



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA SECAGEM DE TECIDO JEANS

Autor: Waldízia Maria Souza de Albuquerque

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra

Co-Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henríquez Guerrero

Maio/2011

WALDÍZIA MARIA SOUZA DE ALBUQUERQUE

ESTUDO DA SECAGEM DE TECIDO JEANS

Dissertação de
mestrado submetida à
Universidade Federal de
Pernambuco para obtenção
do grau de mestre em
engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henríquez Guerrero

Co-Orientador: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra

Recife, 02 de Maio de 2011

PE – Brasil

A345e Albuquerque, Waldízia Maria Souza de.

Estudo da secagem de tecido jeans / Waldízia Maria Souza de Albuquerque. - Recife: O Autor, 2011.xvi, 107 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011.

Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2. Tecido Jeans. 3. Gramatura. 4. Secagem. I. Dutra, José Carlos Charamba (orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2011-150

“ESTUDO DA SECAGEM DO TECIDO TIPO JEANS”

WALDÍZIA MARIA SOUZA DE ALBUQUERQUE

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

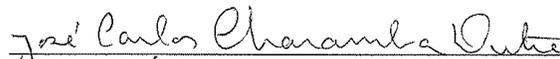


Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

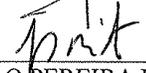

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO
CO-ORIENTADOR


Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (UFPE)


Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO (UFPE)


Prof. Dr. JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO (UFPE)


Prof. Dr. FLÁVIO AUGUSTO BUENO FIGUEIREDO (UFPE – DEMEC)

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação:

Aos meus pais, Antônio de Albuquerque Gonçalves Sobrinho e Marluce de Souza Gonçalves;

Às minhas irmãs, Waldirene Albuquerque e Walquíria Albuquerque;

E aos meus sobrinhos, Hannah de Albuquerque e Victor de Albuquerque.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus todo poderoso por tudo e por mais essa etapa vencida na minha vida.

À Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, em especial ao Departamento de Mecânica, pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, por minha bolsa de mestrado, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. José Carlos Charamba Dutra e ao Prof. Jorge Recarte Henríquez Guerrero pelas orientações, pelos conselhos, e por ter acreditado na realização deste trabalho.

Aos professores João Brito e Flávio pelas preciosas sugestões e críticas.

Aos meus pais, Antônio de Albuquerque Gonçalves Sobrinho e Marluce de Gonçalves Gonçalves, por todo apoio, ajuda e compreensão nos momentos difíceis.

Às minhas irmãs, Walquíria Albuquerque e Waldirene Albuquerque, pelo apoio, incentivo e pelos sobrinhos que me deram.

Aos meus avôs Miguel de Souza Oliveira e Maria José de Souza Oliveira, pelo amor, carinho, apoio e conselhos. Vocês sempre foram minha inspiração pra vencer na vida e lutar por um futuro melhor.

Aos meus amigos do mestrado Álvaro Ochoa, Thiago Novaes, Thiago Parente, Ricardo, Jorge, Rodrigo, Paulo Bonfim, Andrezza, Dalton, Marcus, Renato, Ronaldo, Ângelo, Thiago Santos, Thiago, Marcelo, Jadeilson, Heber, Jacek, pela amizade, apoio, ajuda e brincadeiras.

Aos meus amigos da Residência das Palmeiras – Casa de estudantes, Thaíse Kalix, Marcel, Tamile, Vanessa, Silvo, Hudson, Dinho, Clarck, Graziela, Murilo, Joan, Eduardo, Gil, Rodrigo, pela amizade, apoio e companheirismo.

Ao meu namorado Ricardo Cesar de Andrade, pela colaboração na construção do aparelho de medição de temperatura, pelo apoio e conselhos.

À Stella Khazariyants, minha amiga Russa/Portuguesa, por estar presente nas madrugadas de estudos, pelo apoio e conselhos nas horas difíceis.

Às minhas amigas do SENAI-CETIQT-RJ, Flávia Justino, Paula, Poliana, Daniela Palharini, Natália, pela amizade, respeito, bons valores e aprendizado de vida.

A dona Eliane pela orientação, documentos e pelo apoio na secretaria.

À professora Luiza Helena pela disponibilidade de sua tese e algumas ideias na parte experimental da dissertação.

À Vicunha Têxtil por ter aberto as portas da Unidade instalada no Rio Grande do Norte pelo fornecimento da matéria prima, e permissão para conhecer todo processo de fabricação do tecido jeans.

A todos aquele que mesmo facilitando ou dificultando minha caminhada, a tornaram mais rica e valiosa.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.” (Chico Xavier)

RESUMO

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de jeans, perdendo apenas para a China e o estado de Pernambuco na cidade de Toritama encontra-se o segundo maior produtor de jeans, gerando com isso uma enorme necessidade de estudos específicos ao processo de fabricação do tecido jeans mais especificamente na fase chamada de ultimção. A necessidade de trabalhar uma maneira mais adequada às características dos artigos têxteis é beneficiar de maneira qualitativa e quantitativa a indústria têxtil e também aos usuários conferindo conforto, caimento, beleza e economia. Essas características são concretizadas na fase de acabamento, na qual o consumo de energia é substancialmente elevado, ocorrendo com isso um maior custo operacional. O processo de secagem se faz presente nesta fase final do processo de acabamento do tecido jeans e ter conhecimento das variáveis do processo é gerar grandes benefícios para o setor produtivo e para os consumidores. Contudo, o principal motivo para o desenvolvimento deste trabalho, foi a escassez de estudos voltados para a secagem de materiais têxteis e principalmente do artigo jeans. De modo a contribuir nesse estudo em escala laboratorial foi utilizado dois equipamentos de secagem, a estufa e o analisador de umidade por infravermelho, permitindo uma simplificação dos procedimentos. Tanto para a secagem realizada na estufa quanto no analisador de umidade por infravermelho foram analisados os efeitos da temperatura de secagem com variação de 50 a 110 °C e as gramaturas das amostras. Para estufa foi analisado os perfis de temperatura a partir da leitura feita por termopares inseridos entre os fios de trama e urdume das amostras. Os resultados obtidos da secagem foram analisados por comparação do efeito das variáveis estudadas no comportamento do processo. Todos os resultados foram avaliados com a ajuda do software Estatística 8.0, aplicado às equações empíricas da literatura possibilitando a definição do modelo que melhor se ajuste as condições estudadas.

Palavras Chaves: jeans, gramatura, secagem.

ABSTRACT

Brazil is the second largest producer of jeans, losing only to China and the state of Pernambuco in the city of Toritama is the second largest producer of denim, which resulted in an enormous need studies specific to the manufacturing process of the jeans fabric more specifically at the stage called finalization. The need to work more adequately the characteristics of textiles is benefit from qualitative and quantitative way the textile industry and users also provides comfort, fit, beauty and economy. These features are implemented in the finishing phase, in which the Power consumption is substantially high, occurring with this one higher operational cost. The drying process is present at this stage end of the process of finishing the fabric and jeans have been aware of process variables is to generate large benefits to the productive sector and for consumers. However, the main reason for development this work was the lack of studies for drying Textile and especially Article jeans. To contribute in this study we used two laboratory scale equipment drying, the oven and infrared moisture analyzer, allowing simplification of procedures. Both held on for drying greenhouse and in the moisture analyzer were analyzed by infrared the effects of drying temperature ranging from 50 to 110 ° C and Weights of the samples. For gases was analyzed profiles temperature from the readings made by thermocouples inserted between warp and weft yarns of the samples. The results of drying were analyzed by comparing the effect of the variables in process behavior. All results were evaluated with the help of the software Statistica 8.0, applied to the empirical equations literature allowing the definition of the model that best fits the conditions studied.

Keywords: jeans, weight, drying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Produção do algodão 2010/2011 em milhões de toneladas	1
Figura 1.2. Consumo mundial de 2010/2011 em milhões de toneladas	2
Figura 2.1. Módulo experimental DEC/UEM	7
Figura 2.2. Ohmímetro e a central de aquisição	10
Figura 2.3. Tecido imerso em água destilada	11
Figura 2.4. Câmara climática	11
Figura 2.5. Aplicador de microondas para o tecido	12
Figura 2.6. Umidade na secagem do tecido	13
Figura 2.7. Protótipo da máquina de secagem	14
Figura 3.1. Fluxograma das fibras	20
Figura 3.2. Morfologia da fibra de algodão	27
Figura 3.3. Fluxograma da fibra bruta	30
Figura 3.4. Diagrama da Sarja	32
Figura 3.5. Sistema integrado para acabamento do jeans	33
Figura 3.6. Diagrama esquemático da chamuscagem do tecido	34
Figura 3.7. Diagrama esquemático da sanforizadeira	34
Figura 3.8. Isotermas de diversos tipos de algodão e tecidos de algodão	40
Figura 4.1. Representação de uma amostra de tecido jeans	45
Figura 4.2. Esquema do sistema para secagem do tecido	48
Figura 4.3. Analisador de umidade por infravermelho	49
Figura 4.4. Suporte do prato de alumínio	49
Figura 4.5. Impressora do analisador de umidade por infravermelho	50
Figura 4.6. Parte externa do aparelho de leitura da tensão do LM35DZ	51
Figura 4.7. Parte interna do aparelho de leitura da tensão do LM35DZ	51
Figura 4.8. Diagrama esquemático do termômetro	52
Figura 4.9. Configuração do termômetro LM35DZ	53
Figura 4.10. Data Logger	54
Figura 4.11. Esquema de ligação dos termopares no tecido	54

Figura 4.12. Esquema experimental para levantamento dos perfis de temperatura	55
Figura 5.1(a) e (b). Variação da área superficial com a temperatura das amostras N e K	59
Figura 5.2(a) e (b). Variação da área superficial da amostra D e geral com a temperatura das amostras N, K e D	59
Figura 5.3(a) e (b). Variação da área superficial com a temperatura das amostras N e K	60
Figura 5.4(a) (b). Variação da área superficial da amostra D e geral com a temperatura das amostras N, K e D	60
Figura 5.5. Esquema de posicionamento dos termopares sobre a amostra de tecido	62
Figura 5.6(a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra N a 50 e 65 °C	62
Figura 5.7(a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra N a 80 °C e geral	63
Figura 5.8(a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra K a 50 e 65 °C	63
Figura 5.9(a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra K a 80 °C e geral	63
Figura 5.10(a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra D a 50 e 65 °C	64
Figura 5.11(a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra D a 80 °C e geral	64
Figura 5.12(a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra N	65
Figura 5.13(a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra D	65
Figura 5.14(a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra K	66
Figura 5.15(a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra N	67
Figura 5.16(a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra D	67
Figura 5.17(a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra K	67
Figura 5.18: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra N	78
Figura 5.19: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra K	80
Figura 5.20: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra D	82
Figura 5.21: Coeficiente de correlação dos modelos para cada amostra	82

Figura 5.22: Qui-quadrado dos modelos para cada amostra	83
Figura 5.23: RMSE dos modelos para cada amostra	83
Figura 5.24: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra N	85
Figura 5.25: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra K	87
Figura 5.26: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra D	89
Figura 5.27: Coeficiente de correlação dos modelos para cada amostra – Analisador por infravermelho	89
Figura 5.28: Qui-quadrado dos modelos para cada amostra – Analisador por infravermelho	90
Figura 5.59: RMSE dos modelos para cada amostra- Analisador por infravermelho	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Consumo industrial de fibras naturais no Brasil – 1999 a 2009 (em toneladas)	22
Tabela 3.2. Consumo industrial das fibras artificiais no Brasil – 1999 a 2009 (em toneladas)	23
Tabela 3.3. Consumo industrial de fibras sintéticas no Brasil - 1999 a 2009 (em toneladas)	24
Tabela 3.4. Consumo mundial de fibras têxteis – 1950 a 2008 (em toneladas)	25
Tabela 3.5. Composição do algodão	27
Tabela 3.6. Finura do algodão	28
Tabela 3.7. Absorção de umidade ambiente de algumas fibras	40
Tabela 5.1. Gramatura das amostras N, K e D	56
Tabela 5.2. Título médio dos fios de trama e urdume	57
Tabela 5.3. Diâmetro dos fios de trama e urdume	57
Tabela 5.4. Porosidade dos tecidos	58
Tabela 5.5. Valores dos comprimentos e larguras das amostras N, K e D - Estufa	60
Tabela 5.6. Valores dos comprimentos e larguras das amostras N, K e D – Analisador de umidade por infravermelho	61
Tabela 5.7. Modelos matemáticos	68
Tabela 5.8. Modelos selecionados pelos critérios do $R^2 \geq 0,90$ – Estufa Amplitudes do R^2 , χ^2 e RMSE para cada modelo e amostra	71
Tabela 5.9. Modelos selecionados pelos critérios do $R^2 \geq 0,90$ – Analisador de umidade por infravermelho Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra N - Estufa	73
Tabela 5.10. Modelos para cada amostra	75
Tabela 5.11. Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra N- Estufa	76
Tabela 5.12. Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas	77

as temperaturas – Amostra N	
Tabela 5.13. Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra D – Estufa	78
Tabela 5.14. Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas – Amostra K	79
Tabela 5.15. Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra D – Estufa	80
Tabela 5.16. Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas – Amostra D	81
Tabela 5.17. Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra N – Analisador de umidade por infravermelho	84
Tabela 5.18. Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas – Amostra N	84
Tabela 5.19. Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra K – Analisador de umidade por infravermelho	84
Tabela 5.20. Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas – Amostra K	86
Tabela 5.21. Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra D – Analisador de umidade por infravermelho	87
Tabela 5.22. Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas – Amostra D	88

NOMENCLATURA

a_n, K_n	Parâmetros do modelo de secagem da amostra N
a_D, K_D	Parâmetros do modelo de secagem da amostra D
a_K, K_K	Parâmetros do modelo de secagem da amostra K
$Denier, Tex, Ktex, dtex, mtex$	Título direto do fio de algodão
Ne, Nm	Título indireto do fio de algodão
X	Umidade (b.s.)
X_0	Umidade inicial (b.s.)
X_e	Umidade de equilíbrio (b.s.)
X_{exp}	Umidade experimental (b.s.)
X_c	Umidade crítica (b.s.)
X_p	Umidade da roupa (b.s.)
X_{pred}	Umidade predita pelo modelo ajustado (b.s.)
K	Constante de secagem
a, b, c, n	Parâmetros dos modelos de secagem
N	Número de pontos experimentais
n	Número de parâmetros do modelo
N, K, D	Amostras de tecido jeans
t	tempo (s)
T_s	Taxa de secagem (g/min)
TX_i	Teor de umidade inicial (b.s.)
TX_f	Teor de umidade final (b.s.)
m	Massa do tecido (g)
c	Comprimento dos fios de algodão (m)
d	Diâmetro do fio em polegadas (pol)
C_{ft}	Cobertura fracionária do tecido
d_1	Diâmetro do fio de urdume (mm)
d_2	Diâmetro do fio de trama (mm)
n_1	Quantidade de fios (cm)
n_2	Quantidade de batidas (cm)

<i>Ps</i>	Porosidade superficial do tecido
<i>L</i>	Largura (mm)

Abreviações

ASTM	American Society for Testing and materials
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
NOMENCLATURA	xiv
CAPITULO I. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	3
1.2. Objetivo Geral	3
1.3. Objetivos Específicos	3
1.4. Apresentação da dissertação	4
CAPITULO II. ESTADO DA ARTE	5
CAPITULO III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1. Introdução	17
3.2. A evolução do tecido jeans	17
3.3. Materiais têxteis	19
3.3.1. Fibras têxteis e sua classificação	19
3.3.2. A fibra de algodão	25
3.3.3. Processo de tingimento dos fios de algodão com corante índigo	30
3.3.4. Tecelagem	31
3.3.5. Processo de beneficiamento do jeans	33
3.4. Secagem	35
3.4.1. Velocidade de secagem	35
3.4.1.1. Período de Secagem a taxa constante	35
3.4.1.2. Período de Secagem a taxa decrescente	36
3.4.2. Teorias de Secagem de sólidos	36
3.4.2.1. Modelo da difusão (Fick)	37
3.4.2.2. Modelo da capilaridade	38
3.4.3. Modelos empíricos de secagem	38
3.4.4. Umidade crítica e de equilíbrio	39
3.4.5. Secagem industrial de materiais têxteis	41
CAPITULO IV. MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1. Introdução	44
4.2. Materiais	44
4.3. Caracterização das amostras	44
4.3.1. Espessura	44
4.3.1. Gramatura	45
4.3.3. Densidade	45
4.3.4. Calor específico	45
4.3.5. Condutividade térmica	46
4.3.6. Análise do encolhimento	46
4.3.7. Preparação das amostras	46

4.4. Determinação das curvas de secagem	46
4.4. Determinação das curvas de taxa de secagem	47
4.5. Sistema convectivo natural - Estufa	48
4.6. Sistema infravermelho – Analisador de umidade por infravermelho	48
4.7. Perfis de temperatura	57
4.8. Tratamento dos dados	51
CAPITULO V. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1. Introdução	56
5.2. Caracterização da amostras	56
5.2.1. Gramatura das amostras N, K e D	56
5.2.2. Cálculo do título dos fios de algodão	56
5.2.2.1 Cálculo do título dos fios de trama e urdume das amostras N, K e D	56
5.2.3. Cálculo do diâmetro dos fios de algodão	57
5.2.4. Cálculo da porosidade dos tecidos	57
5.2.5. Massa seca	58
5.3. Análise do encolhimento	58
5.3.1. Estufa	59
5.3.2. Analisador de umidade por infravermelho	60
5.4. Análise dos perfis de umidade das amostras N, K e D	61
5.4.1 Perfis de temperatura	61
5.5. Análise da cinética de secagem das amostras N, K e D	64
5.5.1. Análise da secagem na estufa	64
5.5.2. Efeito da temperatura de secagem	65
5.5.3. Análise da secagem no analisador de umidade por infravermelho	66
5.5.4. Ajuste das curvas de secagem	68
5.4.4.1. Estufa	70
5.4.4.2 Analisador de umidade por infravermelho	72
5.4.4.3. Análise geral - Estufa	76
5.5.4.4. Análise geral – Analisador de umidade por infravermelho	84
CAPITULO VI. CONCLUSÕES	91
CAPÍTULO VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXOS	

1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil vem se difundindo por todo o território nacional, desde a implantação dos primeiros estabelecimentos industriais para a produção de fios e tecidos, embora não possua mais a importância relativa que manteve até o final da década de 40.

Desde a década de 60, o setor têxtil vem presenciando uma substancial modernização com relação à entrada de equipamentos de controle de qualidade e de produção, ocorrendo automação de algumas fases dos processos têxteis tais como: controle do aquecimento, arrefecimento e circulação dos banhos nos processos de tingimento, controle das irregularidades dos fios no processo de fiação e o controle da energia empregada na fase do processo de acabamento têxtil, onde o maior consumo fica por conta da secagem. A secagem é muitas vezes uma das operações com mais alta intensidade energética na indústria têxtil (OĞULATA, 2004).

O estudo pormenorizado das características das fibras pode indicar como melhor aproveitar a energia empregada na fase da secagem, haja vista o alto custo que este insumo representa para as indústrias em geral.

O algodão é uma fibra bastante antiga utilizada pelos indus desde 3000 AC, é uma fibra utilizada de diversas formas em variadas épocas, e apesar das inovações das fibras sintéticas e artificiais o algodão continua tendo seu lugar de destaque em todo o mundo, conforme pode ser observado na figura 1.1 tendo a China como o maior produtor de algodão.

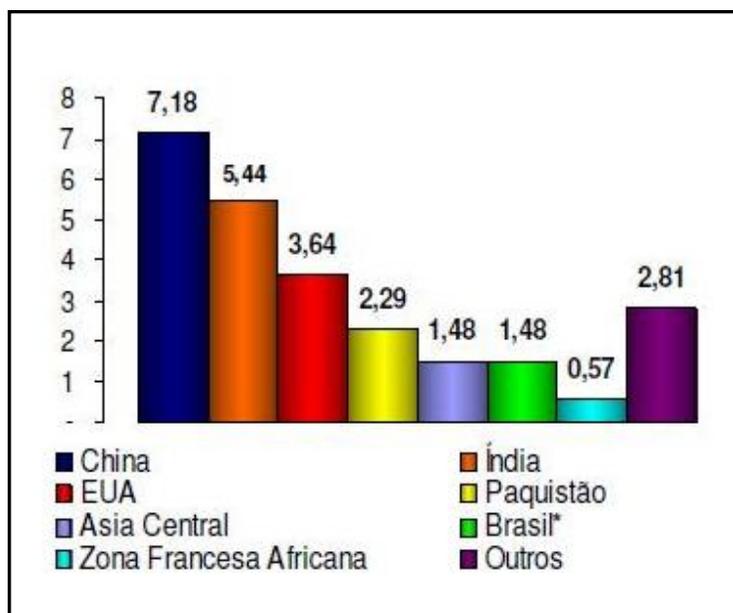


Figura 1.1: Produção do algodão 2010/11 em milhões de toneladas

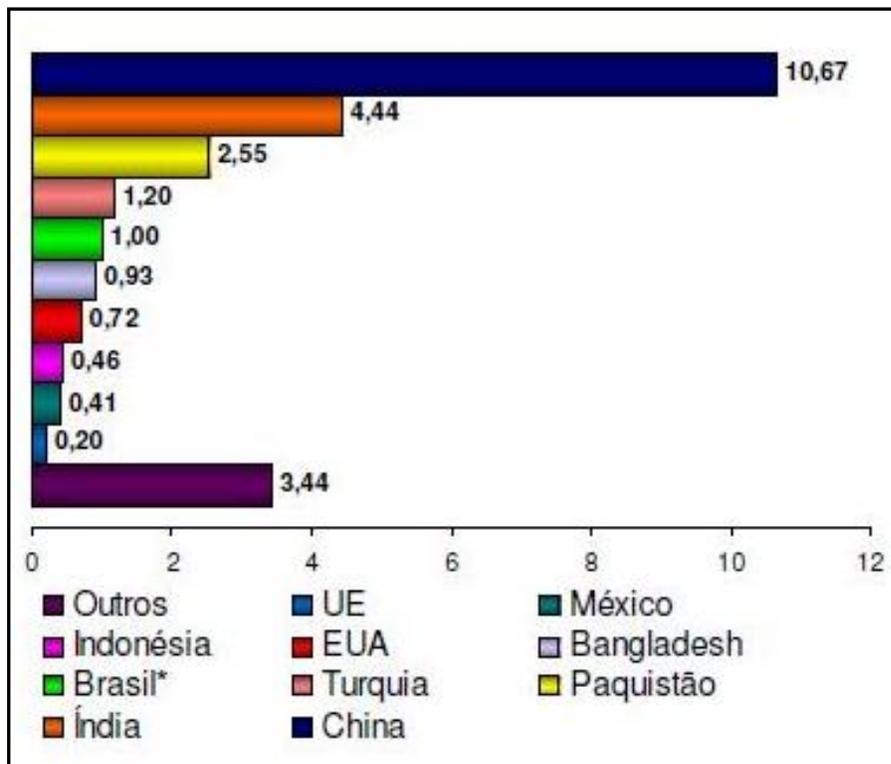


Figura 1.2: Consumo mundial de 2010/11 em milhões de toneladas

Numa visão global a China destaca-se como o maior consumidor de algodão, conforme pode ser observado na figura 1.2, com 10,67 milhões de toneladas.

O algodão confere conforto e bom caimento às roupas desde a mais simples até as mais sofisticadas, sendo ainda amplamente utilizado em roupas de cama e banho, pela facilidade de absorver umidade.

Na finalização do processo de tinturaria ou branqueamento dos tecidos, a indústria têxtil utiliza de secadores específicos para cada tipo de tecido, sendo que para os tecidos planos, os secadores de cilindros, os “hot-flue” e as ramas, são os mais indicados.

No desenvolvimento do estudo da secagem do tecido jeans, será utilizado uma estufa e um analisador de umidade por infravermelho, onde é possível ajustar a temperatura do ar de secagem dentro dos equipamentos.

Com este sistema serão obtidas as curvas de secagem de amostras de tecido jeans, as quais serão analisadas para diferentes condições de secagem, limitando-se a valores de temperatura.

Além das curvas de secagem foram obtidos os dados para os perfis de temperatura e os valores das dimensões das amostras de tecidos jeans antes de depois do processo de secagem.

Uma análise estatística por regressão não linear foi realizada, a fim de comparar os resultados obtidos, com expressões matemáticas existentes na literatura, os quais serviram para representar o processo de secagem têxtil das amostras de tecidos jeans nas condições estudadas.

Espera-se com este trabalho uma contribuição para um maior conhecimento dos processos de transferência de calor e massa na secagem de tecidos jeans.

1.2 Motivação do Trabalho

O surgimento da ideia para o desenvolvimento deste trabalho parte da não existência de uma metodologia de secagem de tecidos jeans especificamente, e o crescente número de empresas produtoras deste tecido e de empresas do ramo de confecção. Na região nordeste a produção de jeans é destaque.

1.3 Objetivo Geral

Com o estudo, pretende-se tornar a metodologia da secagem de tecidos de algodão mais clara, além de apresentar os períodos de secagem e taxa de secagem através de modelos simples. Dando ênfase aos efeitos causados pela temperatura do ar de secagem.

1.4 Objetivos Específicos

- Estudar e analisar os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem entre o ar de secagem e tecidos jeans com composição de fibra de algodão submetidos à secagem;
- Analisar o comportamento da temperatura no decorrer do tempo;
- Analisar o comportamento da temperatura com a variação das gramaturas das amostras de tecidos jeans;
- Analisar o comportamento da temperatura com os dois aparelhos de secagem;
- Verificar o melhor modelo matemático para representar a cinética de secagem que ajuste melhor os dados experimentais;

1.5 Apresentação da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, explanando os assuntos de maneira clara e objetiva para que o leitor tenha fácil compreensão do trabalho proposto.

No segundo capítulo foram apresentadas publicações dos últimos cinco anos de trabalhos encontrados na literatura nas áreas de transferência simultânea de calor e massa através dos têxteis.

O capítulo três explana os fundamentos teóricos sobre a evolução do tecido jeans, materiais têxteis, o processo de tecelagem, beneficiamento do jeans, secagem e secagem industrial de materiais têxteis.

O quarto capítulo consta dos materiais e métodos apresentando toda caracterização das amostras utilizadas em estudo, o método de obtenção das curvas de secagem, das taxas de secagem, dos perfis de temperatura e o tratamento dos dados.

No quinto capítulo são apresentados os resultados e discussão da caracterização das amostras, a análise do encolhimento realizado na estufa e no analisador de umidade por infravermelho, análise dos perfis de temperatura, a cinética de secagem e o ajuste das curvas de secagem.

O capítulo seis apresenta as conclusões a partir dos resultados obtidos no sexto capítulo.

O sétimo, e último capítulo, no final desta dissertação encontramos os anexos 1 e 2 . O anexo 1 apresenta a calibração dos sensores de temperatura. O anexo 2 apresenta a análise de erros e incerteza.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

Foi feita uma revisão bibliográfica dos últimos cinco anos de publicações em congressos e revistas, nas áreas de transferência de calor e massa através dos diferentes tipos de tecidos e diferentes tipos de métodos de secagem, com o objetivo de analisar se os assuntos relacionados já foram estudados, de que forma foram abordados em estudos anteriores.

2.2 Publicações

Alguns autores estudaram o comportamento da transferência simultânea de calor e massa através dos têxteis, que ocorrem entre o ar de secagem e os tecidos de fibra natural de algodão, submetidos à secagem.

JOHANN et al. (2010) calcularam o calor de dessorção da umidade, durante a secagem da sarja e da mei-malha, através do método de Othmer, onde assumiram que o calor de dessorção e o de condensação têm a mesma dependência com a temperatura, baseando-se numa correlação da pressão de vapor e o calor latente de vaporização. Para as isotermas, os autores tomaram posse dos dados das isotermas de dessorção obtidos pelo Grupo de Pesquisas em Processos de Separação e Sistemas Particulados do DEQ/UEM .

Com ela e com os valores de seus parâmetros para cada material têxtil, obtiveram os valores da umidade relativa para cada valor respectivo de umidade de equilíbrio, em cada temperatura que foi utilizada experimentalmente. Depois foram calculados os valores da pressão de vapor da água em cada temperatura analisada e também foram obtidos os valores para a pressão de saturação. Para saber se a equação de Othmer é adequada, os autores verificaram o comportamento dos logaritmos neperianos das pressões calculadas em cada umidade de equilíbrio estudada e viram que há uma relação linear entre os mesmos para cada material têxtil nas condições estudadas.

Foram determinados por regressão linear, os valores dos coeficientes angulares encontrados para cada um dos cinco valores de umidade de equilíbrio estudados. Esses valores foram correlacionados e obtiveram 0,999 de R^2 , para ambos os materiais têxteis. Com a obtenção dos valores do calor de dessorção, os autores, verificaram que, com o aumento do conteúdo de umidade, esse calor aproxima-se do calor de vaporização da água na mesma temperatura e que para a sarja esse calor é maior, no final da secagem, do que o da meia-malha, já que a estrutura da sarja é mais complexa dificultando assim o desligamento da umidade as fibras.

Em se tratando de comparação entre os resultados do calor de dessorção da sarja e da meia-malha, os autores optaram por fazer com os resultados apresentados pela literatura para a celulose, já que foi considerado que os materiais têxteis e o papel apresentam comportamento semelhante durante os processos de secagem. O valor do calor de dessorção para a fibra de celulose é igual a 3500 KJ kg^{-1} , quando o teor de umidade for próximo a zero e os valores obtidos para a sarja e meia-malha são respectivamente 3417 KJ kg^{-1} e 3104 KJ kg^{-1} , mostrando a proximidade entre os valores e a validade do método de Othmer.

Contudo, decréscimo nos valores do calor de dessorção são causados por pequenos acréscimos na umidade dos tecidos, pelo fato de existir maior quantidade de umidade que não está ligada, sendo necessário energia, não somente para a evaporação simples e sim para outras forças existentes nos tecidos como: forças capilares, ligações água-fibra e estruturas mais complexas como a sarja. Os valores obtidos para ambos os materiais foram próximos comparados com o calor de dessorção da fibra de celulose

SANTOS et al. (2008) analisaram a secagem de amostra de tecido com uma composição em sua estrutura de fibras de poliéster e algodão. Esta análise foi através de uma avaliação dos modelos existentes na literatura para tratar os dados das curvas generalizadas de secagem como: PAGE (1949), OVERHULTZS et al. (1973), MOTTA LIMA et al. (2002). O método da regressão não linear foi utilizado para o ajuste das equações aos dados experimentais, onde os parâmetros foram estimados por um software estatístico. Para as isotermas foram utilizados alguns modelos matemáticos encontrados na literatura para os ajustes dos dados experimentais, tais como: Henderson Thompson *et al.* (1968) *apud* Sousa *et al.* (2004), Henderson modificada (Neuman *et al.*, 1986), Motta Lima *et al.* (2002) *apud* Smith (1947), Oswin modificada (Moura *et al.*, 2004) e Motta Lima *et al.* (2003) *apud* Smith (1947). As amostras foram cortadas em dimensões 100 x 100 (mm), pesadas em balança Scientech (precisão: 0,0001g) e colocadas em

estufa de esterilização e secagem ($105 \pm 3^\circ\text{C}$, 24 horas) para determinar a massa seca e com esses valores, determinar a massa úmida. Foi utilizada para a parte experimental uma placa de cobre aquecida por um banho termostático com temperatura controlada, variando de 40 a 85°C , conforme figura 2.1.

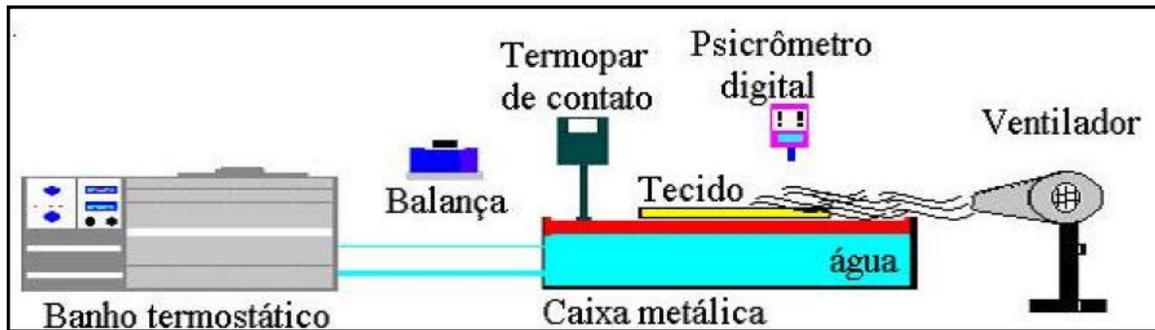


Figura 2.1. Módulo experimental DEC/UEM (Fonte: SANTOS et al 2008).

A velocidade do ar de secagem foi monitorada por um anemômetro digital portátil (Modelo HH-F10 – precisão de $0,1 \text{ m s}^{-1}$) e variou de $0,5$ a $2,5 \text{ m s}^{-1}$. Para as isotermas, as amostras estavam com massas iniciais entre $0,1346$ a $0,1931 \text{ g}$ e colocadas em um equipamento Novasina AW Sprint para a determinação da umidade de equilíbrio de cada amostra em relação à atmosfera padrão, sob influência da temperatura e a umidade ambiente favorecida pelo sal. Com o equilíbrio estabelecido, a amostra foi pesada em uma balança analítica da marca (Tecnal Scientech SA 210) e com isso calcularam a umidade de equilíbrio (X_e).

