m/s, escolhida aleatoriamente.

Figura 4. 33- Umidade adimensional em função do tempo (ensaio e repetição) a 70 °C e 1,0 m/s (a); e valores médios (b) para a secagem de tecido de algodão do tipo jeans.



(a)

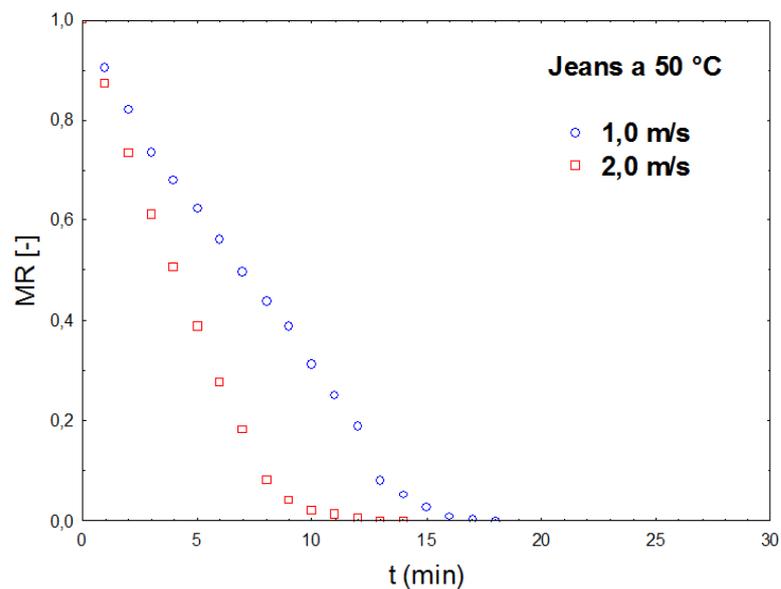


Fonte: Autor, (2016).

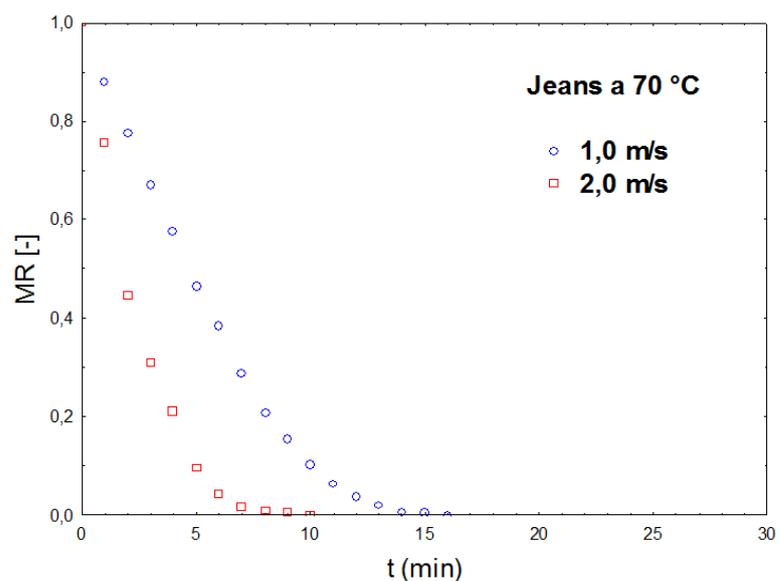
Para os dados da Figura 4.33, os desvios entre ensaio e a repetição foram em média de $\pm 0,02$, na condição de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $2,0\text{ m/s}$, o desvio em média foi de $\pm 0,010$. Em geral, notou-se que na secagem do tecido jeans os desvios entre ensaio e réplica foram em média superiores aos observados para os demais tecidos. Isto pode estar associado ao fato deste tecido ter a menor umidade inicial entre os tecidos testados (varia de $1,2$ a $1,95\text{ kg H}_2\text{O/kg}$ sólido seco), sendo que o tempo total de secagem era muito curto (entre 13 e 18 min), levando à maiores dificuldades para o registro dos dados e aumentando a incerteza das medidas.

Nas Figuras 4.34 (a) e (b) são mostrados dados cinéticos para a verificação do efeito da velocidade do ar na secagem do tecido jeans.

Figura 4. 34- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem parametrizadas na velocidade para o tecido jeans, nas temperaturas de 50 (a) e 70 °C (b).



