

Eduardo de Britto Perez

**Otimização do processo de secagem
na manufatura de fitas adesivas**

Dissertação de Mestrado

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

RIO DE JANEIRO

Março de 2004



Eduardo de Britto Perez

**Otimização do processo de secagem
na manufatura de fitas adesivas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio da Silveira Carvalho

Rio de Janeiro
Março de 2004



Eduardo de Britto Perez

Otimização do processo de secagem na manufatura de fitas adesivas

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Marcelo Catanoce Gandur

3M do Brasil Ltda

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de março de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Eduardo de Britto Perez

Graduou-se em Engenharia de Produção Mecânica na Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos, em 1995. Trabalha na 3M do Brasil Ltda desde 1996, atuando como Engenheiro de Processos nas áreas de revestimento, polimerização, secagem e corte de fitas adesivas diversas.

Ficha Catalográfica

Perez, Eduardo de Britto

Otimização do processo de secagem na manufatura de fitas adesivas / Eduardo de Britto Perez; orientador: Márcio da Silveira Carvalho. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

177 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Secagem. 3. Soluções poliméricas. 4. Substratos impermeáveis. 5. Simulação numérica. 6. Otimização. I. Carvalho, Márcio da Silveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para minha esposa, Simoni, pelo
apoio e confiança de todas as horas.

Agradecimentos

A Deus.

Ao meu orientador, Professor Márcio da Silveira Carvalho, pelo apoio e parceria na realização deste trabalho.

A CAPES e PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À 3M do Brasil, pela oportunidade de desenvolver este trabalho e aumentar minha contribuição.

A Francisco Martins Neto, que conseguiu viabilizar a realização deste trabalho abrindo um precedente para novos projetos de parceria entre a 3M do Brasil e a PUC-Rio.

A Newton Albuquerque e Gláucio Magnusson, por acreditarem nos benefícios deste projeto e manterem sua continuidade.

À minha querida esposa, Simoni, pelo carinho, compreensão e apoiou de todas as horas.

Aos meus pais, Sr. João e D. Nadir, pela educação e incentivo na minha juventude.

Aos professores que participaram da banca examinadora.

Aos meus irmãos, amigos e familiares que contribuíram e que de alguma forma me incentivaram.

Resumo

Perez, Eduardo de Britto; Carvalho, Márcio da Silveira. **Otimização do processo de secagem na manufatura de fitas adesivas**. Rio de Janeiro, 2004. 177p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O processo de manufatura de fitas adesivas geralmente envolve uma etapa de retirada dos solventes presentes na solução revestida e formação de uma camada de material semi-sólido sobre um substrato apropriado.

Devido a alta espessura de adesivo requerida no produto final e a alta concentração de solventes característica da solução revestida, a secagem se torna, muitas vezes, o gargalo do processo produtivo. Ganhos de produtividade em linhas que podem produzir centenas de milhares de metros quadrados de fita adesiva por mês são importantes para viabilizar incrementos na oferta ou redução dos custos operacionais.

Esta dissertação apresenta a análise do processo de secagem de soluções poliméricas revestidas sobre substratos impermeáveis através do desenvolvimento de um modelo matemático para representar os fenômenos de transferência de calor e massa. Também propõe uma metodologia para atingir ganhos de produtividade utilizando um programa computacional especialmente desenvolvido para simulação do processo de secagem.

A utilidade da metodologia e da simulação é demonstrada por um estudo de caso realizado na manufatura de fitas adesivas da 3M do Brasil.

Palavras-chave

Secagem; adesivos; soluções poliméricas; substratos impermeáveis; simulação numérica; otimização.

Abstract

Perez, Eduardo de Britto; Carvalho, Márcio da Silveira. **Optimization of drying process in the manufacturing of adhesive tapes.** Rio de Janeiro, 2004. 177p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the manufacturing process of adhesive tapes usually there is a step where the solvents of solution are evaporated in order to allow the formation of a semi-solid layer of material over a suitable substrate.

