

Influência das Condições Ambientais Sobre a Umidade e Temperatura em Bobinas de Cartão.

R. C. F. do Nascimento¹, C. C. Bueno¹, I. Neitzel^{1*}

¹ Faculdade de Telêmaco Borba – FATEB, Telêmaco Borba, Paraná, Brasil.

* Autor para correspondência: Faculdade de Telêmaco Borba – FATEB, Av. Mal. Floriano Peixoto, 1181, 84266-010 Telêmaco Borba, Paraná, Brasil, ivo.neitzel@fatebtb.edu.br

Resumo: Este trabalho analisa a transferência simultânea de calor e massa, em regime transiente, em bobinas de cartão guardadas em estoque. O modelo, na forma de equações diferenciais parciais, considera também a termodifusão (efeito Soret). Considerou-se que as propriedades de transporte e as demais propriedades físicas dos meios envolvidos dependem da temperatura e da concentração. O modelo não linear obtido foi resolvido numericamente usando geometria cilíndrica, simetria radial, bobina infinita e o *software* COMSOL Multiphysics®. Este modelo foi usado para analisar o comportamento da temperatura e da umidade do cartão durante o período de estocagem em um depósito para investigação da espessura da área influenciada pelo comportamento cíclico da temperatura do meio ambiente.

Keywords: Transferência de calor, transferência de massa, cartão, celulose.

1. Introdução

1.1 Considerações Gerais

O papel é uma matriz porosa, anisotrópica e estocástica de fibras de celulose [Yamauchi, 2002], [Harding, 2001].

A movimentação de líquidos no papel, em baixas concentrações (usualmente água), tem suficiente importância técnica para ser analisada quantitativamente. Esta movimentação pode ser descrita com escoamento capilar, mecanismos difusivos ou uma mistura de ambos juntamente com ponderações termodinâmicas [Foss, 2003], [Jain, 2004], [Bandyopadhyay, 2002], [Chatterjee, 2008]. A descrição da penetração e movimentação de água na forma líquida em papéis *densos* é feita predominantemente por mecanismos difusivos [Lyne, 2002].

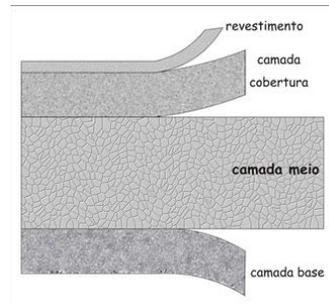


Figura 1: Cartão multicamadas.

O cartão é um material *grosso* feito à base de papel. Segundo a padronização ISO, é um *papel* com peso superior a 224 g/m² (gramatura), todavia outras classificações também são usadas [Pesch, 2012]. Frequentemente é composto por múltiplas camadas de papéis mais finos, onde cada camada tem um objetivo específico. As camadas externas podem receber coberturas não celulósicas para agregar propriedades especiais ao cartão.

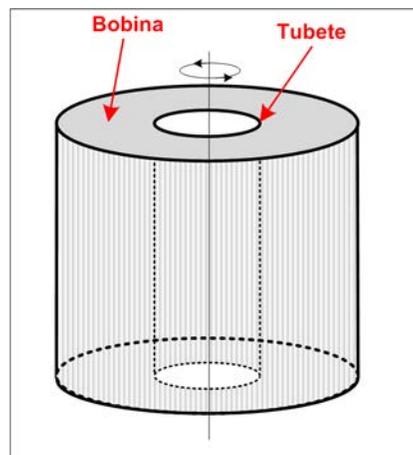


Figura 2: Vista esquemática de uma bobina.

Depois de confeccionado é usualmente armazenado na forma de uma bobina cilíndrica, com dimensões típicas de 1,50 m para diâmetro e 1 m para largura com peso na ordem de grandeza de 4 toneladas. Tipicamente a bobina está a temperaturas na ordem de 70°C e umidades

abaixo de 10% e pode ser envolvida por uma bolsa de papel de baixa permeabilidade à água para protegê-la das condições atmosféricas e ambientais durante a estocagem. As bobinas ocasionalmente ficam estocadas em armazéns por prazos até 150 dias.