Foram utilizados seis tipos de sais para a representação da umidade relativa entre 11 a 98% para as temperaturas entre 20 e 50°C . Dos modelos os que melhor representam as isotermas individuais de materiais têxteis foram os de Henderson modificado (Neumann *et al.*, 1986) e de Motta Lima *et al.* (2003). Para a modelagem das curvas de secagem, usou-se a comparação dos três modelos e percebeu-se que o Motta Lima *et al.* (2002) é o que melhor representa os dados experimentais, com base nos resultados do Teste F. Para as curvas de taxa de secagem, ajustadas pelos modelos Hodgers (1982) e Toffoli (2005), a que melhor representou foi o modelo de Toffoli (2005), verificada através dos resultados dos R^2 e do Teste F.

CARTER e SHAH (2005) estudaram o efeito que a tensão superficial tem sobre o tempo de secagem dos tecidos, ou seja, diminuindo essa tensão, diminui também o conteúdo de umidade dos tecidos. A redução desse conteúdo de umidade em 30% , significa que gasta-se 30% menos energia e 30% menos do tempo de secagem do tecido. Os autores realizaram diversos experimentos com variados tipos de tecidos, onde primeiramente utilizaram três amostras de tecidos sendo dois 100% algodão (um denim e um tecido plano) e o terceiro foi um tecido 65/35% algodão e poliéster para a determinação do RMC (conteúdo de umidade residual) e saber a relação dele com a tensão superficial do tecido. Com a realização de vários testes os autores perceberam que, utilizando os mesmos tipos de tensoativos para variar a tensão superficial obtiveram melhores resultados quando da utilização de diferentes tensoativos e que o principal problema encontrado na redução do teor de água foi de alcançar um sistema com baixa tensão superficial.

FICHET et al. (2005) estudaram o balanço de massa no comportamento da água absorvida nas fibras e a água que move-se no volume do tecido em condições isotérmicas, através da experimentação, modelagem, simulação e otimização de um sistema MMT (Moisture Management Tester) que é utilizado para a determinação da expansão do líquido e das taxas de transferência do tecido. Eles desenvolveram um modelo 3D que descreve o balanço de massa de água absorvido nas fibras. O modelo foi capaz de simular o método MMT predizendo o local e o conteúdo global de água em ambas as superfícies do tecido. Uma otimização também foi utilizado para determinar os valores de alguns parâmetros do modelo desconhecido. Os resultados da simulação mostrou um bom acordo qualitativo entre as medidas experimentais e previsões teóricas do conteúdo de água no tecido.

CYNIAK, CSEKSKI e JACKOWSKI (2006) fizeram uma investigação do comportamento da transferência de calor e massa nos tecidos, utilizando também um modelo que é descrito por equações diferenciais parciais que envolve diversos parâmetros físicos e de transferência desconhecidos. Foram utilizados duas configurações com o objetivo de determinar os parâmetros desconhecidos do modelo. O primeiro utilizou uma amostra de tecido colocada numa sala com temperatura e umidade controladas, após umidecer, e depois sua taxa de secagem foi medida com tempo. Para a modelagem dessa primeira configuração os autores assumiram que

apenas a água livre no tecido é evaporada e que também os efeitos da fase de gás são desprezíveis no processo. O segundo é baseado no uso do aparelho MMT (Moisture Management Tester) que tem como objetivo determinar o líquido expandido e a taxa de transferência de um tecido. Foram assumidos nesse modelo que os processos na fase gasosa não desempenham um papel importante e que todo sistema é isotérmico. Os resultados da simulação foram bastantes satisfatórios e estão de acordo com as respectivas medições experimentais.

DAS et al. (2007) estudaram a transmissão de umidade através dos têxteis dividindo o trabalho em duas partes, onde a primeira ficou direcionada a transmissão de umidade e os processos envolvidos no transporte dessa umidade e a segunda está direcionada às técnicas de medições para determinação dos fatores que influenciam no conforto dos tecidos. É de grande importância a compreensão científica dos processos que envolvem o transporte de umidade através de produtos têxteis para a criação de peças de vestuário. Os autores esperam que, o vapor de água passe através das camadas têxteis por:

- difusão do vapor de água através das camadas;
- absorção, transmissão e dessorção do vapor de água pelas fibras;
- adsorção e migração do vapor de água ao longo da superfície das fibras e
- transmissão de vapor de água por convecção forçada.

Para o processo de difusão, sua taxa depende da porosidade do material e também da difusividade do vapor de água da fibra. No processo de absorção e dessorção quanto maior a pressão de vapor e menor a temperatura, maior é a quantidade absorvida. É abaixo da temperatura crítica que ocorre a adsorção de moléculas de água, devido a força de Van der Waals entre as moléculas de vapor e a superfície sólida da estrutura. Para o processo de convecção a evaporação e condensação tem um efeito muito importante para a transmissão de umidade. As duas dependem da temperatura e da distribuição de umidade de produtos têxteis porosos no momento da transferência. A transmissão de líquido no estado estacionário através dos produtos têxteis é causada pela atração molecular fibra-líquido na superfície do material fibroso. Com a análise dos estudos os autores chegaram à conclusão que o processo de difusão é o principal mecanismo de transferência de umidade em condições de baixo teor de umidade e essa difusão de vapor de água depende principalmente da porosidade do material têxtil. Na segunda parte do

trabalho os autores deram ênfase à técnica de medição para determinação dos fatores que influenciam o conforto do tecido.

HANDAOUI et al. (2008) estudaram ascensão capilar dos tecidos através de um método elétrico, onde é baseado na medição do transporte de água ao longo das fibras têxteis pela capacitância. Porém esse método é incapaz de determinar o teor de líquidos em diferentes alturas e as quantidades de líquidos absorvido sem adição de corante, já que este altera a tensão superficial do líquido e a sua velocidade. Este método permite apenas uma visão geral da evolução do transporte de líquidos. Um computador é usado para fazer o controle de todo o dispositivo experimental, sendo equipado com um programa de software que comanda ao mesmo tempo, o ohmímetro e a central de aquisição.

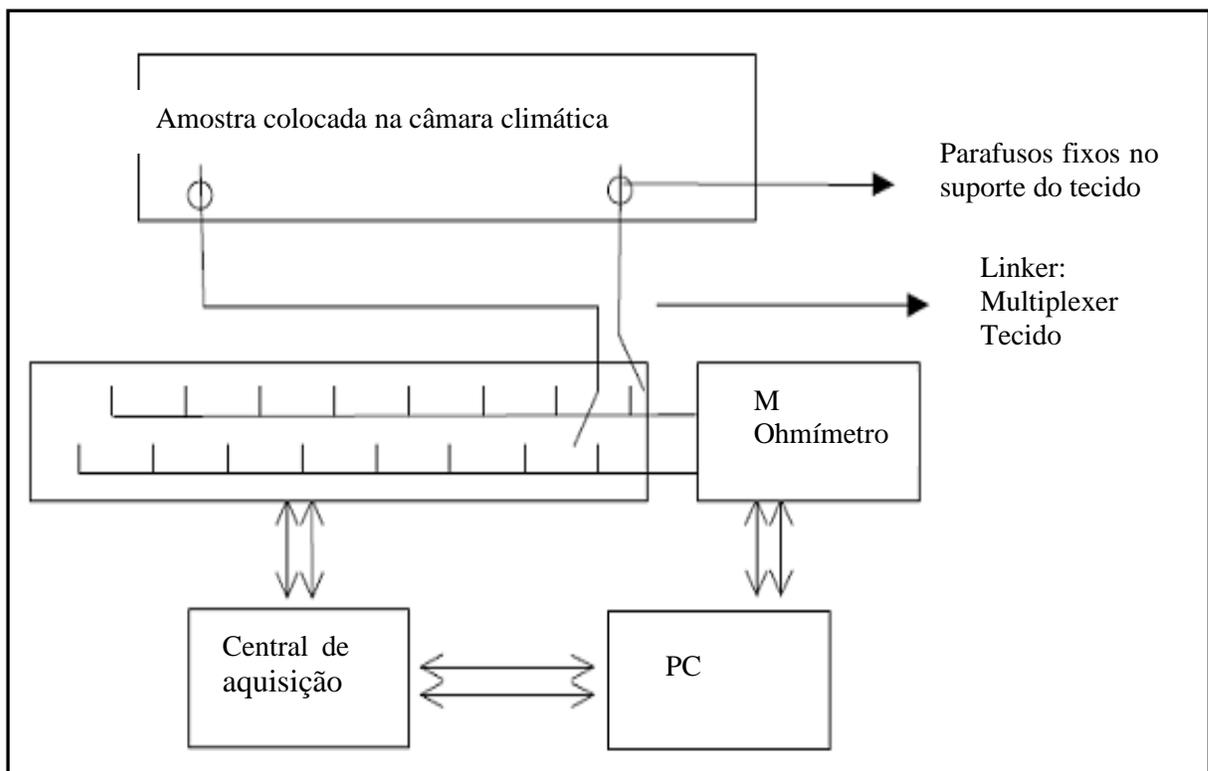


Figura 2.2. Ohmímetro e a central de aquisição. (Fonte: HANDAOUI et al. 2008)

Foram utilizados como amostras de tecidos, inicialmente seco, com dimensões 15 x 10 cm composto por fibras de viscose e algodão. As estruturas dos tecidos foram sarja e cetim com 26 o número de fios de trama por centímetro. Para garantir uma melhor absorção aos tecidos, os mesmos, passaram por um processo de desengomagem utilizando água destilada. O tecido é

mantido na vertical e parcialmente imerso em um banho com água destilada, como mostra a figura 2.3.

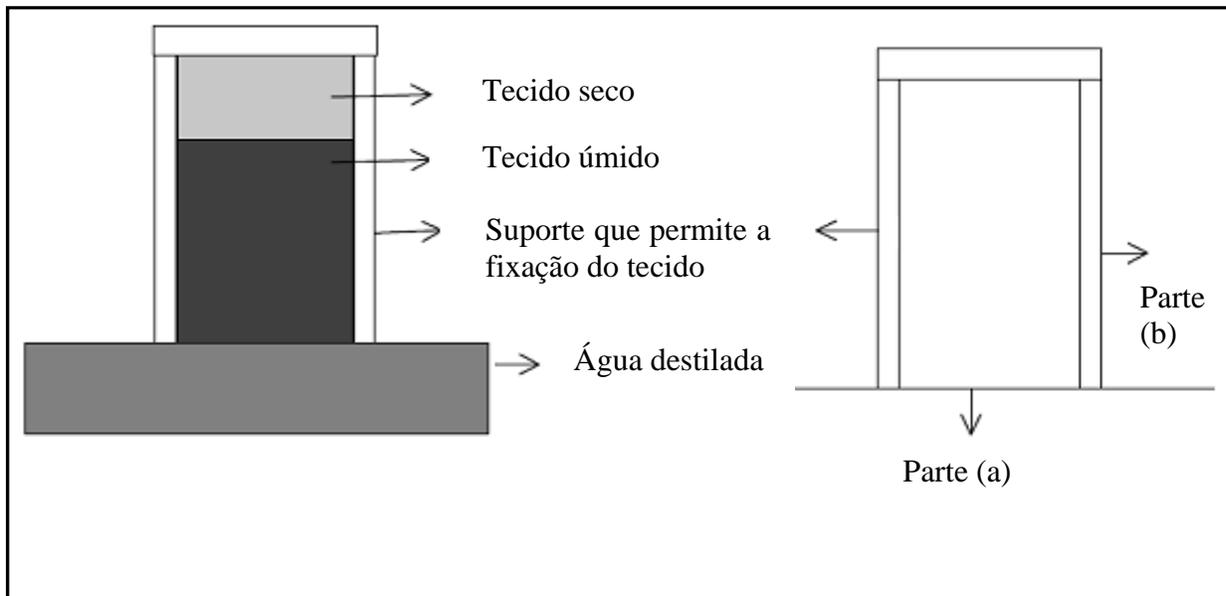


Figura 2.3. Tecido imerso em água destilada. (Fonte: HANDAOUI et al. 2008)

Eletrodos foram colocados ao longo do tecido com uma distância de 1 cm e com isso foi colocado em uma câmara com temperatura de 20°C e umidade relativa de 65% e alimentado por uma tensão de 1V.

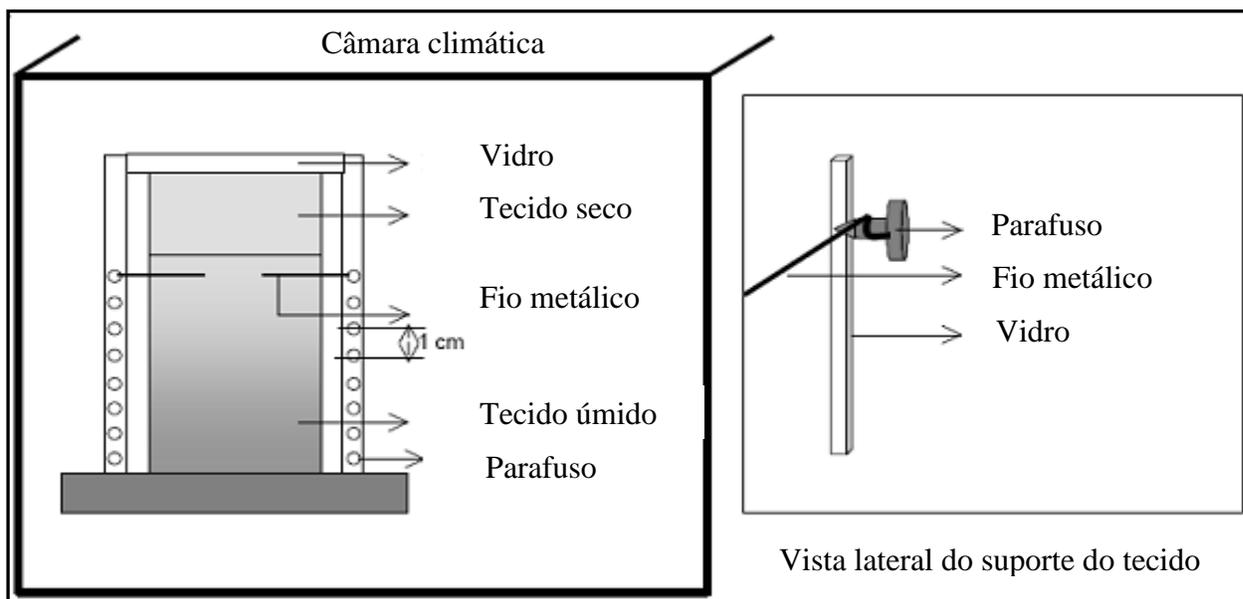


Figura 2.4. Câmara climática. (Fonte: HANDAOUI et al. 2008)

Foi medido o valor da resistência que é igual a $7 \times 10^{10} \Omega$ e com isso foram feitas as análises das curvas. Em cada região a resistência elétrica apresentou valores diferentes. Na A, a 5 cm, a resistência elétrica apresentou um valor maior e constante, na região B, entre 121 e 360 s, a resistência elétrica diminuiu e na C, a 360 s aproximadamente, a resistência elétrica diminuiu e tornou-se constante atingindo um valor de $10^7 \Omega$, período esse que corresponde ao equilíbrio na quantidade de líquido. Foi estabelecida uma relação entre a quantidade de líquido absorvido e o valor da resistência elétrica, com a finalidade de deduzir a distribuição de líquidos dentro do tecido durante a ascensão capilar vertical.

A partir dos resultados os autores concluíram que a quantidade de líquido no tecido diminui com a altura e que a sua distribuição não é homogênea pelo fato da complexidade da estrutura do tecido e da diferença dos tamanhos e formas dos poros. Foi possível também deduzir a pressão capilar nos tecidos versus o conteúdo de líquido.

POUROVÁ e VRBA (2006) projetaram e otimizaram um aplicador de microondas para secagem de tecidos. Todo o sistema de funcionamento foi com uma frequência de 2,4 GHz e os magnetrons proporcionaram uma potência de 800 W. A máquina foi destinada para uso da secagem no processo de produção de tecidos e baseia-se no princípio Fabry-Perrot, que é um ressonador tipo aberto. Ele tem um magnetron como fonte de energia eletromagnética. O tecido é colocado no meio do plano entre os condutores paralelos como mostra a figura abaixo.

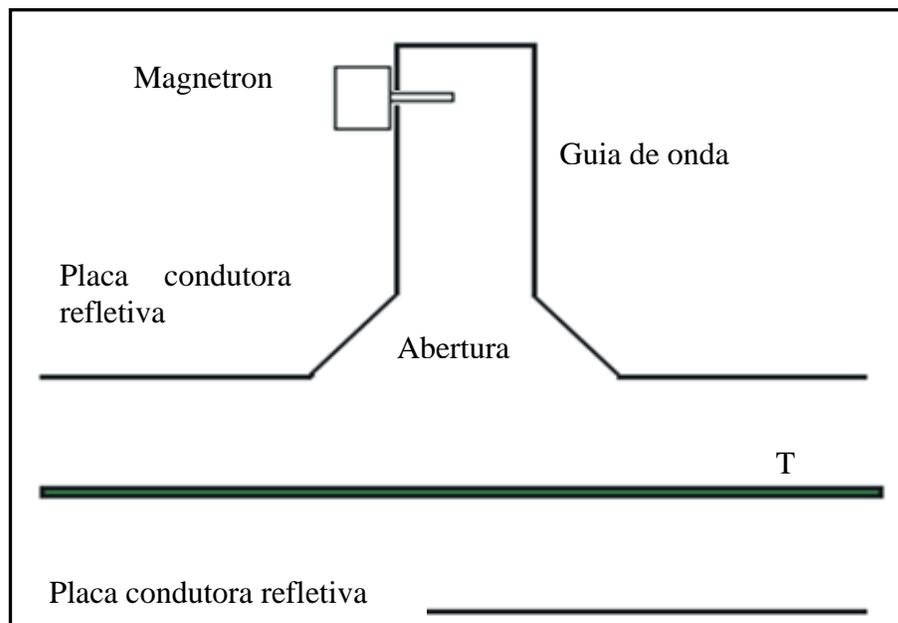


Figura 2.5. Aplicador de microondas para o tecido. (Fonte: POUROVÁ e VRBA 2008)

Primeiramente foi utilizado um simulador do campo eletromagnético para a determinação da posição do magnetron e com isso encontrar a distribuição da intensidade do campo elétrico no setor da secagem do tecido.

A otimização do equipamento teve como objetivo criar o máximo de intensidade de campo elétrico no plano de secagem do tecido. Para os primeiros experimentos foram construídos uma única célula viável para a utilização das primeiras experiências de secagem. Na figura 2.6 é apresentada os resultados das medições de umidade na secagem do tecido no que se refere ao tempo.

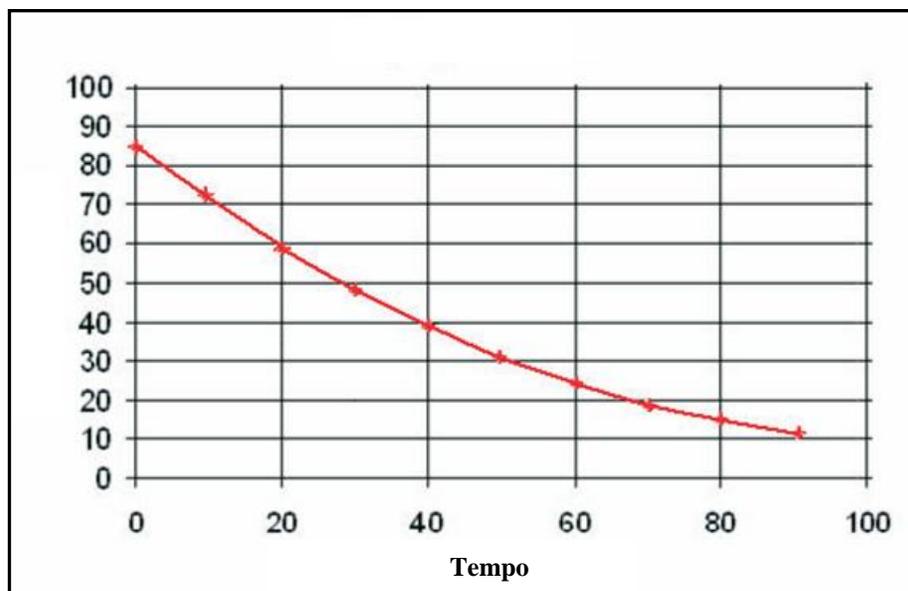


Figura 2.6. Umidade na secagem do tecido. (Fonte: POUROVÁ e VRBA 2008)

Baseado em considerações teóricas desenvolvidas pela Universidade Técnica Checa em Praga, um protótipo de uma máquina de secagem de microondas foi construído em cooperação com o Instituto de Pesquisas de Máquinas Têxteis e da Universidade Técnica em Liberec. A figura 2.8 mostra o protótipo da máquina de secagem e sua parte interna.

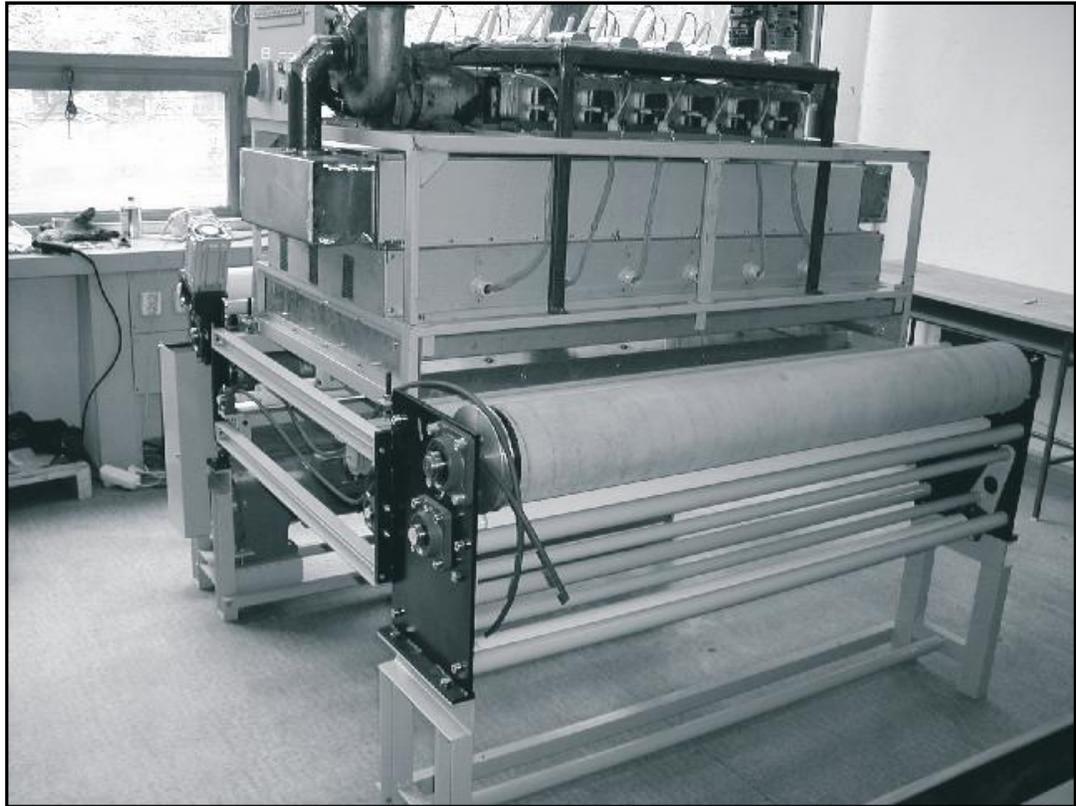


Figura 2.7. Protótipo da máquina de secagem. (Fonte: POUROVÁ e VRBA 2008)

Várias células podem ser vistas em conjunto com os tubos utilizados para retirar a umidade. Este equipamento possui 17 células de aquecimento.

VIGNESWARAN, C., CHANDRASEKARAN, K. e SENTHILKUMAR, P. (2009) estudaram a relação entre a condutividade térmica e algumas propriedades de um tecido de malha composto por fibras de juta e algodão com três diferentes títulos de fios e com diferentes porcentagem de fibras. Com os resultados das propriedades e da condutividade térmica foi usada a ferramenta estatística ANOVA para analisar a importância entre elas.

Para os diferentes percentuais de fibras de juta no tecido é confirmada a tendência da diminuição dos valores da condutividade térmica quando há um aumento da proporção da fibra de juta na composição do tecido. A condutividade térmica diminui com o aumento da tensão. Com o aumento da espessura tem-se a diminuição da condutividade térmica, verificando o aumento da resistência térmica. Com os valores dos coeficientes de correlação foi notada uma

tendência no aumento de permeabilidade do ar quando aumenta o percentual de mistura das fibras e uma diminuição no valor do isolamento térmico.

Os autores concluíram que a condutividade térmica do tecido de malha com maiores valores do título dos fios em tex e com maiores percentuais de mistura de fibras são menores, porém para maiores valores da permeabilidade do ar a condutividade térmica é maior.

WANG, F., ZHOU, X. e WANG, S. (2009) desenvolveram um novo tipo de fibra de poliéster com micro poros e com uma estrutura parecido a um favo de mel, para uma boa absorção de umidade e secagem rápida dos tecidos planos com entrelaçamento tipo tafetá e sarja. Os autores analisaram as imagens microscópicas das fibras e constataram que existem dois tipos de poros na superfície da fibra, onde um tem uma estrutura de canal longo e a outra com a estrutura de elipse.

Para saber a taxa de transporte de água foi usado um método de absorção vertical com uma tira de tecido, onde o mesmo era imerso em 3 mm de água destilada a uma temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 2 %. Para as propriedades de transmissão de calor foi usado o tradicional teste do copo molhado baseado na norma ASTM E96-95, onde o copo é preenchido com água destilada e fechado para evitar a perda de vapor. O peso inicial da amostra foi anotado e em seguida foram pesados periodicamente até a obtenção de valores constantes.

Para as propriedades de secagem rápida a medição foi conforme a norma Taiwan FTS-FA-004, onde as amostras de tecidos foram colocadas numa câmara climática nas condições padrão de 20 ± 2 °C e 65 ± 3 % de umidade relativa. As amostras tinham 5 cm x 5 cm e foram colocados com a face voltada para cima no prato da balança e o peso seco registrado por um computador. O peso úmido foi registrado com a ajuda de um gotejamento de água por uma pipeta.

Os resultados das análises das propriedades foram apresentados por gráficos onde foi constatado que não é possível caracterizar a propriedade total de transporte de água nas direções do urdume e trama dos tecidos e que em duas amostras de tecidos, apresentaram as piores áreas de absorção, pois estas amostras tinham altos valores do fator de cobertura causando um maior impedimento de penetração de água no tecido. Para a propriedade de transmissão de vapor os autores concluíram que o tratamento aditivo hidrofílico pode melhorar essa transmissão e que o tratamento com um agente de amaciamento com silicone não era adequado para secagem rápida.

HAGHI e GHANADZADEH (2005) estudaram o impacto do processo de transferência de calor sobre o processo de transferência de umidade, adicionando a transferência de umidade por difusão de água, ação da capilaridade do líquido e a umidade de sorção das fibras. O objetivo principal deste estudo foi de avaliar a capacidade de secagem de alguns modelos escolhidos para quantificar o comportamento da remoção de umidade na secagem convectiva de uma amostra de tecido que tem sua composição com fibra de lã. As características da amostra usada no experimento foram as seguintes:

- Diâmetro da fibra: 20,8 μm
- Densidade linear do fio: 20 tex
- Estrutura do tecido: Jersey duplo
- Massa do tecido: 276 g/m^2
- Espessura do tecido: 2,98 mm

O método consiste na medição da curva de secagem de um material poroso, de camada simples, nas temperaturas de 50, 65 e 80 °C com umidade inicial das amostras 1,0 (b.s.) e posterior solução da equação diferencial parcial. Foram selecionados nove modelos para ajuste das curvas de secagem e determinação dos parâmetros da equação. Os modelos foram os seguintes: Lewis (1921), Page (1949), Henderson and Pabis (1961), Quadratic function, Logarithmic (Yaldiz and Eterkin, 2001), Degree polynomial, Rational function, Gaussian model e Present model. Os ajustes foram obtidos via método de regressão não linear.

A comparação entre os modelos de Lewis e Present model foi através dos valores do coeficiente de correlação (r) e do erro (S). Com a estimação dos parâmetros, realizado com Present model, os autores chegaram à conclusão que serão necessários a realização de mais pesquisas e modificações para ser usado com confiança na indústria de fabricação de tecido com fibras de lã. Tem sido observado em trabalhos de publicações anteriores e em alguns modelos de equações apresentados, que aumentando a velocidade do ar de secagem terá uma redução da espessura do filme de gás estacionário na superfície do sólido e conseqüentemente um aumento dos coeficientes de transferência de calor e massa.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Introdução

Foi feita uma revisão bibliográfica dos últimos cinco anos de publicações em congressos e revistas, nas área de transferência de calor e massa através dos diferentes tipos de tecidos e diferentes tipos de métodos de secagem, com o objetivo de analisar se os assuntos relacionados já foram estudados, de que forma foram abordados em estudos anteriores.

3.1. A evolução do tecido jeans

O tecido jeans (denim) é o mais popular atualmente. É um tecido pesado de algodão cru ou com fios de urdume tintos em índigo (corante) e fios na trama branca em ligamento sarja 2:1 ou 3:1 muito usada para calças jeans (CATOIRA, 2006).

Acredita-se que o termo jeans esteja ligado às roupas feitas com um tecido azul rústico de algodão, que eram usadas pelos marinheiros genoveses no século 17. No Brasil, o jeans teve sua comercialização na década de 60 e era destinada, principalmente, aos trabalhadores do campo, cujo nome era “calça rancheira”.

O primeiro a utilizar o jeans como artigo de confecção têxtil foi o Levi Strauss, onde criou roupas com boa resistência para mineiros nos Estados Unidos, transformando-se num sucesso por motivos da mesma não estragar com facilidade. Levi Strauss tinha como cliente um alfaiate de nome Jacob Davis, onde o mesmo fez uma proposta com a idéia de reforçar as costuras das calças usadas pelos mineiros com rebites. Obtiveram um enorme sucesso que resolveram requerer uma patente e em 20 de maio de 1873 é marcado o início da história de sucesso da calça jeans.

Neste período o jeans era destinado a roupas de trabalho e somente no século XX foi utilizado no dia-a-dia.

A palavra denim originou-se na França a partir da expressão serje de Nimes (sarja de Nimes), em referência à cidade do sul do país Nimes. Na época era um tecido muito rústico de algodão bastante usado por trabalhadores.

O termo índigo é referente a um corante azul produzido a partir de algumas plantas originárias da Índia (*Indigofera tinctoria*), mas também de outras variedades que crescem no

Egito, no Oriente Médio e na América, que, há muitos anos, alguns métodos de tingimento já eram utilizados para a aplicação desse pigmento sobre fibras naturais. A utilização desse pigmento foi inicialmente usada na fibra de lã e só algum tempo depois chegou à fibra de algodão. Egípcios, fenícios e chineses já tinham conhecimento do índigo há milhares de anos. Na Índia, já usava em 600 a.C. Chega à Europa, ainda na Antiguidade, via península árabe e a importação só foi intensificada com a descoberta do caminho marítimo para as Índias.

Sinteticamente o índigo foi obtido no ano de 1880 e até o fim do século XIX superou o índigo natural. Ainda nesse período outros corantes azuis surgiram para concorrer com a cor milenar.

Houve uma diminuição considerável do índigo entre os anos de 1930 e 1940, chegando quase a desaparecer. Em 1950, a década do *blue jeans*, o índigo reativou no mercado, com a lavagem *délavé*, que traz um aspecto envelhecido, típico da tintura a índigo, oferecendo pouca resistência às lavagens e à fricção natural causada pelo uso. Desde 1950, o jeans veio a se tornar o material têxtil mais democrático do mundo, quando vestidos por celebridades dos filmes de Hollywood.

O jeans teve sua expansão muito além de um modelo básico. Ampliou-se o circuito da moda e promoveu não só variantes dos moldes originais, mas modelagens para mulheres e crianças.

A partir da década de 1970, o jeans mereceu mais espaço no mundo da moda, por motivos principalmente de suas múltiplas lavagens. Nesta mesma época, o estilista Kelvin Klein foi o primeiro a colocar o jeans na passarela, havendo assim uma inclusão social do produto, que era usado por simples operários até pessoas com boa classe social. Quando o elastano foi incorporado à composição do jeans, ele ganhou outro status, fazendo com que tivesse um melhor caimento. A conquista do tecido jeans ao restante da população, só chegou com a proliferação social do seu conceito como roupa despojada e do cotidiano, sem deixar seu charme e elegância de lado.

A comercialização do jeans no Brasil se deu no início da década de 60, pela indústria já extinta Santista Têxtil, destinado, principalmente, aos trabalhadores do campo, a chamada “calça rancheira” com *denim* de 18 onças.

O jeans tem uma característica marcante, pois seu aspecto de envelhecimento que acontece pelo desbotamento gradativo, foi o que levou a indústria a desenvolver processos de

envelhecimento acelerado, que inicialmente aplicados ao tecido aberto, ou seja, antes da confecção da peça de vestuário final. É na etapa de acabamento onde se tem uma fonte de inovação e desenvolvimento do produto, sendo vital no mercado, atualmente essa etapa é conseguida por lavanderias industriais, fora do processo de fabricação industrial do tecido.