(a)



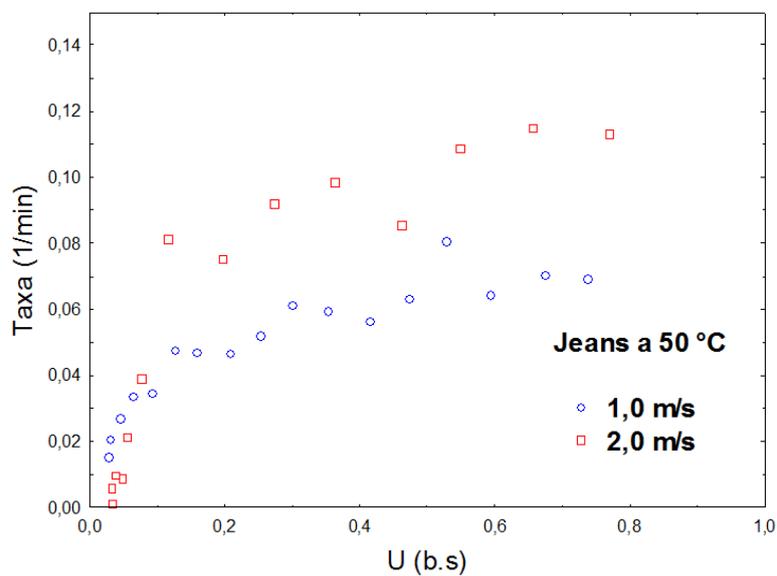
(b)

Fonte: Autor, (2016).

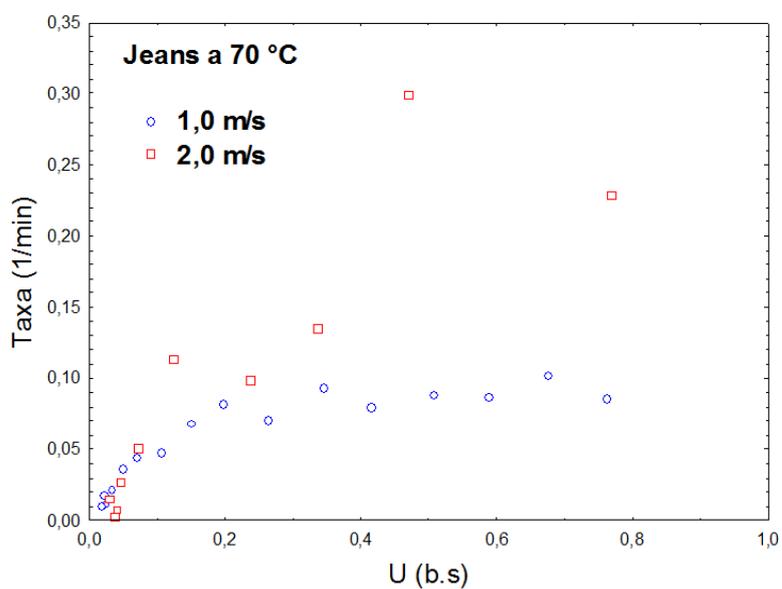
Observa-se nas Figuras 4.34 (a) e (b) o efeito do aumento da velocidade do ar na cinética de secagem, que foi significativo para as duas condições. As cinéticas de secagem apresentadas para esse tecido também mostraram a presença de um período de secagem à taxa constante, como pode ser observado nas Figuras 4.35 (a) e (b), que mostram as taxas de secagem em função da umidade para as condições da Figura 4.34.

Nota-se que como a secagem é rápida, o período de taxa constante nem sempre fica bem evidenciado.

Figura 4. 35- Taxa de secagem em função da umidade em base seca nas velocidades avaliada na temperatura de 50 e 70 °C para o tecido jeans.



(a)

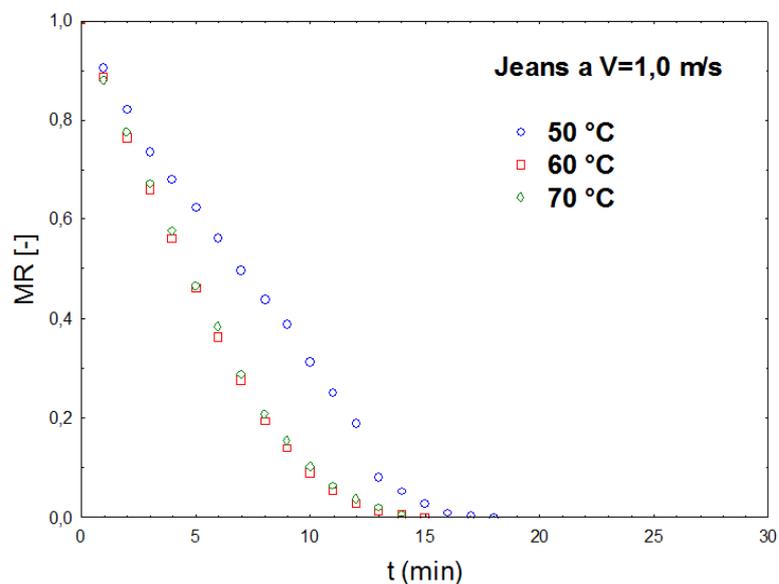


(b)

