

1 Introdução

1.1 Processo de Revestimento

Revestimento é o processo no qual o ar em contato com uma superfície sólida em movimento é substituído por uma camada de líquido. Usualmente é requerido que a camada de líquido seja fina, contínua e de espessura uniforme. O processo de revestimento representa um importante passo na manufatura de diversos produtos, como papel, placas de impressão, folhas de aço galvanizado, disquetes, fitas magnéticas e adesivas, displays, filmes fotográficos de multicamadas, LCD's, suspensões de fotoreceptores para xerografia e ultimamente em circuitos flexíveis dentre muitos outros. A Fig. (1.1). apresenta um esquema simplificado das principais operações do processo de fabricação de filmes revestidos.

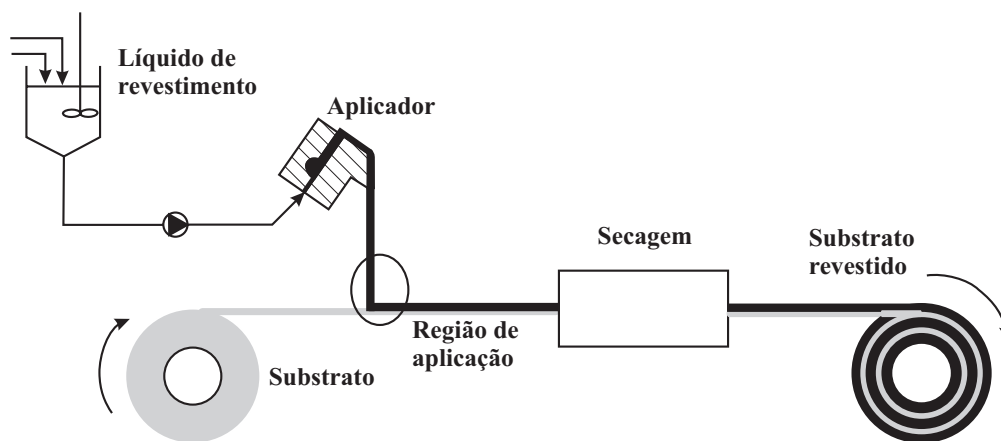


Figura 1.1: Esquema simplificado do processo de revestimento

O líquido de revestimento é alimentado para o aplicador; no aplicador o líquido é uniformemente distribuído para logo ser depositado no substrato. Esta camada de líquido deve ser solidificada, geralmente realizada mediante secagem ou cura. No primeiro caso, o solvente é evaporado e apenas os componentes sólidos presentes no revestimento permanecem sobre o substrato. A solidificação por cura ocorre através de reações químicas entre os componentes do líquido de revestimento. Após solidificado, o substrato revestido pode ser submetido a outros processos, como calandragem e laminação, conforme o produto final desejado.

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. Os métodos de revestimento podem ser classificados em processos de revestimento de vazão pré-fixada, o termo “pré-fixada” indica que o controle de espessura é feito pelo controle da vazão fornecida na alimentação do processo, Fig. (1.2)a, b e c. e de vazão pós-fixada, Fig. (1.2)d, como foi discutido por Ruschak [3]. Alguns desses métodos são: revestimento por cortina, revestimento com cilindros girantes, revestimento por extrusão, revestimento com faca, etc. como mostrado na Fig. (1.2).