O lixamento foi o primeiro processo de envelhecimento precoce e através dele se derivaram os demais. Esse processo consistia em passar o tecido por equipamentos providos de cilindros revestidos de material abrasivo. Logo depois veio o *délavé*, aplicados aos tecidos jeans e aos brins, mas o mesmo já era empregado em veludos. Porém, o processo que obteve mais sucesso e que permanece até hoje é denominado stone wash (lavagem com pedra), essa lavagem é derivada do *délavé*. Este processo nada mais é que lavar as peças já confeccionadas em máquinas com tambores rotativos, com pedras especiais, geralmente pedras pomes, que irá provocar, por abrasão, o desgaste superficial do tecido (CATOIRA, 2006).

Com o passar dos anos os produtos químicos foram substituindo a abrasão estritamente mecânica e o jeans foi sofrendo mudanças tornando-se mais resistente à abrasão extensiva. As máquinas sofreram mudanças, ou melhor, foram adaptadas para resistirem aos resíduos deixados pelas pedras pomes. Com isso, novos produtos químicos e equipamentos com controle eletrônico vêm produzindo novos e vários efeitos no produto final.

3.2. Materiais têxteis

3.2.1 Fibras têxteis e sua classificação

De acordo com a A.S.T.M. (American Society for Testing and Materials), fibra têxtil é um material que se caracteriza por apresentar um comprimento pelos menos 100 vezes superior à sua largura ou diâmetro.

Pode-se dizer mais objetivamente que fibra têxtil é todo material que pode ser usado para fins têxteis, podendo ser um fio, tecido, malha, etc (PITA, 1996).

A indústria têxtil utiliza diferentes espécies de fibras, oriundas do reino vegetal, animal e mineral, existindo ainda as que são quimicamente produzidas pelo homem, através de utilização de materiais provenientes dos reinos vegetal e mineral. As fibras são divididas em dois grupos, mais precisamente em fibras naturais e em fibras têxteis não-naturais.

As fibras naturais, como o próprio nome diz, são aquelas produzidas na natureza proporcionando ao homem um aproveitamento como tal. As fibras não-naturais são todas produzidas por processos químicos, por polímeros naturais ou por polímeros obtidos por síntese química (sinteticamente) ou de origem inorgânica. Na figura 3.1 é apresentada a classificação geral das fibras têxteis.

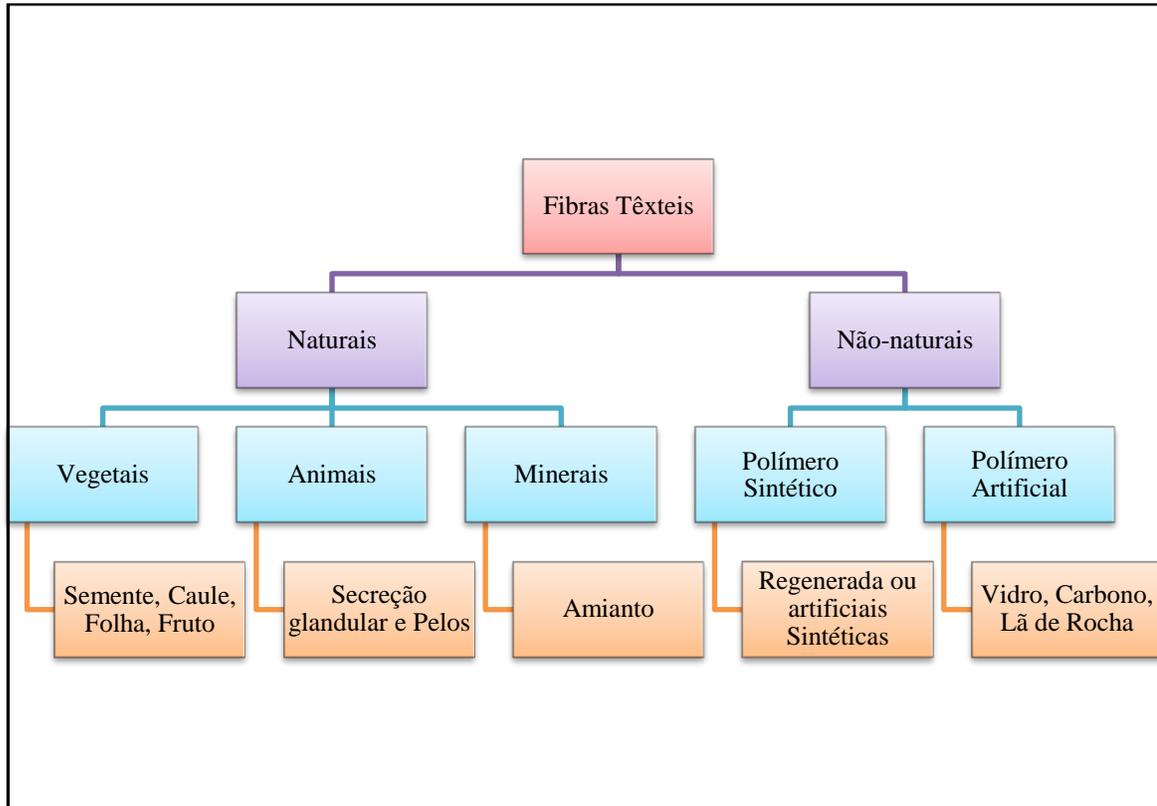


Figura 3.1. Fluxograma das fibras.

FONTE: Fibras Têxteis. Pita (1996)

Essas fibras, tanto as naturais como as não naturais diferem-se de inúmeras maneiras. Cada qual possui características e propriedades diferentes, dimensões de suas cadeias moleculares, cristalinidade, as cores, massa específica, elasticidade e hidrofiliidade. O conhecimento profundo das fibras e de seus aspectos técnicos antes de desenvolver determinado tecido é importante, pois tudo na cadeia têxtil passa primeiramente pela análise correta da fibra.

A composição química das fibras é o que confere uma qualidade diferenciada e única. As fibras têxteis são classificadas de acordo com sua composição química e sua estrutura molecular. Quase sempre, fibras naturais ou não naturais, o elemento carbono está presente, ligado na

maioria das vezes com outros elementos. As maneiras como esses elementos se ligam, formando as cadeias de polímeros, afetam as características e propriedades de alongamento, elasticidade, resistência, absorção entre outras.

As fibras possuem estruturas cristalinas e amorfas. Estas áreas amorfas se comparadas com as estruturas cristalinas possuem baixa resistência à tração. Sua resistência é aumentada quando as redes cristalinas forem orientadas.

Para uma boa absorção de corantes e de umidade, as fibras têm que ter em sua estrutura maiores quantidades de áreas amorfas. O comportamento do artigo têxtil em relação ao conjunto de forças é que irá determinar quando, como e que tipo de fibra e fio será utilizado no processamento do tecido até a produção do artigo final.

O Ne é uma unidade de medida da titulagem indireta do sistema inglês, no qual relaciona o diâmetro com o comprimento de um determinado peso de fibra, fio ou retrós. É definido como o número necessário de meadas de 840 jardas para pesar 454 gramas. Neste sistema inglês, quanto mais fino o fio maior o seu título.

A titulação os fios é uma forma de expressar, o diâmetro do mesmo e está dividida em dois grupos, tais como: grupo indireto e grupo direto. No grupo direto o título é diretamente proporcional ao diâmetro, sendo empregado na titulação de fios compostos por fibras naturais e não naturais.

O grupo indireto caracteriza-se pelo peso constante e o comprimento variável, ou seja, quanto menor a espessura do fio maior será o número que representa seu diâmetro. Neste grupo indireto o título é inversamente proporcional ao diâmetro.

Os sistemas que fazem parte do grupo direto são: sistema Denier e o sistema Tex com seus múltiplos e submúltiplos (ktex, dtex, mtex) e os sistemas do grupo indireto são: sistema inglês (Ne) e o sistema métrico (Nm).

Existem vários tipos de fibras naturais, porém as mais conhecidas são: algodão, lã, linho, rami, seda e juta. Dentre elas, o algodão tem maior participação em artigos têxteis.

Na tabela 3.1, são apresentadas as informações do consumo industrial de fibras e filamentos entre 1990 e 2008 no Brasil. No ano de 2009, do total de 969,8 mil toneladas de fibras naturais, o algodão participou com 948,6 mil toneladas, o equivalente a 98% do total, já para a fibra de juta foi o equivalente a 2%. No ano de 1990, essa participação foi de 92% de algodão e 4% de juta,

mostrando que há um crescente consumo de algodão nas indústrias têxteis em comparação as outras fibras naturais.

Tabela 3.1: Consumo industrial de fibras naturais no Brasil - 1999 a 2009 (em 1000 toneladas).

Ano	Naturais					Total
	Algodão	Lã lavada	Linho/Rami	Seda (fio)	Juta	
1990	730,0	18,0	16,4	0,33	29,7	794,4
1991	781,1	17,4	18,4	0,30	25,3	779,5
1992	741,6	13,2	18,4	0,19	30,1	803,5
1993	829,5	13,0	19,1	0,25	29,5	891,4
1994	836,6	12,5	12,4	0,15	26,9	888,6
1995	803,7	8,2	12,1	0,13	19,9	844,0
1996	829,1	7,8	10,6	0,11	14,6	862,2
1997	798,7	9,8	9,2	0,06	23,0	840,8
1998	782,9	4,1	4,4	0,06	15,6	807,1
1999	806,5	2,3	5,7	0,07	13,0	827,6
2000	885,0	8,3	2,4	0,11	19,0	914,8
2001	865,0	6,4	1,6	0,11	18,5	891,6
2002	805,0	5,0	1,6	0,16	19,0	830,8
2003	800,0	5,5	1,4	0,16	22,0	829,1
2004	930,0	5,0	1,2	0,18	22,0	958,4
2005	900,0	4,5	1,92	0,21	20,0	926,6
2006	890,0	5,0	2,31	0,15	18,2	915,7
2007	1005,8	5,8	1,30	0,16	19,0	1032,1
2008	1050,0	6,0	0,90	0,11	21,0	1078,0
2009	948,6	4,7	0,80	0,15	15,5	969,8

FONTE: www.abit.org.br, 2010.

As fibras artificiais são obtidas por transformação de uma base natural, utilizando alguns artifícios químicos como: madeira (celulose), artifício e filamentos (celulose). Dentre elas pode-se citar a viscose, acetato, modal e liocel (tencel). A viscose é a que tem maior participação. Assim na tabela 3.2 podemos ver que no ano de 2009, do total de 50,1 mil toneladas de fibra

artificial 83% foram de viscosa e 17% de acetato. No ano de 1990, o percentual foi maior com 92% de viscosa e 8% de acetato.

Tabela 3.2: Consumo industrial de fibras artificiais no Brasil - 1999 a 2009 (em 1000 toneladas)

Ano	Artificiais		
	Viscosa	Acetato	Total
1990	38,4	3,4	41,8
1991	41,6	3,6	45,6
1992	38,3	2,8	41,1
1993	49,5	4,5	54,0
1994	51,7	5,3	57,0
1995	44,7	7,2	51,9
1996	27,2	7,6	34,8
1997	30,5	2,9	33,4
1998	27,0	2,4	29,4
1999	30,8	1,9	32,7
2000	30,1	1,5	31,6
2001	24,3	1,0	25,3
2002	23,9	9,85	33,8
2003	27,18	10,02	37,2
2004	29,21	10,06	39,3
2005	28,25	10,35	38,6
2006	37,44	10,79	48,2
2007	47,39	9,6	57,0
2008	19,71	9,3	29,0
2009	41,55	8,5	50,1

FONTE: www.abit.org.br, 2010.

As fibras sintéticas mais comuns são poliamida (nylon, helanca), poliéster (tergal), acrílico e polipropileno. No ano de 2009, do total de 612,3 mil toneladas de fibras sintéticas, o poliéster participou com 404,45 mil toneladas, o equivalente a 66% do total, para a fibra de poliamida foi de 12%. No ano de 1990, do total de 271,6 mil toneladas, o poliéster participou com 112,6 mil toneladas, o equivalente a 41%, para a fibra de poliamida foi de 24%.

Tabela 3.3: Consumo industrial de fibras sintéticas no Brasil - 1999 a 2009 (em 1000 toneladas)

Ano	Sintéticas				Total
	Poliamida	Poliéster	Acrílico	Polipropileno	
1990	65,6	112,6	20,4	73,0	271,6
1991	69,6	128,5	29,3	87,6	315,0
1992	60,3	135,4	19,9	77,4	293,0
1993	75,6	160,8	25,1	86,3	347,8
1994	78,3	179,4	27,4	104,5	389,6
1995	99,1	186,5	26,5	111,9	424,0
1996	107,3	186,6	26,9	107,1	427,9
1997	101,1	229,6	31,9	109,0	471,3
1998	94,5	224,1	29,4	110,0	458,0
1999	100,5	277,5	38,6	114,3	530,9
2000	101,5	314,64	53,3	122,1	591,5
2001	83,3	304,9	47,7	123,7	559,6
2002	73,14	304,64	43,0	144,0	574,8
2003	75,13	314,64	37,5	150,0	605,6
2004	80,49	342,90	48,1	161,0	690,2
2005	68,34	400,56	40,77	102,5	573,4
2006	70,85	361,8	35,03	95,8	576,7
2007	87,25	378,52	37,91	116,9	620,5
2008	80,98	446,4	41,4	110,0	678,8
2009	71,04	404,45	34,8	102,0	612,3

FONTE: www.abit.org.br, 2010.

Conforme a tabela 3.4 o consumo mundial de fibras têxteis entre 1960 e o final da década de 2000, praticamente quadruplicou. O consumo de fibras artificiais e sintéticas teve um aumento sete vezes mais com relação a fibras de algodão durante esse período.

O consumo de fibras naturais era superior ao consumo de não naturais, até o ano de 1990, porém essa relação vem sendo invertido ao longo da história. Analisando a tabela 3.4, percebe-se que, as fibras naturais respondiam por 82% do total e o de fibras não naturais apenas 18%, no ano de 1950. No ano de 1990, essa participação das fibras naturais ainda era predominante em

comparação as fibras não naturais, porém entre os anos de 2000 e 2008 esses valores inverteram e foram 41% e 59% em 2000 e 40% e 61% em 2008

Tabela 3.4: Consumo mundial de fibras têxteis - 1950 a 2008 (em 1000 toneladas).

Ano	Natural	Não naturais	Total
1950	7,7	1,7	9,4
1960	11,6	3,4	15,0
1970	13,5	8,4	21,9
1980	15,2	14,3	29,5
1990	21,5	19,4	40,8
2000	21,5	31,1	52,7
2008	24,4	38,2	62,6

FONTE: www.icac.org, 2010.

3.2.2. A fibra de algodão

A fibra de algodão é utilizada como fibra têxtil a mais de 7000 anos, e pode-se dizer que está ligada à origem mais remota do vestuário e à evolução da produção de artigos têxteis (SOUSA, 2003).

Desde a Pré-História o algodão acompanha o homem. Ele deixou de ser a lã branca que dá em árvore para colorir povos dos mais distantes países. No Oriente, misturam-se a incensos, flores, oferendas, seja na China, no Nepal, na Índia, no Paquistão. No Ocidente, é associado ao sol, ao verde da paisagem e aos ritmos seja do Brasil ou do México.

A palavra algodão vem do árabe *qoton*, que gerou o italiano *cottone*, o francês *coton* e o inglês *cotton*. Tem origem na Índia, onde foram tecidas as peças mais antigas e da Etiópia (norte da África).

A grande vantagem do algodão em relação às outras fibras é porque dele pode-se aproveitar tudo. A fibra é a parte mais importante, porém da semente também é produzido óleos, inclusive comestíveis. Sua penugem que fica presa aos caroços, também tem utilidades, tais como estofos de travesseiros, almofadas e estofamentos. O algodão pode ficar séculos com conservação

razoável e também é menos vulnerável a traças, mofo e fungos, pois é considerada a fibra mais resistente.

Nos dias atuais apenas cinco espécies de algodão são utilizadas de formas significativas, tais como:

- *American Upland* (*Gossypium hirsutum*) – é originário do México, onde suas fibras variam entre 2,22 a 3,33 centímetros e responde por cerca de 95% da produção mundial. Tem uma flor de tom creme, podendo produzir materiais pesados como lona de caminhão, bem como roupas delicadas de bebê.
- Egípcio – suas flores são no tom verde-limão e possui fibras longas, sendo bastante cultivado nos Estados Unidos e no Brasil.
- *Sea Island* – foi originário dos Estados Unidos, mas atualmente é cultivado nas Antilhas. Bastante valioso e caro, pois cresce devagar e exige cuidados.
- Asiático – possui fibras curtas, ásperas e grosseiras. Cultivado na China, Paquistão e Índia.
- Pima Americano (*Gossypium barbadense*) – tem origem peruana, possui fibras longas que variam entre 3,17 a 3,96 centímetros de comprimento, resistentes e respondem por cerca de 5% da produção mundial. Pode ser cultivado em regiões semi-áridas como o Egito, o Sudão, o Peru, os Estados Unidos.

As fibras de algodão têm uma estrutura monomolecular que se diferencia a partir das células epidérmicas da semente do algodoeiro. A formação da fibra de algodão desenvolve-se na epiderme, alongando-se até seu comprimento máximo. Até alcançar o comprimento final, o crescimento é cerca de 1 mm por dia. Nas camadas internas da fibra, a parede celular vai engrossando pela deposição de anéis de celulose. Este engrossamento cessa de quatro a cinco dias antes do arrebentamento da cápsula e liberação de seu conteúdo: as fibras de algodão. Quando a fibra atinge seu comprimento máximo, inicia-se o processo de deposição dos anéis de celulose ou camadas concêntricas de celulose que são depositados, de fora para dentro da fibra ficando abaixo da parede primária, constituindo-se desta forma a parede secundária ou parede celular. Cada anel de celulose formado corresponde a um dia de crescimento da maturidade da fibra.

Com a expansão da massa de fibras em conjunto ao aumento da pressão interna, há a abertura dos capulhos ou pulhocas. Nesta fase de abertura dos capulhos, a deposição de celulose

é mais lenta e há uma acentuada perda de água com grande rigidez, provocando a contração das fibras sobre si. O protoplasma da célula em forma de fibra morre, no fim da maturação. A fibra perde a forma cilíndrica e fica espalmada, assumindo assim na sua seção transversal, a forma característica de grão de feijão. A figura 3.2 apresenta a morfologia da fibra de algodão.

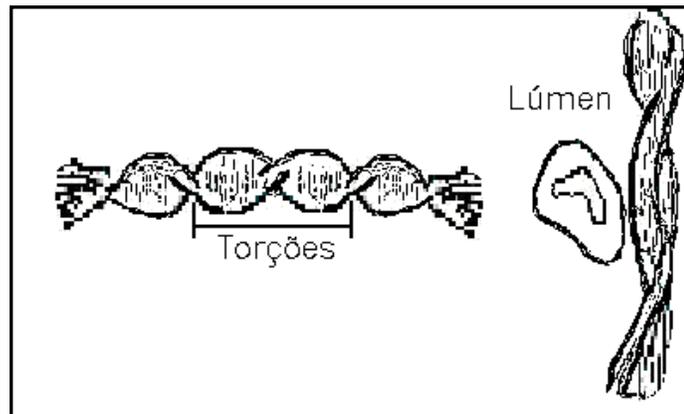


Figura 3.2: Morfologia da fibra de algodão. FONTE: Sousa (2003)

A forma microscópica da fibra de algodão é um tubo espalmado com várias torções sobre seu eixo, que em média, ocorrem em número de cinco por milímetro de fibra. A espessura das paredes pode variar de 0,35 a 15,5 micra, e o diâmetro maior do lúmen de 11,9 a 21,5 micra e sua densidade, com umidade relativa de $65 \pm 2\%$ é de $1,52 \text{ g/m}^3$ (SOUSA, 2003).

O algodão, além da celulose, apresenta em sua composição os constituintes comuns da célula vegetal. Conforme tabela 3.5 a celulose é o elemento mais importante e é o que comanda a maior parte das propriedades físicas e químicas do algodão.

Tabela 3.5: Composição do algodão

Materiais	Quantidade (%)
Celulose	85,5%
Óleos e ceras	0,5%
Proteínas, pectoses e pigmentos	5,0%
Substância mineral	1,0%
Água	8,0%

FONTE: Fibras Têxteis. Pita (1996)

A grande quantidade de grupos hidroxilas presentes na cadeia de moléculas da fibra de algodão, confere uma grande capacidade de absorção de água (cerca de 50% do seu peso) e facilidade no processo de tingimento.

Dentre várias propriedades do algodão, o comprimento é a mais importante, dependendo inicialmente do uso que se poderá dar à fibra. Ele está diretamente relacionado com a finura, a resistência e o número de torções que poderá ser dado na formação dos fios. Um equipamento utilizado em países como Estados Unidos é o *High Volume Instrument* (HVI), que permite a determinação objetiva das propriedades intrínsecas da fibra, inclusive o comprimento, reduzindo a subjetividade da classificação com base em critérios visuais, onde ainda é muito comum no Brasil.

Em se tratando de finura do algodão, é em geral, medida pela massa da fibra por unidade de comprimento. Ela é uma propriedade muito importante depois do comprimento. A finura influi diretamente na qualidade e na aparência dos fios e tecidos e sua medida média determina o número de fibras na seção transversal e a variabilidade dos seus valores é também um fator da maior importância. Relaciona a quantidade de celulose depositada na fibra e é expressa em $\mu\text{g}''$ (micrograma por polegada de fibra). Na tabela 3.6 está a classificação da finura do algodão.

Tabela 3.6: Finura do algodão

Algodão $\mu\text{g}''$	Artificiais denier	Classificação
Abaixo de 3,0	Abaixo de 1	Muito fina
3,0 a 3,9	1,0 a 1,3	Fina
4,0 a 4,9	1,4 a 1,7	Média
5,0 a 5,9	1,8 a 2,1	Grossa
6,0 em diante		

FONTE: Fibras Têxteis. Pita (1996)

Outra propriedade importante e que está diretamente relacionada com a finura do algodão é a sua maturidade. Essa maturidade refere-se ao diâmetro da fibra que é atingido pela superfície externa da camada primária durante o período de crescimento longitudinal da fibra. Durante uma fase de aproximadamente 25 dias, forma-se a camada secundária, mediante sucessivos depósitos

de celulose. Atingido a espessura que é normal para a respectiva variedade, diz-se que o algodão tem uma maturidade normal. Caso o engrossamento da referida camada for interrompida por qualquer motivo (clima, doença, etc.) a maturidade será deficiente, o lúmen ficará maior e a parede ficará mais fina do que o valor normal correspondente ao tipo de algodão dando lugar aos chamados algodões imaturos (NEVES, 1979).

O algodão não sofre decomposição se aquecido até o estado seco a 150°C, porém se é prolongado, uma coloração marrom surge gradualmente. É necessário um cuidado com o controle da temperatura das máquinas de secagem, pois não devem ultrapassar 93°C. O algodão exposto a uma alta temperatura num ambiente que contenha oxigênio causa danos influenciando a formação da oxixelulose.

A ação de água e microorganismos na fibra de algodão pode ser observada com uma umidade acima de 9%, pois acima disso a velocidade de multiplicação dos microorganismos pode aumentar rapidamente até alcançar o máximo de 50% da água contida. Com temperatura superior a 21°C, os fungos podem crescer abundantemente.

As fibras de celulose absorvem grandes quantidades de água numa faixa de 20 a 30% para umidade relativa de 100% a 25°C, permitindo assim que o algodão seja relativamente absorvente (SÁ, 2008).

O algodão é considerado uma das fibras mais confortáveis, por ter um nível relativamente alto de absorção de água ao qual está relacionado pela presença dos grupos hidroxilas da celulose. Quando a água penetra na fibra, o algodão incha e a sua seção cruzada torna-se mais arredondada, com isso permite absorver até cerca de um quarto do seu peso em água.

É comum, com a absorção da água na fibra, o aparecimento de um “stress” interno conduzindo ao enfraquecimento da mesma, porém para o algodão ocorre uma diminuição do “stress” interno e com isso a fibra torna-se mais forte, porque terá menos stress interno para compensar.

A água absorvida atua como um lubrificante interno que irá contribuir para aumentar o nível de flexibilidade das fibras, tornando desta forma as roupas de algodão mais fáceis de passar a ferro quando úmidas. O algodão atende aos requisitos da indústria do vestuário fornecendo tecidos leves, fortes, flexíveis e fáceis de secar e lavar.

O encolhimento e o amarrotamento dos tecidos de algodão são os aspectos mais desfavoráveis, porém o primeiro pode ser controlado com uma aplicação de acabamentos anti-encolhimento.

Em se tratando do uso da fibra de algodão, há inúmeras utilidades, como aplicações médicas, móveis, na indústria automobilística e em várias outras indústrias, conforme observado na figura 3.3, porém o principal consumo é destinado à indústria têxtil, que absorve aproximadamente 60% da produção mundial de fibra de algodão (BUAINAIN e BATALHA, 2007).

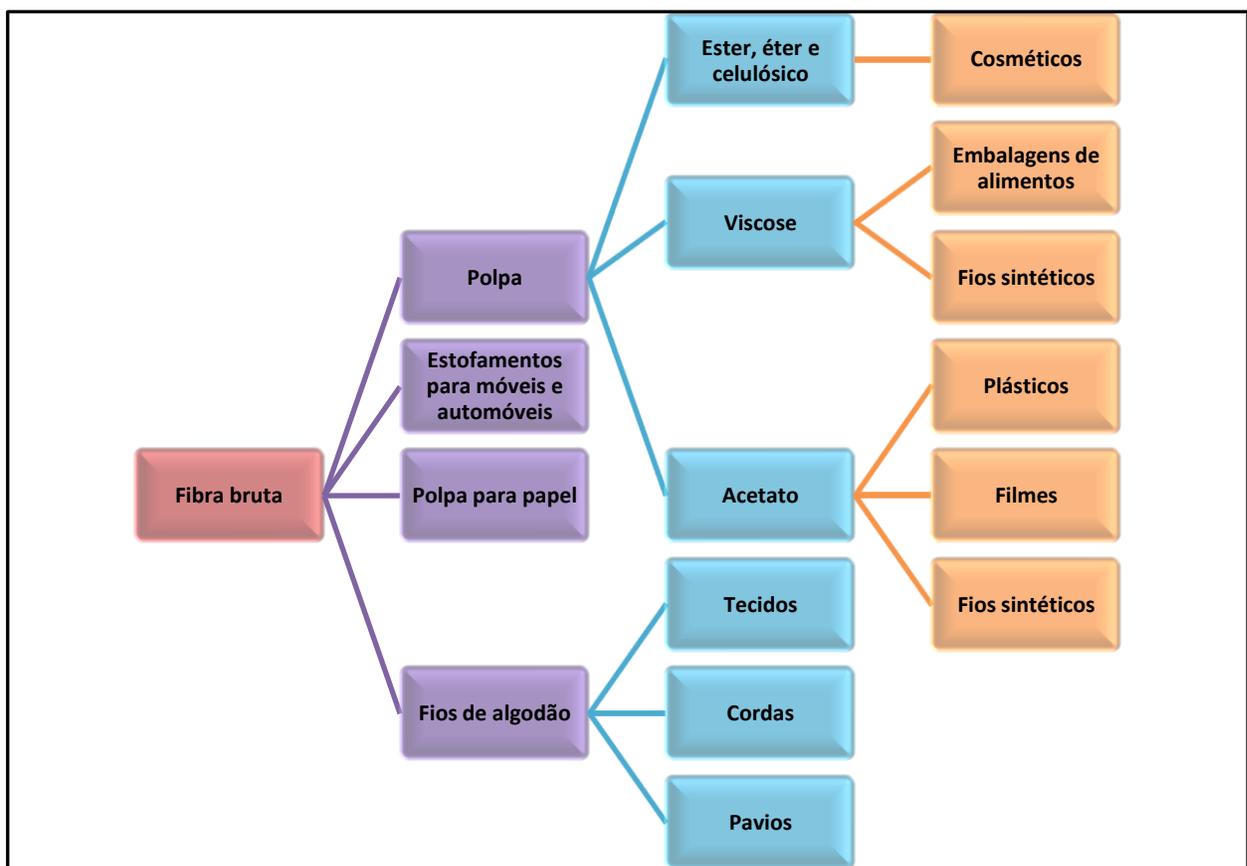


Figura 3.3: Fluxograma da fibra bruta

3.2.3 Processo de tingimento dos fios de algodão com corante índigo

A fabricação do jeans depende do processo de tingimento dos fios que chamamos de urdume e este processo é longo, pois o corante índigo não é o mais indicado para a fibra de

algodão, sendo necessário repetir por muitas vezes o tingimento e a oxidação para a obtenção de um azul intenso sobre a fibra. São dois os processos de tingimento dos fios:

- Tingimento em corda ou multicaixas rope-dye
- Tingimento em urdume aberto, mais conhecido como método loo-dye

O processo de tingimento em corda consiste em um equipamento com aproximadamente 60 metros de comprimento. As cordas podem alcançar um comprimento aproximado de 25000 metros, e normalmente em número de 12, 24 ou 36 e preparados com 300 a 400 fios cada corda. O tingimento pode ser de maneira contínua, sem parar a máquina durante a troca de partidas. As instalações geralmente são compostas por cubas de umectação e tingimento onde é alimentado o corante índigo já reduzido e solubilizado. A oxidação do corante ocorre com a passagem aérea dos fios de urdume entre cada cuba de tingimento, garantindo, ao final, um tingimento intenso (SENAI CETIQT, 1994).

O processo de tingimento em camadas é adequado para realização do processo de engomagem imediatamente após o tingimento. A instalação é constituída de 1 a 3 cubas de umectação, 4 a 8 cubas de tingimento e 3 caixas para o enxágue.

Este processo possui algumas vantagens em relação ao processo em cordas, pois são em menor comprimento, tempo de umectação mais curto e maior rapidez na estabilização dos banhos de tingimento. Porém, as principais desvantagens são as propriedades de solidez inferiores e maior consumo de hidrossulfito.

Existem também instalações para tingimento em camada dupla, ao qual é adequada para a engomagem separada dos rolos de urdume após o tingimento.

Uma variante desta instalação é a de tingimento “loop-dye 1 for 6” que consiste na recondução dos fios, depois da oxidação, ao mesmo banho de tingimento possibilitando a redução do comprimento da máquina, bem como no consumo de hidrossulfito.

3.2.4 Tecelagem

A tecelagem é uma das formas de artesanato mais antigo ainda presente nos dias de hoje. O processo de tecer refere-se ao entrelaçamento de dois fios formando um ângulo reto entre eles. Esses fios são: trama (transversal) e urdume (longitudinal).

A trama é um conjunto de fios que está no sentido da largura do tecido e o urdume no sentido do comprimento.

Há dois tipos de tecidos: malha e tecido plano. A malha é definida como sendo o entrelaçamento de laçadas com fios dispostos um a um por agulhas, já o tecido plano os fios de trama são cruzados um a um com os fios de urdume que já se encontram previamente dispostos no tear. No cruzamento há somente duas posições para os fios de trama: ou passa por cima ou por baixo dos fios de urdume. As combinações formadas pelos cruzamentos são conhecidas como padronagem. A figura 3.4 apresenta um tipo de padronagem denominado sarja 3:1, onde o número 1 representa os fios de trama e o número 2 representa os fios de urdume.

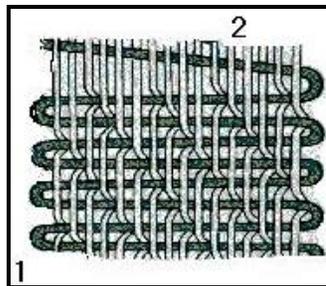


Figura 3.4: Diagrama da Sarja (SOUSA, 2003)

O ligamento sarja é o primeiro mais complexo depois do ligamento tela (tafetá) e são principalmente utilizados para vestuário, particularmente em roupas profissionais, como macacão, avental e em outros tecidos onde necessite de uma construção forte. A sua utilização em jeans destaca-se e atualmente é um importante item da moda.

A densidade superficial da sarja varia entre 136 e 270 g/m^2 quando sua densidade é considerada como leve ou média e 271 g/m^2 quando considerada pesada. A fabricação deste tecido normalmente é com algodão cardado com a variação de título na unidade Ne de 24/1 a 14/1 para artigos considerados superficialmente leve a média, e com Ne 12/1 a 8/1 nos artigos com densidade superficial pesada. O sistema Ne é uma unidade de medida que está diretamente ligado com o diâmetro do fio, quanto maior o valor do Ne mais fino será o fio.

Os fios antes de serem submetidos à tecelagem recebem a aplicação de uma goma, o qual tem a finalidade de encapsular os fios com uma película elástica para o ganho de resistência à abrasão sem perder sua elasticidade e “colar” as fibras para evitar o deslizamento entre elas, aumentando a resistência à tração.

3.2.5 Processo de beneficiamento do jeans

Existem três etapas de beneficiamento de tecido cru que são: a preparação, o beneficiamento propriamente dito e os acabamentos especiais. Em se tratando do jeans, o fluxo de acabamento é muito mais simples. Existe um sistema integrado que se realizam quatro processos consecutivos: chamuscagem, amaciamento, skew (correção do entortamento das tramas) e pré-encolhimento. Uma linha integrada para processamento do jeans está exibida na figura 3.5.



Figura 3.5: Sistema integrado para acabamento do jeans. (Fonte: Vicunha Têxtil – RN)

O processo de chamuscagem é a eliminação de fibras curtas e soltas através do fogo. Na figura 3.6 é apresentado um esquema da chamuscagem do tecido.