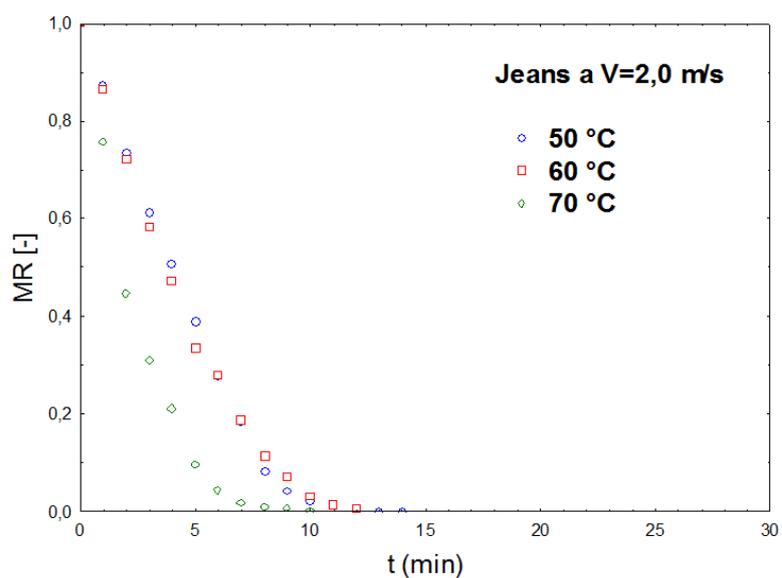
Fonte: Autor, (2016).

O efeito da temperatura na secagem do tecido jeans pode ser observado nas Figuras 4.36 (a) e (b).

Figura 4. 36- Curvas de umidade adimensional em função do tempo de secagem, parametrizadas na temperatura para o tecido de algodão do tipo jeans, nas velocidades de 1,0 (a) e 2,0 m/s (b).



(a)



(b)

Fonte: Autor, (2016).

Observa-se que o efeito da temperatura no processo foi pequeno em comparação com os outros tecidos, e em alguns casos não foi detectado. Por exemplo, na secagem a 1,0 m/s, as curvas de secagem foram similares para as temperaturas de 60 e 70 °C e a 2,0 m/s, foram similares nas temperaturas de 50 e 60 °C. A maior variação foi observada com o aumento de 50 para 70 °C a 2,0 m/s, em que o tempo total de secagem

foi reduzido de 14 para 10 minutos. Em processos controlados pela resistência interfacial, o efeito da temperatura na secagem é muito menos significativo do que o efeito da velocidade. Devido à pequena umidade inicial (em comparação com os outros tecidos), o jeans requer pequena quantidade de energia para a secagem, e o efeito da temperatura tende a ser ainda menos significativo. Assim, a variação em muitos casos ficou dentro das incertezas experimentais.

Para o tecido jeans não foram feitas medidas de distribuição de temperatura na superfície.

Para a determinação da umidade crítica foi adotada também a metodologia baseada nas curvas de Krischer. Na Tabela 4.14 são mostrados os valores de umidade crítica estimados. Observa-se que neste caso não foi observada dependência da umidade crítica em relação às condições de operação. Ressalta-se que como a secagem ocorreu em tempos muito curtos, o número de pontos nas curvas cinéticas era pequeno e apresentava a dispersão característica associada às estimativas das taxas de secagem, o que dificultava o ajuste de uma curva de tendência aos dados experimentais. Assim, a determinação da X_{cr} nos ensaios com tecido jeans envolvia mais incerteza do que para os demais tecidos.

Tabela 4. 14- Valores de umidade crítica determinadas através das curvas de Krischer para o tecido jeans.

Temperatura (°C)	V (m/s)	X_{cr}
50	1,0	0,05
60	1,0	0,15
70	1,0	0,15
50	2,0	0,16
60	2,0	0,14
70	2,0	0,12

Fonte: Autor, (2016).

Na Tabela 4.15, são mostrados os valores estimados e experimentais das taxas de secagem no período de secagem à taxa constante. O padrão observado para os outros 2 tecidos se repetiu, com valores experimentais inferiores aos estimados e desvios da ordem de 50 % em média.

