

1 Introdução

A produção e venda de fitas adesivas é um negócio que movimentam imensas quantias de capital mundialmente. 3M, Avery Dennison, Tesa, Norton e Loma são empresas de grande reputação que estão neste mercado e trabalham no aperfeiçoamento dos produtos e dos processos produtivos para conseguirem vantagem competitiva num mercado que demanda baixo custo e consistência de qualidade.

As fitas adesivas são empregadas em inúmeros segmentos de mercado, desde uso doméstico e escritório até aplicações extremamente complexas de substituição de outras formas de fixação convencionais como parafusos, grampos e rebites.

Fita adesiva é um nome genérico para uma gama de produtos. Conforme a sua construção, as fitas adesivas podem ser classificadas em: simples-face, dupla-face e transferíveis.

De acordo com a aplicação temos as fitas repolpáveis, filamentosas, proteção, mascaramento, uso automotivo, estrutural, etc.

O adesivo pode ser acrílico, borracha ou misto. Os requisitos de adesão, resistência ao cisalhamento, envelhecimento, resistência à temperatura, resistência à radiação ultravioleta, entre outros, definem o tipo de adesivo para cada aplicação.

As propriedades dos adesivos acrílicos e de borracha diferem muito. Os acrílicos são mais resistentes ao envelhecimento (oxidação) por possuírem ligações saturadas, enquanto os adesivos de borracha dão maior sensação de adesão ao tato devido a fatores reológicos e de molhamento.

O processo de manufatura das fitas adesivas envolve o preparo do adesivo, o revestimento do adesivo sobre o substrato e o corte da fita em rolos nas medidas vendidas ao usuário final.

Os adesivos acrílicos são fabricados através de uma reação de polimerização partindo do ácido acrílico e de diferentes ésteres acrílicos na presença de um ou

mais solventes, ou sem solvente numa reação chamada de pré-polimerização. Quando a reação envolve os componentes acrílicos puros, o grau de polimerização no reator é baixo (daí o nome pré-polimerização) para manter a viscosidade do adesivo em um nível que permita a descarga. O restante da polimerização é realizada num processo posterior.

Os adesivos de borracha podem ser feitos a partir da borracha natural (poliisopreno) extraída de algumas espécies de seringueiras, de borracha sintética – como poli(estireno-butadieno) e poli(estireno-isopreno-estireno)– ou de blends entre borracha natural e sintética.

O processo de fabricação de adesivos a base de borracha natural envolve a moagem da matéria-prima base para redução do peso molecular, dispersão de partículas sólidas na borracha (antioxidantes, agentes taquificantes, *pellets* de borracha sintética, e cargas minerais) e a diluição da massa em um ou mais solventes e outros aditivos.

Nos adesivos de borracha sintética, é mais comum a dispersão de partículas sólidas na borracha fundida (termoplástica). Neste caso não há adição de solventes.

O revestimento do adesivo sobre o substrato pode ser feito por vários métodos existentes. A reologia do adesivo, velocidade de revestimento, espessura de camada, tempo de preparação do equipamento são algumas variáveis que determinam a escolha do método de revestimento apropriado.

Quando o processo de manufatura de uma fita específica envolve um adesivo a base de solvente, existe uma etapa de retirada destes solventes e formação de uma camada de material semi-sólido sobre o substrato.

Devido à 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 de manufatura de fitas adesivas. 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.

1.1

O processo de revestimento

O processo de revestimento contínuo de substratos com líquidos e posterior solidificação é amplamente utilizado na manufatura de fitas adesivas, filmes fotográficos e magnéticos, gráficos, papéis, etc.

A função deste processo é a aplicação de uma camada uniforme de material sólido ou semi-sólido sobre um substrato. A espessura da camada depende da aplicação final do produto e pode variar entre 1 μ m ou menos para revestimento de silicone em papéis antiaderentes, a 500 μ m ou mais.

Os líquidos revestidos podem ser monômeros reativos, emulsões, dispersões de partículas, soluções poliméricas ou polímeros fundidos.

O processo de revestimento destes líquidos pode ser feito por vários métodos diferentes, desenvolvidos e aperfeiçoados com o passar do tempo. Todos estes métodos de revestimento cumprem cinco funções básicas:

- a) Alimentação do líquido de revestimento;
- b) Distribuição ao longo da largura do substrato;
- c) Dosagem na espessura desejada;
- d) Aplicação sobre o substrato;
- e) Solidificação do líquido sobre o substrato.

Em determinados métodos de revestimento, duas ou três funções podem ocorrer simultaneamente.

Uma forma conveniente de classificação dos métodos de revestimento é separá-los em:

- a) Métodos com vazão pré-fixada (Fig. 1), e;
- b) Métodos com vazão pós-fixada (Fig. 2).