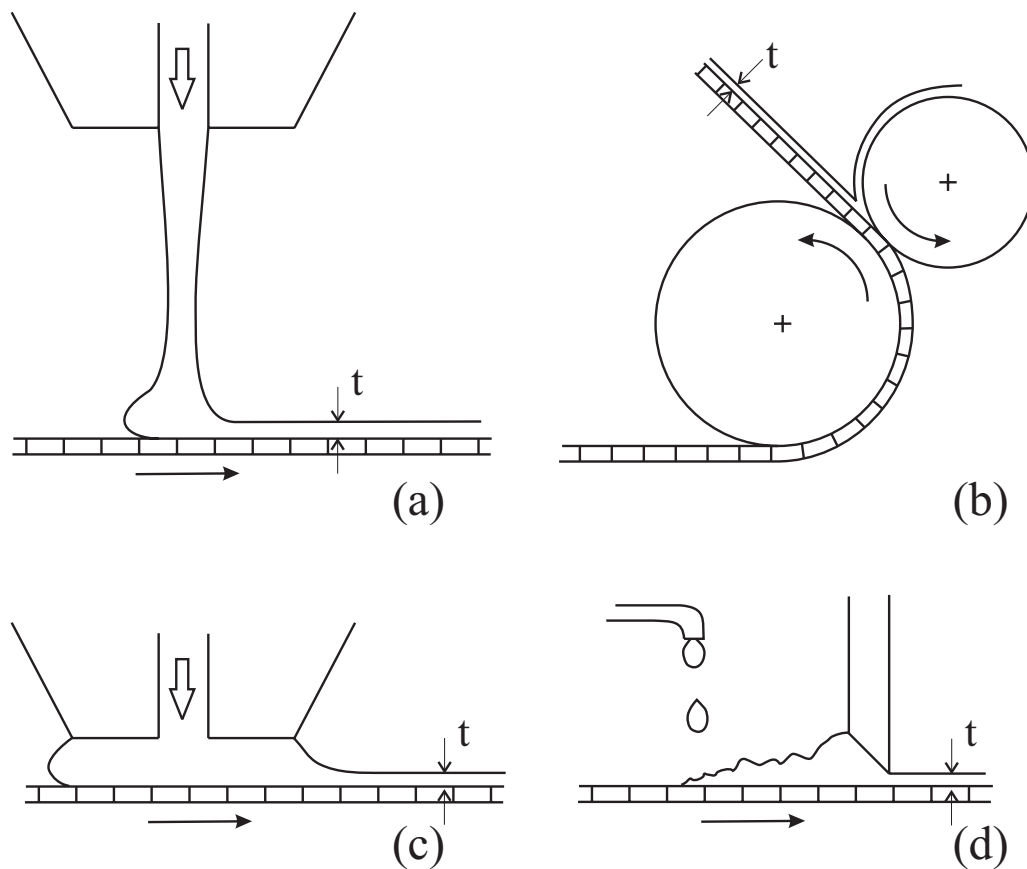


Figura 1.2: Métodos de revestimento:(a) por cortina, (b) rotação reversa, (c) por extrusão e (d) por faca.

A espessura da camada líquida depositada, t , varia de acordo com o produto. Quase sempre, diversas camadas são depositadas em um mesmo substrato, como no caso de filmes fotográficos. Hoje a indústria de revestimento freqüentemente requer melhorias na produção e no desenvolvimento de novos produtos, na procura de maior competitividade, estes desenvolvimentos trazem consigo grandes desafios tecnológicos como:

- Espessura do revestimento cada vez menor.
- Aumento da velocidade de produção.
- Constante mudança na formulação química dos líquidos a serem revestidos, dentre outros.

Para poder obter a otimização da produção e ter desenvolvimento tecnológico no processo deve-se primeiro atingir um completo entendimento das diferentes operações do processo de produção. Em particular, e fundamentalmente, a análise do processo de revestimento requer o entendimento do escoamento na região de aplicação; o que torna muito importante a análise dos mecanismos físicos que determinam o sucesso ou a falha (instabilidades) do escoamento. O presente trabalho é focado no estudo dos limites operacionais no processo de revestimento por cortina. A visualização do escoamento e a modelagem computacional são as ferramentas utilizadas para este fim. Ambos métodos (experimental e teórico) se complementam para conduzir e melhorar a compreensão do processo.

1.2

Método Revestimento por Cortina

Nosso caso de estudo é o revestimento por cortina de líquido que é um dos mais importantes processos de revestimento. Ele pertence à classe de revestimento com vazão pre-fixada. Esta característica dá lugar a importantes vantagens em termos de procedimentos operacionais e de qualidade do produto em comparação com outros métodos de revestimento.

Este processo é caracterizado por um líquido caindo livremente de uma altura considerável sobre a superfície do substrato a ser recoberto (rígido ou flexível), o que se encontra em movimento, Kistler e Schweizer[4], como mostrado na Fig. (1.3).