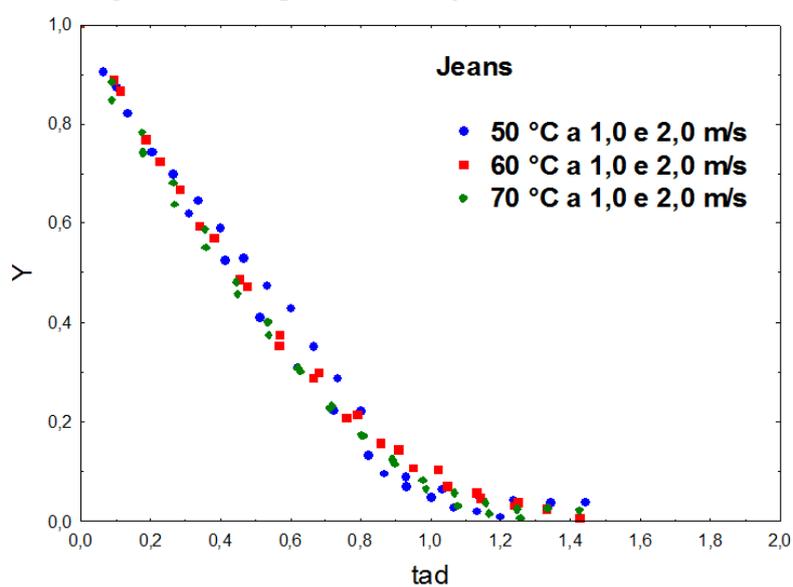
Tabela 4. 15- Taxas de transferência de massa experimentais e estimadas para o período de secagem à taxa constante no tecido jeans.

T (°C)	V (m/s)	NA (gH ₂ O/min)	NA' (gH ₂ O/min)	Desvio (%)
50	1,0	0,12	0,26	52
50	2,0	0,15	0,28	46
60	1,0	0,13	0,23	44
60	2,0	0,27	0,33	20
70	1,0	0,15	0,36	58
70	2,0	0,35	0,31	11

Fonte: Autor, (2016).

Na Figura 4.37 são apresentados os dados arranjados segundo o procedimento para obtenção das curvas generalizadas para o tecido jeans.

Figura 4. 37- Curva generalizada para o tecido jeans.



Fonte: Autor, (2016).

Foi possível representar os dados na forma generalizada, mas nota-se que eles apresentam dispersão maior em comparação às curvas generalizadas dos outros 2 tecidos. O comportamento linear da umidade em relação ao tempo é observado até um tempo adimensional de aproximadamente 0,9, similar ao observado para o tecido atoalhado.

Os parâmetros ajustados aos dados são mostrados na Tabela 4.16. Dentre as equações a 2 parâmetros testadas (Page, 1949 e Overhultz et al., 1973), a equação de Page foi a que apresentou R^2 mais alto e menores valores de SQR. Os valores de k e n ajustados (2,294 e 1,391) também estão próximos dos valores ajustados para os outros 2 tecidos usando esta equação.

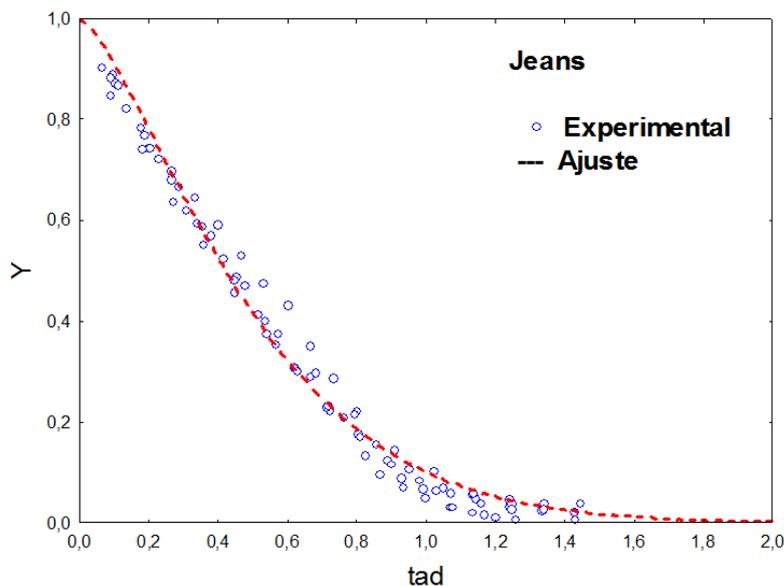
Tabela 4. 16- Parâmetros ajustados e critérios estatísticos obtidos no ajuste de equações empíricas para o tecido jeans.

Modelo	Parâmetro	Valores
Page (1949)	k	2,40
	n	1,47
	R^2	0,99
	SQR	0,09
Lewis	k	1,89
	R^2	0,98
	SQR	0,38
Overhultz et al., (1973)	k	1,37
	n	1,37
	R^2	0,98
	SQR	0,63

Fonte: Autor, (2016).

A comparação entre a equação ajustada e os dados da curva generalizada do tecido jeans são mostradas na Figura 4.38. A qualidade do ajuste foi similar à observada para o tecido atoalhado, também com uma tendência a superestimar os dados no início e no final da secagem.

Figura 4. 38- Valores experimentais e ajustados pela equação de Page para o tecido jeans.



Fonte: Autor, (2016).

4.2.3 Análise comparativa da secagem dos tecidos

Na Tabela 4.17 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos para os 3 tecidos. Para uma comparação quantitativa do consumo energético para evaporação da água em cada tecido, foi estimada a potência consumida para reduzir a umidade em 20 % do valor inicial, em cada condição avaliada, e os resultados também estão na Tabela 4.17. Foram também incluídos os dados de umidade crítica, razão entre o tempo de secagem a taxa constante e tempo total de secagem, a taxa experimental de secagem no período constante e a umidade inicial (média) dos tecidos.

