

1

Introdução

1.1

Processo de Revestimento por Rotação

A deposição de uma fina camada de líquido sobre um substrato é parte essencial do processo de manufatura de diversos produtos, como diferentes tipos de papel, fitas adesivas e etiquetas, fitas e discos magnéticos, dentre muitos outros.

A parte fundamental do processo de revestimento é a deposição contínua de uma camada líquida sobre um substrato em movimento.

Esta operação pode ser feita de diferentes modos e diferentes métodos de revestimento são utilizados nas indústrias, dependendo da faixa de viscosidade, tensão superficial do líquido, velocidade do substrato, espessura final da camada líquida a ser depositada, nível de investimento e desenvolvimento tecnológico da empresa.

A espessura de camada líquida depositada varia de acordo com o produto, ficando geralmente entre 10 a 100 micrômetros (espessura molhada, antes do filme ser seco).

A camada depositada também deve ser uniforme, tanto na direção transversal como na direção do movimento do substrato. Para isto, o escoamento na região de aplicação deve ser laminar e em regime permanente (para garantir uniformidade na direção do movimento do substrato) e bidimensional (para garantir uniformidade na direção transversal). Qualquer desvio destas características pode levar a defeitos na camada de líquido depositada.

O grau de uniformidade depende da aplicação do produto: produtos óticos e magnéticos possuem graus de uniformidade mais rígidos que produtos adesivos, por exemplo. O líquido de revestimento pode ser um composto puro, uma solução polimérica, uma dispersão coloidal, uma suspensão de partículas, um cristal líquido ou fundido.

A maioria destes líquidos possuem comportamento não Newtoniano. Muitas vezes, diversas camadas são depositadas em um mesmo substrato, como no

caso de filmes fotográficos.

O objetivo principal de um processo de revestimento bem sucedido é produzir uma camada de líquido dentro das especificações do produto na maior velocidade possível. Porém, as características do escoamento e conseqüentemente da qualidade do filme depositado são fortemente influenciados pelos parâmetros de operação do processo, como velocidade do substrato, propriedades do líquido e do substrato e configuração da geometria do escoamento.

A busca de maior competitividade e melhores produtos gera grandes desafios tecnológicos para as empresas que atuam na área de revestimento de substratos.

Dentre os mais importantes pode-se citar: (i) espessura da camada líquida depositada cada vez menor; (ii) emprego de soluções cada vez mais concentradas; (iii) aumento da velocidade de produção; (iv) aumento da eficiência de produção; (v) diminuição da emissão de solventes orgânicos; e (vi) constante mudança na formulação química dos líquidos de revestimento.

A otimização e o desenvolvimento tecnológico só podem ser atingidos a partir de um perfeito entendimento de cada passo do processo de manufatura. Em particular, a análise do processo de revestimento requer o entendimento do escoamento na região de aplicação, pois na maioria dos casos as barreiras dos desafios tecnológicos estão ligados ao escoamento na região de aplicação da camada líquida sobre o substrato.

A qualidade do filme depositado e conseqüentemente do produto final pode ser mapeada em função das variáveis do processo. A região de qualidade dentro das especificações é geralmente denominada *janela de operação do processo*. Ela pode ser construída através de experimentos em plantas pilotos ou através de modelagem teórica e simulação numérica do processo.

A metodologia experimental é extremamente cara e os experimentos em plantas pilotos não são totalmente controláveis. Em contraste, com um modelo teórico confiável, pode-se obter janelas de operação em uma grande faixa de parâmetros a um custo muito pequeno. Porém, como modelos teóricos incluem simplificações e não incluem todos os aspectos físicos envolvidos no processo, muitos dos resultados teóricos devem ser comparados com testes experimentais para validá-los.

Um dos processos de revestimento muito utilizados por diferentes ramos da indústria é o processo de revestimento por rotação direta. A figura 1.1 mostra uma fotografia de um processo de revestimento de papel por rotação. Processos de revestimento por rotação são menos precisos que os métodos de revestimento de vazão pré-fixada, como revestimento por extrusão, cascata e cortina. Porém, eles são muito mais simples de operar, o custo de instalação é muito menor e são

suficientes em muitas aplicações industriais.