A primeira indústria que utilizou este tipo de revestimento foi a indústria alimentícia na manufatura de balas recobertas de chocolate em 1903 na Alemanha. Aplicações recentes de revestimento por cortina incluíram revestimentos de precisão com multicamadas de líquido, que será descrito mais adiante como as que são usadas na manufatura de filmes fotográficos, na indústria do papel e outros produtos.

1.2.1

Vantagens e Desvantagens do Revestimento por Cortina

Neste processo encontramos excelentes vantagens como por exemplo:

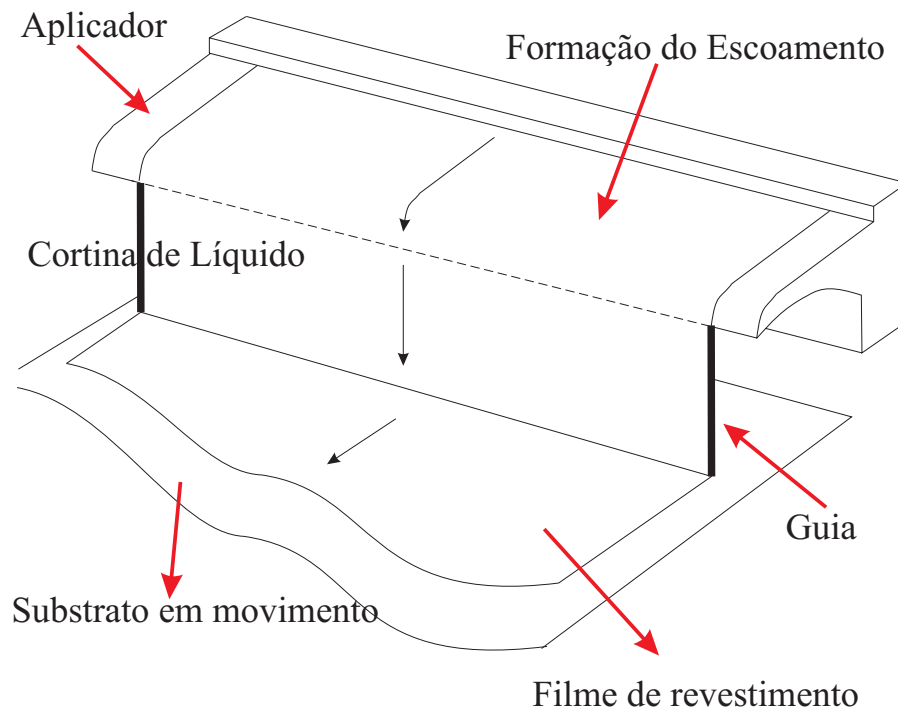


Figura 1.3: Revestimento por cortina.

- Aplicação do revestimento livre de contato, devido a grande distância entre o aplicador e o substrato em movimento. A tensão de cisalhamento no substrato não é muito alta (menos risco de quebra do substrato), e no alinhamento mecânico não torna-se tão crítico.
- Processo de revestimento de vazão “pre-fixada”. Não ocorre recirculação de fluido, mantendo as propriedades do líquido constante em todo o processo. Possibilidade de aplicar multicamadas de revestimento simultaneamente.
- Permite altas velocidades de revestimento (>1000 m/min, o limite exato depende de vários outros fatores).
- Qualidade constante em todo o processo de revestimento, o filme de revestimento é menos sensível a variações da espessura do substrato.
- Amplia variabilidade de velocidades e propriedades do líquido de revestimento.

Mas também existem desvantagens neste processo como:

- Existência de uma vazão mínima, abaixo da qual a cortina de líquido sofre quebra.
- Problemas inerentes da zona de encontro entre a cortina e o substrato: entrada de ar causando a presença de bolhas, pequenos furos e listras

no filme de revestimento; a cortina sendo puxada pelo substrato (alta velocidade); e a formação de calcanhar pelo escoamento do líquido na direção contrária ao movimento do substrato, causando defeitos similares à entrada de ar, além da recirculação (dentro do calcanhar) podendo assim degradar a solução.