Observa-se as umidades iniciais dos tecidos são muito diferentes entre si, sendo que os maiores valores são para o poliéster, seguido pelo tecido atoalhado e o jeans. Em condições idênticas de temperatura e velocidade, os tempos totais de secagem refletiram estas diferenças, sendo maiores para o poliéster e tecido atoalhado, e menores para o jeans. Quando se avalia a potência consumida, as diferenças entre as condições não são expressivas e não foi possível identificar uma tendência de comportamento. Constata-se, porém, que para os três tecidos o menor consumo ocorreu, em geral, na secagem a 70°C.

O período de secagem a taxa constante foi observado em no mínimo 80% do tempo de secagem do poliéster, enquanto para o tecido atoalhado este período foi em média maior do que 75% e para o jeans foi em média maior do que 60%. Este

comportamento é consistente com as características destes tecidos, já que a fibra de poliéster é a que absorve menos água e a secagem se dá praticamente por evaporação de água livre. As fibras de algodão possuem maior capacidade de absorção, mas o período de secagem a taxa constante também foi predominante para estes tecidos, porque os materiais oferecem pequena resistência interna ao transporte de umidade, já que o volume e espessura dos tecidos são muito pequenos, assim como o diâmetro das fibras. Assim, a resistência ao transporte de umidade do interior do material para a superfície é pequena.

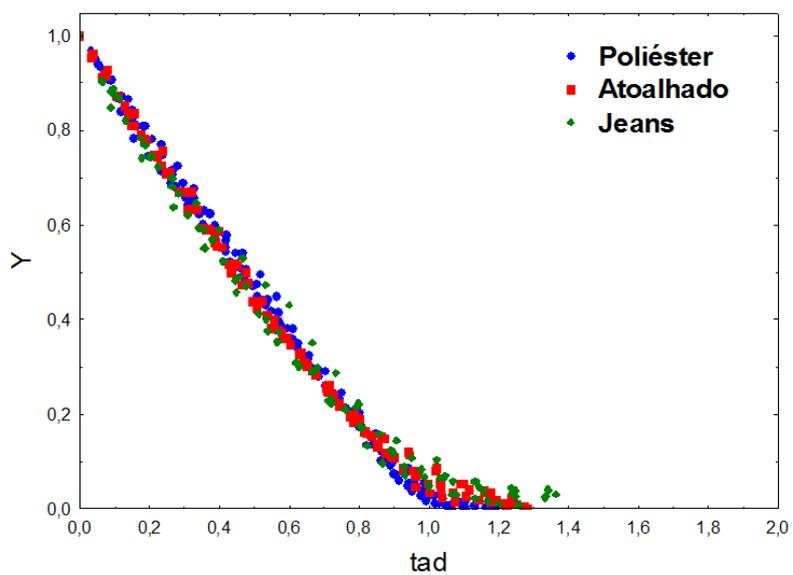
As taxas de secagem no período a taxa constante, no qual predomina a evaporação da água superficial, foram similares para os três tecidos. Embora os tecidos apresentem arranjo de fibras, espessura e gramatura diferentes, essas variáveis não apresentaram influência significativa no processo de secagem nesta condição, sugerindo que, para materiais com elevada razão entre a área superficial e o volume, as condições do escoamento são determinantes para a secagem, e as características superficiais do material têm pouco efeito sobre as taxas. As curvas generalizadas dos 3 tecidos foram reunidas em um único gráfico de umidade adimensional em função do tempo, mostrado na Figura.4.39 . Nota-se diferenças entre as curvas apenas no final da secagem, quando já não existe um filme uniforme de água cobrindo a superfície e água passa a ser removida a partir do interior das fibras. Os dados evidenciam que, na maior parte da secagem, é possível ajustar uma única equação para descrever os dados experimentais.

Tabela 4. 17- Síntese dos resultados para os 3 tecidos.