Essa classificação leva em consideração se todo líquido distribuído ao longo da largura do substrato é aplicado definitivamente ou se há uma etapa posterior de ajuste de espessura da camada.

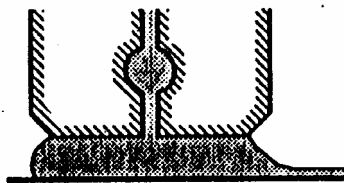


Figura 1 - *Slot Coating*, um método de revestimento com vazão pré-fixada [*Coating fundamentals, University of Minnesota - Jun, 2003*]

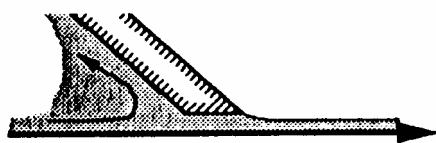


Figura 2 - Método de revestimento com vazão pós-fixada [*Coating fundamentals, University of Minnesota - Jun, 2003*]

Exemplos típicos de método de revestimento com vazão pré-fixada e método de revestimento com vazão pós-fixada são, respectivamente, *Slot Coating* (Fig. 1) e faca raspadora (Fig. 2).

A existência dos vários métodos de revestimento se deve a 1) inventores independentes, 2) evolução de métodos de vazão pós-fixada para métodos de vazão pré-fixada, 3) diversidade de propriedades dos líquidos a serem revestidos— viscosidade, elasticidade, tensão superficial, volatilidade— e requisitos de espessura de camada e uniformidade.

O estudo da aplicação de líquidos sobre substratos consiste na análise do escoamento na região de controle de espessura e conseqüentemente das forças envolvidas, descrito pelas equações de transferência de quantidade de movimento, continuidade e a equação constitutiva do líquido a ser revestido. Para casos onde a variação de temperatura interfere significativamente na viscosidade e/ou tensão superficial do líquido, deve-se incluir a equação de transferência de calor ao sistema de equações e obter a relação funcional entre a propriedade pertinente e a temperatura.

Revestimentos bem sucedidos apresentam escoamento bidimensional e em regime permanente.

A solidificação pode ocorrer por resfriamento de um líquido fundido, reticulação e secagem de uma solução de polímeros, polimerização de uma solução de monômeros ou simplesmente a retirada de solventes da solução.

A solidificação pela simples evaporação dos solventes constituintes da solução ainda é muito comum e pode ser encontrado na manufatura de fitas adesivas em geral, embora seja forte a pressão para a redução da emissão de solventes orgânicos para a atmosfera.

A tendência, quando possível, é a migração para formulações que usem água como solvente ou formulações sem solvente, com solidificação por polimerização térmica ou radiação UV. A reticulação das cadeias poliméricas, quando necessária, pode ocorrer durante a solidificação ou por bombardeio de elétrons (*e-beam*).

A evaporação de solventes em processos de secagem modernos ocorre dentro de estufas com circulação forçada de ar quente do tipo fluxo paralelo ou fluxo perpendicular (*impingement jets ou air flotation*). A diferença básica entre estas estufas é o tipo e direção do escoamento do ar aquecido em relação ao substrato, proporcionando diferenças no coeficiente de transferência de calor e massa e conseqüentemente diferentes características de secagem.