1.2.2 Revestimento de Multicamadas

Quando desejado, duas ou mais camadas de revestimento podem ser aplicadas simultaneamente num substrato utilizando o método de revestimento por cortina, como mostrado na Fig. (1.4). Este processo é atrativo quando é necessário produzir camadas com diferentes propriedades físicas a várias profundidades do revestimento, i.e., melhorar as características de desgaste, diferentes cores, obter superfície brilhante, etc. Esta habilidade torna atraente este tipo de processo do ponto de vista de custo e tempo. A condição de

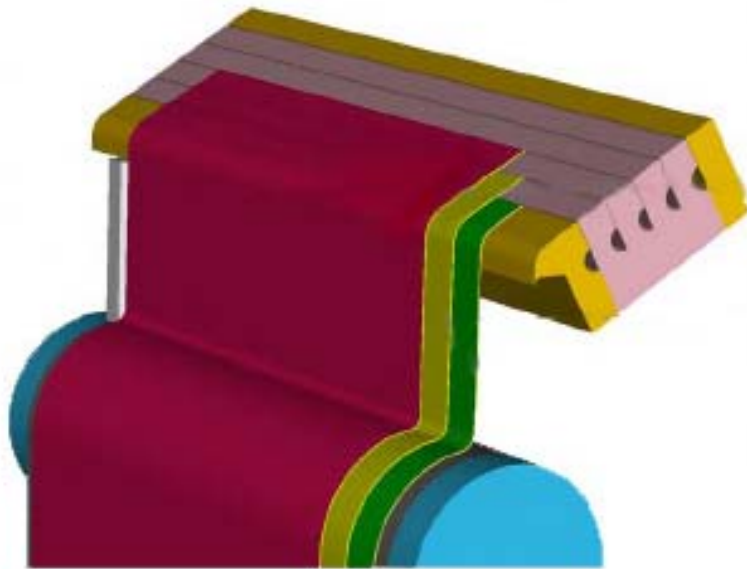


Figura 1.4: Revestimento por cortina de multicamadas

escoamento laminar na cortina garante que as camadas de líquidos não tendam a misturar-se.

1.2.3 Guias da Cortina

A cortina de líquido caindo livremente sobre o substrato deve ser retida nas laterais para prevenir a contração pelo efeito da tensão superficial e mantê-la com uma largura uniforme. Para manter a largura da cortina é

essencial a presença de guias nas extremidades: sem elas a cortina tende a se contrair obtendo uma forma triangular e na zona jusante da cortina uma forma cilíndrica, como mostrado na Fig. (1.5). Tipicamente as guias são montadas coladas ao aplicador do líquido de revestimento iniciando o contato com o líquido desde o primeiro ponto de caída livre da cortina. A certa distancia da guia, a cortina é caracterizada por uma velocidade igual a $V = \sqrt{2gy}$ onde g é a gravidade e y é a distancia do ponto inicial da queda livre da cortina. Na superfície de contato entre a guia e a cortina, a velocidade da cortina é zero. Como consequência existe um gradiente de velocidade perto da guia. Este gradiente de velocidade dá como resultado o enfraquecimento da cortina ao longo da superfície de contato perto da guia e a cortina de líquido. A cortina pode-se tornar instável e conseqüentemente a separação da guia pode ocorrer, interrompendo o processo de revestimento. Porém existem diferentes projetos, configurações e materiais de guias que reduzem o gradiente de velocidade.