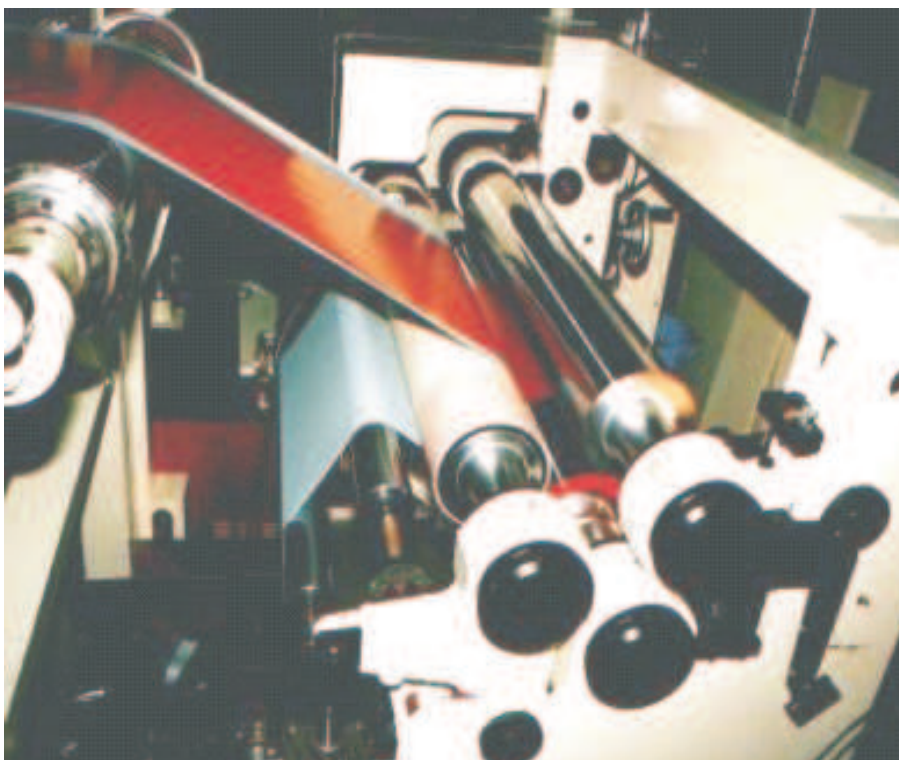


Figura 1.1: Processo de revestimento por rotação direta.

As diferentes etapas do processo de fabricação de um produto revestido são mostrados na Fig. 1.2, tais como a alimentação do substrato, o processo de revestimento propriamente dito, a secagem e as outras etapas necessárias para a obtenção do produto final.

O processo de revestimento por rotação é caracterizado pelo escoamento de líquido através do pequeno espaçamento entre pares de cilindros girantes. A velocidade superficial dos cilindros de cada par pode ser no mesmo sentido (rotação direta) ou em sentido contrário (rotação reversa). O processo de revestimento por rotação direta apresentado na Fig. 1.2 é uma configuração típica de três cilindros.

O primeiro cilindro remove uma certa quantidade de líquido da bacia de alimentação e transfere parte do líquido para o cilindro de aplicação. Esta transferência é feita através de rotação direta.

A quantidade de líquido sobre o cilindro de aplicação é reduzida no próximo par de rolos. A velocidade do cilindro de controle de vazão determina a espessura do filme de líquido sobre o cilindro de aplicação antes da transferência ao substrato.

Apesar da grande variação de configurações de máquinas de revestimento por rotação (com diferentes números de cilindros, sentido de rotação de cada

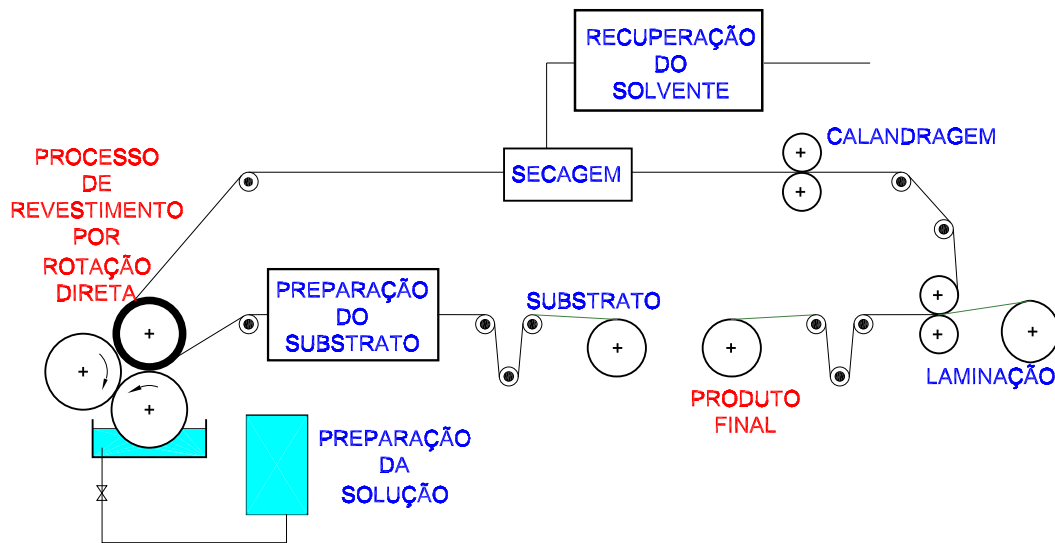


Figura 1.2: Vista esquemática dum processo de revestimento por rotação direta.