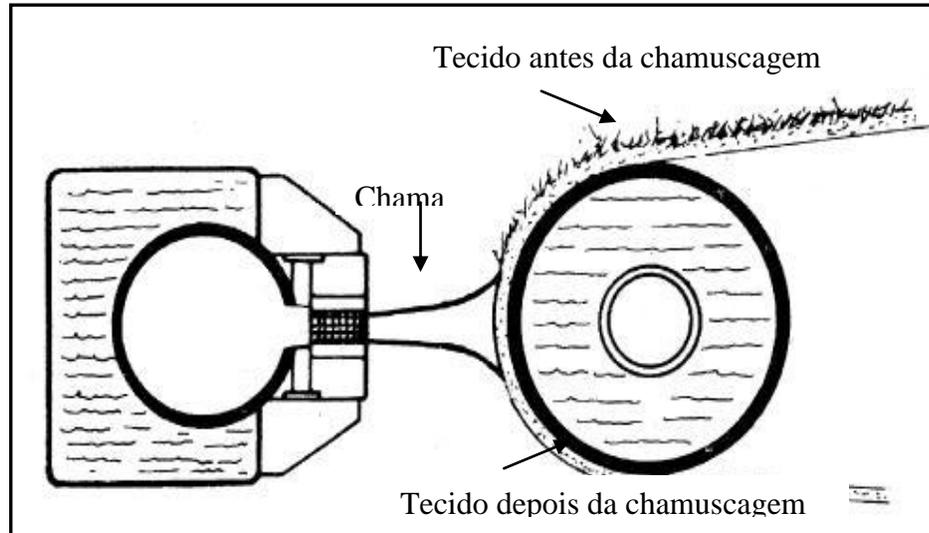


Figura 3.6: Diagrama esquemático da chamuscagem do tecido. (Fonte: JORGE, 2007)

É na rama, equipamento com a função de aplicar produtos químicos, que favorece o toque, a costurabilidade e a definição da largura final do tecido. A sanforizadeira é utilizada para dar um pré-encolhimento aos tecidos, evitando desta forma o encolhimento após a primeira lavagem pelos clientes. A rama proporciona ao tecido melhor brilho e toque. Na figura 3.7 é apresentado um diagrama esquemático de uma sanforizadeira.

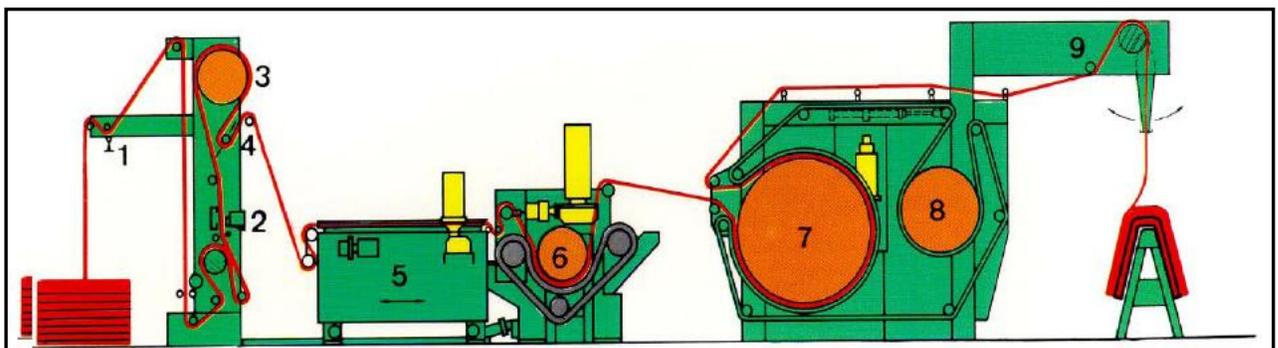


Figura 3.7: Diagrama esquemático da sanforizadeira. (FONTE: www.texima.com.br)

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1: Entrada do tecido; | 6: Unidade de encolhimento com manchão de |
| 2: Jato de água; | borracha; |
| 3: Tambor vaporizador; | 7: Calandra de feltro; |
| 4: Regulador de trama; | 8: Tambor para secar o feltro; |
| 5: Rama de 1,2 ou 2,4 m com pinças; | 9: Saída do tecido em fralda. |

3.3 Secagem

A secagem tem a finalidade de remover água (ou um solvente) de um material por evaporação. Durante o processo de secagem, normalmente é necessário fornecer calor para a evaporação da umidade do material.

Ocorrem transferências simultâneas de calor e massa tanto internamente, quanto entre a superfície externa do material e o ambiente que o envolve, quando o calor é necessário para a evaporação da água.

Para a descrição do fenômeno da secagem é de fundamental importância o conhecimento dos mecanismos de transferência de água do interior do material para sua superfície.

Dentre os mecanismos os mais importantes são:

- Difusão líquida: é devido à existência do gradiente de concentração;
- Difusão de vapor: é devido ao gradiente de pressão de vapor que por sua vez é causado pelo gradiente de temperatura;
- Escoamento de líquido e de vapor: ocorrem por causa da diferença de pressão externa, da concentração, capilaridade e alta temperatura.

É bastante complexo saber ao certo quais mecanismos estariam atuando na secagem de um determinado material. Geralmente um mecanismo tem predominância em um determinado instante do processo, porém diferentes mecanismos podem atuar em fases distintas ou em uma mesma fase do ciclo completo de secagem. A predominância do mecanismo está relacionada ao tipo de sólido, a distribuição de umidade e as características estruturais pelo material no instante do processo de secagem.

É bastante comum a classificação do processo de secagem em duas categorias em relação ao comportamento da taxa de secagem: período de taxa constante e período de taxa decrescente, sendo baseadas no comportamento da velocidade de secagem do material.

3.3.1 Velocidade de Secagem

3.3.1.1 Período de Secagem a Taxa Constante

O processo ocorre como se o sistema fosse água pura evaporando, sendo caracterizado pelo fato da superfície do material estar num alto nível de umidade. As resistências à

transferência de calor e massa independem dos mecanismos internos, estando localizadas apenas no ar que envolve o material, permanecendo constante a taxa de evaporação. O término desta etapa corresponde ao instante em que a migração interna de água para a superfície do material não consegue mais compensar a evaporação da água livre superficial. A umidade neste ponto é denominada por umidade crítica, cujo valor vai depender do material e das condições em que se processa a secagem (SOUSA, 2003)

A partir da construção das curvas experimentais de secagem do material, podem ser determinados os valores da taxa constante de secagem por unidade de massa sólida seco.

3.3.1.2. Período de Secagem a Taxa Decrescente

O processo de secagem a taxa decrescente é iniciado quando a migração interna de água passa a controlar o processo de secagem. Em muitos casos, este período pode ser dividido em duas fases distintas, a depender do comportamento da taxa de secagem. Na primeira fase, pode acontecer o transporte simultâneo ou em separado tais como: o escoamento capilar, a difusão de líquido e a difusão de vapor. Na segunda fase o mecanismo dominante do transporte de umidade, provavelmente, é a difusão de vapor e é nesta fase que corresponde ao final do processo de secagem onde a umidade se dá no interior do material.

Para o tecido essa taxa é controlada pela taxa de migração do líquido até a superfície do tecido ocorrendo à evaporação. A saturação de água na fibra é indicada quando a taxa entra no período decrescente no momento em que a migração da água para a superfície do tecido diminui.

Na taxa de transferência de massa dentro do tecido, a massa transferida para a superfície cai progressivamente e com isso a temperatura da superfície do tecido aumenta no final da secagem. Muitos pesquisadores propõem diferentes equações para este período da secagem por causa de sua complexidade (BONTEMPI, 2004).

3.3.2. Teorias de Secagem de Sólidos

Durante o período de taxa decrescente, os mecanismos de migração de umidade, podem ser explicados por várias teorias de secagem existentes na literatura, bem como pelo grande número de modelos matemáticos que servem para estimar as transferências simultâneas de calor e massa durante a secagem de sólidos.

Para as fases sólidas e fluidas todas as teorias partem de equações de balanço de massa, de energia e de quantidade de movimento. A diferença está somente nas hipóteses consideradas. São muitas as teorias que são desenvolvidas para a explicação dos mecanismos de transferência de umidade durante a secagem, porém, dentre as mais importantes, temos:

3.3.2.1. Modelo da difusão (Fick)

De acordo com MOTTA LIMA (1999) muitos modelos mais sofisticados tomam a forma da lei de Fick, o movimento de água por difusão da fase líquida não pode ser negado. Ele afirma também que as críticas repousam no fato de não considerar o encolhimento, o endurecimento ou as isotermas de equilíbrio e assumir que o movimento de água líquida como único mecanismo para migração da umidade.

Para o tecido a concentração de umidade é função do tempo, baseando-se na Lei de Fick da difusão para regimes transitórios, expressando o fluxo de massa por unidade de área, dependendo da concentração de água no tecido.

A difusão em regime transitório é dada por:

$$\frac{\partial X_p}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 X_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X_p}{\partial z^2} \right) \quad (3.1)$$

em que:

X_p = representa o conteúdo de umidade da roupa na (b.s.)

Para a solução da equação da difusão, há vários trabalhos com variadas condições de contorno, porém estas soluções aplicam-se a formas geométricas definidas como placas, cilindros, esferas e outras. É possível a utilização da equação 3.1 levando em consideração algumas hipóteses, tais como:

- Homogeneidade do tecido;
- Dimensões constantes do tecido;
- Difusividade mássica da água é considerada constante;
- A superfície do produto entra imediatamente em equilíbrio com o ar secante;
- A umidade limite é a umidade de equilíbrio do tecido.

O coeficiente de difusividade é obtido experimentalmente e o coeficiente de transferência de massa é obtido pelo número de Lewis e neste modelo a secagem pode ser tratada como uma

difusão puramente controlada pelo fenômeno de transferência de massa e que a transferência de calor pode ser desprezada.

3.3.2.2. Modelo da capilaridade

O processo de secagem de materiais sólidos pode ser também descrito como sendo a movimentação de um líquido através dos interstícios e sobre a superfície de um sólido, devido à interação molecular entre o sólido e o líquido nele contido. Na área de pesquisa com materiais fibrosos, por exemplo, o escoamento capilar tem sido aceito como um dos mecanismos fundamentais, principalmente nos casos de materiais com umidade elevada (SOUSA, 2003).

STRUMILLO e KUDRA (1986 apud SOUSA, 2003) dizem que as curvas de secagem de materiais teriam a seguinte análise pela teoria da capilaridade:

- no período de secagem a taxa constante, a perda de umidade estaria relacionada à evaporação da água superficial e daquela obtida pela migração a partir do esvaziamento dos poros maiores;

- na primeira fase de taxa decrescente, a migração de água torna-se insuficiente, ocorrendo aumento da sucção à medida que o teor de umidade diminui e os poros mais finos vão sendo progressivamente abertos;

- na segunda fase de taxa decrescente, a umidade seria removida pela difusão de vapor formado no interior do material, apesar de ainda haver água no sólido, restrita em poros e/ou interstícios isolados, para a existência de forças capilares.

3.3.3. Modelos Empíricos de Secagem

Alguns modelos empíricos se baseiam na teoria de difusão, onde se é assumido que a resistência ocorre numa camada fina na superfície das partículas. A taxa de secagem neste modelo é proporcional ao teor de água livre. O modelo tem a forma da equação 3.2.

$$-\frac{d\bar{X}}{dt} = K(\bar{X} - X_e) \quad (3.2)$$

A partir da integração desta equação obtém-se:

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = e^{-K.t} \quad (3.3)$$

em que:

X = teor de água do produto

X_0 = teor de água inicial do produto

X_e = teor de água de equilíbrio do produto

K = constante de secagem.

Outras modificações do modelo de forma exponencial na forma integrada a dois e três parâmetros que apresentam bons ajustem são:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = a * \exp(-kt) \quad (3.4)$$

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = C \exp(-kt^n) \quad (3.5)$$

A equação (3.6) é similar à solução do modelo de Fick para termos de secagem longos.

A equação (3.7) é conhecida como modelo de Page, sendo bastante utilizado nos estudos da secagem de produtos agrícolas.

3.3.4. Umidade Crítica e de Equilíbrio

Umidade crítica do material é denominada no instante em que a migração da umidade interna para a superfície do material não consegue mais compensar sua evaporação, marcando o início do período de taxa decrescente.

É bastante difícil de ser determinado o valor da umidade crítica de um material (X_c), sem a construção gráfica das curvas de secagem experimentais do material em estudo.

Para o tecido, o teor de umidade de equilíbrio é definido como sendo o teor de umidade deste produto depois de exposto a um ambiente com condições de temperatura, pressão e umidades relativas controladas, por um período de tempo suficiente para que ocorra o equilíbrio.

O equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no ambiente é, portanto, o teor de umidade.

Caso o tecido for seco abaixo do conteúdo de equilíbrio, ele entrará em equilíbrio ao ser retirado da secadora, ou seja, absorverá certa quantidade de água mais uma vez (BONTEMPI, 2004). A tabela 3.7 apresenta, em alguns tecidos com composições de fibras diferentes o valor de equilíbrio para determinadas umidades relativas.

Tabela 3.7: Absorção de umidade ambiente de algumas fibras

Absorção do conteúdo de umidade em relação à massa seca de alguns compostos por fibras diferentes em 65 % e 95 % de umidade relativa do ar					
Composição	65 %	95 %	Composição	65 %	95 %
Algodão	8,0 a 8,5	16	Poliéster	0,3 a 0,4	0,5 a 0,8
Linho	10	20	Poliamida	3,0 a 4,5	6,0 a 8,0
Cânhamo	10	30	Acetato	6,5	14
Seda	10,45	37	Viscose	11,5 a 12,5	30 a 40
Lã	10,45	28	cupro	12,5	27

FONTE: Bontempi (2004)

Há dois métodos na determinação do teor de umidade de equilíbrio: o estático e o dinâmico.

- o método estático, a umidade de equilíbrio entre o material e a atmosfera é atingida sem movimentação do ar ou do material.

- o método dinâmico, o ar ou o material, é movimentado mecanicamente até que o equilíbrio seja atingido (BARROZO, 1995).

As isotermas do algodão, para a temperatura de 25 °C de alguns países exportadores de algodão para o Brasil podem ser observados na figura 3.9 extraída do trabalho de FOUST (1982) apud SOUSA (2003).

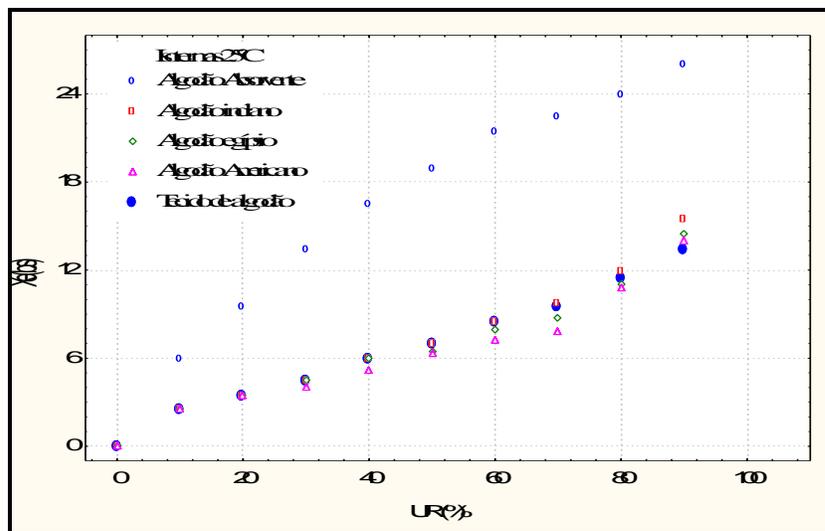


Figura 3.8: Isotermas de diversos tipos de algodão e tecidos de algodão

FONTE: Sousa (2003)

No trabalho de FOUST foi mostrado que com uma única curva de isoterma de equilíbrio é possível obter o comportamento do material mediante às condições ambientais.

3.3.5. Secagem industrial de Materiais Têxteis

O processo de secagem de tecidos na indústria têxtil, geralmente, baseia-se em secadores que podem ser condutivos ou convectivos, os quais utilizam vapor, gás natural e até mesmo infravermelho. Este meio requer um tempo consideravelmente grande e um alto consumo de energia. Atualmente, novas tecnologias são empregadas, as quais utilizam eletricidade no princípio de secagem tais como, rádio frequência e microondas tornando o processo de secagem com um menor tempo e consumo de energia (FRANCESCHI et al., 2008).

De acordo com OGULATA (2004) o crescente custo de energia tem exigido o seu uso de uma forma mais eficaz. A secagem é muitas vezes uma das operações de mais alta intensidade energética na indústria têxtil.

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

Nesta fase, torna-se necessário despende o mínimo de energia com o processo de secagem térmica e também garantir a qualidade final do tecido acabado.

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

Na etapa final do acabamento primário do tecido a indústria têxtil utiliza uma pré-secagem dos tecidos, antes de enviá-los à secagem final. Normalmente, esta pré-secagem é realizada através de processos mecânicos cujos procedimentos podem ser realizados por três diferentes maneiras tais como: espremer, centrifugar ou aspirar.

Ainda podemos citar o processo por sucção, sendo utilizado apenas para tecidos delicados ou que aqueles que não podem ser espremidos, como exemplo o tecido de veludo.

Sempre é necessário, para secar um tecido, recorrer em maior ou menor escala a uma evaporação. Como é impossível na indústria deixar secar os artigos ao ar, é necessário recorrer à energia, o que torna o processo bem mais dispendioso que os processos mecânicos.

Podemos encontrar na indústria têxtil a secagem por condução que tem o melhor rendimento energético, pois confere melhor contato ao tecido e a superfície aquecida utilizando para tal secador de cilindros, porém provoca a migração do corante e de alguns produtos de acabamento, afeta a superfície do tecido e pode provocar um encolhimento na direção dos fios de trama (transversal). Por estes motivos, esse tipo de secagem é usado apenas no processo de secagem intermediária e não no processo de secagem final.

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

Um secador que confere ao tecido uma largura e comprimento desejados é a rama, sendo o mais utilizado também por permitir que o calor residual na saída dele seja recuperado através de trocadores de calor adequados. O inconveniente neste tipo de secador é o espaço ocupado, sendo às vezes necessária a existência de mais de um piso.

Em se tratando de secagem por radiação a mais divulgada é por infravermelho, apesar de ter suas restrições, por apresentar perigo no que se refere a queima do tecido, e com isso, somente é utilizado no processo de pré-secagem, não sendo recomendado baixar além de 0,30 (b.s.) de umidade para tecidos com fibras de algodão.

O secador de tambor perfurado trabalha com secagem mista, ou seja, condução e convecção.

Em HAGHI (2004) uma combinação da secagem por microondas e secagem convectiva pode fornecer maiores taxas de secagem e, conseqüentemente mais rápido o tempo de secagem no custo de secagem de tapetes. Para entender melhor os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem no tapete é necessário analisar a distribuição de umidade, temperatura e a pressão gerada durante o processo. A quantidade de poros dentro do tapete determina a capacidade de reter água, ou seja, maior porosidade, mais água poderá conter no tapete e esses poros estão em todo tapete e principalmente dentro dos fios.

LI e ZHU (2003) afirmaram que o processo de transferência de calor é influenciado pela distribuição de tamanho dos poros e do diâmetro das fibras dos tecidos porosos. A distribuição do

tamanho dos poros e diâmetro da fibra presentes num material fibroso, muitas vezes tem um impacto significativo sobre os processos de transporte de umidade.

O diâmetro da fibra pode influenciar a taxa de calor de sorção ou dessorção do vapor de água pelas fibras. O fluxo de umidade de líquido através dos têxteis é causada por atração molecular na superfície da fibra, que é determinado principalmente pela tensão superficial e distribuição dos poros.

Primeiramente o que deve ser observado na secagem de material têxtil, é a umidade de saída, que deve ser próxima da umidade característica das fibras em processo.

O algodão absorve em torno de 7 a 10 % de umidade, dependendo do seu estado de hidrofiliade, com isso secar mais, significa encarecer o produto e ao mesmo tempo prejudicá-lo no que diz respeito ao toque, aspecto, elasticidade, caimento e estabilidade dimensional.

Antes de se empreender um acabamento deve-se conhecer bem o histórico do artigo têxtil, como por exemplo, a sua característica de composição, características estruturais e físicas, a fim de evitar incompatibilidades com o acabamento pretendido.

ZHONGXUAN et al (2003) afirmou que a maioria dos materiais têxteis têm um certo grau de capacidade de absorção de umidade chamado de higroscopicidade exemplificado a fibra de lã que pode demorar até 30 % de umidade em relação ao seu peso próprio peso.

Em HAGHI (2002) afirmou que os mecanismos físicos de difusão de umidade em tecidos variam de acordo com os tecidos fabricados com diferentes graus de higroscopicidade.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Introdução

São abordados neste capítulo os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho e a metodologia empregada. Duas das amostras de tecidos utilizadas são de puro algodão e a outra com 97% de algodão e 3% de elastano, denominadas comercialmente por jeans (tecido plano tipo sarja). Os testes realizados foram os seguintes: determinação do ponto de equilíbrio das amostras, secagem convectiva natural (estufa), secagem por infravermelho (balança termogravimétrica), acompanhamento das medidas de espessura, largura e comprimento das amostras, antes e depois do período de secagem. Foram realizadas pesagens das amostras durante a secagem convectiva natural, a fim de obter o percentual de umidade. A determinação das condições dos ensaios no laboratório foi baseada em dados industriais e em normas técnicas.

4.2. Materiais

Foram utilizados como matéria-prima três tipos diferentes de amostras de tecidos plano tipo jeans com estruturas sarja 3:1. As amostras são representadas por letras tais como: N com 97% de algodão e 3% de elastano e K e D com 100% algodão.

Cada amostra tem características diferentes no que se refere a porosidade dos tecidos. A amostra N apresenta a maior porosidade e a amostra D a menor. Essas amostras foram fornecidas pela Vicunha Têxtil-RN e são constituídas por fios formados por fibras paralelizadas de algodão.

Tanto para a secagem por convecção natural (estufa) quanto para secagem por infravermelho (balança termogravimétrica), as amostras mediram 90 x 90 mm.

4.3. Caracterização das amostras

4.3.1. Espessura

A espessura foi medida por meio de um paquímetro – exatidão: 0,05 mm. As amostras foram identificadas por letras, especificamente, N, K e D. As medidas das espessuras foram para o tecido N de $(0,75 \pm 0,05)$ mm, para o tecido K de $(0,85 \pm 0,05)$ mm e para o tecido D de $(0,75 \pm 0,05)$ mm. As realizações das medidas foram feitas antes e depois dos testes de secagem.

4.3.2. Gramatura

A gramatura do tecido é definida como sendo a massa por unidade de comprimento e pode ser representado em termos de gramas por metro quadrado (g/m^2) ou gramas/ metro linear (g/m). Esta é uma característica que, permite avaliar a textura do tecido, quando analisada em conjunto com o número de fios por unidade de comprimento e com o título do fio também. Em fábrica a gramatura é determinada depois de um período de acomodação das fibras, pois na tecelagem o tecido sofre uma tensão muito grande.

A confirmação da gramatura foi realizada mediante a Norma – NBR 10591 – Materiais têxteis – Determinação da gramatura de tecidos. No laboratório do DEMEC-UFPE foram cortados cinco corpos de prova medindo 100 mm, retirados de pontos diferentes da amostra de tecido e pesados em uma balança digital com exatidão: 0,0001 g, conforme apresentado na figura 4.1. Para a determinação da massa por unidade de área em gramas por metro quadrado (g/m^2) foi feito à média das pesagens e depois multiplicou por 100.

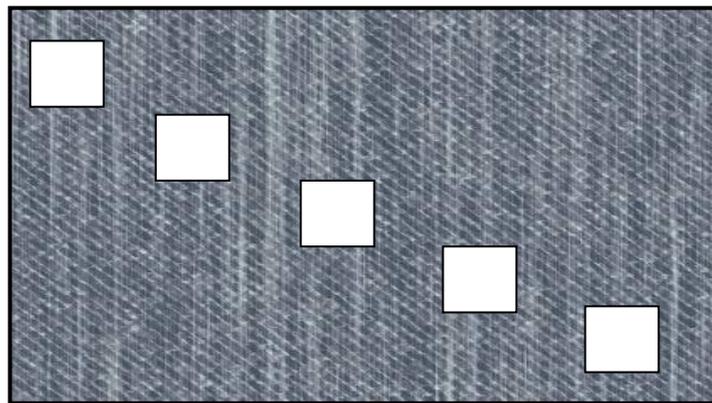


Figura 4.1 – Representação de uma amostra de tecido jeans

4.3.3. Densidade

ERHARDT (1975 apud SOUSA, 2003) informa que o valor da densidade da fibra de algodão é respectivamente $1,55 \text{ g/cm}^3$ para uma umidade relativa de 0%, e $1,53 \text{ g/cm}^3$ para uma umidade relativa de 65%.

4.3.4. Calor específico

ERHARDT et al. (1975 apud SOUSA, 2003) o calor específico que geralmente pode ser aceito é de $0,3 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ ou $1,26 \text{ kJ/kg K}$, para materiais têxteis. A faixa encontrada, para a fibra de algodão é de $0,317$ a $0,324 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ ou $1,325$ a $1,356 \text{ kJ/kg K}$.

4.3.5. Condutividade Térmica

De acordo com BAXTER (1946 apud SOUSA, 2003) a condutividade térmica efetiva dos tecidos que tem em sua composição a fibra de algodão varia de 0,40 a 0,70 W/m.K e FERRACIOLLI e PIETROBON (2002) obtiveram pelo método das placas paralelas 0,62 W/m.K, confirmando desta forma os resultados da literatura.

4.3.6. Análise do encolhimento

Antes e depois da realização dos testes de secagem, as amostras de tecidos foram submetidas a uma análise de encolhimento, com o objetivo de avaliar suas dimensões (largura, comprimento e espessura). As amostras N, K e D foram cortadas com as dimensões de 100 x 100 mm e foram umedecidas a 1,40 (b.s.). Depois de úmidas as amostras de tecido foram colocadas na estufa para secar, nas temperaturas de 50, 65, 80, 95 e 110 °C. Foi feito um quadrado no centro das amostras medindo 90 x 90 mm, evitando assim o efeito de borda nas amostras, que ao serem submetidas à secagem começam a dobrar.

4.4. Preparação das amostras

As amostras de tecidos, antes de qualquer processo de corte e secagem, foram lavadas em água fervente com detergente neutro, com troca de lavagem por três vezes. A fim de retirar a goma dos fios de urdume das amostras de tecido jeans. Depois de lavadas as amostras foram, em seguida, enxaguadas em água corrente aquecida e depois seca ao ar ambiente para serem cortadas nas medidas especificadas.

No início de cada teste eram medidas as temperaturas e umidade do ar com o auxílio de um medidor de umidade digital.

4.5. Determinação das Curvas de Secagem

A secagem das amostras de tecido jeans teve como objetivo a análise da influência das condições operacionais tais como: a umidade inicial das amostras e a temperatura do ar.

A princípio, para saber até quanto tempo as amostras de tecidos jeans (K,N e D) ficariam submersas em água destilada, com a ajuda de um relógio e uma balança (precisão: 0,0001 g) a cada 1 (uma) hora, eram anotadas a massa dos três tipos de amostras. Depois de um tempo de 6 horas consecutivas anotando os valores das massas, as amostras permaneceram submersas por mais 12 (doze) horas e após este tempo verificou-se que é necessário pelo menos 1 (uma) hora de permanência em água destilada para atingir a umidade necessária para as condições de teste.

As condições de teste foram conforme a Norma NBR 8428 – Condicionamento de materiais têxteis para ensaios, onde as amostras K, N e D de tecido foram dispostas em uma bancada e condicionadas por 24 horas com atmosfera de $65 \pm 2\%$ de umidade relativa e 20 ± 2 °C de temperatura. A fim de retirar o excesso de umidade das amostras, as mesmas foram colocadas em toalha absorvente e se por alguma razão a umidade ficasse menor que a desejada era borrifada manualmente com água destilada, de modo que toda a amostra ficasse com umidade uniforme.

Para a determinação da massa seca, todas as amostras foram pesadas em balança (precisão: 0,0001g) e colocadas em estufa (105 ± 3 °C, 24 h). Com estes valores, foi calculada a massa úmida para dar início aos experimentos com a umidade desejada.

As umidades iniciais das amostras foram de 1,4 (b.s.), nas temperaturas de 50, 65, 80, 95 e 110 °C. Essas temperaturas foram medidas e monitoradas com a ajuda de um termopar Tipo K acoplado a um leitor digital portátil. Os ensaios para obtenção das curvas de secagem na estufa com circulação de ar foram realizados por medições de massa a cada 1 (um) minuto, em balança digital (especificações – precisão: 0,0001 g).

4.6 Determinações das Curvas de Taxa de Secagem

Para determinação das curvas de taxa de secagem foi utilizada a equação 4.

$$T_s = \frac{TX_i - TX_f}{t} \quad (4.1)$$

Sendo:

T_s = taxa de secagem (g/min)

TX_i = teor de umidade inicial (b.s.)

TX_f = teor de umidade final (b.s.)

Com os resultados da equação foram elaborados as curvas de taxa de secagem.

4.6. Sistema convectivo natural - Estufa

Para realizar os experimentos do processo de secagem em convecção natural, utilizou-se uma estufa (Modelo QUIMIS – exatidão: 0,1°C) ligada a um indicador de temperatura com um termopar Tipo K (Cromel-Alumel). No interior da estufa, foram colocados os três tipos de amostras de tecido jeans – N, K e D, conforme apresentado na Figura 4.3.

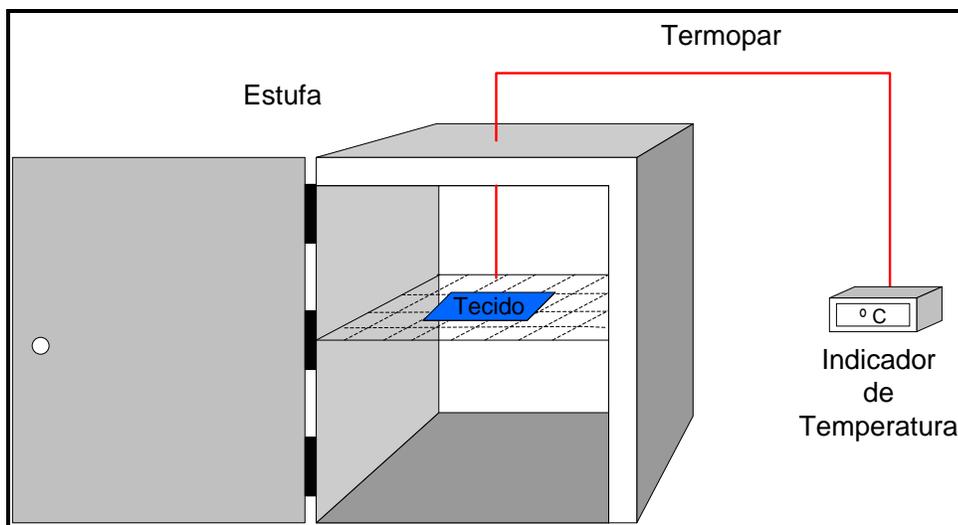


Figura 4.2 – Esquema do sistema para secagem do tecido

Após o conhecimento da massa seca das amostras foi possível calcular a massa úmida necessária para alcançar a umidade inicial desejada. Com isso as amostras foram umidificadas e colocadas na estufa a temperaturas de 50, 65, 80, 95 e 110 °C e pesadas sucessivamente a cada um minuto, tempo necessário para a troca da amostra.

Para saber se as amostras de tecido variaram o seu comprimento, largura e espessura, eram anotadas suas dimensões antes e depois do processo de secagem. Para garantia da reprodutibilidade dos resultados os ensaios foram realizados com quatro amostras para cada tipo de tecido, sendo calculada a média e depois realização mais uma vez do ensaio. Após a repetição, foram computados os melhores resultados para análise.

4.7. Sistema por infravermelho – Analisador de umidade por infravermelho

O princípio de aquecimento da radiação infravermelha é por transformação de energia eletromagnética em energia cinética, liberando energia térmica (NEGRI, 2007).

A secagem por infravermelho foi realizado num equipamento analítico possibilitando a determinação do teor de umidade de uma amostra sólida. O equipamento é um analisador de umidade por infravermelho (Modelo IV 2000). A temperatura é medida por um sensor do tipo Platina informando ao circuito eletrônico a temperatura real aplicada à amostra de tecido. O valor da temperatura pode ser ajustado entre 50 e 200°C. Em um prato de alumínio descartável com diâmetro de 110 mm foram alojadas as amostras para secagem. Na figura 4.3 é apresentado o analisador de umidade.



Figura 4.3 - Analisador de umidade por infravermelho

O prato de alumínio fica sobre um suporte que está diretamente ligado ao eixo da balança, sendo motivo para as devidas precauções pra que não haja impactos mecânicos, conforme apresentado na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Suporte do prato de alumínio

O analisador de umidade foi ajustado nas temperaturas de secagem para os valores de 50, 65, 80, 95 e 110°C. Com o conhecimento da massa seca das amostras obtidas, foi possível calcular a massa úmida para alcançar a umidade inicial desejada. Cada amostra foi umidificada e colocada no prato de alumínio descartável, uma amostra para cada temperatura desejada, já que o diâmetro do prato era pequeno.