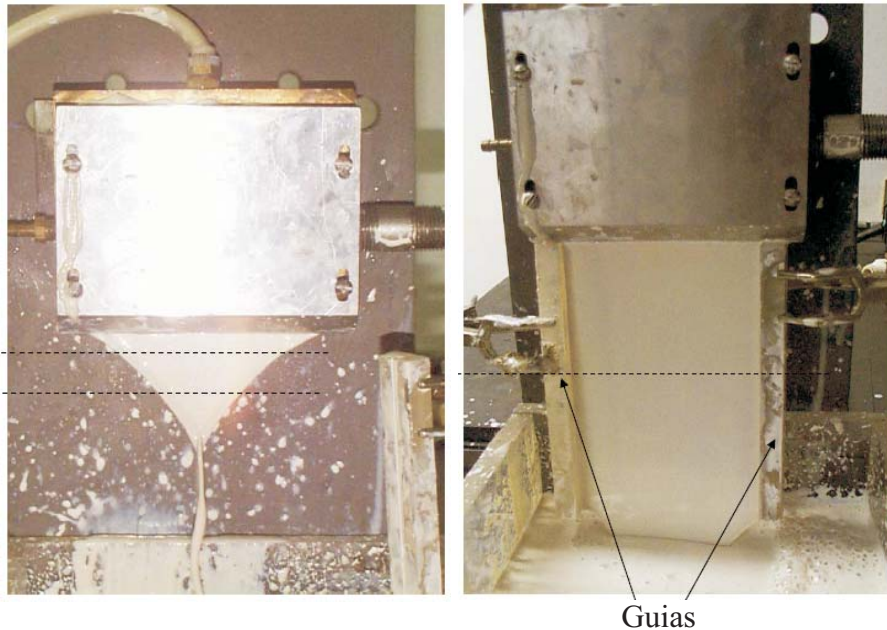


Figura 1.5: Uso de guias no processo.

1.3

Revisão Bibliográfica: escoamento no Processo de Revestimento por Cortina

O escoamento no processo de revestimento por cortina é usualmente dividido em diferentes zonas ou regiões, como descrito por Kistler [1] e mostrado na Fig. (1.6):