cilindro e tipo de superfície - rígida ou deformável), cada sistema pode ser analisado como uma sequência de escoamentos através do espaçamento entre pares de cilindros. Para entender o processo como um todo, o escoamento entre cada par de cilindros deve ser analisado, conforme descrito por Benjamin (1994) [36].

1.2

Instabilidade do escoamento no processo de revestimento por rotação direta

O processo de revestimento por rotação direta, que consiste na operação com as velocidades superficiais dos cilindros no mesmo sentido, é bastante comum em diversas configurações. O escoamento bidimensional é instável, a não ser a baixas velocidades dos cilindros.

O padrão observado experimentalmente consiste em um escoamento tridimensional e periódico na direção transversal ao substrato, conforme ilustrado na figura 1.3.

Como resultado deste escoamento tridimensional, a espessura da camada de líquido depositada é também não uniforme. Este tipo de instabilidade, ou melhor o padrão resultante na camada de líquido depositada, é comumente denominado de *ribbing*. Esta instabilidade pode limitar a velocidade do processo se uma camada com um determinado grau de uniformidade é requerida.

O escoamento e a instabilidade da separação de um líquido Newtoniano entre dois cilindros girantes com velocidades no mesmo sentido foi extensamente

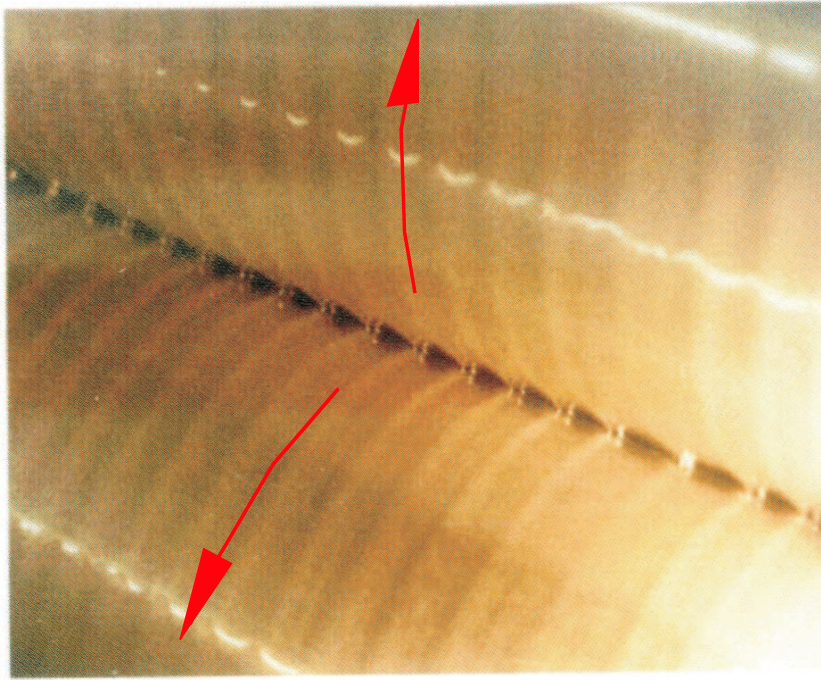


Figura 1.3: Padrão do escoamento tridimensional, periódico na direção transversal (foto por Suszynski).

estudado.

Pearson (1960) [4] foi o primeiro a analisar porque o escoamento bidimensional torna-se instável. Ele mostrou que o gradiente de pressão adverso perto da superfície livre necessário para desacelerar o líquido desestabiliza o escoamento e que a tensão superficial tende a estabilizá-lo.

Um valor crítico da razão destas duas forças, isto é o *Número de Capilaridade* $Ca = \mu V / \sigma$, determina o aparecimento da não-uniformidade da superfície livre. μ é a viscosidade do líquido, σ é sua tensão superficial e V é a velocidade média dos cilindros.

Pitts et al. (1961) [5] desenvolveram um critério de estabilidade considerando o balanço de forças num menisco perturbado, conforme ilustrado na figura 1.4. Na análise feita por eles, as forças viscosas e elásticas foram desprezadas e apenas a pressão foi considerada no balanço de forças.