Foi adotado para a base de cálculo o percentual de umidade e o modo de secagem – Auto Dry – secagem automática. Com este modo de secagem, quando atingida à estabilidade do peso é finalizada a medida e indicada o percentual de umidade, que é feito a cada 15 s e depois de 1 min abaixo do valor ajustado é finalizada a medida de umidade e simultaneamente enviado pela saída serial conectado a impressora, conforme apresentado na Figura 4.5. Os valores da massa inicial, final e o percentual de umidade final são registrados pela impressora, ao término da secagem.



Figura 4.5 - Impressora do analisador de umidade por infravermelho

Antes e depois do período de secagem, foram medidas as dimensões das amostras como o comprimento, largura e espessura com um paquímetro (exatidão: 0,05 mm). Os testes foram reproduzidos a fim de garantir seus resultados, sendo computados para análise os melhores.

4.8. Perfis de Temperatura

A análise do comportamento dos perfis de temperatura não foi realizada simultaneamente com o processo de secagem, pois durante a secagem, os termopares presos ao tecido não permitiam a retirada do tecido para a pesagem a cada 1 minuto.

Para o monitoramento da temperatura de secagem do sistema convectivo natural foram distribuídos ao longo da estufa cinco sensores de temperatura (LM35DZ - exatidão: 0,5 °C), que são sensores de temperatura do circuito integrado de precisão. A tensão de saída é linearmente proporcional à temperatura calibrada em Celsius. Esses sensores foram interligados a um milivoltímetro digital, com leituras em milivolts transformada em °C. As figuras 4.6 e 4.7 apresentam a parte externa e interna do aparelho.

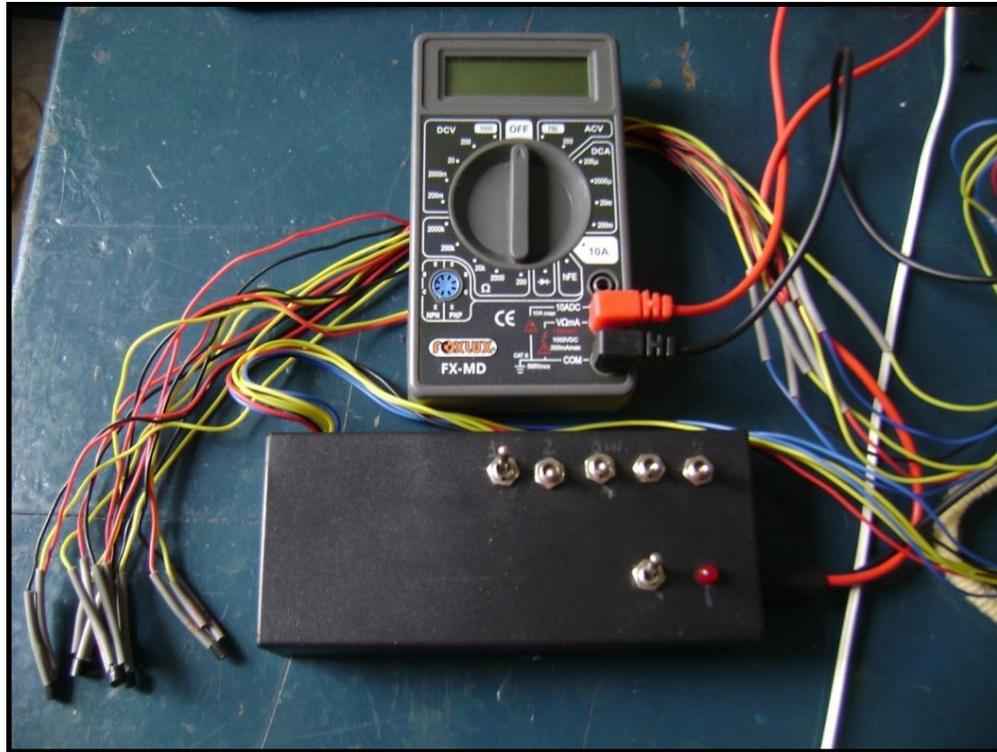


Figura 4.6: Parte externa do aparelho de leitura da tensão do LM35DZ

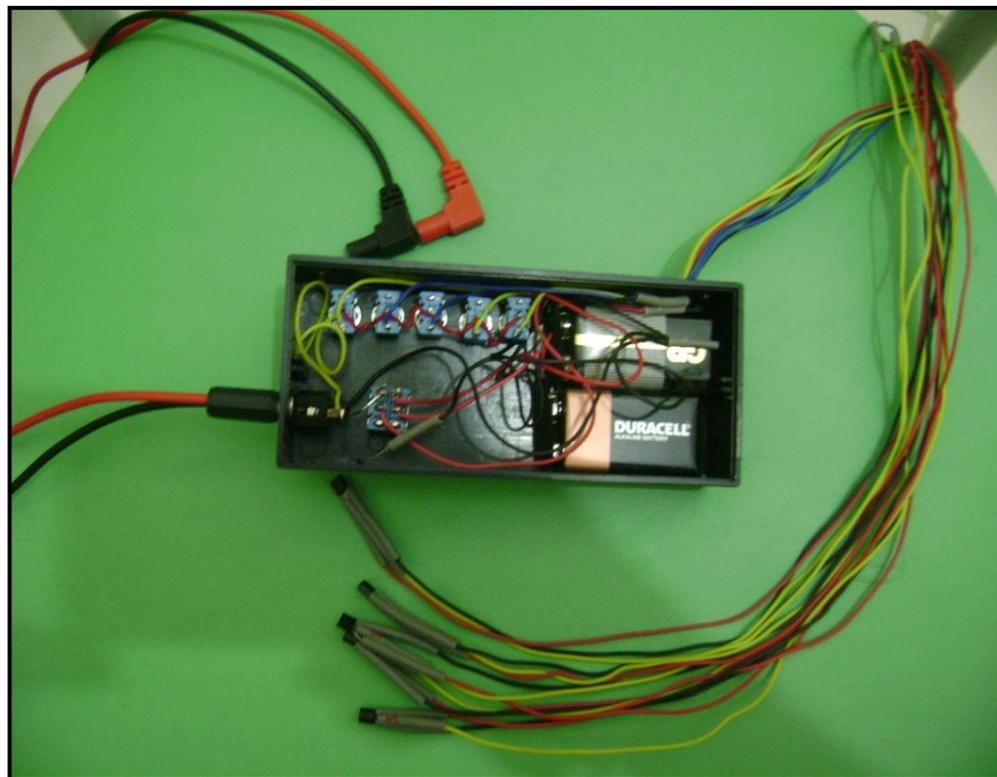


Figura 4.7: Parte interna do aparelho de leitura da tensão do LM35DZ

A figura 4.8 apresenta detalhes do termômetro montado, tais como: sensores de temperatura, chaves seletoras para habilitar um dos cinco sensores e um voltímetro.

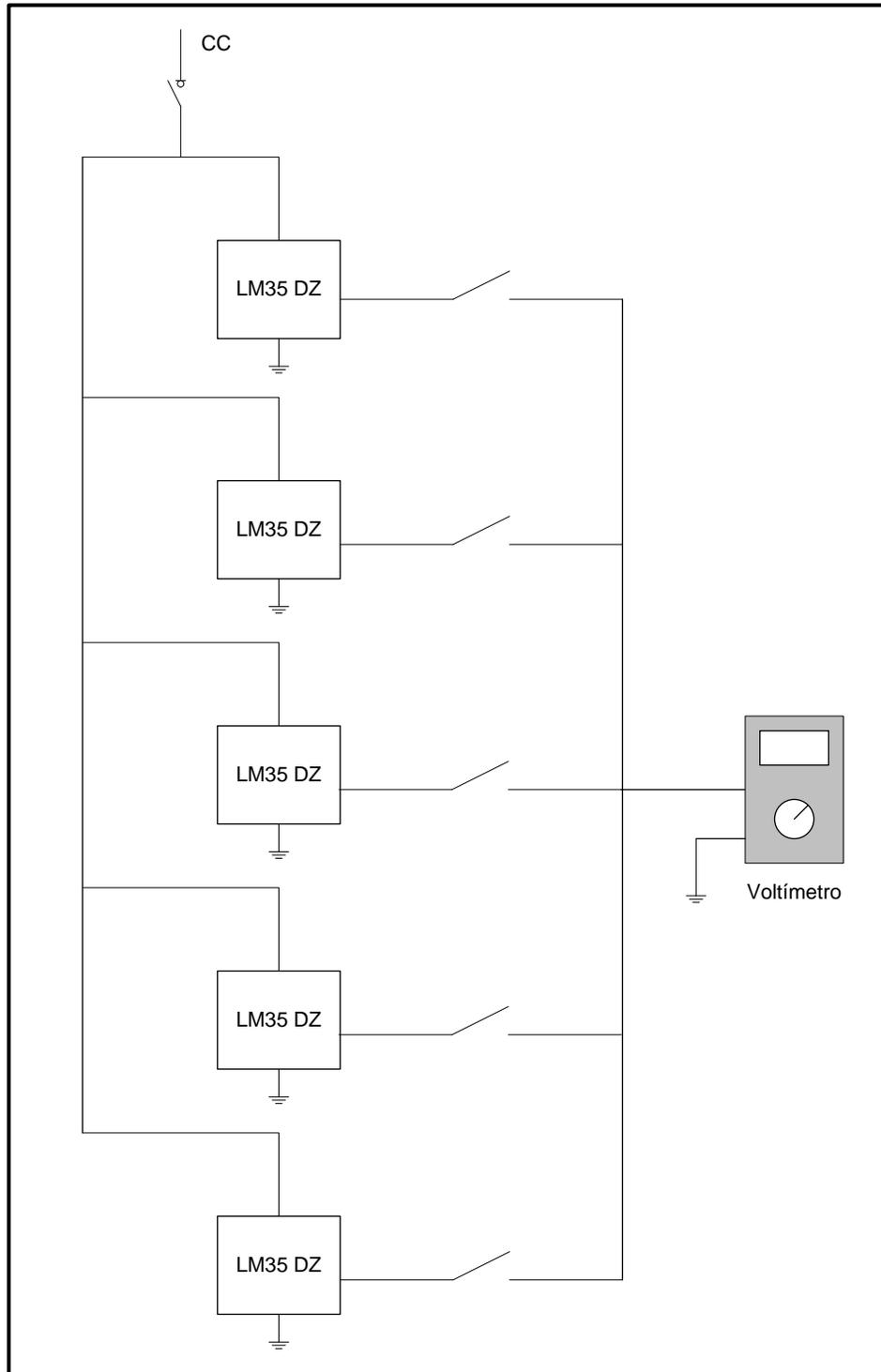


Figura 4.8: Diagrama esquemático do termômetro.

A figura 4.9 representa o diagrama esquemático utilizado para construção do termômetro. O mesmo é um aparelho de baixo custo que usa o sensor LM35DZ. A série LM35 são circuitos integrados de precisão para aferir temperatura, cuja tensão de saída é linearmente proporcional à graus centígrados de temperatura. O LM35, portanto, tem uma vantagem sobre outros sensores de temperatura, pois não necessita de qualquer calibração externa ou aparato para fornecer precisão típica de $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ à temperatura ambiente e $\pm 3 / 4^{\circ}\text{C}$ ao longo de uma faixa total -55 a $+150^{\circ}\text{C}$ de temperatura. O termômetro está em uma configuração que lhe permite ler uma faixa de temperatura que vai desde $+2^{\circ}\text{C}$ até 150°C , conforme pode ser observado na figura 4.9.

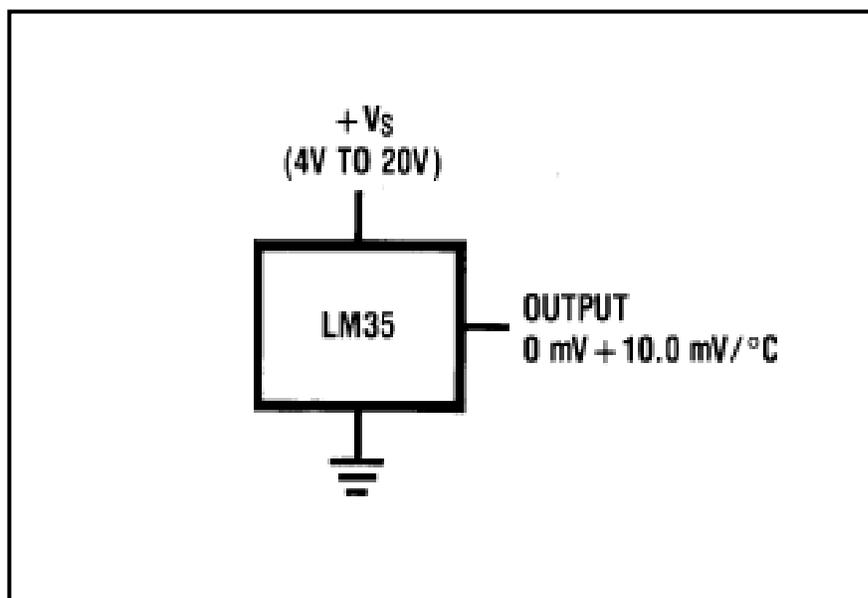


Figura 4.9: Configuração do termômetro LM35DZ

Para acompanhamento das temperaturas ao longo do tecido foi necessário o afastamento dos fios de urdume e o levantamento dos fios de trama a fim de manter presos os termopares junto à superfície dos mesmos e permitir maior contato. Foram colocados sobre o tecido cinco termopares Tipo T (Cu-Constantan – exatidão: $0,1^{\circ}\text{C}$) interligados a um Data Logger que por sua vez é conectado a um computador para captura dos dados, conforme apresentado na figura 4.10.



Figura 4.10: Data Logger

A secagem foi realizada para temperaturas de 50, 65 e 80 °C, sendo a amostra umidecida em 1,40 (b.s.), colocada sobre uma grade metálica previamente mantida no interior da estufa e imediatamente inserida os termopares em suas posições determinadas. As leituras foram acompanhadas em intervalos de tempo concordantes com os utilizados para as curvas de secagem, sendo a cada 1 minuto. A figura 4.11 apresenta o esquema de ligações dos termopares na superfície da amostra montado para obtenção do perfil de temperatura no interior da estufa.

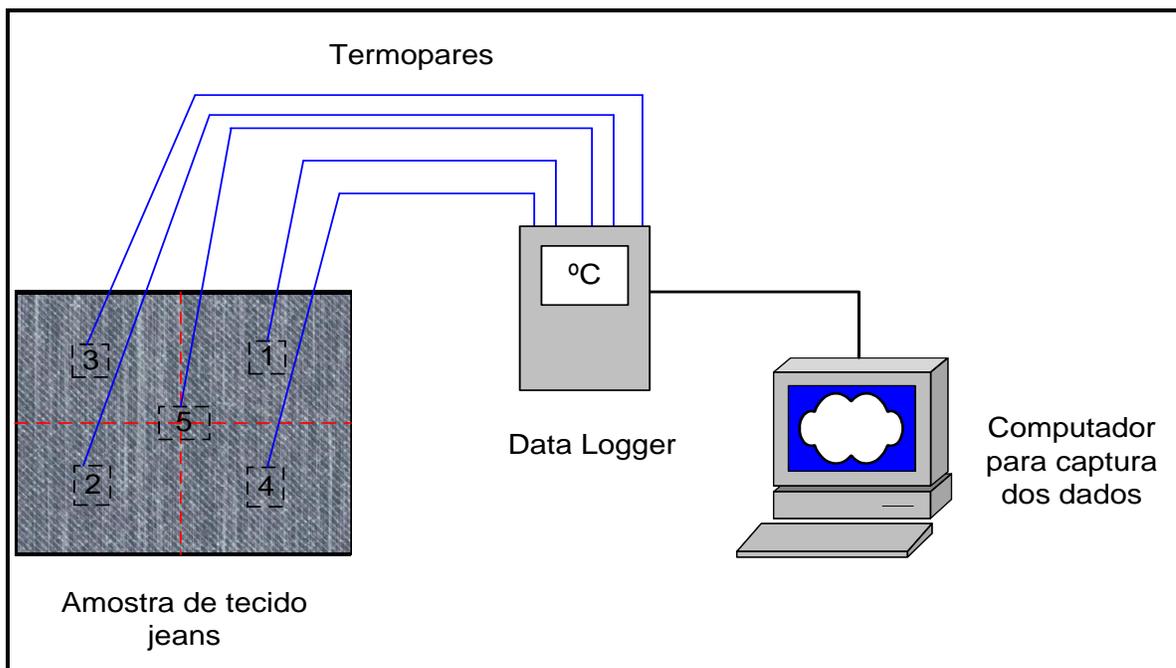


Figura 4.11: Esquema de ligação dos termopares no tecido

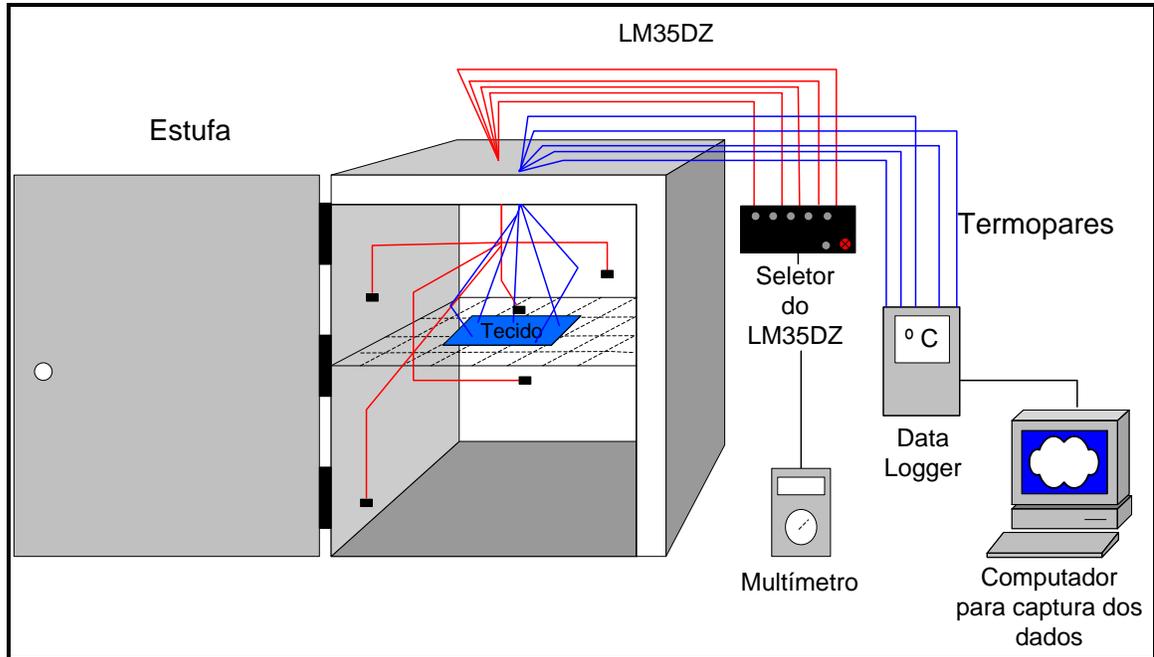


Figura 4.12: Esquema experimental para levantamento dos perfis de temperatura

4.9. Tratamento dos dados

Foi realizada uma busca na literatura sobre dados de equilíbrio de materiais têxteis com vários diferentes tipos de fibras.

Com a construção dos experimentos para a secagem das amostras dos tecidos jeans foi possível, determinar os adimensionais de umidade em função do tempo, calcular as taxas de secagem ao longo do tempo e verificar o comportamento das amostras antes e depois da secagem, medindo a largura e comprimento.

Com os valores dos adimensionais de umidade foi possível uma análise estatística a fim de verificar a influência da temperatura na secagem e com isso ajustar os dados obtidos experimentalmente via método de regressão não linear, com a ajuda de modelos existentes na literatura utilizando um software Statistica 8.0.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as caracterizações das amostras N, K e D e discutidos os resultados das análises do encolhimento das amostras em cada aparelho, dos perfis de temperaturas, da cinética de secagem e o ajuste das curvas de secagem aos modelos matemáticos mais utilizados para o tratamento dos dados das curvas de secagem.

5.2. Caracterização das amostras

5.2.1 Gramatura das amostras N, K e D.

As gramaturas das amostras ar são conforme apresentado na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Gramatura das amostras N, K e D

Amostras	Gramatura (g/m ²)
N	464,7 ± 4,9
K	509,5 ± 7,0
D	474,4 ± 10,2

5.2.2. Cálculo do título dos fios de algodão

O cálculo do título dos fios de trama e urdume foram conforme a Norma ASTM D 1059 – Materiais têxteis – Determinação do título de fios em amostras reduzidas.

5.2.2.1 Cálculo do título dos fios de trama e urdume das amostras N, K e D.

Com a equação 5.1 foi obtido o título dos fios de trama das amostras N, K e D.

$$TítuloNe = \frac{0,59 \times c}{m} \quad (5.1)$$

sendo:

c = comprimento em metros (m)

m = massa em gramas (g)

Os resultados do título médio dos fios de trama e urdume das amostras N, K e D são apresentados conforme tabela 5.2.

Tabela 5.2: Título médio dos fios de trama e urdume

Tecidos	Título Médio - Trama(Ne)	Título Médio - Urdume(Ne)
N	8,9 ± 0,2	10,3 ± 0,2
K	6,7 ± 0,2	7,9 ± 0,2
D	6,8 ± 0,2	7,7 ± 0,2

5.2.3 Cálculo do diâmetro dos fios de algodão

O cálculo do diâmetro do fio das amostras de tecido N, K e D é obtido pela equação 5.2, conforme fornecido pelo pesquisador F. T. Pierce (1937), citado em SOUZA (2003), que publicou um estudo sobre a geometria das estruturas dos tecidos utilizando a equação 5.2 para o cálculo do diâmetro de fios de algodão.

$$d = \frac{1}{28\sqrt{N_e}} \text{ [pol]} \quad (5.2)$$

sendo:

d = diâmetro do fio em polegadas (pol)

N_e = número inglês para fios de algodão (título do fio)

Tabela 5.3: Diâmetros dos fios de trama e urdume

Tecidos	Diâmetro dos Fios - Trama	Diâmetro dos Fios - Urdume
N	0,32 ± 0,05 mm	0,29 ± 0,05 mm
K	0,34 ± 0,05 mm	0,32 ± 0,05 mm
D	0,34 ± 0,05 mm	0,32 ± 0,05 mm

5.2.4. Cálculo da Porosidade dos Tecidos

Antes de calcular a porosidade das amostras de tecidos, é preciso saber, primeiramente, sua cobertura fracionária C_{ft} . Conforme a equação 5.3.

$$C_{ft} = \left[0,6 \left(n_1 d_1 + n_2 d_2 \right) \left(n_1 d_1 n_2 d_2 \right) \right] 10^{-2} \quad (5.3)$$

onde:

n_1 = quantidade de fios/cm

d_1 = diâmetro do fio de urdume, em mm

d_2 = diâmetro do fio de trama, em mm

n_2 = quantidades de batidas/cm

Com isso, a porosidade superficial do tecido é dada por:

$$P_s = 1 - C_{ft} \quad (5.4)$$

Tem-se também a porosidade do fio, que é obtida considerando-se um fator de cobertura de 60% (valor tabelado para o algodão), significando que a composição do fio é de 60% de fibras e 40% de ar. Então, para saber a porosidade total do tecido temos que fazer 40% da cobertura fracionária do tecido, que é a porosidade total do fio.

Os valores da porosidade total do tecido encontram-se de acordo com a tabela 5.4.

Tabela 5.4: Porosidade dos tecidos

Tecidos	Porosidade dos Tecidos
N	0,793 ± 0,004
K	0,777 ± 0,005
D	0,765 ± 0,004

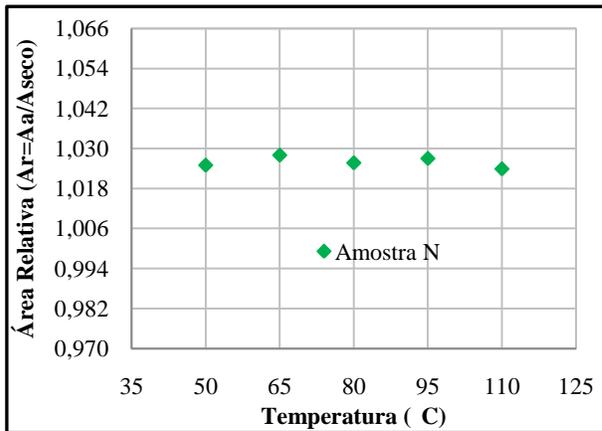
5.2.5 Massa seca

Para a determinação da massa seca das amostras de tecidos, foi utilizado o método da estufa (105 ± 3) °C por 24 horas. As amostras utilizadas no processo de secagem, a massa seca média por área foram respectivamente as seguintes: tecido N foi de 423 g/m^2 , o tecido K de 456 g/m^2 e o tecido D com 399 g/m^2 .

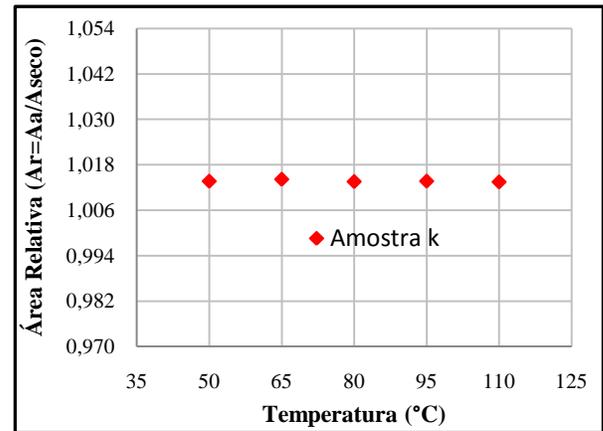
5.3. Análise do encolhimento

Nas figuras de 5.1 a 5.4 podem-se visualizar os resultados obtidos na variação das áreas com a temperatura.

5.3.1 Estufa

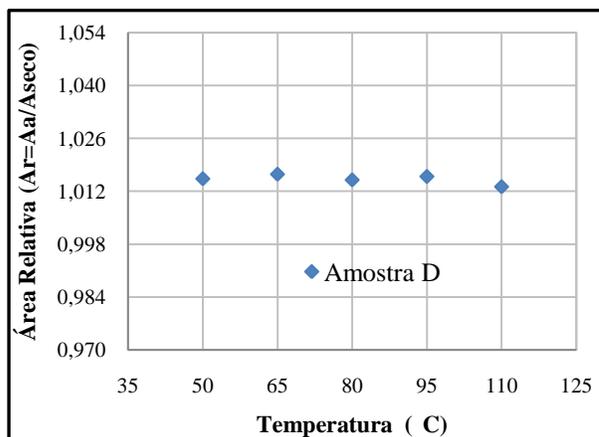


(a)

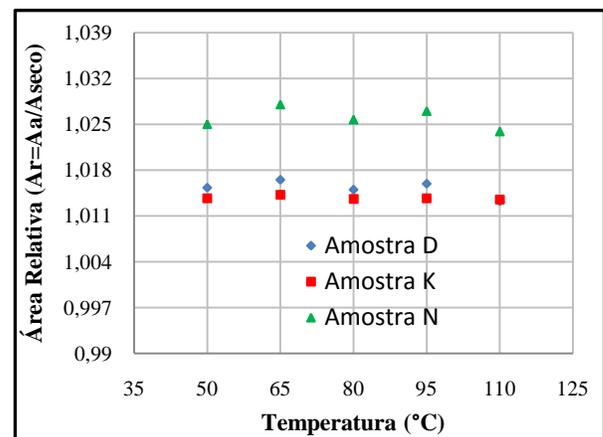


(b)

Figura 5.1 (a) e (b): Variação da área superficial com a temperatura das amostras N e K



(a)



(b)

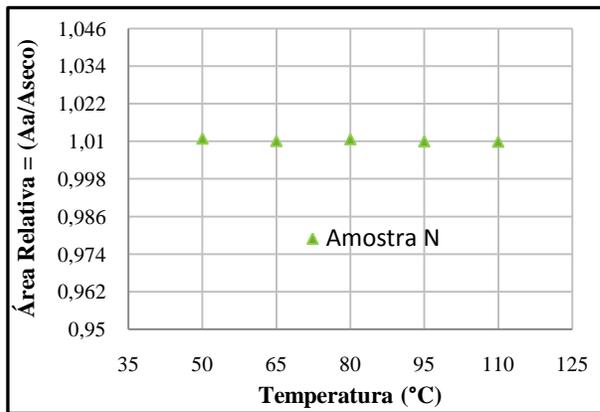
Figura 5.2 (a) e (b): Variação da área superficial da amostra D e geral com a temperatura das amostras N, K e D

Pode-se observar que a variação da temperatura de secagem parece não influenciar no comportamento das áreas superficiais das amostras, permanecendo praticamente constante nas condições avaliadas. Esta ocorrência deve estar relacionada, provavelmente, ao fato de que os fios possuem mais facilidade de acomodação nos espaços vazios, que antes eram ocupados pela umidade (SOUSA, 2003). Analisando separadamente as dimensões de comprimento e largura percebe-se o aumento do comprimento (fios de urdume) e a diminuição da largura (fios de trama), para todas as amostras como apresentado na tabela 5.5.

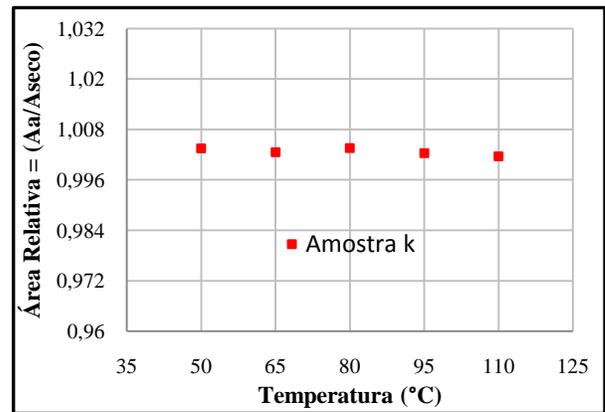
Tabela 5.5: Valores dos comprimentos e larguras das amostras N, K e D - Estufa

Amostra	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)				
		50	65	80	95	110
N	Comprimento	92,3	92,5	91,7	92,3	91,6
	Largura	89,9	89,7	89,6	89,1	89,6
K	Comprimento	91,3	91,1	91,4	90,8	91,1
	Largura	89,9	89,2	89,8	89,8	89,7
D	Comprimento	91,1	91,1	91,5	91,5	91,1
	Largura	89,6	89,6	89,7	89,9	89,5

5.3.2 Analisador de umidade por infravermelho

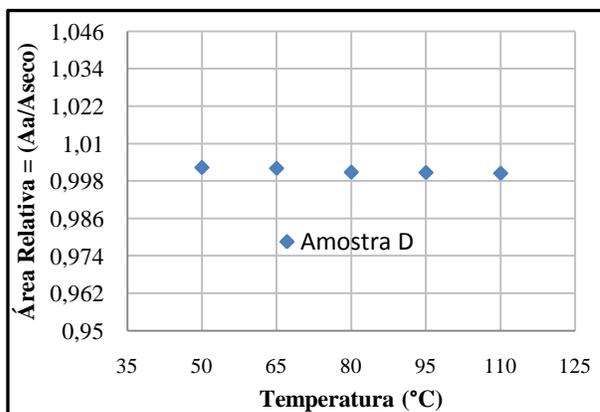


(a)

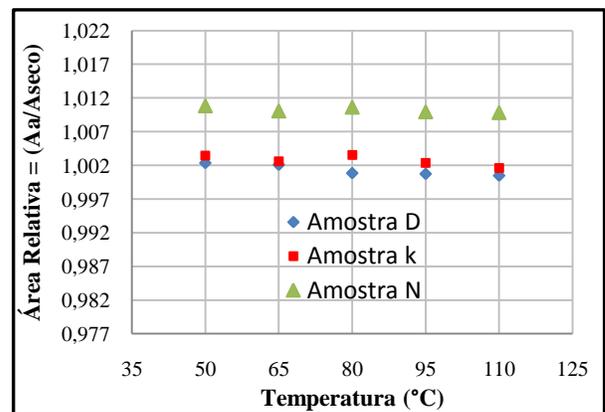


(b)

Figura 5.3 (a) e (b): Variação da área superficial com a temperatura das amostras N e K



(a)



(b)

Figura 5.4 (a) e (b): Variação da área superficial da amostra D e geral das amostras N, K e D

De acordo com os resultados obtidos pode-se dizer que as amostras secas no analisador de umidade por infravermelho, apresentaram os mesmos comportamentos realizados com a estufa pelos mesmos motivos. Sendo explicado pela facilidade que os fios das amostras possuem de acomodarem-se nos espaços vazios, que anteriormente estavam ocupados pela umidade.

Analisando separadamente as dimensões de comprimento e largura percebe-se o aumento do comprimento (fios de urdume) e a diminuição da largura (fios de trama), para todas as amostras como apresentado na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Valores dos comprimentos e larguras das amostras N, K e D – Analisador de umidade por infravermelho

Amostra	Dimensão (mm)	Temperatura (°C)				
		50	65	80	95	110
N	Comprimento	92,5	91,5	90,7	91,3	91,9
	Largura	88,9	89,9	89,9	89,6	89,6
K	Comprimento	92,3	92,1	91,8	91,8	91,7
	Largura	89,9	89,8	89,6	89,8	89,9
D	Comprimento	91,6	91,8	91,3	90,9	91,7
	Largura	89,1	89,6	89,1	89,7	89,4

5.4. Análise dos perfis de temperatura das amostras N, K e D.

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados dos perfis de temperatura, com umidade inicial de 1,40 (b.s.), na secagem convectiva natural, nas condições de temperatura variando de 50 a 80 °C.