Tecido (gramatura, espessura e X_{eq})	T (°C)	V (m/s)	Potência (kJ/s)	t_{total}	X_{cr}	t_{Nc}	t_{Nc}/t_{total}	NA (gH ₂ O/min)	U _i média (b.s)
Poliéster (194,80 g/m ² e 0,52 mm)	50	1,0	0,62	37	0,35	30	0,81	0,12	3,54
		2,0	0,64	30	0,14	25	0,83	0,16	3,78
	60	1,0	0,67	28	0,15	24	0,86	0,15	3,30
		2,0	0,56	21	0,15	16	0,86	0,20	2,88
	70	1,0	0,47	25	0,24	20	0,80	0,16	2,84
		2,0	0,44	15	0,21	12	0,80	0,24	2,60
Atoalhado (308,60 g/m ² , 0,60 mm e 0,06)	50	1,0	0,59	31	0,18	26	0,84	0,12	2,22
		2,0	0,52	19	0,17	14	0,74	0,19	1,56
	60	1,0	0,53	30	0,06	27	0,90	0,12	1,96
		2,0	0,53	17	0,24	11	0,65	0,22	1,57
	70	1,0	0,46	18	0,23	12	0,67	0,17	1,58
		2,0	0,79	13	0,37	9	0,69	0,32	2,15
Jeans (333,00 g/m ² , 0,59 mm e 0,08)	50	1,0	0,38	18	0,32	11	0,61	0,12	1,13
		2,0	0,43	14	0,12	8	0,57	0,15	0,88
	60	1,0	0,27	14	0,11	9	0,60	0,13	0,72
		2,0	0,53	11	0,28	6	0,55	0,27	0,94
	70	1,0	0,31	14	0,15	9	0,64	0,15	0,86
		2,0	0,63	8	0,12	5	0,63	0,35	0,99

Fonte: Autor, (2016)

Figura 4. 39- Curva generalizada dos três tipos de tecidos.



Fonte: Autor, (2016).

5 CONCLUSÕES

Neste item são apresentadas as principais conclusões deste trabalho com respeito aos objetivos propostos no estudo da secagem de materiais têxteis.

Na caracterização dos tecidos, as amostras apresentaram características diferentes quando ao tipo de fibra, gramatura, estrutura do tecido, arranjo das fibras e porosidade.

As isotermas de sorção, dos tecidos atoalhado e jeans, obtidas a 30 °C, são do tipo II e foram adequadamente descritas tanto pela equação de GAB quanto a de Oswin, com coeficientes de correlação para o atoalhado (0,97 e 0,99) e jeans (0,98 e 0,99), respectivamente. Para atividades de água entre 0 e 0,8, as umidades de equilíbrio variaram entre 0 e 0,06 para o tecido atoalhado e entre 0 e 0,08 para o jeans. Para o poliéster não foi possível obter a isoterma de sorção a 30°C, pois o tecido não absorveu quantidades mensuráveis de água nessa condição.

As cinéticas de absorção de água em atmosfera de vapor saturado, obtidas nas temperaturas de 40 e 60 °C, mostraram que o tecido que possui mais afinidade com a água foi o jeans, seguido pelo tecido atoalhado e depois o poliéster, que mostrou baixa capacidade de absorção, por tratar-se de um material hidrofóbico. O aumento da temperatura afeta a capacidade de absorção do tecido. A 40 °C, o poliéster não absorveu água, enquanto o atoalhado absorveu o equivalente a 8 % do sua massa em água e o jeans absorveu 40% na condição de saturação. Aumentando-se a temperatura para 60°C, a capacidade de absorção do poliéster aumentou para 10 %, a do atoalhado aumentou para 40%.

No processo de umidificação por imersão em água, foi observado que o poliéster apresenta maior capacidade de retenção, devido à sua maior porosidade, seguido pelo tecido atoalhado e depois o jeans.

De acordo com os resultados obtidos durante a secagem dos tecidos de poliéster e atoalhado em estufa de convecção natural, observou-se a predominância da resistência interfacial ao transporte de umidade durante o processo de transferência de massa, com o período de secagem a taxa constante predominante para todas as temperaturas avaliadas. A elevada umidade inicial e grande área de superfície favorecem a remoção de umidade no início do processo, e os pequenos volumes e espessuras fazem com que a resistência interna ao transporte de umidade seja pequena. Na secagem em estufa de convecção natural, o aumento da temperatura favoreceu o aumento das taxas de secagem.

Na secagem em túnel de convecção forçada, o processo de secagem também foi controlado pela resistência interfacial ao transporte de umidade, e o período de secagem a taxas

constantes foi observado em todas as condições investigadas. A velocidade de escoamento foi o fator com maior efeito nas taxas de secagem, sendo observado aumento das taxas com o aumento da velocidade do ar de 1,0 para 2,0 m/s. As taxas de secagem no período constante foram pouco afetadas pelas características dos tecidos. O uso da correlação desenvolvida para escoamento sobre placas planas para estimativa do coeficiente de transferência de massa superestimou fortemente as taxas de secagem. Os erros, que foram em média de 50 % para todas as condições avaliadas, podem ser atribuídos ao fato da área nominal de transferência de massa, calculada com base nas dimensões lineares das amostras, não representar a área real de transferência da superfície dos tecidos.

Foi possível adimensionalizar os dados experimentais e representa-los na forma de curvas generalizadas de secagem, em que a umidade adimensional é função de um tempo adimensional, calculado com base nas taxas de secagem no período constante. Os dados foram ajustados à equações empíricas de cinética de secagem. Para o poliéster, o melhor ajuste foi obtido considerando-se uma função linear, com um único parâmetro. Para os tecidos atoalhado e jeans, a equação de Page forneceu ajustes satisfatórios.