O escoamento é considerado instável se a pressão sob a protuberância da superfície livre perturbada for menor do que a pressão sob a posição inicial da interface. O critério de estabilidade obtido é dado por:

$$\frac{dp}{dx} < \frac{1}{Ca} \left(\frac{1}{r^2} \frac{dr}{dx} + N^2 \right). \quad (1-1)$$

onde r é o raio de curvatura do menisco. Usando várias outras aproximações,

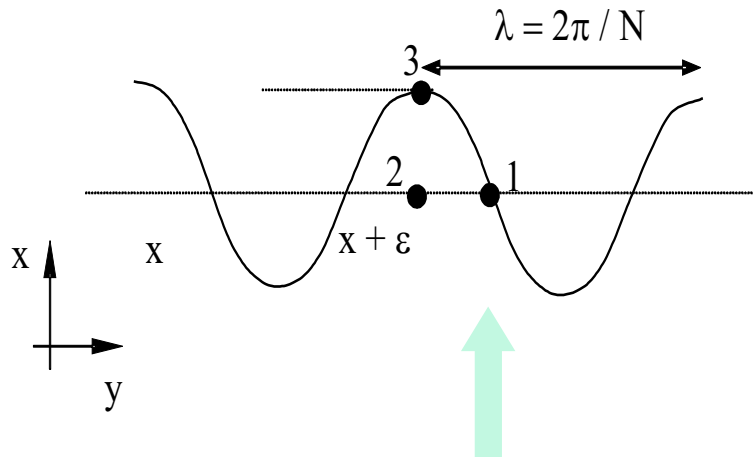


Figura 1.4: Superfície livre perturbada na direção transversal.

Pitts et al. (1961) [5] estimaram que o número de capilaridade crítico para o aparecimento da instabilidade é uma função da distância entre os cilindros:

$$Ca = 28 \frac{H_0}{R}. \quad (1-2)$$

Várias outras análises teóricas e experimentais para descrever a instabilidade neste tipo de escoamento para fluidos Newtonianos foram desenvolvidas por diversos autores, as contribuições mais importantes são: Mill (1967) [8]; Greener (1980) [12]; Savage (1984) [20], Benkreira (1982) [13]; e Coyle (1990) [29].

Em casos práticos, os líquidos utilizados em processos de revestimentos contêm polímeros e outras substâncias que alteram o seu comportamento mecânico.

O comportamento não Newtoniano do líquido pode alterar completamente o escoamento perto da superfície livre e conseqüentemente alterar a estabilidade do mesmo.

As primeiras análises de efeitos não Newtonianos em escoamentos de revestimento por rotação direta foram restritas ao comportamento pseudo-plástico dos líquidos e utilizaram o modelo de potência para descrever a dependência da viscosidade com a taxa de deformação.

Coyle et al. (1987) [25] resolveram as equações de conservação bidimensional e mostraram o efeito da diminuição da viscosidade com a taxa de deformação na vazão e distribuição de pressão entre os dois cilindros girantes.

Bauman (1982) [14] testou experimentalmente o efeito de certos aditivos poliméricos na estabilidade do escoamento do processo de revestimento por rotação direta. Eles observaram que o número de capilaridade crítico no qual a instabilidade aparece é menor quando comparado com o escoamento de fluidos

Newtonianos. A explicação dada foi que as tensões elásticas que surgem no escoamento predominantemente extensional perto da superfície livre desestabilizam o escoamento.

Se a velocidade dos cilindros, ou melhor o número de capilaridade, for acima do número de capilaridade crítico para o aparecimento da instabilidade do escoamento bidimensional, as protuberâncias na superfície livre crescem ainda mais e dão origem a formação de filamentos, que podem quebrar formando uma névoa de gotículas na região de separação do escoamento.

Glass (1978) [11] foi o primeiro a estudar sistematicamente este fenômeno. Ele analisou a formação de filamentos e névoa no processo de revestimento por rotação direta de dispersões coloidais poliméricas em base água com outros ingredientes presentes em tintas sintéticas através da comparação das propriedades reológicas e padrão de escoamento de várias tintas comerciais. A principal conclusão foi que tintas com altas viscosidades extensionais produziram filamentos longos e estáveis.

Fernando et al. (1988) [27] continuaram o trabalho anterior, e concluíram que quanto maior a viscosidade extensional, medida pela técnica de sucção de filamento (*fiber suction technique*), menor era o número de capilaridade crítico para o aparecimento da instabilidade no escoamento. Eles ainda mostraram que o comprimento dos filamentos formados e a intensidade da névoa de gotículas na região de separação em alguns casos cresceram com a viscosidade extensional do líquido utilizado.