O modelo utilizado é uma versão simplificada [Nascimento, 2006] para analisar o comportamento dos perfis de temperatura e umidade e sua penetração em bobinas de papel submetidas a longos períodos de armazenagem. O modelo considera a transferência simultânea de calor e massa com o efeito Soret (α), mas sem o efeito Latour (β). O sistema é fechado em relação à umidade e aberto em relação à energia. As propriedades térmicas são dependentes da umidade e temperatura; o coeficiente de difusão é dependente da temperatura. A temperatura do ar internamente ao tubete foi analisada utilizando CFD (COMSOL Multiphysics) [Bueno, 2012] e analiticamente [Nascimento, 2006]. Para análise de comportamento típico foi considerada como síncrona com a temperatura ambiente, mas, fortemente atenuada.

1.2 O Processo de Fabricação de Papel

A descrição detalhada do processo de fabricação de papel e celulose pode ser encontrada em literatura, [Andrioni, 2006].

A descrição breve, aqui, aborda simplificada as etapas finais do processo envolvendo a máquina de papel, a secaria, a enroladeira e a cortadeira.



Figura 3: A bobina jumbo é cortada em bobinas menores.

O objetivo da máquina de papel é produzir o cartão que sai em forma de bobinas com largura e diâmetro especificados pelo cliente.

Na fase de secagem (secaria) uma fonte de calor promove a remoção da água presente na folha. Com isto a folha sofre um aquecimento onde a temperatura pode chegar a 90°C na sua superfície. Após secagem final o cartão está pronto e é enrolado em rolos jumbo (40000 kg).

O corte da bobina consiste em converter o rolo jumbo em bobinas menores (4000 kg) de acordo com a especificação do cliente. As bobinas são embaladas e seguem para estoque, que é um depósito coberto, empilhadas e dispostas em colunas.



Figura 4: A estocagem das bobinas.

O fato de alguns desses cartões exigirem boa qualidade de impressão (pois usualmente são armazenados diretamente em prateleiras ou gôndolas de supermercados ficando diretamente em exposição) faz com que a maioria passe por processos de revestimento com pigmento. Assim, o lado recoberto, pode ser revestido duas ou três vezes.

1.3 Caracterização e Descrição dos Problemas Atribuídos à Temperatura e Umidade do Cartão.

Ao sair da máquina, o rolo jumbo é enviado à rebobinadeira com objetivo de cortá-lo em bobinas menores de acordo com especificação do cliente. O cliente define as propriedades do cartão que deve ser produzido. A umidade da folha é produzida dentro de uma faixa de especificação. A temperatura na folha é resultado do processo de secagem.

A bobina pronta é enviada para estoque, aguardando ordem de embarque. No estoque as

bobinas são guardadas em pilhas. Pode-se ter entre 5 e 8 bobinas em uma pilha. As bobinas são estocadas em depósito coberto, mas sem condicionamento. Portas largas permitem livre circulação de ar externo. O depósito está sujeito às variações de temperatura ambiente, vento, calor, frio e oscilações de temperatura e umidade relativa ao longo do dia. Nestas condições de estocagem, as bobinas da base (em contato com o chão) e do topo, esfriam mais rapidamente, pois tem maior área de contato com o ambiente para troca térmica.

1.3.1 Problemas Envolvendo o Revestimento do cartão.

Os cartões revestidos têm a finalidade de melhorar a qualidade de impressão, buscando apelo visual em embalagens de produtos diversos. O revestimento “couche” consiste em cobrir o cartão com uma composição de pigmento mineral, látex e aditivos.

O látex presente no revestimento, por ser termoplástico, sofre deformação se for mantido a temperatura alta por muito tempo, [Heikkila, 1992]. Esta temperatura alta é verificada nas bobinas em estoque, que pode se manter superior a 60 °C em seu interior por vários dias. Esta temperatura é suficiente para causar reações de adesão do filme de látex com a face oposta do cartão em contato. Este efeito é conhecido por “blocking”.



Figura 5: Ruptura da parede fibrosa.

1.3.2 Problemas Envolvendo a variação de Umidade do Cartão.

Vários problemas de conversão de cartão em uma embalagem resultam da variação de umidade. Um em particular que afeta a

integridade da embalagem final são trincas que ocorrem em vincos e dobras. Quando o cartão está mais seco ocorre o rompimento da estrutura fibrosa, comprometendo o aspecto visual final ou até mesmo a integridade, para o caso de embalagens para alimentos líquidos. A variação de umidade do cartão em uma mesma bobina também causa variação dimensional da folha.