Devido à elevada área superficial e pequena resistência interna, a secagem dos tecidos foi influenciada essencialmente pelas condições do escoamento e constatou-se que as características físico-químicas dos materiais tiveram pouca influência no processo.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO

Analisar o processo de secagem para os tecidos, utilizando um aparato de superfície aquecida (fornecimento de calor por condução) ou usando lâmpadas de infravermelho.

7 REFERÊNCIAS

ABIT. Associação brasileira da indústria têxtil e de confecção, pg. 17, jun, 2013.

ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. Química do Processamento Têxtil. **Quim. Nova**, v. 19, p. 323-330, 1996.

ALBUQUERQUE, W. M. S. Estudo da secagem de tecido jeans. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco – BR, 2011.

AOAC. ASSOCIATION OF OFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official methods of analysis 16th ed. Washington D.C.: AOAC, 1997. v.2.

Asian Textile Studies. Disponível em: <http://www.asiantextilestudies.com/cotton.html> Acessado em: 27 de abr., 2016.

BALEM, F. R., TISSIAN, K. Moda, estilo e brasilidade no desenvolvimento de produto de moda: cores, formas e recursos naturais renováveis. *Unoesc & Ciência – ACET*, Joaçaba, vol. 2, n° 2, pg. 175-192, jul./dez. 2011.

BONET, M. **Revista de la Industria Textil**, pág. 44-51, n° 404, Enero, 2003.

BRUNAUER, S.; EMMET, P. H. and TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of American Chemical Society*, vol. 60, pg. 309-319, 1938.

CASSANDRE, J. E. F.; MOREIRA, M. F. P.; SARTORI, D. J. M. Desenvolvimento de um secador de convecção forçada com reciclo de ar. In: III COBEQ-IC, 3, 2001, Belo Horizonte. Anais.

CELESTINO, S. M. C. Princípios de secagem de alimentos. p. 19-20, 1^a ed. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados, 2010.

CORRÊA, L. J. Estudo da secagem de sementes de embaúba em leito fluidizado. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), pg. 29. Universidade federal de são carlos-UFSCar, 2012.

COSTA, A. B. Secagem convectiva de folhas de hortelã: análise baseada no ajuste de correlações empíricas, superfícies de respostas e redes neurais. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)- Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, pg. 11-91, 2013.

CSERI, D. Fundamentos de malharia: estudo do fator de elasticidade em tecidos de malha e suas aplicações. Maio de 2014. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/debcseri/fundamentos-de-malharia-estudo-do-fator-de-elasticidade>. Acessado em: 5 de junho de 2015.

CREMASCO, M.; A. Fundamentos de transferência de massa. 1º ed., Campinas: editora da UNICAMP, 1998, p. 363.

DIAS, L.G. Estudo do processo de secagem em estufa e por micro-ondas de compósitos cerâmicos de argila e resíduos de esteatito. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia)- Universidade federal de São João Del Rei, pg. 26, 2013.

DUCREUX, O., NEDEZ, C. Air and gas drying with AxSorb activated alumina. **AxSorb air and Gas Drying**, 2011.

FALCON TÊXTIL. Disponível em: <<http://www.falcontextil.com.br/representantes.php#>> Acessado: 2 de jan. de 2016.

FIorentin, L. D.; MENON, B. T.; ALVES, J. A.; BARROS, S. T. D.; PEREIRA, N. C.; MOTTA LIMA, O. C.; MODENES, A. N. Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos. *Engevista*, vol. 14, nº 1, pg. 22-33, 2012.

FOUST, A.S. et al. Princípios das operações unitárias. 2.ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982.

FREMPAST TINTAS. Disponível em: <<http://fremplast.com.br/beneficiamento-de-tecidos/>>
Acessado: 17 de mar. de 2016.

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.

HAM, J., B., S. Análise da secagem de azevém (*Lolium multiflorum*) em leito fixo com escoamento de ar paralelo. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Bagé-RS, 2013.

INCROPERA, F. P., DEWITT, D., P., BERGMAN, T., L., LAVINE, A. S. Fundamentos de transferência de calor e de massa. Rio de Janeiro: 6ª ed., LTC, 2005.

KARAHAN, M., EREN, R. **Experimental Investigation of the Effect of Fabric Parameters on Static Water Absorption in Terry Fabrics**, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* Abril / Jun., vol. 14, n° 2, 2006.

KEEY, R., B. Introduction to industrial drying operations. Oxford: Pergamon Press, 1978. pg. 376.

KEEY, R. B. Drying of loose and particulate materials. 1ª ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992.

LEAL, J.J. Um olhar sobre o *design* brasileiro. São Paulo: Joice Joppert Leal, 2002.