5.4.1 Perfis de temperatura - Estufa

O esquema do posicionamento dos termopares sobre a amostra de tecido durante a secagem convectiva é apresentado na figura 5.1. A numeração representa cada um dos termopares utilizados.

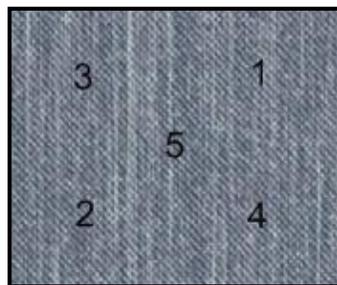


Figura 5.5: Esquema do posicionamento dos termopares sobre a amostra de tecido

As figuras 5.6 a 5.11 apresentam os perfis de temperatura das amostras de tecido N, K e D, obtidos no processo de secagem, considerando a temperatura inicial da amostra a do ambiente laboratorial. As temperaturas de secagem foram as seguintes: 50, 65 e 80 °C. As temperaturas de 95 e 110 °C não foram usadas por limitações do aparelho.

Pode-se perceber em todos os gráficos a presença do período de indução, onde no começo o tecido é mais frio do que o ar. Como o calor chega em excesso ocorre uma elevação da temperatura do tecido acarretando um aumento de pressão e velocidade de secagem.

Após o período de indução ocorre o período de velocidade de secagem constante, onde a quantidade de água disponível dentro do tecido é bem grande e essa água evapora-se como água livre. Na superfície do tecido a pressão de vapor de água é constante e igual à pressão de vapor de água pura. A troca de calor após a fase de velocidade constante não é mais compensada, consequentemente, a temperatura do tecido aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. O fator limitante durante esse período é a migração interna de água. No final deste período o tecido está em equilíbrio com o ar.

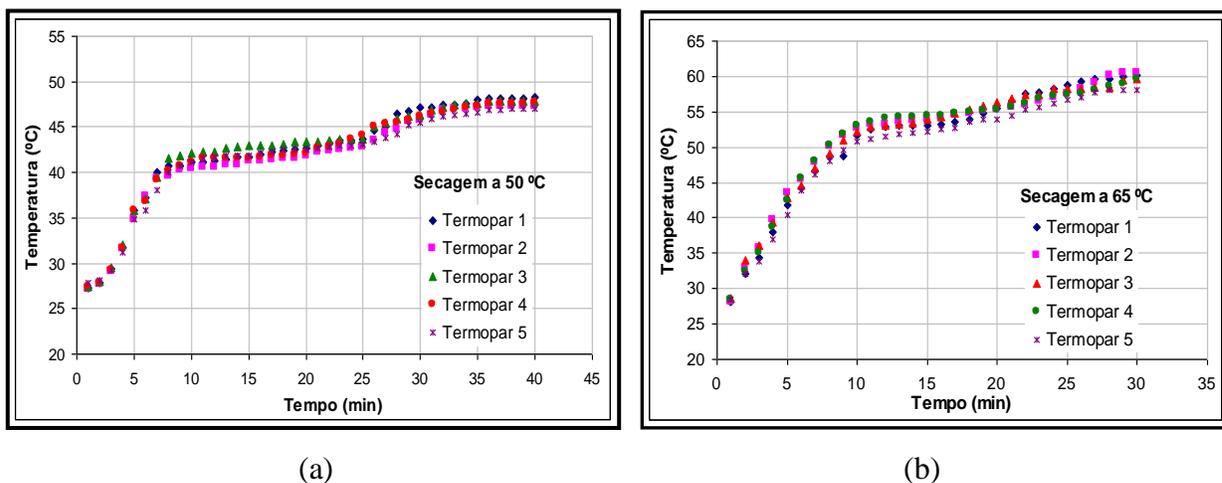
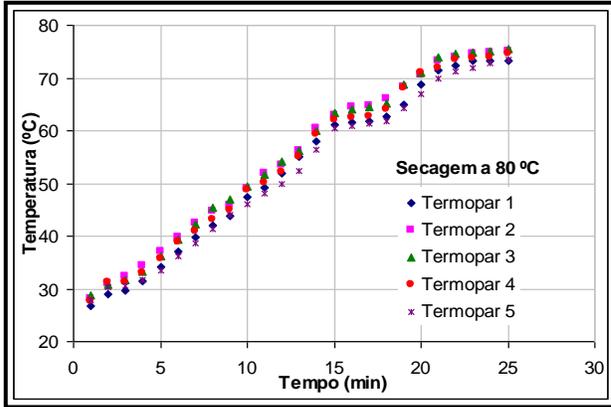
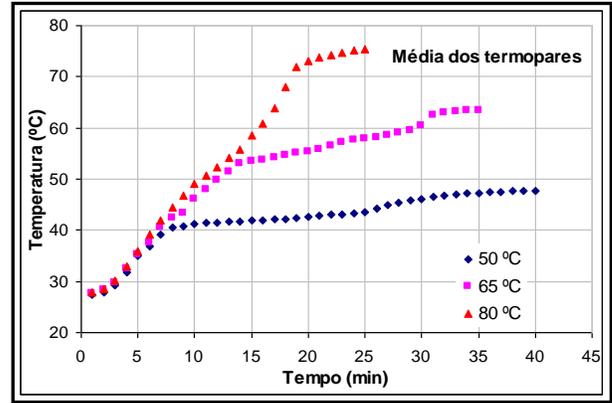


Figura 5.6 (a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra N a 50 e 65 °C

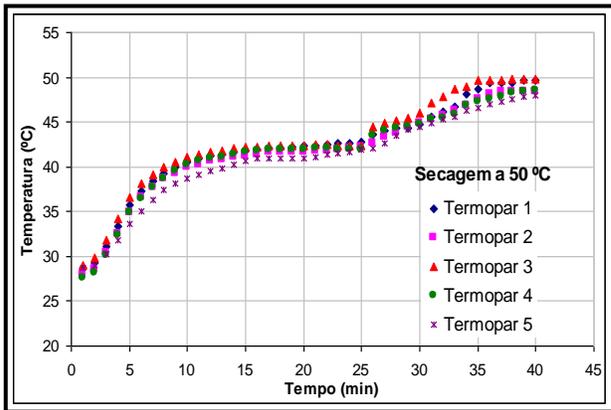


(a)

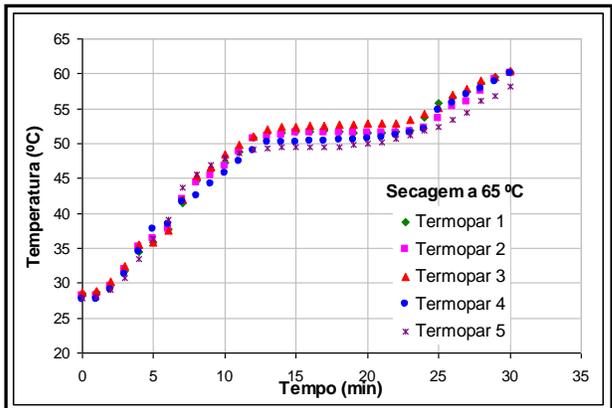


(b)

Figura 5.7 (a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra N a 80 °C e geral

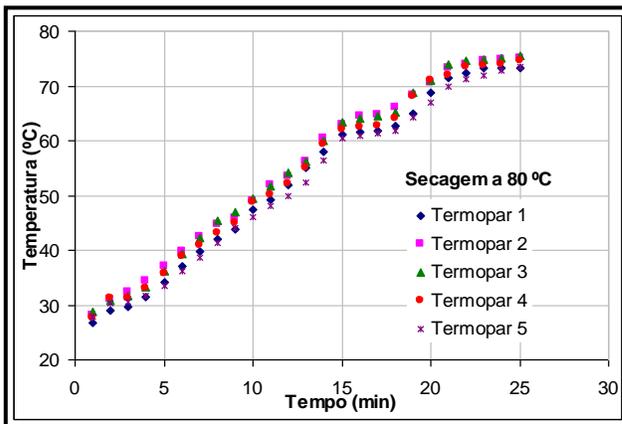


(a)

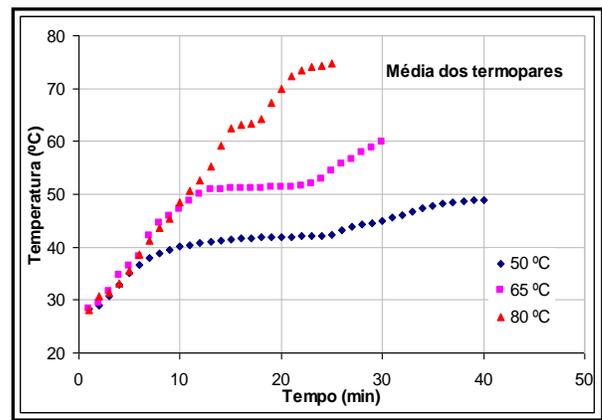


(b)

Figura 5.8 (a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra K a 50 e 65 °C

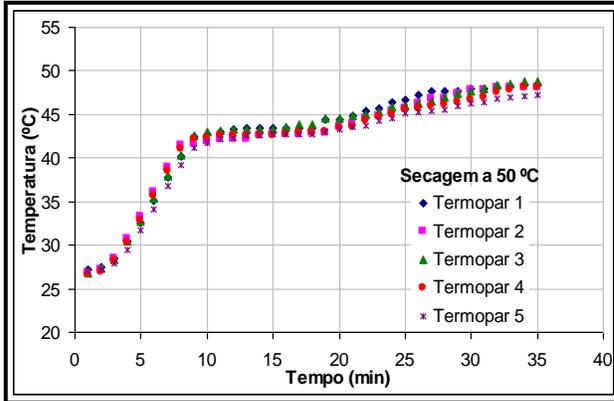


(a)

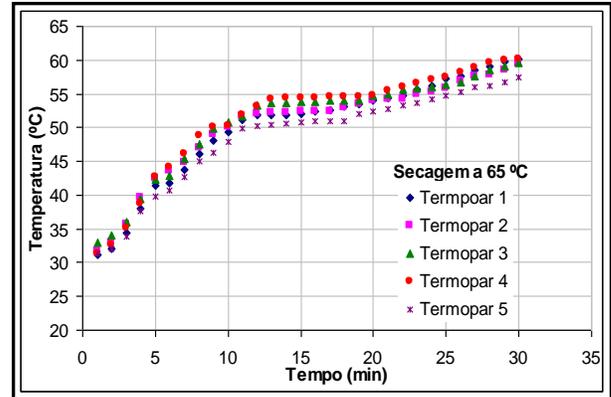


(b)

Figura 5.9 (a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra K a 80 °C e geral

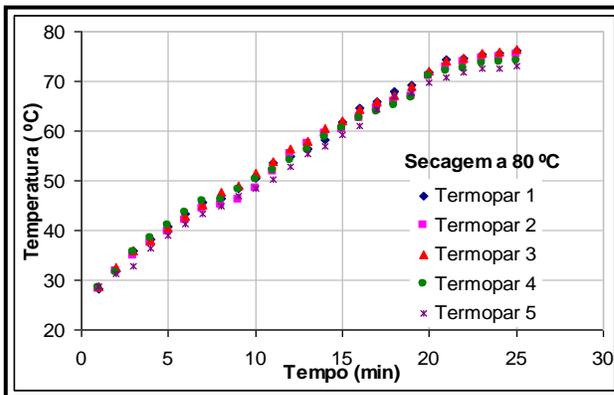


(a)

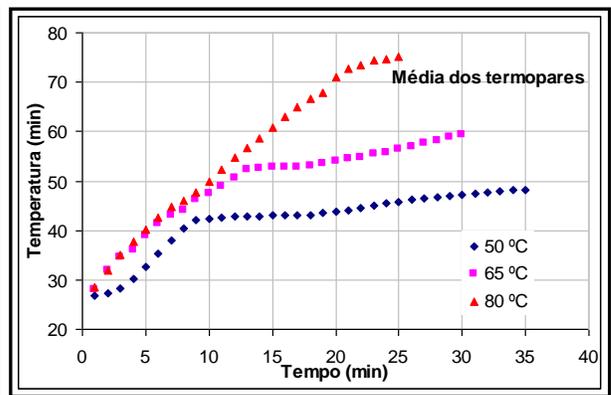


(b)

Figura 5.10 (a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra D a 50 e 65 °C



(a)



(b)

Figura 5.11 (a) e (b): Perfis de temperatura – Amostra D a 80 °C e geral

Observando as figuras de 5.6 até 5.11 percebe-se a semelhança no comportamento dos perfis para as temperaturas estudadas e a presença dos patamares de temperatura constante relacionados à vaporização da água livre, com o período de secagem à taxa decrescente correspondendo aproximadamente ao trecho dos perfis após este primeiro patamar.

5.5 Análise da cinética de secagem de amostras N, K e D.

5.5.1 Análise da secagem na estufa

Neste item são apresentados os resultados obtidos pelo levantamento das curvas de secagem e de taxa de secagem para as amostras de tecidos jeans, considerando-se as situações propostas no capítulo de Materiais e Métodos, para secagem na estufa.

5.5.2 Efeito da temperatura de secagem

Nas figuras de 5.12 a 5.15 são apresentadas as curvas de secagem e de taxa de secagem obtidas para as temperaturas de 50, 65, 80, 95 e 110 °C e com umidade inicial de 1,40 % (b.s.).

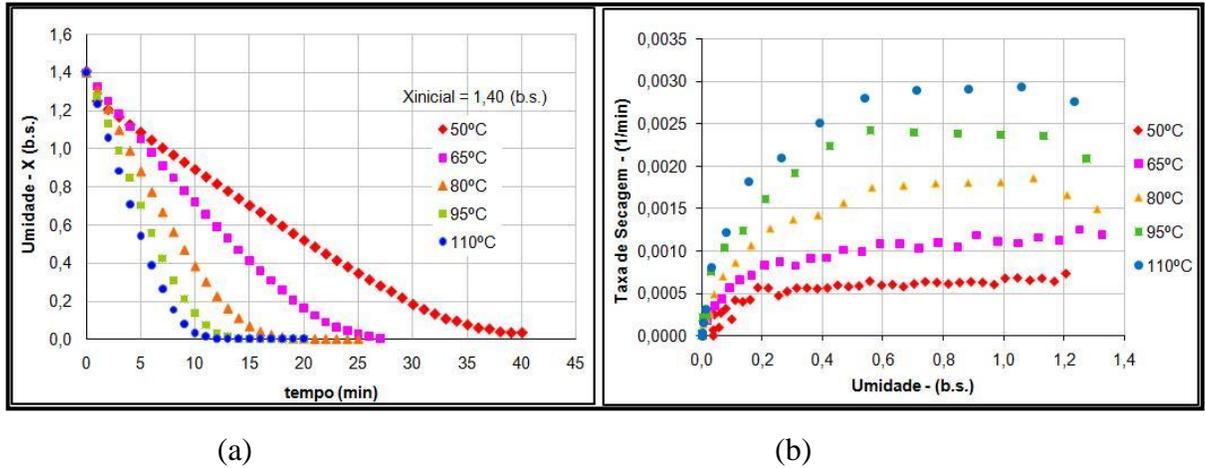


Figura 5.12 (a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra N

Observando o resultado da Figura 5.12, verifica-se uma coerência de resposta, pois aumentando a temperatura o material seca mais rapidamente. A partir das curvas de secagem da amostra N foram obtidas as curvas de taxa de secagem, as quais apresentam o período constante de taxa de secagem e o início bem caracterizado do período decrescente desta taxa. Isto pode ser verificado na Figura 5.12b, onde se constata que para temperaturas mais baixas o período de taxa constante se apresenta mais acentuado.

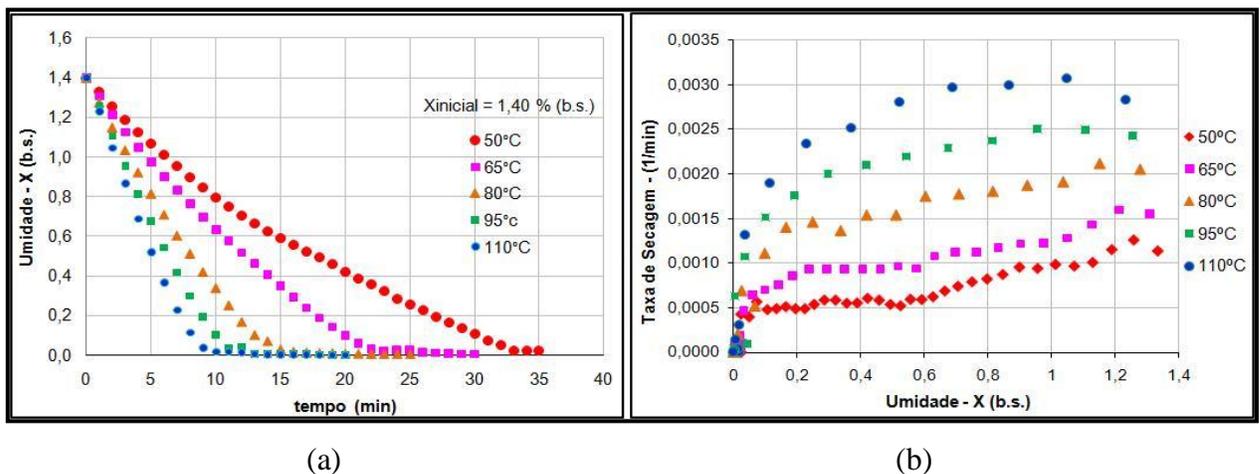


Figura 5.13 (a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra D

Percebe-se um aumento acelerado do processo de secagem a medida que aumenta a temperatura do ar de secagem dentro da estufa proporcionando um aumento da taxa de secagem. No período de taxa constante, percebe-se que o aumento da temperatura tem maior influência no período de taxa constante. De acordo com SOUSA (2003), isto ocorre pela maior quantidade de água livre na superfície da amostra e no período de taxa decrescente a umidade interna da amostra, onde provavelmente é controlada pelo escoamento capilar seguido de difusão ao final do processo.

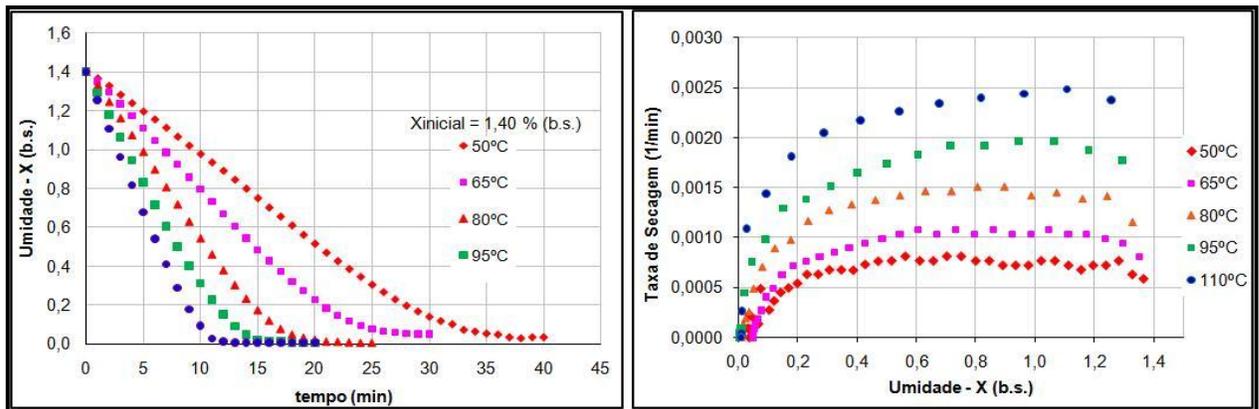
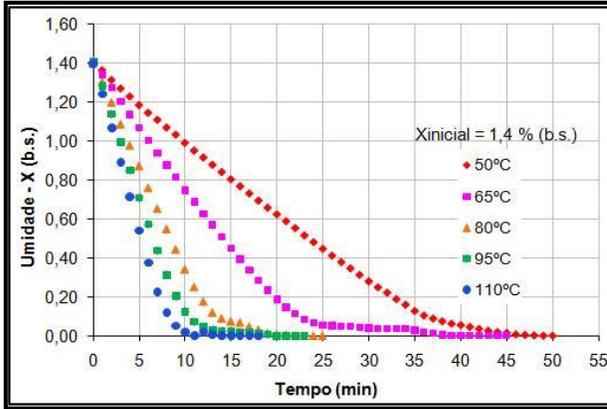


Figura 5.14 (a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra K

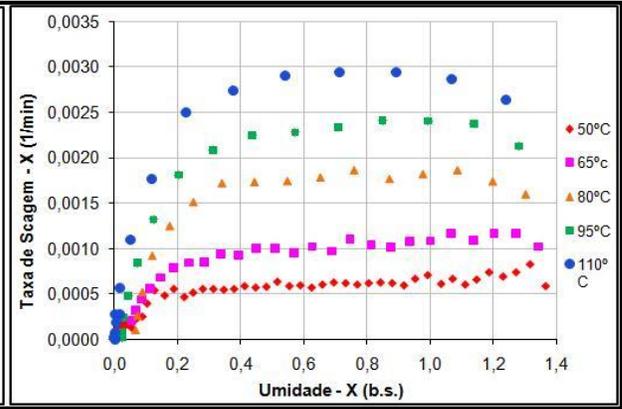
Pode-se verificar que em comparação com a amostra D, a amostra K apresenta um aumento do tempo de secagem, isto se deve provavelmente a gramatura desta amostra que é maior e, portanto leva mais tempo para secar dificultando a saída da umidade.

5.5.3 Análise da secagem no analisador de umidade por infravermelho

São apresentados aqui os resultados obtidos pelo levantamento das curvas de secagem e de taxa de secagem para as amostras de tecidos jeans, considerando-se as situações propostas no capítulo IV de Materiais e Métodos, para secagem no analisador de umidade por infravermelho.

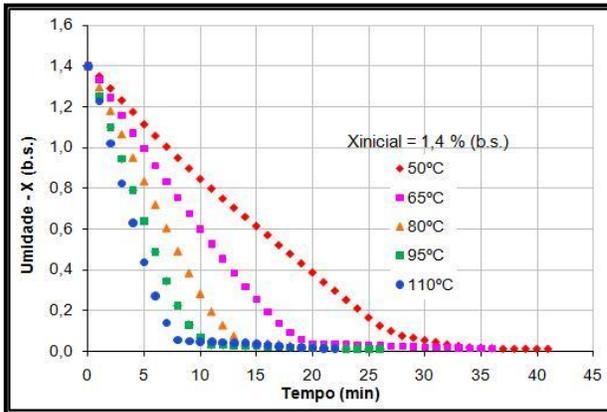


(a)

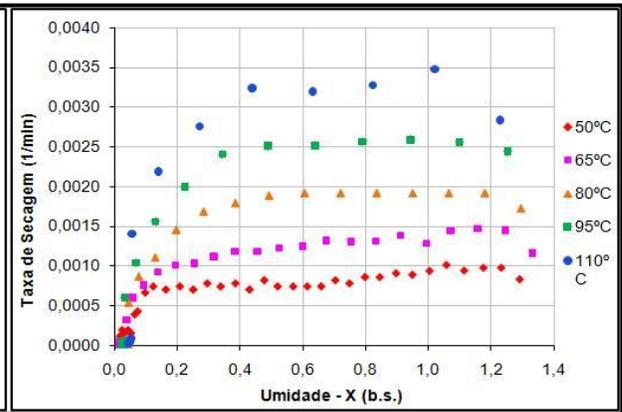


(b)

Figura 5.15 (a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra N

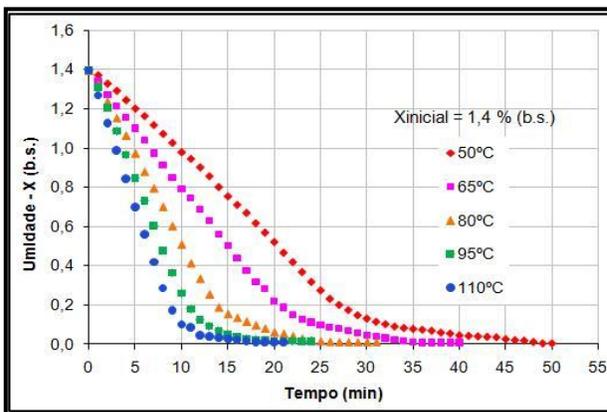


(a)

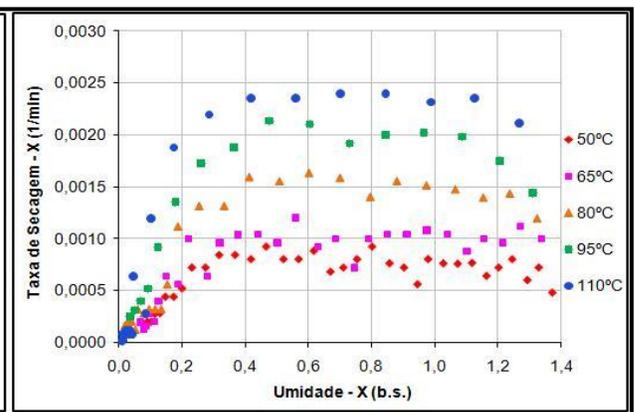


(b)

Figura 5.16 (a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra N



(a)



(b)

Figura 5.17 (a) e (b): Curvas de secagem e Taxa de secagem – Amostra K

Analisando o comportamento da influência das mesmas condições de secagem realizadas para a estufa, nota-se na figura 5.15(a) que o tempo de secagem é maior, comparado a secagem da mesma amostra na estufa. Conforme SOUSA (2003 apud FOUST, 1982) a secagem de um tecido úmido resulta sempre um tipo de comportamento padrão. A temperatura do tecido ajusta-se até atingir o equilíbrio entre a superfície e o seu meio exterior, chamado período de indução, como pode ser visto na figura 5.16. O tempo de secagem para a amostra N é menor comparado as outras duas amostras D e K, isto se deve provavelmente aos valores da porosidade que é menor, e, portanto leva menos tempo para secar. De acordo com HAGHI (2004) a quantidade de poros dentro do tecido determina a capacidade de reter, portanto quanto maior a porosidade, mais água poderá conter no tecido. O diâmetro das fibras dos tecidos e a distribuição dos poros influenciam no processo de transferência de calor (LI e ZHU, 2003). Para as amostras D e K os diâmetros dos fios de trama e urdume são maiores e com isso maior quantidade de fibras é contida neles.

Em se tratando de higroscopicidade, a amostra N contém em sua composição 97% de fibra de algodão e 3% de fibra de elastano, onde o grau de higroscopicidade do elastano é diferente do algodão. A porcentagem de umidade do algodão é de 8,5% e do elastano 1,5%. De acordo com ZHONGXUAN et al (2003) a maioria dos materiais têxteis têm um certo grau de capacidade de absorção de umidade chamado higroscopicidade.

5.5.4 Ajuste das curvas de secagem

Neste trabalho foram testados alguns modelos da literatura mais comumente utilizados para o tratamento dos dados das curvas de secagem conforme descritos na tabela 5.7.

Tabela 5.7: Modelos matemáticos

Nome do modelo	Modelo
Newton	$X = \exp[-kt]$
Page	$X = \exp[-kt^n]$
Page Modificado	$X = \exp[-(kt)^n]$
Henderson e Pabis	$X = a \exp[-kt]$
Henderson e Pabis modificado	$X = a \exp[-kt] + b \exp[-gt] + c \exp[-ht]$
Dois termos	$X = a \exp[-k_0t] + b \exp[-k_1t]$
Simplified Fick's Difusion	$X = a \exp[-c(t/L^2)]$

Realizou-se a análise de regressão com o auxílio do software STATISTICA 8.0, utilizando a metodologia de estimativa de Quase-Newton e o critério de convergência de 0,0001, para a determinação dos coeficientes dos modelos com todas as condições de operações estudadas. Com os coeficientes foi possível o cálculo dos coeficientes gerais em função da temperatura, para obter um modelo geral que seja possível simular o comportamento da secagem das amostras dos tecidos jeans em função dos parâmetros antes nomeados. Em anexo são apresentados os resultados dos parâmetros para todas as temperaturas.

Para os critérios de seleção do modelo que melhor se ajusta para o processo estudado temos, pela ordem, o coeficiente de determinação R^2 , sendo eliminados os modelos que apresentaram valores de R^2 menores que 0,95 de acordo com (SANTOS et al, 2008), o valor de qui-quadrado χ^2 calculado pela equação 5.5, sendo eliminados os modelos para os quais se obteve $\chi^2 \geq 0,01$, critério utilizado em WAUCHON e PENA (2008). A raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) calculado pela equação 5.6, sendo eliminados os modelos quadráticos com $RMSE \geq 0,1$. Ainda que o critério de eliminação ocorresse em apenas um critério, eliminou-se o modelo como um todo.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{exp}} - X_{\text{pred}})^2}{N - n} \quad (5.5)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{exp}} - X_{\text{pred}})^2 \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

em que:

X_{exp} = umidade obtida experimentalmente, b.s.

X_{pred} = umidade predita pelo modelo ajustado, b.s

N = número de pontos experimentais

n = número de parâmetros do modelo

Na tabela 5.6 são apresentados os parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos de todos os modelos utilizados para cada amostra e aparelho.

5.5.4.1 Estufa

Para uma análise preliminar dos possíveis modelos excluídos pelo critério dos coeficientes de determinação R^2 , do χ^2 e do RMSE foram observados os valores dos coeficientes de cada modelo para cada amostra com todas as temperaturas estudadas e as amplitudes dos resultados. Com valor do R^2 inferior a 0,90, apenas o modelo de Newton foi excluído.

Na continuação da seleção dos modelos, pelos critérios do valor de χ^2 e RMSE, observou-se que, independente do critério do R^2 , foram excluídos outros modelos.

Quanto ao critério do $RMSE \geq 0,1$ somente foi excluído o modelo de Newton para todas as temperaturas, apresentando valor máximo de ($RMSE = 0,2267$, $T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$), que já havia sido excluído pelo critério do coeficiente de determinação.

Apenas o modelo de Newton com as temperaturas de 65 e 80 $^\circ\text{C}$ foram excluídos com os menores valores encontrados de R^2 com 0,8790 e 0,8959 respectivamente para o ajuste das curvas de secagem com a amostra N. Os demais modelos estudados apresentaram R^2 maior que 0,90. O maior valor de R^2 foi de 0,9851 para o modelo Henderson e Pabis Modificado na temperatura de 110 $^\circ\text{C}$. O segundo maior valor de R^2 foi apresentado para o modelo de Simplified Fick's Difusion Equation com R^2 (0,9809) na temperatura de 50 $^\circ\text{C}$.

Para a amostra K, pelo critério de se excluir os modelos cujos valores dos R^2 fossem inferior a 0,90, não teve nenhum modelo abaixo desse critério. O maior valor de R^2 foi apresentado pelo modelo de Newton com R^2 0,9893, na temperaturas de 65 $^\circ\text{C}$.

Para a amostra D, o valor do R^2 maior também foi para o modelo de Newton, porém na temperatura de 50 $^\circ\text{C}$ e pelo critério de se excluir os modelos com valores dos $R^2 \geq 0,90$, também não teve nenhum modelo.

A tabela 5.8 apresenta os valores máximos e mínimos de cada modelo selecionado pelo critério de $R^2 \geq 0,95$. Observou-se que, os modelos que passaram por este critério de seleção, o menor valor de R^2 foram para os modelos de Page, Page Modificado e Page Modificado Equação II com (0,9527), todos para a mesma amostra D.

Tabela 5.8: Modelos selecionados pelos critérios de $R^2 \geq 0,95$ - Estufa

Modelo	Amostras	R^2	Temperatura (°C)
Newton	K	Máximo = 0,9893	65
		Mínimo = 0,9757	80
	D	Máximo = 0,9972	50
		Mínimo = 0,9718	110
Page	N	Máximo = 0,9733	50
		Mínimo = 0,9678	65
	K	Máximo = 0,9722	50
		Mínimo = 0,9601	65
Page Modificado	D	Máximo = 0,9705	110
		Mínimo = 0,9527	50
	N	Máximo = 0,9734	50
		Mínimo = 0,9679	65
Henderson e Pabis	K	Máximo = 0,9685	110
		Mínimo = 0,9550	65
	D	Máximo = 0,9705	110
		Mínimo = 0,9527	50
Henderson e Pabis Modificado	N	Máximo = 0,9760	110
		Mínimo = 0,9656	65
	K	Máximo = 0,9656	65
		Mínimo = 0,9633	50
Henderson e Pabis Modificado	D	Máximo = 0,9793	50
		Mínimo = 0,9729	95
	N	Máximo = 0,9851	110
		Mínimo = 0,9655	65
Henderson e Pabis Modificado	K	Máximo = 0,9696	110
		Mínimo = 0,9563	50
	D	Máximo = 0,9794	50
		Mínimo = 0,9729	95

		N	Máximo = 0,9760	110
			Mínimo = 0,9656	65
Dois termos		K	Máximo = 0,9697	110
			Mínimo = 0,9627	80
		D	Máximo = 0,9794	50
			Mínimo = 0,9729	95
Simplified Fick's Difusion		N	Máximo = 0,9809	50
			Mínimo = 0,9656	65
		K	Máximo = 0,9656	110
			Mínimo = 0,9627	80
		D	Máximo = 0,9793	50
			Mínimo = 0,9729	95
Page Modificado Equation II		N	Máximo = 0,9701	110
			Mínimo = 0,9636	95
		K	Máximo = 0,9685	110
			Mínimo = 0,9572	65
		D	Máximo = 0,9706	110
			Mínimo = 0,9527	50

5.5.4.2 Analisador de umidade por infravermelho

No ajuste das curvas de secagem, nenhum modelo e nenhuma amostra obtiveram valores de R^2 inferior a 0,90. A tabela 5.9 apresenta os modelos selecionados, para cada amostra, pelo critério de $R^2 \geq 0,90$ bem como os valores máximos e mínimos de cada modelo. Percebeu-se que, nos modelos que passaram por este critério de seleção, o menor valor de R^2 para a amostra N foi de 0,9621 para o modelo de Henderson e Pabis Modificado, na temperatura de 50 °C, para amostra K o menor valor foi de 0,9604 para o modelo Simplified Fick's Diffusion, na temperatura de 50 °C já para amostra D o menor foi de 0,9628 para o modelo de Newton, na temperatura de 80 °C.