2. O modelo e sua implementação

2.1 Considerações Gerais

A descrição mais apropriada para uma bobina de cartão é um conjunto de cascas cilíndricas concêntricas, com superfície rugosa, e que, apesar de fortemente compactadas mantém uma fina camada de ar aprisionada entre as cascas. Há evidências experimentais para a existência desta camada de ar. Cada casca cilíndrica é constituída pelo cartão que é tecnicamente composto por três camadas de papel com estrutura e propriedades distintas. A interface entre estas camadas é observável por microscopia e tem o comportamento de uma barreira hidráulica. É notório que a bobina tem comportamento anisotrópico.

No presente caso foi proposto usar um modelo simplificado para uma bobina de cartão considerando-a um material homogêneo, simétrico, com propriedades contínuas. O modelo considera a transferência simultânea de calor e massa (umidade), em um sistema cilíndrico de comprimento infinito, oco internamente (tubete) e impermeável em relação à água nas superfícies interna e externa. Esta impermeabilidade é obtida internamente por selagem da superfície interna (o tubete é construído padronizadamente com material de baixa permeabilidade à água) e externamente por uma proteção contra intempéries para atender necessidades decorrentes do transporte do material. A troca de calor com o ambiente ocorre nas superfícies interna e externa. O tubete pode ser considerado um cilindro oco com diâmetro típico de 0,15 m. Este cilindro é fechado nas extremidades. A superfície externa tem diâmetro típico de 1,5 m. O comprimento do cilindro da bobina é considerado infinito em decorrência do procedimento de armazenamento. Desta forma considerou-se relevante a transferência de calor e massa apenas no componente radial.

Foi observada, durante o tempo em que as bobinas ficam estocadas aguardando o uso, a existência de bolsões de umidade migratórios não compatíveis com o perfil de umidade medido em linha durante a produção do cartão. Como a bobina está selada nas superfícies externa e interna, considerou-se que este perfil de umidade não estacionário é decorrente do gradiente de temperatura oriundo do esfriamento e do gradiente de temperatura oriundo do ambiente externo (cíclico). Desta forma o fluxo de massa (Γ_C) considerou como força motriz os gradientes de massa e temperatura – efeito Soret. Para o fluxo de energia (Γ_T) admitiu-se que o gradiente de massa e a energia envolvida com a transferência de massa são significativamente muito menores do que a energia envolvida com a transferência condutiva e a troca de calor com o ambiente, de modo que o efeito Dufour foi desconsiderado.

O calor específico (\hat{C}_p), condutividade térmica (k) e coeficiente de difusão (D_A) foram considerados dependentes da temperatura e/ou umidade. Para a troca de calor foi considerada a convecção mista ($h_{externo}$, $h_{interno}$) e natural com movimentação forçada de baixa velocidade. A umidade média típica do cartão foi considerada como sendo 7 % em base seca. A temperatura inicial do cartão, valor típico, foi considerada sendo 70 °C. A temperatura ambiente foi considerada cíclica, tomando como base dados obtidos na estação meteorológica. A partir destas informações para o intervalo de tempo em que foi realizada a simulação, a temperatura ambiente foi descrita por um componente cíclico de muito baixa frequência (A_{Drift}) (com período de 18 dias) e um componente de média frequência (A_{24h}) (período de 24 horas).

Com estas considerações os balanços de massa e energia fornecem as equações:

Para o balanço de energia:

$$\frac{\partial(\rho \cdot \hat{C}_p \cdot T)}{\partial t} = -\nabla \cdot \Gamma_T$$

Onde o fluxo de energia é descrito por:

$$\Gamma_T = -k \cdot \nabla T - \beta \cdot \nabla C$$

$$\|\nabla C\| \ll \|\nabla T\| \rightarrow \beta = 0$$

Para o balanço de massa:

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} = \nabla \cdot \Gamma_C$$

Onde o fluxo de massa é descrito por:

$$\Gamma_C = -D_{Aeff} \cdot \nabla C - \alpha \cdot \nabla T$$

O sistema é aberto em relação à energia, produzindo as condições de contorno:

$$n \cdot \Gamma_T \Big|_{r=R_{externo}} = h_{externo} \cdot (T(t, R_{externo}) - T_{externo})$$

$$n \cdot \Gamma_T \Big|_{r=R_{interno}} = h_{interno} \cdot (T(t, R_{interno}) - T_{interno})$$

O sistema é fechado em relação à massa, produzindo as seguintes condições de contorno:

$$n \cdot \Gamma_C \Big|_{r=R_{externo}} = 0$$

$$n \cdot \Gamma_C \Big|_{r=R_{interno}} = 0$$

A temperatura do ar externo ($T_{externo}$) é descrita pela equação:

$$T_{externo}(t) = T_{0,externo} + A_{Drift}^{externo} \cdot \sin(\omega_{Drift} t) + A_{24h}^{externo} \cdot \sin(\omega_{24h} t)$$

A análise da resposta de frequência [Nascimento, 2006] do comportamento interno ao tubete, considerando que ele está fechado nas extremidades, leva ao seguinte resultado:

$$T_{interno}(t) = T_{0,interno} + A_{Drift}^{interno} \cdot \sin(\omega_{Drift} t - \varphi_{Drift}) + A_{24h}^{interno} \cdot \sin(\omega_{24h} t - \varphi_{24h})$$

A amplitude internamente ao tubete pode ser descrita por:

$$A_{Drift}^{interno} = RA(\omega_{Drift}) \cdot A_{Drift}^{externo}$$

$$A_{24h}^{interno} = RA(\omega_{24h}) \cdot A_{24h}^{externo}$$

A razão de amplitude para as frequências envolvidas fica no intervalo:

$$RA(\omega_{Drift}) \in (0.002 \dots 0.03)$$

$$RA(\omega_{24h}) \in (0.002 \dots 0.03)$$

O atraso de fase é muito pequeno e pode ser desconsiderado:

$$\varphi_{Drift} \approx 0$$

$$\varphi_{24h} \approx 0$$

Estes resultados indicam que para um valor típico de $A_{24h}^{externo} \approx 10^\circ\text{C}$ a flutuação da temperatura interna do tubete em decorrência das flutuações externas pode ser desconsiderada, isto é, $A_{24h}^{interno} \approx 0$ e $A_{Drift}^{interno} \approx 0$. Estes resultados foram corroborados por simulação [Bueno & Neitzel, 2012].

2.2 Propriedades Físicas e de Transporte

2.2.1 Coeficientes de convecção ar-bobina

Muitos trabalhos descrevem o processo de resfriamento de objetos de diferentes formas geométricas, expostos a um ambiente de convecção natural e forçada, veja, por exemplo, [Tokonai, 1997]. Todos têm em comum a equação clássica:

$$Nu = a \cdot Pr^m \cdot Gr^n$$

Os coeficientes a , m e n são determinados experimentalmente para cada situação e condição. O coeficiente a engloba a geometria do problema. No caso de cilindros e placas verticais, [Earle, 1983], [Ferreira, 2004], [Resende, 2002], [Somerton, 1992], são usuais as equações:

$$Nu = 0.59 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0.25}$$

Para $10^4 < Pr \cdot Gr < 10^9$

$$Nu = 0.10 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0.33}$$

Para $10^9 < Pr \cdot Gr < 10^{12}$

Nicolau [Nicolau, 2001] determinou experimentalmente o perfil de h para convecção

natural em função da altura em uma parede plana vertical. Seu trabalho mostra que o coeficiente de convecção apresenta um alto valor nos primeiros centímetros na base de uma placa vertical aquecida e exposta à troca térmica com o ambiente. Isto ocorre porque o ar sempre mais frio e denso estará ao pé da placa. Após uma altura crítica, o coeficiente de convecção permanece constante ao longo de toda parede. Esta altura varia para cada situação, mas como regra geral, para temperaturas moderadas na parede ($< 100^\circ\text{C}$), é de poucos centímetros. Esta é a condição que se tem para o caso de bobinas armazenadas.