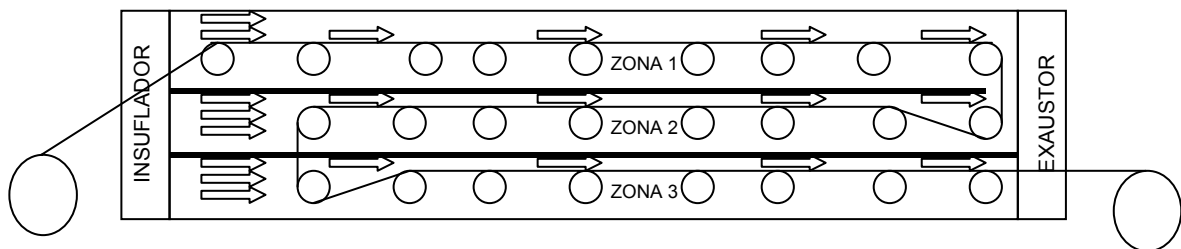


Figura 3 – Estufa de secagem com fluxo paralelo

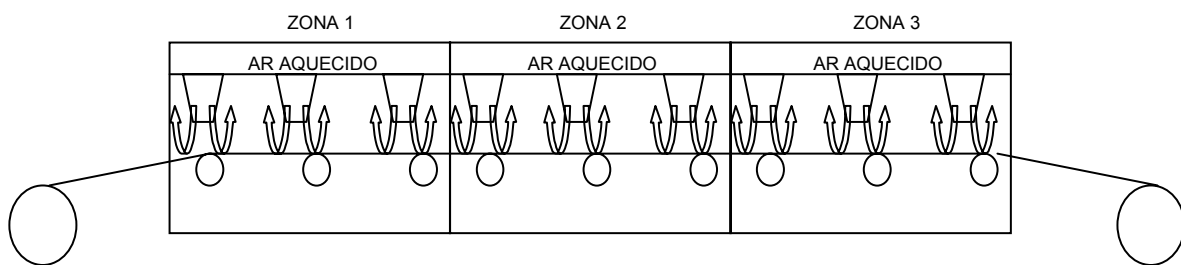


Figura 4 – Estufa de secagem tipo *impingement jets*

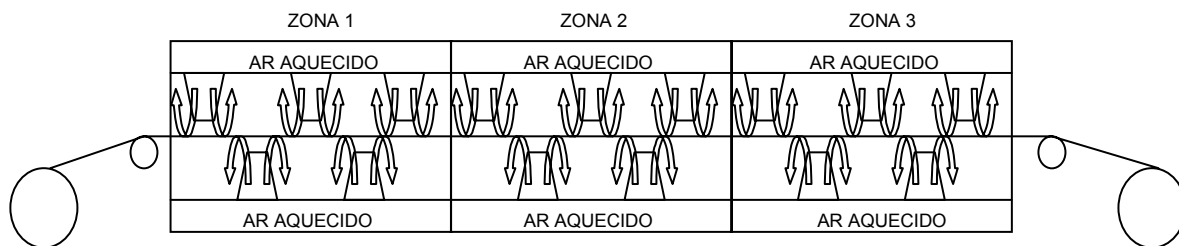


Figura 5 – Estufa de secagem tipo *air flotation*

Estufas com fluxo de ar perpendicular ao substrato, *impingement jet*, são as que possibilitam maior coeficiente de transferência de calor, embora isto não signifique necessariamente um tempo de secagem menor para um dado comprimento de estufa ou uma estufa menor para uma dada velocidade da linha.

Um conceito inovador em secagem é o *Gap Dryer*, no qual a transferência de calor se dá por condução numa região de pequena espessura entre uma placa quente localizada na parte inferior e uma placa fria localizada na parte superior. O substrato revestido passa por esta fresta enquanto o solvente evaporado se condensa na placa fria e é arrastado para canaletas laterais por pressão capilar. O *Gap Dryer* foi inventado por W. Blake Kolb e Gary Huelsman e as patentes pertencem a 3M Company. [US Pat. 5.581.905, 1996] [US Pat. 5.694.701, 1997]

Dado um tipo específico de estufa, os parâmetros de controle do processo de secagem são: temperatura do ar circulante, pressão parcial de solvente dentro da estufa, coeficiente de transferência de calor e massa (dados pelo tipo de escoamento do ar na interface com a fase líquida, geometria interna da estufa e outras fontes de energia como radiação infravermelha).

O estudo do processo de secagem é complexo em decorrência da inter-relação dos fenômenos de transporte de calor e massa e da dificuldade para obtenção de modelos satisfatórios para determinação de propriedades termodinâmicas da solução e coeficientes de difusão dos componentes voláteis.

Transporte de massa do corpo da solução para a atmosfera e transporte de calor do ar para o líquido sempre estão presentes e formam o conjunto básico de equações para a maioria dos modelos existentes. Pode ser necessária a análise da equação de transferência de momento caso os escoamentos ou tensões internas geradas durante o transcorrer da secagem sejam significantes.

Vários defeitos estão relacionados com o processo de secagem, porém a presença de bolhas na camada seca decorrente da ebulição da solução é um dos

defeitos mais comuns na fabricação de fitas adesivas. Outros defeitos possíveis são: descascamento da camada, formação das chamadas *Células de Bénard* e ruptura da camada revestida.

O revestimento e a solidificação afetam de maneira decisiva as características de qualidade básicas do produto final e devem ser analisadas em conjunto para otimização do processo de manufatura.

Na indústria de fitas adesivas a gramatura do material revestido tem um valor alto e o processo de secagem frequentemente se torna o gargalo da linha de produção. Portanto há grande importância em otimizá-lo, garantindo a retirada de solventes até um nível aceitável no menor tempo de residência possível.

Esta dissertação aborda o processo de solidificação por simples evaporação de solventes através do uso de estufas com circulação forçada de ar aquecido. Um *modelo unidimensional e transiente* é elaborado e resolvido numericamente para simular a mudança no desempenho da secagem decorrente de alterações nos parâmetros de processo ou propriedades do líquido. *O método das diferenças finitas* é usado para integrar as equações diferenciais de transporte de massa e calor. *O método de Newton* é usado na solução do sistema de equações algébricas não lineares resultantes da discretização das equações diferenciais.

O principal objetivo da análise que será desenvolvida é prever o nível final de solvente residual após certo tempo de secagem, temperatura de ajuste da estufa e outros parâmetros de processo e propriedades da solução. A partir daí conseguir aumentos de velocidade de produção.