Tabela 5.9: Modelos selecionados pelos critérios de $R^2 \geq 0,95$ – Analisador de umidade por infravermelho

Modelo	Amostra	R^2	Temperatura (°C)
Newton	N	Máximo = 0,9801	50
		Mínimo = 0,9647	110
	K	Máximo = 0,9856	65
		Mínimo = 0,9696	110
	D	Máximo = 0,9888	50
		Mínimo = 0,9592	110
Page	N	Máximo = 0,9696	65
		Mínimo = 0,9631	110
	K	Máximo = 0,9736	50
		Mínimo = 0,9680	95
	D	Máximo = 0,9718	95
		Mínimo = 0,9683	65
Page modificado	N	Máximo = 0,9696	65
		Mínimo = 0,9630	110
	K	Máximo = 0,9708	110
		Mínimo = 0,9646	50
	D	Máximo = 0,9718	95
		Mínimo = 0,9647	50
Henderson e Pabis	N	Máximo = 0,9761	65
		Mínimo = 0,9623	50
	K	Máximo = 0,9737	80
		Mínimo = 0,9625	50
	D	Máximo = 0,9760	110
		Mínimo = 0,9674	50
Henderson e Pabis Modificado	N	Máximo = 0,9761	65
		Mínimo = 0,9621	50
	K	Máximo = 0,9735	80

		Mínimo = 0,9625	50
	D	Máximo = 0,9762	110
		Mínimo = 0,9674	50
	N	Máximo = 0,9761	65
		Mínimo = 0,9623	50
Dois termos	K	Máximo = 0,9737	80
		Mínimo = 0,9604	50
	D	Máximo = 0,9760	110
		Mínimo = 0,9674	50
	N	Máximo = 0,9761	65
Simplified Fick'		Mínimo = 0,9623	50
Difusion	K	Máximo = 0,9737	65
		Mínimo = 0,9604	50
	D	Máximo = 0,9761	110
		Mínimo = 0,9674	50

Não se observou uma tendência nos valores de R^2 no que se refere à temperatura, ocorrendo valores máximos e mínimos em diferentes temperaturas, conforme o modelo. Contudo, a temperatura de 50 °C apresentou, para todas as amostras, os menores valores de R^2 em seis dos nove modelos usados. Pelo critério de χ^2 e RMSE, observou-se que, independente do critério do R^2 , foram excluídos pelo critério do $\chi^2 \geq 0,01$ os modelos, para a mostra N em todas as temperaturas, o modelo de Newton com maior valor de ($\chi^2 = 0,0466$, T = 65 °C), Page para todas as temperaturas e maior valor de ($\chi^2 = 0,01323$, T = 50 °C), Henderson e Pabis ($\chi^2 = 0,0102$ T = 50 °C), Dois termos ($\chi^2 = 0,0109$, T = 50 °C), Page Modificado Equação II e Page Modificado, para todas as temperaturas, apresentados maior valor de ($\chi^2 = 0,0136$, T = 80 °C). Os modelos de Henderson e Pabis, logarítmico e Simplified não foram excluídos pelo critério do qui-quadrado.

Para amostra K, foram excluídos os modelos de Newton, para todas as temperaturas, apresentando maior valor de ($\chi^2 = 0,0533$, T = 50 °C), Page, para todas as temperaturas, apresentado maior valor de ($\chi^2 = 0,0158$, T = 50 °C), Henderson e Pabis Modificado ($\chi^2 = 0,0109$, T = 50 °C e $\chi^2 = 0,0127$, T = 110 °C), Page Modificado Equação II, para todas as temperaturas,

apresentado maior valor de ($\chi^2 = 0,0151$, T = 95 °C) e Page Modificado, também para todas as temperaturas, com maior valor de ($\chi^2 = 0,0158$, T = 50 °C).

Para amostra D, os modelos Newton, Page, Page Modificado e Page Modificado Equação II, foram excluídos, para todas as temperaturas, apresentando maiores valores de ($\chi^2 = 0,041$, T = 65 °C, $\chi^2 = 0,0129$, T = 50 °C, $\chi^2 = 0,0131$, T = 50 °C, $\chi^2 = 0,0127$, T = 95 °C) respectivamente. O modelo de Henderson e Pabis Modificado também foi excluído, apresentando valor de ($\chi^2 = 0,0124$, T = 110 °C).

Para todas as amostras, dentre os modelos, apenas o de Henderson e Pabis e Simplified Fick's Diffusion não foram excluídos pelo critério do qui-quadrado. Em se tratando do critério do $RMSE \geq 0,1$ nenhum modelo foi excluído, para todas as amostras.

Portando, entre os critérios usados, apenas o χ^2 possibilitou a retirada de modelos que não tinham sido excluídos pelo R^2 . Desta forma, para estes dados, a aplicação do critério do R^2 , em conjunto com o χ^2 , teria levado à seleção dos mesmos modelos. Após a aplicação dos critérios de seleção de exclusão, pré-estabelecidos, restaram os seguintes modelos para a amostra N e K: Henderson e Pabis e Simplified Fick's Diffusion. Para a amostra D foram os modelos: Henderson e Pabis, Dois termos e Simplified Fick's Diffusion. Portanto, pelos critérios de seleção adotados, qualquer um destes modelos poderia ser usado para descrever a base de dados de cada amostra estudada. A tabela 5.10 apresenta os modelos selecionados.

Tabela 5.10: Modelos para cada amostra.

Modelo	Amostra
Henderson e Pabis	
Dois termos	N
Simplified Fick's Diffusion	
Henderson e Pabis	
Dois termos	K
Simplified Fick's Diffusion	
Henderson e Pabis	
Dois termos	D
Simplified Fick's Diffusion	

Após análise preliminar dos resultados, percebemos a possível exclusão de alguns modelos e com isso passa-se a analisar qual modelo após a regressão melhor representará os dados de secagem das amostras.

5.5.4.3 Análise geral - Estufa

São apresentados na tabela de 5.11 os valores dos parâmetros estatísticos obtidos a partir das análises de regressão dos sete modelos matemáticos. Os modelos capazes de predizer de maneira mais eficiente as curvas de secagem na estufa da amostra N foram identificados com base nos maiores valores do coeficiente de correlação (R^2) e menores valores de qui-quadrado (χ^2).

Tabela 5.11: Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra N - Estufa

Modelo	R^2	χ^2	RMSE
Newton	0,9826	0,00325	0,03554
Page	0,9817	0,00449	0,06721
Page Modificado	0,9907	0,00148	0,03847
Henderson e Pabis	0,9936	0,00117	0,02327
Henderson e Pabis Modificado	0,9929	0,00172	0,03482
Dois termos	0,9936	0,00134	0,03229
Simplified Fick's Equation II	0,9858	0,00685	0,08307

Os ajustes dos modelos de Page modificado, Henderson e Pabis, Henderson e Pabis modificado e Dois termos foram os que apresentaram os maiores valores de R^2 conforme tabela 5.9. O fato dos valores serem os maiores indica, no primeiro momento, que todos esses modelos podem ser utilizados com boas precisões na predição dos dados de secagem da amostra N. Porém, desses quatro modelos selecionados, merece destaque o de Henderson e Pabis por apresentar os menores valores de χ^2 e RMSE e também por apresentar apenas dois parâmetros, sendo mais fácil a linearização e o ajuste aos dados experimentais.

A eliminação desses modelos confirma a análise realizada anteriormente, pois para o modelo de Newton o valor do R^2 para as temperaturas de 65 e 80 °C apresentaram valores

menores que 0,90 e $\chi^2 \geq 0,01$. Para os modelos de Page e Page modificado apresentaram valores do $\chi^2 \geq 0,01$ para a temperatura de 65 °C.

A tabela 5.12 apresenta as equações obtidas com o modelo de Henderson e Pabis para as cinco temperaturas estudadas para a amostra N.

Tabela 5.12: Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas – Amostra N.

Amostra	Temperatura (°C)	Equação
N	50	$X = 1,50004 \exp(0,05335t)$
	65	$X = 1,51856 \exp(0,09921t)$
	80	$X = 1,52707 \exp(0,14508t)$
	95	$X = 1,55585 \exp(0,19094t)$
	110	$X = 1,57409 \exp(0,23681t)$

Com o cálculo da regressão múltipla é possível encontrar a equação geral para as cinco temperaturas estudadas. As equações são as seguintes para cada amostra analisada.

Para a amostra N, temos:

$$X = a_n \exp[-k_n t] \quad (5.7)$$

onde:

$$a_n = 1,43834 + 0,00123T$$

$$k_n = -0,99533 + 0,00306T$$

Na figura 5.18 é apresentada graficamente as correlações entre os valores de X, experimentais (X observado) e preditos (X predito) a partir do modelo que apresenta o melhor ajuste.

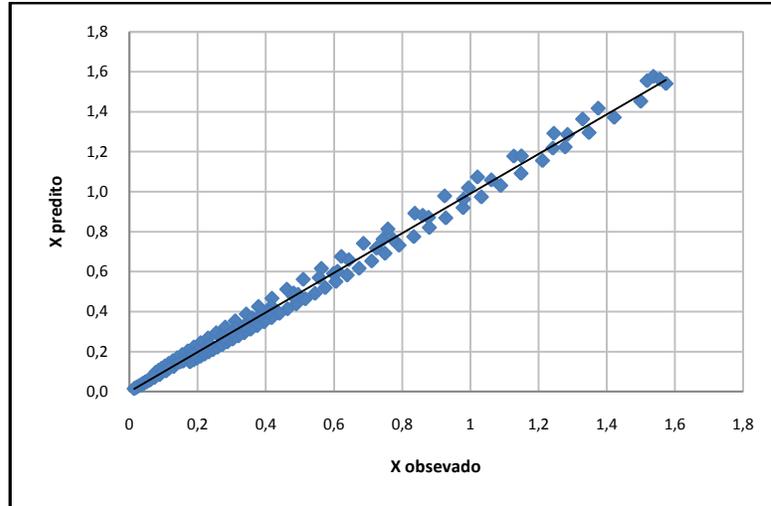


Figura 5.18: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra N

A tabela 5.13 apresenta os parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos para a amostra K com todos os modelos

Tabela 5.13: Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra K - Estufa

Modelo	R²	χ²	RMSE
Newton	0,9691	0,00135	0,03345
Page	0,9900	0,00445	0,06697
Page Modificado	0,9863	0,00222	0,04724
Henderson e Pabis	0,9925	0,00117	0,02339
Henderson e Pabis Modificado	0,9847	0,00186	0,04893
Dois termos	0,9825	0,00177	0,03443
Simplified Fick's Equation II	0,9756	0,00685	0,08367

Os ajustes dos modelos de Page, Page modificado, Henderson e Pabis, Henderson e Pabis modificado e Dois termos foram os que apresentaram os maiores valores de R² conforme pode ser visto na tabela 5.11.

O fato dos valores serem os maiores indica, no primeiro momento, que todos esses modelos podem ser utilizados com boas precisões na predição dos dados de secagem da amostra K. Porém, desses cinco modelos selecionados, merece destaque o de Henderson e Pabis e Dois

termos por apresentarem os menores valores de χ^2 e RMSE. Para uma fácil linearização e ajuste aos dados experimentais o modelo de Henderson e Pabis destaca-se, pois apresenta apenas dois parâmetros.

Numa análise dos coeficientes de cada temperatura os modelos de Newton, Page, Page modificado apresentaram valores do $\chi^2 \geq 0,01$ para as temperaturas de 65 a 110 °C, exceto o modelo de Newton que apresentou para as temperaturas de 50 a 110 °C.

Confirmando assim que estes modelos não são bons para predizer de maneira mais eficiente as curvas de secagem das amostras de tecidos jeans para a faixa de dados experimentais utilizados nesta pesquisa.

A tabela 5.14 apresenta as equações obtidas com o modelo de Henderson e Pabis para as cinco temperaturas estudadas para a amostra K.

Tabela 5.14: Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas – Amostra K

Amostra	Temperatura (°C)	Equação
K	50	$X = 1,59317 \exp(0,05346t)$
	65	$X = 1,58194 \exp(0,08893t)$
	80	$X = 1,57070 \exp(0,12440t)$
	95	$X = 1,55947 \exp(0,15987t)$
	110	$X = 1,54824 \exp(0,19534t)$

Com o cálculo da regressão múltipla é possível encontrar a equação geral para as cinco temperaturas estudadas. A equação é a seguinte para a amostra K.

$$X = a_k \exp[-k_k t] \quad (5.8)$$

onde:

$$a_k = 1,63061 + 0,00075T$$

$$k_k = - 0,06478 + 0,00236T$$

Na figura 5.19 é apresentada graficamente as correlações entre os valores de X experimentais (X observado) e preditos (X predito) a partir do modelo que apresenta o melhor ajuste.

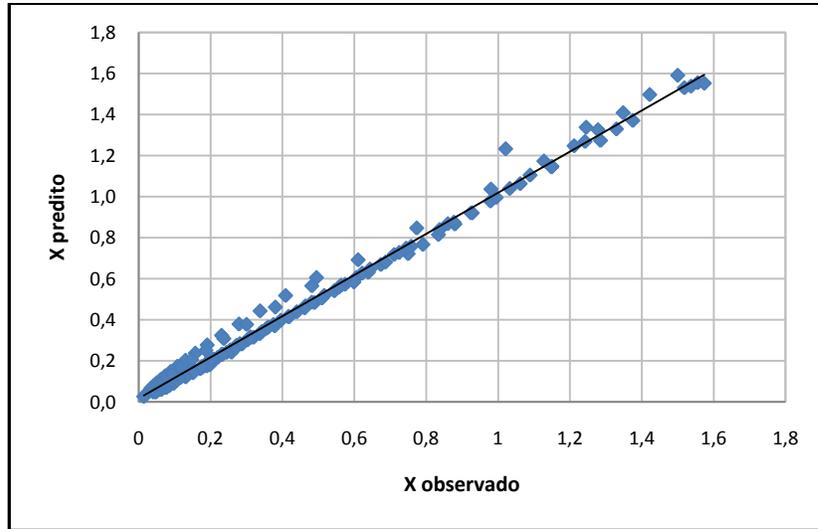


Figura 5.19: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra K

A tabela 5.15 apresenta os parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos para a amostra D com todos os modelos

Tabela 5.15: Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra D - Estufa

Modelo	R²	χ²	RMSE
Newton	0,9657	0,00137	0,04380
Page	0,9710	0,00462	0,06771
Page Modificado	0,9884	0,00187	0,03599
Henderson e Pabis	0,9895	0,00121	0,02901
Henderson e Pabis Modificado	0,9920	0,00228	0,03657
Dois termos	0,9894	0,00122	0,03480
Simplified Fick's Equation II	0,9816	0,00710	0,08424

Os ajustes dos modelos de Page modificado, Henderson e Pabis, Henderson e Pabis modificado e Dois termos foram os que apresentaram os maiores valores de R² conforme pode ser visto na tabela 5.11.

Todos esses modelos podem ser utilizados com boas precisões na predição dos dados de secagem do tecido jeans - amostra D, caso este tivesse sido o único critério de seleção. Porém, desses quatro modelos selecionados, merece destaque o de Henderson e Pabis e Dois termos por apresentarem os menores valores de χ^2 e RMSE e muito próximo. O modelo de Henderson e Pabis destaca-se por apresentar apenas dois parâmetros, sendo de fácil linearização e ajuste aos dados experimentais.

A eliminação destes modelos é confirmada pela análise realizada em separado dos coeficientes de cada temperatura onde apresentaram valores do $\chi^2 \geq 0,01$ para todas as temperaturas com o modelo de Newton e na faixa de 50 a 95 °C para o modelo de Page.

Haghi e Ghanadzadeh (2005) ajustaram nove modelos, dentre eles os modelos de Newton e Page, para secagem de fibras de lã e os valores dos coeficientes de correlação (R^2) e o SE (standart error) obtidos por eles foram os menores semelhantes aos obtidos neste trabalho.

A tabela 5.16 é apresentada as equações da amostra D obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas.

Tabela 5.16: Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas –

Amostra D		
Amostra	Temperatura (°C)	Equação
D	50	$X = 1,49808 \exp(0,08354t)$
	65	$X = 1,50601 \exp(0,10775t)$
	80	$X = 1,51393 \exp(0,10775t)$
	95	$X = 1,52185 \exp(0,11986t)$
	110	$X = 1,52987 \exp(0,13196t)$

Com o cálculo da regressão múltipla é possível encontrar a equação geral para as cinco temperaturas estudadas. A equação é a seguinte para a amostra D.

$$X = a_D \exp[-k_D t] \quad (5.9)$$

onde:

$$a_D = 1,47159 + 0,00053T$$

$$k_D = 0,00081 + 0,04319T$$

Na figura 5.20 são apresentadas graficamente as correlações entre os valores de X, experimentais (X observado) e preditos (X predito) a partir do modelo que apresenta o melhor ajuste.

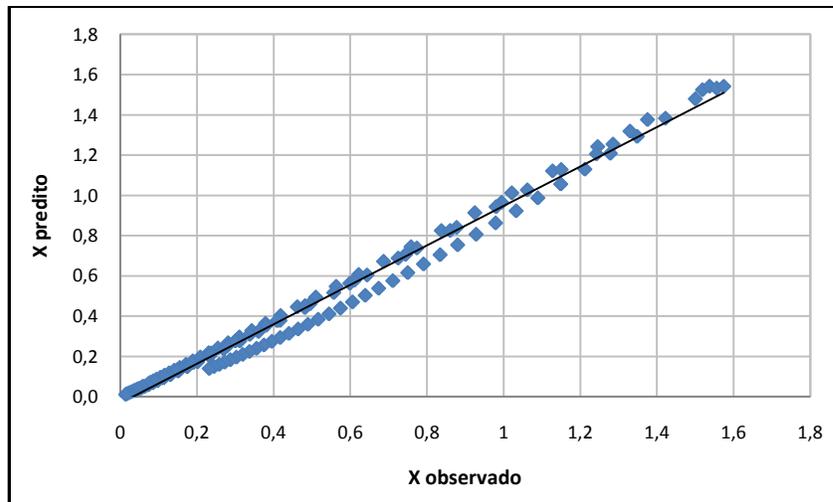


Figura 5.20: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra D

A distribuição para todos os modelos e amostras pode ser visualizada nas figuras 5.21 a 5.23.

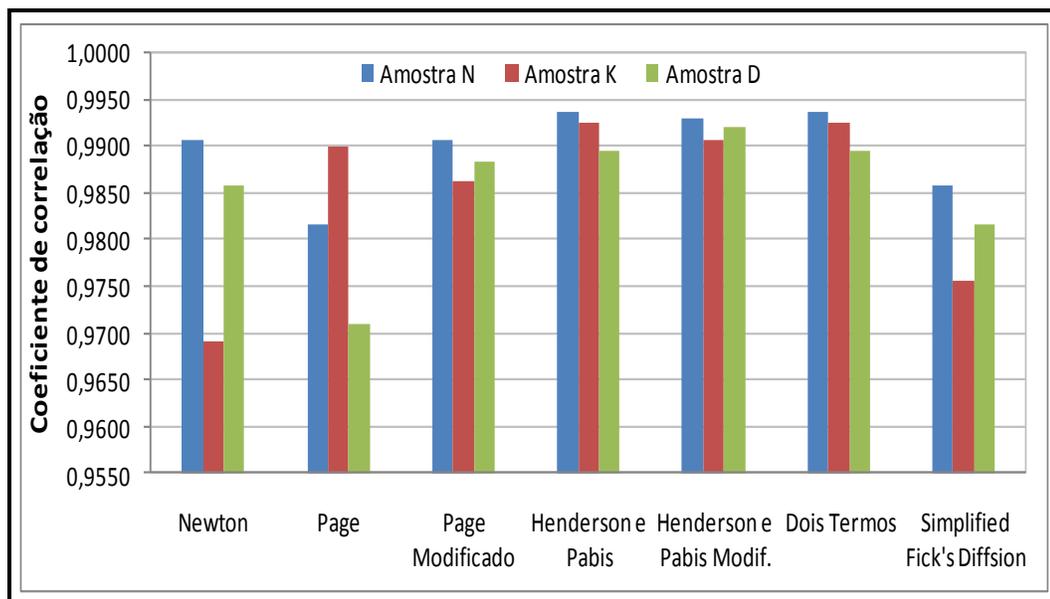


Figura 5.21: Coeficiente de correlação dos modelos para cada amostra

Pode-se observar na figura 5.21 o desempenho do ajuste efetuado pelos três modelos de Henderson e Pabis, Henderson e Pabis modificado e Dois termos e que eles se ajustam satisfatoriamente aos dados experimentais. Caso este tivesse sido o único critério estes modelos seriam considerados equivalentes. Em se tratando dos parâmetros estatísticos do χ^2 e do RMSE o modelo de Henderson e Pabis apresenta os menores valores conforme figuras 5.22 e 5.23.

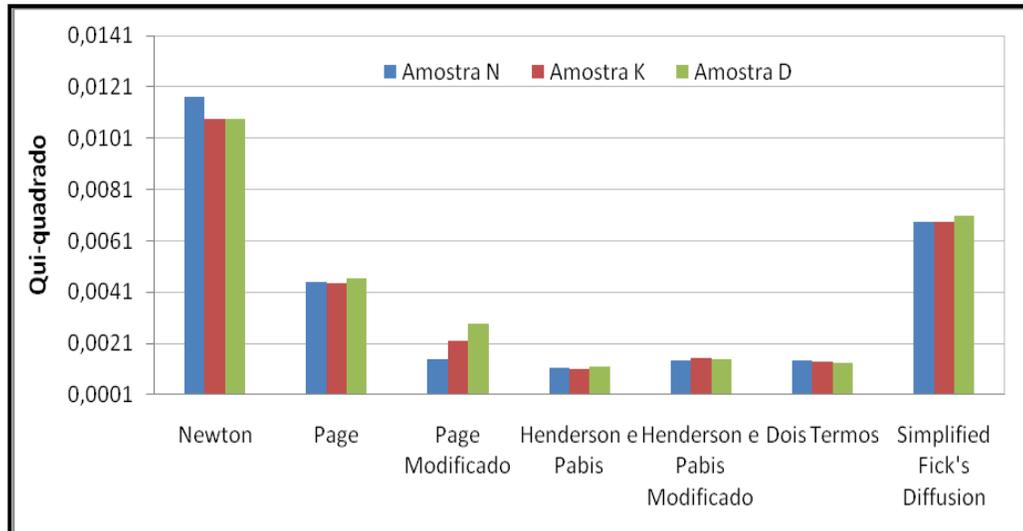


Figura 5.22: Qui-quadrado dos modelos para cada amostra

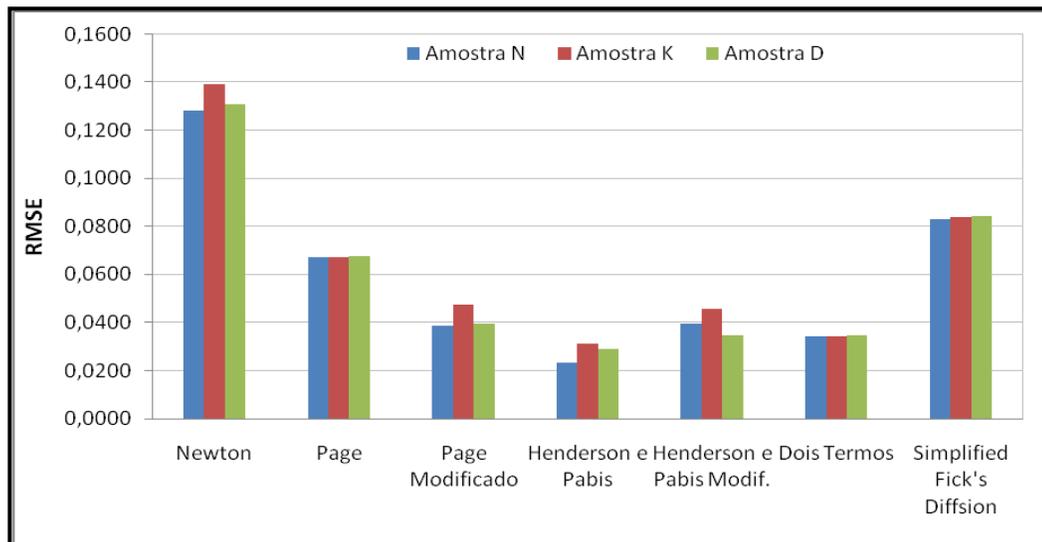


Figura 5.23: RMSE dos modelos para cada amostra

5.5.4.4 Análise geral - Analisador de umidade por infravermelho

São apresentados na tabela de 5.17 os valores dos parâmetros estatísticos obtidos a partir das análises de regressão dos sete modelos matemáticos.

Tabela 5.17: Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra N - Analisador de umidade por infravermelho

Modelo	R²	χ²	RMSE
Newton	0,9751	0,00266	0,03253
Page	0,9703	0,00163	0,02495
Page Modificado	0,9951	0,00139	0,03715
Henderson e Pabis	0,9964	0,00063	0,01624
Henderson e Pabis Modificado	0,9962	0,00145	0,03811
Dois termos	0,9936	0,00234	0,04839
Simplified Fick's Equation II	0,9758	0,00605	0,07777

Os ajustes dos modelos de Page modificado, Henderson e Pabis, Henderson e Pabis modificado e Dois termos foram os que apresentaram os maiores valores de R² conforme pode ser visto na tabela 5.13. Apenas com esta análise, todos esses modelos podem ser utilizados com boas precisões na predição dos dados de secagem da amostra N. Porém, desses quatro modelos selecionados, merece destaque o de Henderson e Pabis por apresentar o menor valor de χ² e RMSE. A tabela 5.18 apresenta as equações obtidas com o modelo de Henderson e Pabis para as cinco temperaturas estudadas para a amostra N.

Tabela 5.18: Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas – Amostra N.

Amostra	Temperatura (°C)	Equação
N	50	X = 1,57588 exp(0,05016t)
	65	X = 1,57192 exp(0,09782t)
	80	X = 1,56796 exp(0,14549t)
	95	X = 1,56399 exp(0,19314t)
	110	X = 1,56003 exp(0,24080t)

Com o cálculo da regressão múltipla é possível encontrar a equação geral para as cinco temperaturas estudadas. As equações são as seguintes para cada amostra analisada.

Para a amostra N, temos:

$$X = a_n \exp[-k_n t] \quad (5.10)$$

onde:

$$a_n = 1,58909 - 0,00026T$$

$$k_n = -0,10871 + 0,00318T$$

Na figura 5.24 são apresentadas graficamente as correlações entre os valores de X, experimentais (X observado) e preditos (X predito) a partir dos modelos que apresentaram os melhores ajustes.

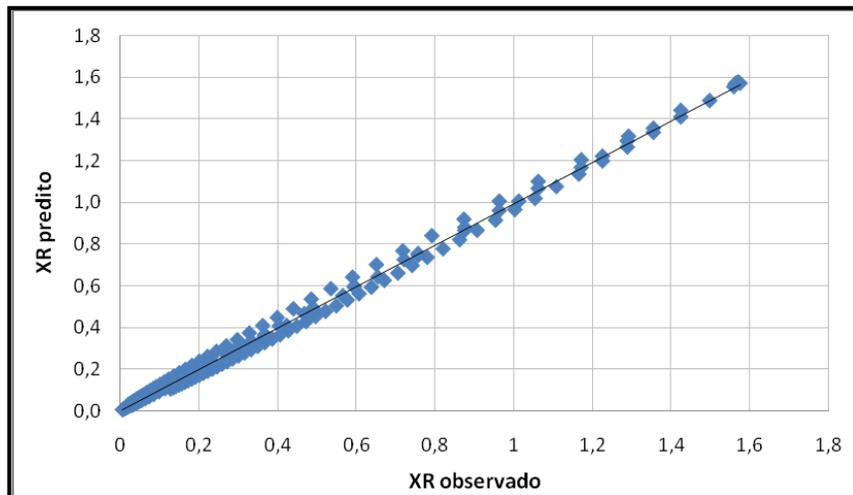


Figura 5.24: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra N

A tabela 5.19 apresenta os parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos para a amostra K com todos os modelos

Tabela 5.19: Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra K- Analisador de umidade por infravermelho

Modelo	R ²	χ ²	RMSE
Newton	0,9734	0,00135	0,04184
Page	0,9747	0,00392	0,06243
Page Modificado	0,9900	0,00153	0,04020
Henderson e Pabis	0,9965	0,00037	0,02585
Henderson e Pabis Modificado	0,9949	0,00134	0,03651
Dois termos	0,9903	0,00216	0,04633
Simplified Fick's Equation II	0,9869	0,00698	0,08332

Os ajustes dos modelos de Page, Page modificado, Henderson e Pabis, Henderson e Pabis modificado e Dois termos foram os que apresentaram os maiores valores de R² conforme pode ser visto na tabela 5.14. O fato dos valores serem os maiores indica, no primeiro momento, que todos esses modelos podem ser utilizados com boas precisões na predição dos dados de secagem do tecido jeans - amostra K. Porém, desses cinco modelos selecionados, merece destaque o de Henderson e Pabis e Dois termos por apresentarem os menores valores de χ² e RMSE. Para uma fácil linearização e ajuste aos dados experimentais o modelo de Henderson e Pabis destaca-se, pois apresenta apenas dois parâmetros. A tabela 5.20 apresenta as equações obtidas com o modelo de Henderson e Pabis para as cinco temperaturas estudadas para a amostra K.

Tabela 5.20: Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas – Amostra K

Amostra	Temperatura (°C)	Equação
K	50	X = 1,60802 exp(0,05721t)
	65	X = 1,59541 exp(0,09109t)
	80	X = 1,58280 exp(0,12497t)
	95	X = 1,57018 exp(0,15886t)
	110	X = 1,55756 exp(0,19273t)

Com o cálculo da regressão múltipla é possível encontrar a equação geral para as cinco temperaturas estudadas. A equação é a seguinte para a amostra K.

$$X = a_k \exp[-k_k t] \quad (5.11)$$

onde:

$$a_k = 1,65007 + 0,00084T$$

$$k_k = -0,05572 + 0,00226T$$

Na figura 5.25 são apresentadas graficamente as correlações entre os valores de X, experimentais (X observado) e preditos (X predito) a partir do modelo que apresenta o melhor ajuste.

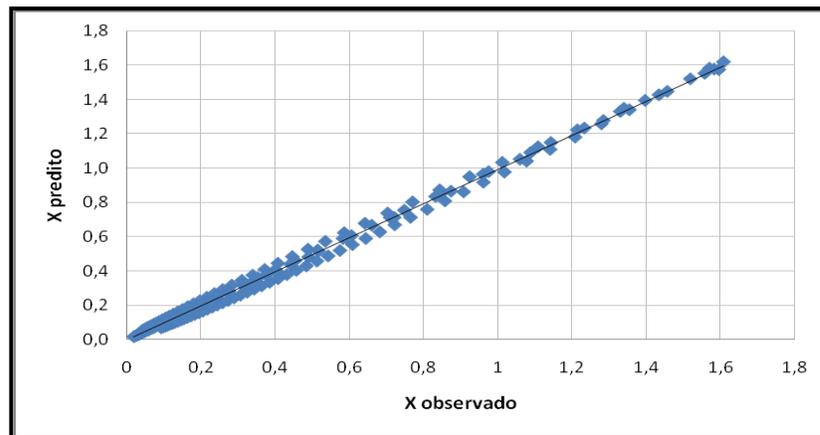


Figura 5.25: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra K

A tabela 5.21 apresenta os parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos para a amostra D com todos os modelos

Tabela 5.21: Parâmetros estatísticos dos ajustes matemáticos – Amostra D – Analisador de umidade por infravermelho

Modelo	R²	χ²	RMSE
Newton	0,9587	0,00368	0,03199
Page	0,9782	0,00468	0,06799
Page Modificado	0,9840	0,00354	0,03109
Henderson e Pabis	0,9981	0,00037	0,01910
Henderson e Pabis Modificado	0,9940	0,00096	0,02097
Dois termos	0,9982	0,00039	0,01920
Simplified Fick's Equation II	0,9798	0,00429	0,06594

Os ajustes dos modelos de Page modificado, Henderson e Pabis, Henderson e Pabis modificado e Dois termos foram os que apresentaram os maiores valores de R^2 . Todos esses modelos podem ser utilizados com boas precisões na predição dos dados de secagem da amostra D, caso este tivesse sido o único critério de seleção. Porém, desses quatro modelos selecionados, merece destaque o de Henderson e Pabis e Dois termos por apresentarem os menores valores de χ^2 e RMSE e muito próximo. O modelo de Henderson e Pabis destaca-se por apresentar apenas dois parâmetros, sendo de fácil linearização e ajuste aos dados experimentais. Estes dois modelos também apresentaram valores muito próximos quando ajustados com a estufa.