2.2.2 Capacidade Calorífica do Cartão

A capacidade calorífica do cartão foi medida com o equipamento Setaram 121DSC pela DOW Química Brasil S.A. O método empregado seguiu a padronização “ASTM E-1269-01 – Standard Test Method for Determining Specific heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry”. O fluxo de calor foi medido no sentido perpendicular à amostra que era composta por um conjunto de 10 folhas de cartão para 3 tipos diferentes com relação à composição fibrosa e presença ou não de revestimento.

$$\hat{C}_p = a_{\hat{C}_p, T} \cdot T + a_{\hat{C}_p, 0}, \text{ kJ}/(\text{°C kg})$$

2.2.2 Condutividade Térmica do Cartão

A condutividade térmica foi medida pelo Research and Development Center Dow Chemical – USA, procedimento “ASTM C518-04”. Os resultados medidos de condutividade térmica encontrados para a temperatura padrão de 23°C , 50% de umidade relativa (ar) e 7,5 % (base seca) de umidade no cartão foram, tipicamente:

$$k = a_{k, T} T + a_{k, 0} + b_{k, C3} C^3 / (b_{k, C0} + C^3), \text{ kW}/(\text{°C m}^2)$$

2.2.3 Coeficientes de difusão da água

O coeficiente de difusão da água nas fibras é significativamente diferente do coeficiente de difusão nos poros. Valores típicos, [Foss, 2003],

são $D_{H_2O-fibras} \approx 10^{-14}$ m/s e $D_{H_2O-poros} \approx 10^{-5}$ m/s. No modelo foi utilizado um coeficiente efetivo dependente da temperatura segundo a relação $D_{efetivo} = D_{A_0} \sqrt{T}$. O valor de D_{A_0} foi estimado a partir das observações experimentais.

2.3 Implementações do modelo no COMSOL Multiphysics

O modelo foi implementado no COMSOL/Multiphysics utilizando a interface para entrada de equações diferenciais parciais na forma geral *General Form PDE* (pois os fluxos dependem da temperatura e umidade), com geometria (a) unidimensional e axisimétrica, e, (b) bidimensional axisimétrica. A análise unidimensional foi utilizada para representar uma situação típica *não dependente do arranjo espacial de armazenamento* e foi a usada neste estudo. Foi utilizado o regime transiente.

Como o ar externo tem comportamento periódico (frequência circadiana) foi exigido do solver, em regime transiente, a preservação do teorema de amostragem de Shannon.

Adicionalmente foi imposta uma restrição para preservação do balanço de massa no interior da bobina.

3. Resultados Experimentais e Validação do Modelo

O modelo foi validado experimentalmente com bobinas de cartão de uma fábrica de LPB [Nascimento & Neitzel, 2006].

Com relação à temperatura, a simulação forneceu resultados próximos da medição real. O erro médio foi de 2,0 %, com alguns valores pontuais próximos de 8,0%. São erros de simulação pequenos considerando que os erros de medição estão próximos destes valores.

Erros admissíveis na medição de temperatura e dificuldades em registrar, a cada momento, as condições externas à bobina, tais como, umidade, temperatura, vento, movimentação não programada, etc., são fatores que fazem o resfriamento acelerar ou atrasar em um determinado intervalo de tempo. Essas condições externas, mesmo se medidas, seriam de difícil

inserção nas condições de simulação, principalmente para períodos longos de análise.

A análise dos resultados de umidade é agravada pelas dificuldades inerentes ao procedimento de medida. Mesmo assim foi constatado um erro médio de 2,6 %.

Parte das discrepâncias pode ser explicada pelo desconhecimento inicial da umidade *exata* do cartão, em condições padrão, enrolado em uma bobina.

Outro fator a considerar é o fato de que a difusão mássica é igualmente significativa nas três dimensões e o modelo foi considerado unidimensional. A difusão de massa também sofre o efeito da ação gravitacional, o que não foi considerado neste trabalho, por não ser significativo frente à migração provocada pelo efeito de capilaridade e a induzida pelo gradiente de temperatura.

Algumas variáveis do cartão, como densidade, capacidade calorífica e condutividade térmica, foram ajustadas para as condições de cartão enrolado em bobina. De fato, os valores destas propriedades medidos em laboratório são obtidos a partir de folhas soltas, ou no máximo com poucas folhas agrupadas. Não se consegue reproduzir a condição da folha enrolada em uma bobina, que está compactada e comprimida com menor quantidade de ar intrínseco.