LEWIS, L.W. **The rate of drying of solid materials.** *Industrial Engineering Chemistry*, v.13, n. 1, p. 427, 1921.

MOTTA LIMA, O.C.; GIL, M. A. F.; PEREIRA, N. C.; MENDES, E. S. Aspectos da secagem convectiva de papel artesanal. *Acta Scientiarum - Sciences and Technology*, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1381-1388, 2003.

MOTTA LIMA, O.C.; PEREIRA, N. C.; MENDES, N. C. P.; Análise da cinética de secagem convectiva de papel artesanal com ar ambiente em convecção forçada. *Acta Scientiarum - Sciences and Technology*, Maringá, v. 24, n. 6, p. 1659-1664, 2002.

MOTTA LIMA, O. C.; PEREIRA, N. C.; MENDES, N. C. P.; Curvas generalizadas na análise da cinética de secagem de papel artesanal com ar ambiente em convecção forçada. *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá, v. 25, n. 1, p. 45-52, 2003.

NBR-13370. Disponível em: <https://www.target.com.br/pesquisa/resultado.aspx?pp=16&c=35974>
Acessado em: 20 de nov. de 2014.

NBR- 8428. Condicionamento de matérias têxteis para ensaios.

NBR – 10591 Materiais têxteis: determinação da gramatura de superfícies têxteis.

NUNES, F. R. M., SILVA, M. A. R., NUNES FILHO, F. R. M. Propriedades mecânicas das fibras de algodão usadas na indústria de fiação *open end* para fabricação de tecido de *denim*: estudo de caso das indústrias do Ceará. In: XV Congresso brasileiro de engenharia mecânica, 15, 1999, Águas de Lindóia, São Paulo. Anais.

OVERHULTZ, D. G., WHITE, G. M., HAMILTON, H. E. & ROSS, I. J (1973), “Drying soybeans with heated air”, *Trans. SAE*, Vol. 16, 112-113.

PAGE, C. **Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shelled Corn in Layers**. West Lafayette, 1949. MSc Thesis, Purdue University.

PAGLARINI, C. S., SILVA, F. S., PORTO, A. G., PIASSON, D., SANTOS, P. Histerese das isotermas de sorção da polpa de manga (*Mangifera indica* L.) variedade manteiga. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v.17, n.3, p. 299-305, 2013.

PARK, K.J.; NOGUEIRA, R.I. Modelos para ajuste de isoterma de sorção de alimentos. Piracicaba, vol.3, n° 1, pg.80–86, 1992.

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.; CHILTON, C. H. Manual de Engenharia Química, 5aed., Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980

PEZZOLO, D. B.; Tecidos: história, tramas, tipos e usos. São Paulo: Ed. SENAC, São Paulo, 2007.

RIBEIRO, L. G.; Introdução à tecnologia têxtil. Rio de Janeiro: CETIQT/SENAI, 1984. Vol. II.

SÁNCHEZ, J. C. Têxteis inteligentes. **Revista de la Industria Têxtil**, Química têxtil. n. 82, pg. 58-76, 2006.

SANTOS, J. C. O., LIMA, O. C. M., PEREIRA, N. C., SOUSA, L. H. C; Estudo da cinética e isoterma de secagem de tecido composto por poliéster e algodão. *Acta Scientiarium Technology*, v. 30, n. 1, p. 63-72, 2008.

SILVA, A. Análise da secagem de limão TAHITI (*Citrus Latifolia*- TANAKA) em fatias e de suas frações: epicarpo, mesocarpo e endocarpo. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)- Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, pg. 61-105.

SOUSA, L. H. C. D., PEREIRA, N. C. P., MOTTA LIMA, O. C., FONSECA, E. V. Equilibrium moisture isotherms of textiles materials. **Acta Sci. Technol.**, v. 23, n. 6, p.1363-1368, 2001.

SOUSA, L. H. C. D.; MONTEIRO, A. S.; MOTTA LIMA, O. C.; PEREIRA, N. C.; MENDES, E. S. Analysis of moisture distribution in convective textile fabric drying. *International drying symposium (IDS)*, vol. A, p. 285-292, 2004.

TEMPLE, S.J.; BOXTEL, A.J.B.V. Equilibrium moisture content of tea. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 74, p. 83-89, 1999.

UDALE, J. Fundamentos de design de moda: tecidos e moda. Porto Alegre: Bookman, 2009.

VIEIRA, M. G. A. Análise da secagem de polpa de celulose para a obtenção de papel reciclado. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química)- UNICAMP, Campinas-SP, pg. 17, 2006.

VICUNHA, Manual técnico do poliéster. Disponível em: <<http://www.vicunha.com.br/>>. Acessado em: 14 de jan. de 2016.

WYLEN, G. V., SONNTAG, R., BROGNAKKE, C. Fundamentos da termodinamica. Ed. Edgard Blücher, 2006. 6 ° edição, Apendice C.