A eliminação destes modelos é confirmada pela análise realizada em separado dos coeficientes de cada temperatura onde apresentaram valores do $\chi^2 \geq 0,01$ para todas as temperaturas com o modelo de Newton e na faixa de 50 a 95 °C para o modelo de Page. Haghi e Ghanadzadeh (2005) ajustaram nove modelos, dentre eles os modelos de Newton e Page, para secagem de fibras de lã e os valores dos coeficientes de correlação (R^2) e o SE (standart error) obtidos por eles foram os menores semelhantes aos obtidos neste trabalho. A tabela 5.22 apresenta as equações obtidas com o modelo de Henderson e Pabis para as cinco temperaturas estudadas para a amostra D.

Tabela 5.22: Equações obtidas com modelo de Henderson e Pabis para todas as temperaturas –
Amostra D

Amostra	Temperatura (°C)	Equação
D	50	$X = 1,57893 \exp(0,06909t)$
	65	$X = 1,56847 \exp(0,11615t)$
	80	$X = 1,55800 \exp(0,16323t)$
	95	$X = 1,54755 \exp(0,21030t)$
	110	$X = 1,53708 \exp(0,25737t)$

Com o cálculo da regressão múltipla é possível encontrar a equação geral para as cinco temperaturas estudadas. A equação é a seguinte para a amostra D.

$$X = a_D \exp[-k_D t] \quad (5.12)$$

onde:

$$a_D = 1,61381 - 0,00698T$$

$$k_D = -0,87810 + 0,003138T$$

Na figura 5.26 são apresentadas graficamente as correlações entre os valores de X, experimentais (X observado) e preditos (X predito) a partir do modelo que apresenta o melhor ajuste.

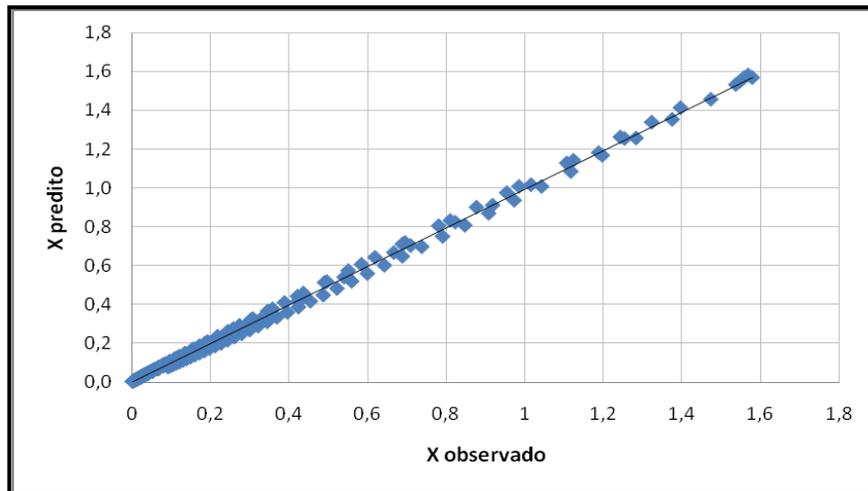


Figura 5.26: Correlação entre valores de X observado e predito pelo modelo de Henderson e Pabis – Amostra D

Para uma melhor visualização do melhor modelo nas figuras 5.27 a 5.29 são apresentadas as distribuições para todos os modelos e amostras.

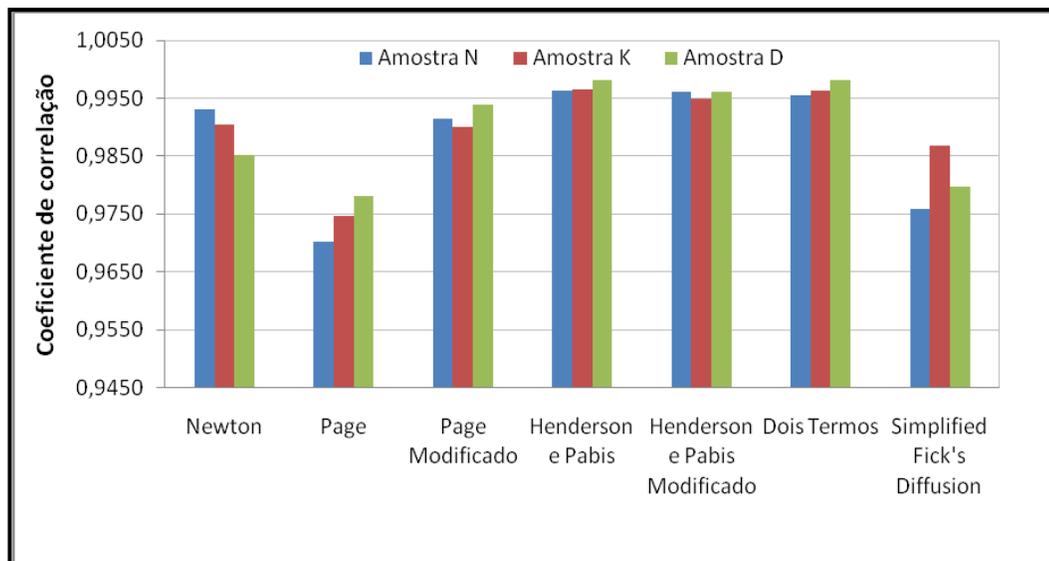


Figura 5.27: Coeficiente de correlação dos modelos para cada amostra – Analisador por infravermelho

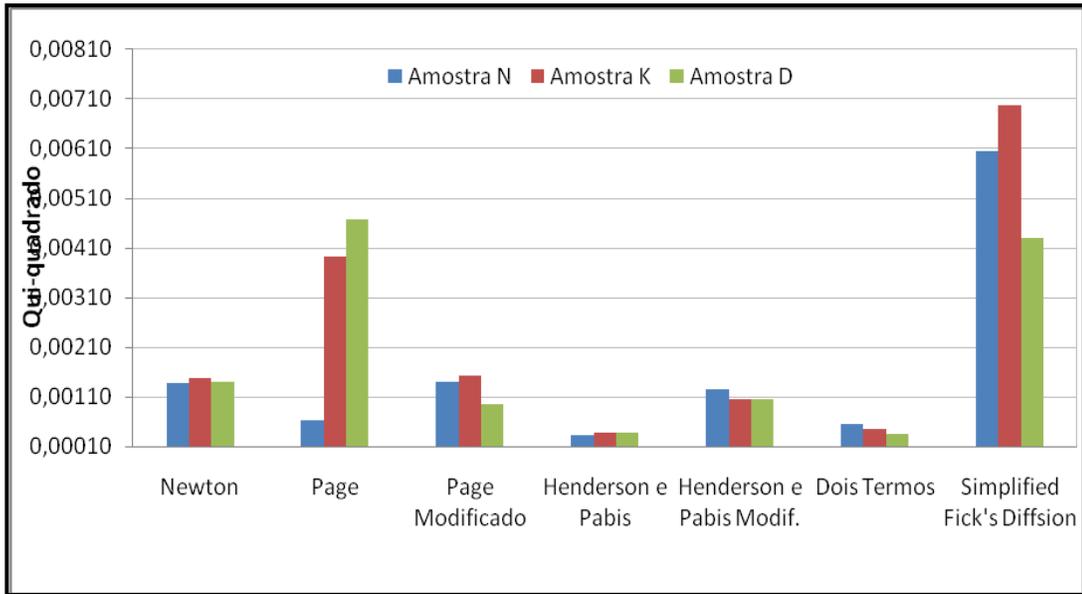


Figura 5.28: Qui-quadrado dos modelos para cada amostra – Analisador por infravermelho

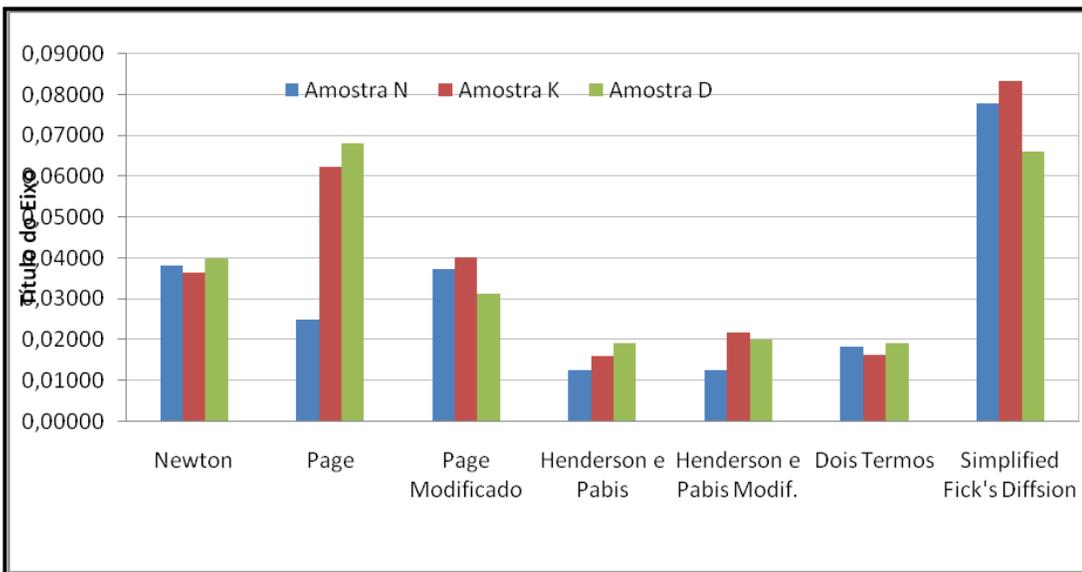


Figura 5.29: RMSE dos modelos para cada amostra- Analisador por infravermelho

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas condições operacionais estudadas, pode-se concluir que:

- Com a caracterização das amostras foi permitido um conhecimento de propriedades importantes, as quais são escassas na literatura;
- O comportamento da área superficial e da espessura das amostras mostrou-se invariáveis, não interferindo nos processos analisados nos intervalos de temperaturas e umidades;
- Observando os equipamentos utilizados, ficou evidente que, para secagem das amostras, ocorre uma pequena diferença no tempo de secagem, onde para o analisador de umidade por infravermelho é maior se comparado a estufa;
- Existe uma dependência do tempo de secagem para as diferentes gramaturas das amostras estudadas, já que a gramatura é uma característica que permite avaliar a contextura do tecido, quando analisada em conjunto com o número de fios por unidade de comprimento e com o título do fio também;
- Para o efeito de temperatura ficou claro que ocorre uma redução de tempo e maiores taxas de vaporização com o aumento da temperatura de secagem, confirmando as leis que regem a transferência de calor e massa;
- Na análise dos perfis das cinco temperaturas estudadas, pode-se observar a semelhança no comportamento com a presença dos patamares de temperatura constante relacionados à vaporização da água livre, seguindo de um aumento correspondente ao período de taxa decrescente e de sua estabilização ao final da secagem;
- O modelo de HENDERSON E PABIS, através primeiramente da análise dos parâmetros estatísticos R^2 , χ^2 e RMSE, foi o que proporcionou melhor ajuste, tanto para estufa quanto para o analisador de umidade por infravermelho, ao processo de secagem;
- Observou-se também uma carência com relação a dados e correlações experimentais sendo importante analisar os ajustes de curvas a variados modelos matemáticos, para outros tipos de tecidos, como é o caso do jeans, pois o mesmo tem uma diferença por levar em seu processo de fabricação corante aos fios de urdume.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Várias possibilidades para continuidade deste trabalho são possíveis, dentro do campo da secagem de tecido e algumas são comentadas a seguir.

- Uma análise, na secagem da influência das estruturas dos tecidos, haja vista que existem tecidos compostos em sua estrutura, onde apresentam estruturas diferentes para cada tecido;
- Analisar o comportamento da secagem para diferentes tipos de fibras desde natural a não natural;
- Seja analisada, nos tecidos, a influência da torção dos fios já que a mesma relaciona o número de voltas por unidade de comprimento e quanto maior o número de voltas, mais resistência terá o fio e conseqüentemente o tecido;
- Analisar a influência da tensão sobre o tecido, pois a mesma causa deformações no período da secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIT. Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. Informes técnicos: Pasta de Arquivos – Publicações – Consumo Industrial de Fibras e Filamentos – 1970-2010. São Paulo, 2000. Disponível em: http://www.sindi.textil.org.br/site/navegacao.asp?id_menu=9&id_sub=32&idoma=PT. Acesso em: 3 marc. 2008.

AIMEIDA, O. P., CALÇADA, L. A., MASSARANI, G – “Análise de um Sistema para Levantamento de Isotermas de Secagem”, Anais do XXV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, v. 2, p.600-603, Gráfica da UFSCar, São Carlos – SP, 1998.

ARAÚJO, M. & CASTRO, E. M. C. (1984). Manual de Engenharia Têxtil – Fundação Calouste Gulbenkian v. I e II. Lisboa, Portugal.

ASTM. American Society for Testing and Materials.

BHATTACHARJEE, D. e JOTHARI, K. V. Heat transfer through woven textiles. International Journal of Heat and Mass Transfer. n. 52, p. 2155-2160, 2009.

BONTEMPI, A. Eficiência energética de secadores industriais: análise e propostas experimentais. Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica, Curitiba, 2004.

CARTER, L. D. e SHAH, O. D. The Role of Surface Tension on the Residual Water Content of Fabrics. Journal of surfactants and detergents. v. 8, n.1, 2005.

CELCAR, D. e HARRIETt, M. Heat and moisture transmission properties of clothing systems evaluated by using a sweating thermal manikin under different environmental conditions. International Journal of Clothing Science and Technology. v. 20, n. 4, 2008.

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

CYNIK, D., CZEKALSKI, J. e JACKOWSKI, T., Influence of Selected Parameters of the Spinning Process on the State of Mixing of fibres of a Cotton/Polyester-Fibre Blend Yarn. FIBRES & TEXTILES in Eastem Europe. v. 14, n.4, 2006.

DAS, B., DAS, A., KOTHARI, V. K., FANGUIERO, R. e ARAÚJO, M. Moisture transmission through textiles. Part I: Processes involved in moisture transmission and the factors at play. AUTEX Research Journal. v. 7, n.2, 2007.

DAS, B., DAS, A., KOTHARI, V. K., FANGUIERO, R. e ARAÚJO, M. Moisture transmission through textiles. Part II: Processes involved in moisture transmission and the factors at play. AUTEX Research Journal. v. 7, n.3, 2007.

FICHET, D., LESAGE, F., VENTENAT, V. e LAFITI, A. M. Water spreading analysis on fabrics surface. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference, 2005.

FRANCESCHI, K., PÉREZ, S., NIÑO, Z. e MAGARELLI, D. Modelado y Simulación del Secado de Textiles Delgados Mediante um Cilindro Calentado por Inducción Eléctrica. Información Tecnológica. v. 19, n.4, 2008.

GORINI, F. P. A. O segmento de índigo. BNDES Setorial. n. 10, p. 313-334, 1999.

HAGHI, K. A. Mechanism of heat and mass transfer in moist porous materials. Journal Teknologji. 36(F) (2002) 1-14.

HAGHI, K. A. Relations for water-vapor transport through fibres. Journal of omputational and Applied Mechanics. v. 5, n. 2, p. 263-274, 2004.

HAGHI, K. A. e GHANADZADEH, H. A study of thermal drying process. *Indian Journal of Chemical Technology*. v. 12, p.654-663, 2005.

HAMDAOUI, M., FAYALA, F., PERRÉ, P. e BEM NASRALLAH, S. Experimental study of capillary rise in fabrics using an electrical resistance technique. *AUTEX Research Journal*, v. 8, n.2, 2008.

JOHANN, G., PEREIRA, C. N., MOTTA LIMA., C. O. e Silva, A. E. Determinação do calor de dessecção para materiais têxteis. *Acta Scientiarum*. v. 32, n.1, p.63-68, 2010.

JORGE, T. C. D. Tecnologia de medição não invasiva do encolhimento e homogeneidade de cores em processos têxteis. Mestrado (Dissertação em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

LANGRISCH, G. A. T. Characteristic drying curves for cellulose fibres. *Chemical Engineering Journal*. n. 137, p. 677-680, 2008.

LE, V. C. e POSTLE, R. Heat and mass transfer in the condensing flow of steam through an absorbing fibrous medium. *Int. J. Heat Mass Transfer*. v. 38, n. 1, p. 81-89, 1995.

Li, Y. e ZHU, Q. Simulations Heat and Moisture Transfer with Moisture Sorption, Condensation, and Capillary Liquid Diffusion in Porous Textiles. *Textile Research Journal*. 73(6), 515-524 (2003).

MOHAMMIDI, A., RAFIEE, S., KEYHANI, A. e EMAN, Z. Moisture content modeling of sliced kiwifruit. *Pakistan Journal of Nutrition* 8 (1): 78-82, 2009.

MOTTA LIMA, C. O., ALVES, S. E. C., PEREIRA, C. N. e MENDES, S. E. Moisture equilibrium isotherms for long-fiber cellulose. *Acta Scientiarum*. v.26, n.1, p.27-32, 2004.

MOTTA LIMA, O. C. e MASSARANI, G. Estudo sobre a Secagem de Papel II: Influência da Temperatura e da Umidade Inicial. Anais do XXIII COBRASP, v.1, Ed. DEQ/CTC-UEM, Maringá, BR 1996a. In: MOTTA LIMA, O.C. (1999).

MOTTA LIMA, O. C. Estudo sobre a Secagem de Folhas de Celulose. Tese de Doutorado, PEQ/UEM, Maringá, PR, Brasil, 1999.

NEGRI, M. L. S. Secagem das folhas de espinheira-santa-Maytenus ilicifolia Mart. Ex Reiss. Sob diferentes temperaturas e influência nos teores de polifenóis, na atividade antioxidante e nos aspectos microbiológicos. Mestrado (Dissertação em Ciências Farmacêuticas) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

OĞULATA, T. R. Utilization of waste-heat recovery in textile drying. Applied Energy 79 (2004) 41-49.

ÖZDİL, N., ÖZÇELİK, G., SÜPÜREN, G. e PRŮCHOVÁ, J. A study on the moisture transport properties of the cotton knitted fabrics in single jersey structure. TEKSTİL ve KONFEKSIYON, 2009.

POUROVÁ, M. e VRBA, J. Analytical Solutions to the Applicators for Microwave Textile Drying by Means of Zigzag Method. PIERS- Progress In Electromagnetics Research Symposium. p. 27-30, 2007.

QUINIOU, S., LESAGE, F., VENTENAT, V. e LATIFI, A. M. Heat and mass transfer investigation in fabrics: modeling and experimentation. Excerpt from th Proceedings of the COMSOL Users Conference, 2006.

SÁ, M. A. M. M., Aplicação de β -Ciclodextrinas no tingimento de materiais têxteis. Mestrado (Mestrado em Química Têxtil) Universidade do Minho, 2008.

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

SILVA, P. W., SILVA, S. P. D. C. e LIMA, B. G. A. Incerteza na determinação do teor de água de equilíbrio de produtos agrícolas. *Revista agrícola de Produtos Agroindustriais*. v. 7, n.2, p. 159-164, 2005.

SIROKA, B. NOISTERNIG, M., GRISSER, J. U. e BECHTOLD, T. Characterization of cellulosic fibers na fabrics by sorptio/desorption. *Science Direct*. n. 343, p. 2194-2199, 2008.

SOUSA, D. C. H. E. Estudo da secagem de materiais têxteis. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2003.

SOUSA, D. C. H. L., PEREIRA, C. N. e MENDES, MOTTA LIMA, C. O. e FONSECA, V. E. Equilibrium moisture isotherms of textile materials. *Acta Scientiarum*. v. 23, n.6, p. 1363-1368, 2001.

Texima S.A. Disponível em: <http://www.texima.com.br>. Acesso em: 5 jan. 2010.

VIGNESWARAN, C e CHANDRASEKARAN, K. Effect of Thermal Conductivity Behavior of Jute/Cotton Blended Knitted Fabrics. *Journal of Industrial Textiles*. v. 38, n.4, 2009.

WANG, F., ZHOU, X. e WANG, S. Development Processes and Property Measurements of Moisture Absorption and Quick Dry Fabrics. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*. v. 17, n. 2 (73), p. 46-49, 2009.

YADAV, V. e MOON, G. C. fabric-drying process in domestic dryers. *Science Direct. Applied Energy*. n. 85, p. 143-158, 2008.

YANG, K., JIAO, L. M., CHEN, Y., Li, J. e ZHANG, W. Analysis and Prediction of the Dynamic Heat-Moisture Comfort Property of Fabrics. *Fibres & Textiles in Eastem Europe*. v. 16, n. 3, 2008.

ZHONGXUAN, L., FENGZHI, L., YINGXI, L. e Yi, L. Effect of the environmental atmosphere on heat, water and gas transfer within hygroscopic fabrics. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 163 (2004) 199-210.

ANEXOS

Anexo 1 - Calibração dos sensores de temperatura

Calibração dos termopares e do LM35 DZ

Para a aferição dos sensores térmicos tipo termopares foi usado o método absoluto, onde o mesmo é imerso em um meio onde a temperatura é conhecida através de um fenômeno físico. Para este trabalho foi utilizado um forno de calibração com as seguintes especificações:

- **Faixa de Operação:**

- Módulo de aquecimento de baixa temperatura (BT): 50°C abaixo da temperatura ambiente a 140°C.

- Módulo de aquecimento de alta temperatura (AT): 150°C a 1200°C.

- **Estabilidade absoluta:**

- Módulo de aquecimento de baixa temperatura (BT): ambiente a 50°C abaixo da temperatura ambiente – 15 minutos e ambiente a 140°C – 15 minutos.

- Módulo de aquecimento de alta temperatura (AT): ambiente a 1200°C – 60 minutos.

- **Tempo de estabilização:**

- Módulo de aquecimento de baixa temperatura (BT): 15 minutos.

- Módulo de aquecimento de alta temperatura (AT): 40 minutos.

O forno de calibração possui dois módulos independentes, podendo estes trabalhar de forma simultânea. É um forno tipo bloco seco para calibração de sensores de temperatura na faixa de 50°C a 1200°C. Os insertos que são fornecidos juntamente com o forno, permitem a colocação do sensor padrão e a calibração pode ser feita por comparação de sensores de temperatura.

O meio de calibração é confiável devido a uma temperatura homogênea e estável. Controladores de alta exatidão finamente ajustado permitem a fácil mudança para a temperatura requerida. Com o ajuste do set point através das teclas seta para cima e seta para baixo.

A figura A1.1 apresenta o forno de calibração e o Data Logger.

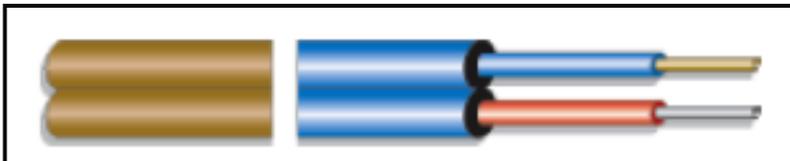


Figura A1.1 – Forno de calibração

Os tipos de termopares escolhidos foram de acordo com as faixas de temperaturas usadas no experimento. Os termopares selecionados foram os seguintes:

Tipo T – Termopares de Cobre Constantan

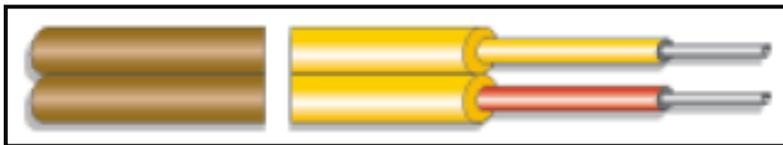
Azul (+) e Vermelho (-)



- Composição: Cobre (+) / Cobre-Níquel (-)
- Faixa de trabalho: -200°C a 350°C
- Identificação da polaridade: Cobre (+) é avermelhado e o Cobre-Níquel (-)

Tipo K – Termopares de Cromel Alumel

Amarelo (+) e Vermelho (-)



- Composição: Níquel-Cromo (+) / Níquel-Alumínio (-)
- Faixa de trabalho: até 1200°C
- Identificação da polaridade: Níquel-cromo (+) não atrai ímã e o Níquel-Alumínio (-) levemente magnético.

Os sensores de temperatura LM35DZ não necessitam de calibração de externa, mas por medida de segurança foram feitas as calibrações. A configuração deste LM35DZ está numa faixa de temperatura de + 2 °C até 150 °C.

Os passos para a aferição dos termopares presentes no tecido e do LM35DZ dentro da estufa são os seguintes:

1. Colocam-se os dados em um gráfico de dispersão para realizar o ajuste da curva no Excel, gerando-se a curva de correção da temperatura, a tabela 1 mostra alguns dados coletados para o termopar T1. Para o LM35DZ os dados coletados foram as tensões, onde as mesmas foram colocados em uma tabela no Excel, gerando-se uma equação que relaciona a tensão e temperatura. Com esta equação foi possível determinar a temperatura correspondente para cada tensão coletada.

Tabela 1. Valores de temperatura de referência e valores de temperatura medidos para o termopar T1. (Fonte: O autor)

T1	T_{padrão}
44,8	45
49,9	50
59,8	60
69,7	70
79,9	80
84,8	85

Tabela 2. Valores de temperatura de referência e valores de temperatura medidos para o termopar LM35DZ. (Fonte: O autor)

LM35DZ	T_{padrão}
40,0	40,0
40,1	40,0
45,0	45,1
45,0	45,0
50,1	50,0
50,1	50,0
55,1	55,1
55,1	55,0
55,1	55,0
60,1	60,1
60,1	60,0
60,1	60,1
65,1	65,0
65,1	65,1
65,1	65,1
70,1	70,1
70,0	70,0
70,1	70,1
75,1	75,1
75,1	75,1
75,1	75,1
80,0	80,0
80,0	80,0
85,0	85,0
85,1	85,1
90,0	90,0

2. Os valores medidos pelos termopares e pelos LM35DZ são inseridos no eixo horizontal e os valores medidos pelo forno de calibração no eixo vertical. Esta série de pontos permite a construção da curva, como é mostrado na figura A1.2 e A1.3. Para a validação do ajuste da curva é necessário do coeficiente de correlação (r), quanto mais perto da unidade é melhor. Como pode ser observado na figura A1.2 e A1.3, o valor do coeficiente de correlação é praticamente para o ajuste linear determinado para o termopar T1.

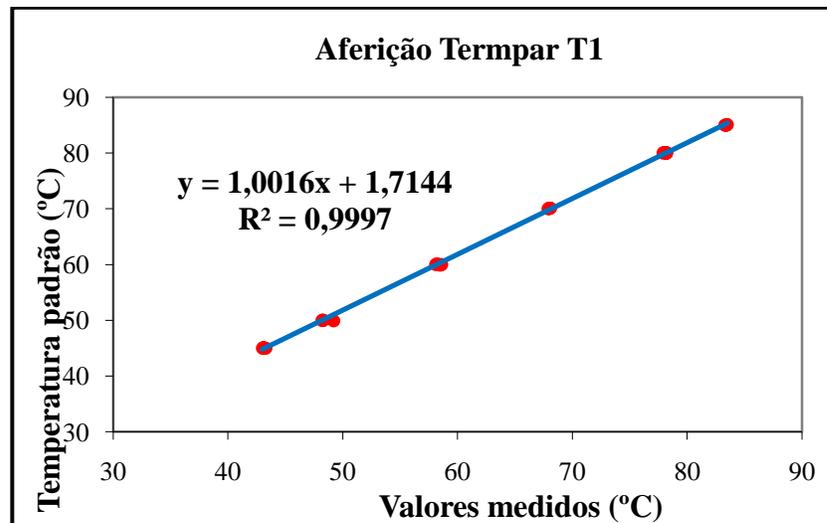


Figura A1.2 - Curva de ajuste para a obtenção do valor real de temperatura – Termopar – T1. (Fonte: O autor)

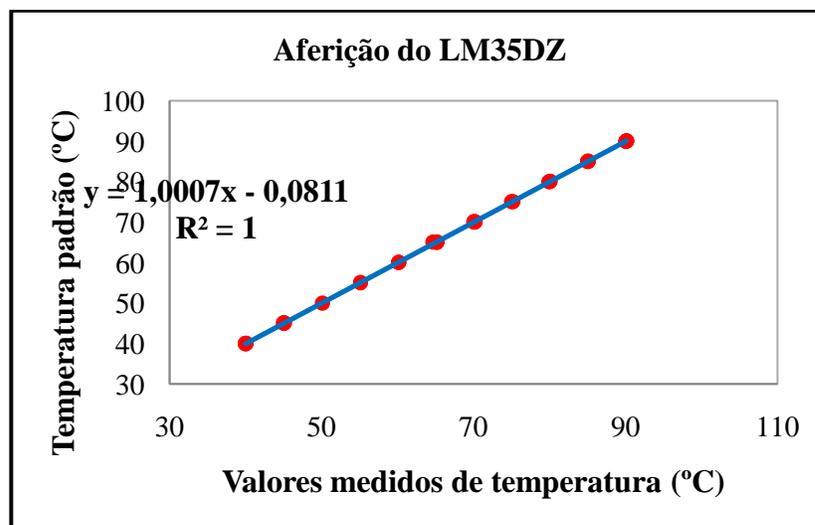


Figura A1.3 - Curva de ajuste para a obtenção do valor real de temperatura – LM35DZ. (Fonte: O autor)

3. Finalmente as equações determinadas no ajuste, são inseridas em uma planilha para a correção dos valores de temperatura, ou seja, os valores coletados serão introduzidos nestas equações para substituí-los pelos valores reais de temperatura. Este processo é realizado para os outros termopares do sistema e para os outros sensores LM35DZ.

Anexo 2 - Análise de Erros e incertezas.

Para validação dos resultados de todo trabalho experimental é necessário um estudo do erro. Este erro é a diferença entre um valor observado ao se medir uma grandeza e o valor real ou correto da mesma. Os erros são divididos em dois grupos; fixos ou sistemáticos e aleatórios.

Os erros fixos ou sistemáticos são causados por fontes que podem ser identificadas, e em princípio podem ser eliminados ou compensados. Com estes erros as medidas executadas ficam consistentemente acima ou abaixo do valor real, prejudicando a exatidão das medidas. Estes erros podem ser devidos vários fatores, tais como:

1. Instrumento que foi utilizado, como exemplo, intervalos de tempo medidos com um aparelho que atrasa;
2. Método de observação utilizado;
3. Efeitos ambientais;
4. Simplificações do modelo teórico utilizado.

Os erros aleatórios são erros devidos a causas diversas, como a causas temporais que variam durante observações sucessivas. Estes erros estão relacionados com a repetitividade do instrumento. Os erros podem ser abordados, quantitativamente, mediante o uso de ferramentas do tipo estatístico, de forma a determinar sua grandeza e propagação em cálculos.

Para a determinação dos erros aleatórios encontrados nos ensaios é necessário aplicar métodos estatísticos para a determinação das grandezas que possam afeitar os resultados obtidos. Para começar a metodologia estatística, usa-se a média aritmética dos valores medidos nos ensaios, segundo a seguinte equação:

–

(Eq. A1)

Seguidamente pode determinar-se a incerteza a partir da media aritmética usando o desvio padrão da seguinte forma:

$$\text{---} \quad \text{(Eq. A2)}$$

Uma maneira de representar graficamente os resultados das medições usando os parâmetros estatísticos é o diagrama de Gauss, ou de distribuição normal. O desvio padrão estabelece uma probabilidade de 68% de que a medida esteja num intervalo (+/-) em torno da medida, portanto para uma probabilidade maior deve ser aumentada a faixa de incerteza, segundo apresentado na tabela 3.

Tabela 3. Valores de probabilidade da distribuição Normal. (fonte: Aulas Prof. Jorge)

Incerteza	Probabilidade (Z) (%)
0,647 σ	50
σ	68,67
1,645 σ	90,00
2 σ	95,45
2,576 σ	99,00
3 σ	99,73

Então o erro estimativo pode ser calculado em função da probabilidade e o erro padrão da seguinte maneira.

$$\text{=} \quad \text{(Eq. A3)}$$

Finalmente pode ser determinado o valor real da grandeza medida e sua incerteza mediante a seguinte equação.

$$\text{(Eq. A4)}$$

Para o caso onde o método estatístico não possa ser usado, devido a que a grandeza obtida não possui vários valores medidos, portanto se usa duas formas para poder mesurar a grandeza.

A incerteza é o erro inerente ao processo de medida, isto é, nunca será completamente eliminado. O erro poderá ser minimizado, procurando-se eliminar o máximo possível as fontes de erro. Ao realizar medidas é necessário avaliar quantitativamente as incertezas nas medições.

Incerteza de resolução, quando a grandeza física medida for estável ou varie muito lentamente com o tempo, estimando-se o erro mediante a resolução do instrumento da seguinte forma, a incerteza será calculada como a metade da menor divisão da escala.

Incerteza Relativa, esta forma pode-se representar a grandeza mediante a razão entre a incerteza absoluta e o valor da medida realizada, da seguinte forma.

$$\text{-----} \tag{Eq. A5}$$

No caso onde as grandezas medidas sejam variáveis dependentes para o cálculo de outras grandezas físicas a partir de modelos é necessário propagar os erros, ou seja, propagar o erro de cada variável ao resultado final da grandeza desejada, na forma de incerteza relativa ou incerteza absoluta:

$$\tag{Eq. A6}$$

$$\text{-----} \tag{Eq. A7}$$

$$\text{-----} \tag{Eq. A8}$$