O modelo, face à sua simplicidade, apresentou resultados excelentes. Os dados experimentais corroboraram a expectativa de que o perfil de temperatura não é significativamente influenciado pelo perfil de movimentação de umidade. Já no tocante à umidade, foi confirmado que a termodifusão (SORET) é essencial na descrição da movimentação da umidade.

As condições ambientais influenciam fortemente os perfis de umidade e temperatura da bobina nas proximidades das extremidades (raio externo e raio interno). Esta influência se faz sentir até uma penetração de aproximadamente 20% da espessura da bobina.

No lado interno as flutuações provocadas pelas variações ambientais são menores, pois são amortecidas pelo ar confinado nos tubetes.

4. Resultado das Simulações

O modelo apresentado, com as respectivas condições de contorno, foi simulado nas condições descritas.

O comportamento cíclico da temperatura juntamente com a umidade no interior da bobina degrada as propriedades mecânicas essenciais para resistência à vincagem e dobra do cartão. A perda da elasticidade ao longo do tempo de estocagem permite a ruptura das camadas externas do cartão (trinca) provocando a degradação e até perda do material acondicionado pela embalagem.

A região sob influência deste comportamento em uma bobina de cartão em decorrência das condições ambientais, para o modelo *linear*, foi investigada analiticamente por técnicas convencionais de resposta de frequência [Neitzel, 2009].

A investigação para o modelo *não linear* foi feita por simulação com o *software* COMSOL Multiphysics. Para identificar a região da bobina submetida a este comportamento cíclico a simulação foi realizada considerando que a temperatura externa oscila em torno de um valor médio típico.

Os resultados, indicando a faixa de variação de 1%, estão expostos nas figuras abaixo:

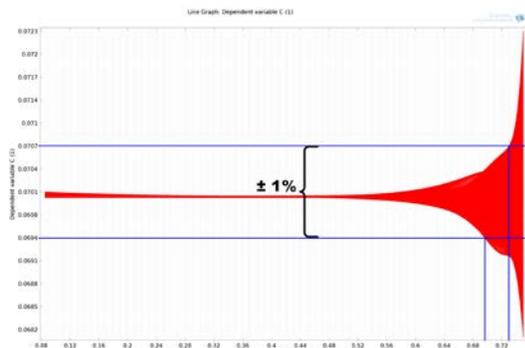


Figura 6: Variação do perfil de concentração.

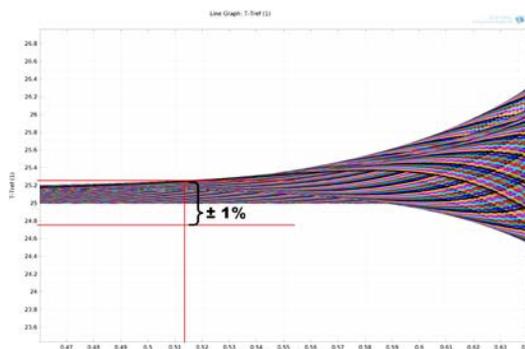


Figura 7: Variação do perfil de temperatura.

As figuras mostram que oscilações com amplitudes maiores do que 1% do valor médio nominal penetram, para a umidade 7,5% e para a temperatura 8,3% no raio da bobina. Considerando amplitudes de 0,5% do valor médio nominal a penetração aumenta para 12% para a umidade e 15,4% para a temperatura.

5. Conclusões

A quantidade de material (cartão) submetida ao comportamento cíclico é significativa, conforme constatado no item anterior, representando alguns quilômetros lineares de cartão. Este material tem potencializada a sua possibilidade de apresentar trincas quando da operação de vincagem e dobra nos convertedores, caso a bobina permaneça estocada por muito tempo. Este problema é observado empiricamente.

A análise deste fenômeno só é possível por simulação em decorrência da não linearidade e complexidade do modelo.

O estudo será continuado para incluir a dependência do envelhecimento do cartão em função do tempo exposto a estas oscilações de temperatura e umidade. Após esta etapa complementar pretende-se estimar o tempo máximo que a bobina pode ficar exposta a oscilações com amplitudes definidas sem degradar as propriedades elasto-mecânicas que provocam a perda de elasticidade do material a ponto de significativamente aumentar a incidência de trincas.