As the final product requires high coating weight and solvent concentration on adhesive solution is high as well, the drying becomes, most of the time, the constraint of the overall process. Productivity increase on machines that can produce hundred of thousands of square meters of adhesive tapes per month can represent additional sale volumes or possibility to reduce operating costs.

This dissertation presents the analysis of drying process of polymeric solutions coated over impermeable substrates through the development of a mathematical model to represent the heat and mass transfer. It also proposes a methodology to achieve productivity increases using a computer code specially developed to simulate the drying process.

The power of this methodology and of the computer-aided simulation is showed by a case study in the manufacturing department of adhesive tapes at 3M Brazil.

Keywords

Drying process; adhesives; polymer solution; impermeable substrates; computer-aided simulation; optimization.

Sumário

1. Introdução	11
1.1. O processo de revestimento	13
2. Fundamentos do processo de secagem	18
2.1. Modelo	20
2.1.1. Transferência de massa da fase líquida para a fase gasosa	21
2.1.1.1. Condições de contorno para a equação da conservação das espécies químicas	26
2.1.2. Equilíbrio de fases	28
2.1.3. Atividade dos componentes em uma solução	31
2.1.4. Temperatura de formação de bolhas	33
2.1.5. Transferência de calor	34
2.1.6. Analogia entre coeficientes de transferência de calor e massa	35
2.1.7. Coeficientes de difusão	36
2.1.8. Difusão viscosa, elástica e viscoelástica	40
2.1.9. Sistema completo de equações do modelo de secagem	43
2.2. Método de solução	44
3. Ferramentas para análise do processo de secagem	50
3.1. Bancada de testes	51
3.1.1. Descrição da bancada de testes	53
3.1.2. Operação da bancada de testes	55
3.2. Simulador numérico	57
3.2.1. Gráficos fornecidos pelo simulador	58
3.2.2. Validação	63
3.3. Observação do processo	66
4. Otimização do processo de secagem	68
4.1. Metodologia para otimização do processo de secagem	69
4.2. Estudo de caso	71

Sumário (continuação)

5. Conclusão	80
6. Referências bibliográficas	82
7. Apêndice	85
7.1. Estrutura de dados	85
7.2. Código <i>Fortran</i>	91

Lista de figuras

Figura 1 – Método de cobrimento com vazão pré-fixada	14
Figura 2 – Método de cobrimento com vazão pós-fixada	14
Figura 3 – Estufa de secagem com fluxo paralelo	15
Figura 4 – Estufa de secagem tipo <i>impingement jets</i>	15
Figura 5 – Estufa de secagem tipo <i>air flotation</i>	16
Figura 6 – Gráfico típico do processo de secagem	19
Figura 7 – Esquema de secagem da camada de líquido sobre substrato	20
Figura 8 – Esquema do balanço de massa na interface líquido-vapor	26
Figura 9 – Esquema do sistema constituído por 2 fases em equilíbrio	28
Figura 10 – Esquema da bancada de teste	52
Figura 11 – Bancada de teste para simulação do processo de secagem	52
Figura 12 – Vista interna da balança	53
Figura 13 – Gráfico do peso de solvente	56
Figura 14 – Gráfico da temperatura da solução	57
Figura 15 – Gráfico de solvente residual	59
Figura 16 – Gráfico da temperatura de formação de bolhas	60
Figura 17 – Gráfico da concentração de solvente	61
Figura 18 – Gráfico do gradiente de concentração	62
Figura 19 – Gráfico da espessura do revestimento	63
Figura 20 – Gráfico de solvente residual	65
Figura 21 – Gráfico da espessura do revestimento	65
Figura 22 – Gráfico de temperatura do revestimento	66
Figura 23 – Gráfico do perfil de temperatura da estufa	73
Figura 24 – Determinação do coeficiente de transferência de calor	74
Figura 25 – Gráfico de solvente residual	75
Figura 26 – Gráfico de solvente residual	76
Figura 27 – Gráfico da temperatura de formação de bolhas	77
Figura 28 – Gráfico de solvente residual	78
Figura 29 – Gráfico da temperatura de formação de bolhas	79