Carvalho (1995) [40], e posteriormente Dontula (2000) [48] analisaram o escoamento de separação de soluções aquosas de PEG (Polietileno Glicol) e PEO (Óxido de polietileno) entre dois cilindros girantes. A principal conclusão foi que quando pequenas quantidades de polímeros com moléculas flexíveis estão presentes, o aparecimento da instabilidade na direção transversal do escoamento bidimensional ocorre a velocidades (número de capilaridades) bem menores quando comparado ao caso Newtoniano.

Grillet et al. (1999) [49] e Lopez et al. (2002) [55] estudaram experimentalmente a instabilidade de um escoamento não Newtoniano entre dois cilindros concêntricos. Lopez et al. (2002) [55] usaram duas famílias de soluções poliméricas com comportamento pseudo-plástico da viscosidade em cisalhamento semelhantes, mas com características elásticas distintas, a saber goma xantana (inelástico) e poliácridamida (elástico). Eles observaram que com a solução de poliácridamida, a redução no número de capilaridade crítico para o aparecimento da instabilidade cresce com a concentração do polímero até um fator de dez vezes.

Com a solução de goma xantana, observou-se apenas uma pequena

diminuição do número de capilaridade crítica. As configurações resultantes da interface, periódicas na direção transversal, também são apresentadas. Elas são fortemente dependentes das propriedades reológicas da solução, indicando que o mecanismo responsável pelo aparecimento da instabilidade a baixas velocidades do cilindro (quando comparado ao caso Newtoniano) teve ter origem no comportamento elástico do líquido.

Graham (2003) [57] estudou a influência da viscoelasticidade no aparecimento de instabilidade tridimensional em escoamentos com superfície livre, e mostrou que o mecanismo de desestabilização está relacionado com a combinação de altas tensões tangenciais e curvatura ao longo da superfície livre côncava.

1.3

Escopo e Roteiro da Tese

Modelos teóricos do escoamento de líquidos viscoelásticos no processo de revestimento por rotação direta não estão disponíveis na literatura.

Os mecanismos pelos quais a elasticidade do líquido torna o escoamento instável em relação a perturbações infinitesimais na direção transversal a números de capilaridades muito menores quando comparado ao escoamento de líquidos Newtoniano também não são perfeitamente entendidos. O objetivo desta tese é responder estas questões.

Para modelar e determinar os parâmetros críticos nos quais um escoamento bidimensional em regime permanente torna-se instável, é fundamental desenvolver um modelo teórico preciso tanto do escoamento base, isto é o escoamento bidimensional em regime permanente, quanto da resposta deste escoamento a perturbações infinitesimais.

A solução das equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos viscoelásticos em geometrias complexas representa um grande desafio numérico. A presença da superfície livre no escoamento estudado nesta tese torna a solução do problema ainda mais complexa.

Nesta tese, o escoamento bidimensional, viscoelástico, em regime permanente, com superfície livre que ocorre no processo de revestimento por rotação direta é analisado através da solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento acopladas com modelos constitutivos diferenciais (Oldroyd-B e FENE-P).

As equações diferenciais resultantes da formulação são resolvidas numericamente pelo método de elementos finitos. A presença da instabilidade que torna

o escoamento periódico na direção transversal pode ser estimada através de um critério simples de balanço de forças na superfície livre.

O critério proposto aqui é uma modificação na análise apresentada por Graham (2003) [57] e determina os mecanismos pelos quais a elasticidade do líquido desestabiliza o escoamento. Este trabalho também apresenta uma formulação geral de análise de estabilidade linear de escoamentos de fluidos viscoelásticos com superfícies livres. Esta análise é aplicada a três escoamentos simples, com soluções disponíveis na literatura.

A utilização da metodologia desenvolvida para análise do escoamento no processo de revestimento por rotação direta fica como sugestão para trabalhos futuros.

O conteúdo da tese está dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2: Descrição da formulação do escoamento bidimensional em regime permanente com superfície livre de fluidos viscoelásticos.
- Capítulo 3: Descrição do método numérico utilizado para resolver o sistema de equações diferenciais que descreve o escoamento em questão.
- Capítulo 4: Apresentação dos escoamentos bidimensionais de líquidos Newtonianos e Viscoelásticos, bem como o critério de estabilidade simples baseado no balanço de forças na superfície livre.
- Capítulo 5: Apresentação da formulação para análise de estabilidade linear de escoamentos com superfícies livres de fluidos viscoelásticos. A formulação apresentada é testada em três escoamentos distintos.
- Capítulo 6: Comentários Finais.