O *software* COMSOL MULTIPHYSICS é uma ferramenta essencial para esta análise pois, além de ser um ambiente integrado para o desenvolvimento destas simulações, permite facilmente acoplar diferentes fenomenologias descritas por diferentes técnicas de modelagem de forma a obter resultados de importância industrial.

6. Referências

T. Yamauchi, K. Murakami, Porosity and gas permeability, chapter 6 in: Habeger Jr., Charles C. et al; *Handbook of Physical Testing of Paper*, Volume 2, 2nd edition, 2002, Marcel Dekker, ISBN 0-8247-0499-1.

- M. B. Lyne, Wetting and the penetration of liquids into paper, chapter 7 in: Habeger Jr., Charles C. et al; *Handbook of Physical Testing of Paper*, Volume 2, 2nd edition, 2002, Marcel Dekker, ISBN 0-8247-0499-1. [pg 313].
- S.G. Harding, D. Wessman, S. Stentröm, L. Kenne, Water transport during the drying of cardboard studied by NMR imaging and diffusion techniques, *Chemical Engineering Science*, **56** (2001) 5269-5281.
- W.R. Foss, C.A. Bronkhorst, K.A. Bennett, Simultaneous heat and mass transport in paper sheets during moisture sorption from humid air, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **46** (2003) 2875–2886.
- C. A. Jain, *Moisture transport in paper and paper coatings*, doctoral thesis, 2004, Drexel University.
- Bandyopadhyay, B. V. Ramarao, S. Ramaswamy, Transient moisture diffusion through paperboard materials, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, **206** (2002) 455-467.
- S.G. Chatterjee, A Simple Description of Transient Moisture Diffusion in Paper, *INDIAN CHEMICAL ENGINEER* –Indian Institute of Chemical Engineers, **Vol. 50** No. 1 January-March 2008, pp. 34-46.
- L. R. Pesch, I. Neitzel, Cross Direction Bending Stiffness Profile Modelling in Paper Machine with Neural Networks, *Publ. UEPG Ci. Exatas Terra, Ci. Agr. Eng.*, Ponta Grossa, **18** (2): 69-78, jul/dez. 2012, <http://www.revistas2.uepg.br/index.php/exatas>, DOI:10.5212/Publ.Exatas.v.18i2.0002.
- R. C. F. do Nascimento, F. F. de Moraes, I. Neitzel, *Simulação de transferência simultânea de calor e massa em regime transiente, em bobinas de cartão acabadas*, relatório interno não publicado, 2006.
- C. C. Bueno, I. Neitzel, *Influência do caráter periódico da temperatura ambiente sobre o perfil de umidade e temperatura em bobinas de cartão estocadas*, Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Química da Faculdade de Telêmaco Borba, 2012.
- Andrioni, J. Luis, *Fabricação de Papel-Formação da folha*, Senai-Cetcep, Curitiba, 2006. 316 p.
- Earle, R.L., 1983, *Unit Operations in food Processing*, Chapter 5, “Overall Heat-Transfer Coefficients and Convection Heat Transfer”, Nzifst Inc, 1983.
- Nicolau, Vicente de Paulo e Guths., 2001, “*Congresso Brasileiro de Engenharia mecânica*”, Cobem 907, Bauru – SP, artigo 1211. ‘Um experimento didático em convecção natural/A didatic Experiment on free convection. São Paulo 2001.
- Tokonai, Hideki; Kuriyama, Masafumi, 1997, Natural Convection Heat Transfer from Vertical and Inclined Arrays of Horizontal Cylinder to air, *Journal Of Chemical Engineering of Japan*, **Vol. 30**, n°04.
- Dow Brasil SA, TS&D - Dow Latex Department, Maio/2006.
- Somerton, Craig W., Genik, Laura J., et al., 1992, *Heat Transfer on Cylinders*, Department of Mechanical Engineering, Michigan State University/School of Engineering, University of Portland, session 3233.
- Resende, Jaime Vilela., Filho, Neves, Camargo, Lincoln de., 2002, Coeficientes de Transferência de Calor Efetivos no Congelamento com Ar Forçado, *Brazilian Journal Food Technology*, **5**:33-42,2002.
- Heikkilä, De Pertti, 1992, *A study on the drying process of pigment coated paper webs*, Academic dissertatation Åbo Akademic.