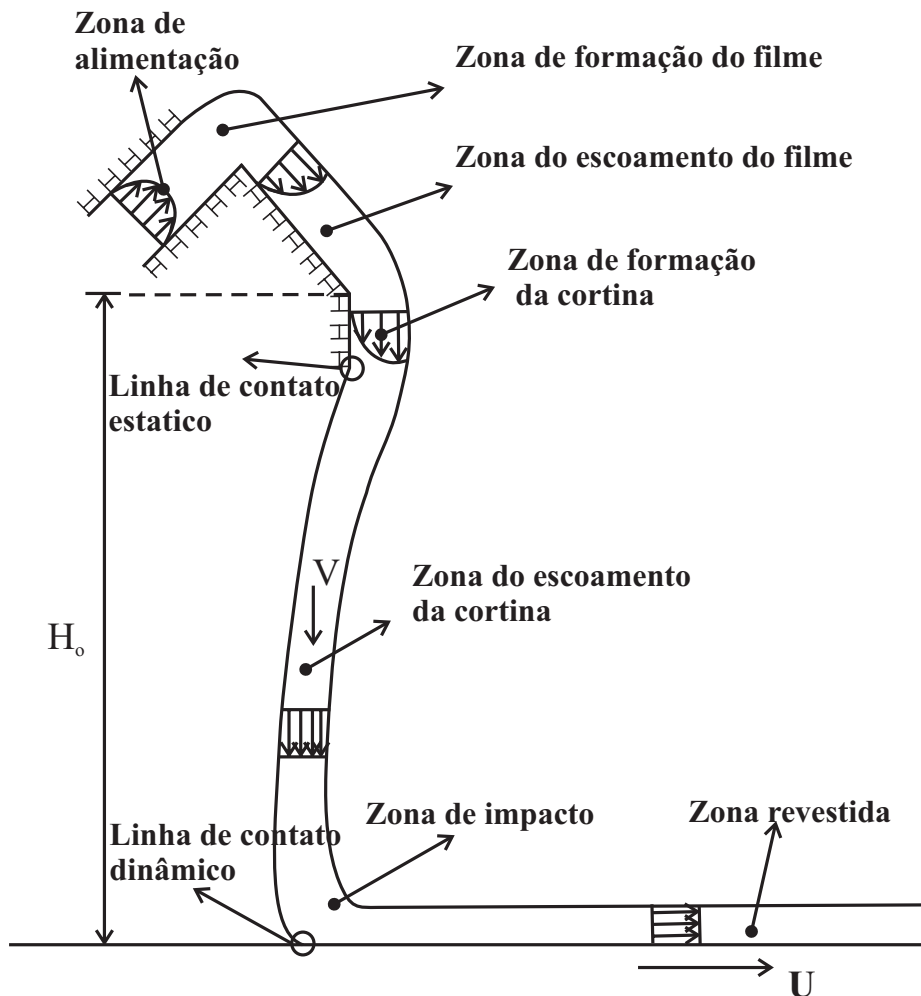


Figura 1.6: Zonas de escoamento em um processo de revestimento por cortina

Zona de alimentação: Na fenda de alimentação, onde o líquido é fornecido à saída do aplicador.

Zona de formação do filme: Onde o líquido adquire uma superfície livre e sob ação da gravidade começa a escoar na parte externa do aplicador (lábio).

Zona do escoamento do filme: No lábio do aplicador, onde o líquido aproxima-se a um escoamento completamente desenvolvido (perfil de velocidade parabólico).

Zona de formação da cortina: Corresponde a parte final do aplicador, onde a cortina é formada a partir da linha de contato estática (interface líquido-gás-sólido). A geometria da saída e a reologia do líquido de revestimento são os mais importantes parâmetros que influenciam no comportamento do escoamento nesta zona. A trajetória do líquido

na saída da barra é controlada pela gravidade, inércia, forças capilares e viscosas. O desvio da cortina é um dos mecanismos relacionados ao fenômeno chamado “efeito teapot”. Este desvio da cortina que ocorre quando a linha contato estática permanece na ponta da barra, tem como variável chave a vazão por unidade de largura, porém a intensidade do desvio não é uma função monotônica da vazão.

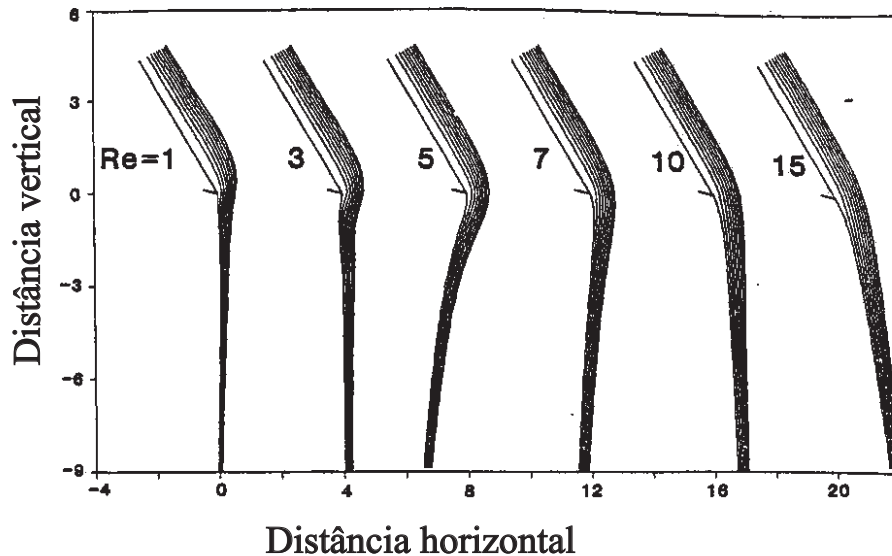


Figura 1.7: Desviação hidrodinâmica da cortina a diferentes vazões, Klister[1].

A Fig.(1.7) apresenta os resultados do Klister [1] a configuração da cortina em função da vazão (Número de Reynolds). Kistler e Scriven [5], modelaram numericamente a zona de formação da cortina utilizando elementos finitos e concluíram que a trajetória é determinada por um efeito hidrodinâmico, sendo influenciada depois por parâmetros de molhamento, principalmente o ângulo de contato, que apresenta histerese. Na Fig. (1.8) pode-se observar o “efeito teapot”, a migração da linha de contato estático, e sua histerese.

Zona de escoamento da cortina Região onde o líquido cai sob ação da gravidade e o escoamento se aproxima de um regime de escoamento extensional puro, onde a aceleração gravitacional compete com a influência da tensão normal viscosa. Nesta zona, a estabilidade da cortina é o resultado de uma complexa relação entre forças de inércia, viscosas, capilares, e de gravidade. A configuração da cortina de líquido e sua estabilidade foram estudadas inicialmente por Squire [6], que conclui que a quebra da cortina resulta do crescimento de ondas transversais. Experimentalmente, uma das primeiras e mais importantes contribuições foi feita por

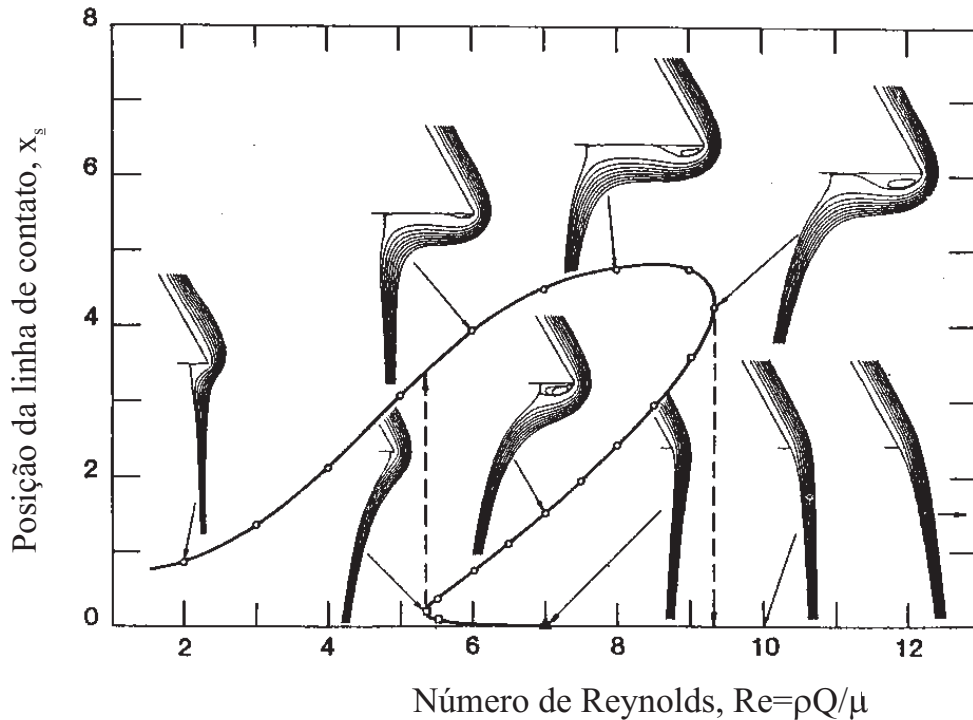


Figura 1.8: Efeito “Teapot”, Kistler[1].

Brown [7]. Ele mediu a velocidade da cortina em função da posição. Encontrou que a cortina atinge o regime de queda livre depois de uma pequena distância percorrida pelo líquido, e propôs uma fórmula empírica para a velocidade da cortina como uma função da distância percorrida, y , na forma de uma parábola que começa no ponto y_o

$$V^2 = V_o^2 + 2g[y - 2(4\mu/\rho)^{2/3}g^{-1/3}], \quad (1-1)$$

onde V_o é a velocidade média na saída no líquido e a distância y_o é dada pela equação

$$y_o = 2(4\mu/\rho)^{2/3}g^{-1/3}. \quad (1-2)$$

Kistler [1] mediante um análise utilizando método de elementos finitos, revela que o valor de y_o pode não ser uma função simples das propriedades do líquido $2(4\mu/\rho)^{2/3}g^{-1/3}$, como Brown [7] tinha previsto. Outra contribuição de Brown [7] foi referente à análise da estabilidade da cortina, ele se baseou em um simples balanço de quantidade de movimento na superfície livre de um pequeno furo (produzida pela presença de bolhas ou impurezas no líquido) na cortina líquida. As forças de inércia ρqV (ou ρV^2d) devem ser maiores que as forças de tensão superficial para que o furo não cresça e seja carregado com o escoamento, como esquematizado na Fig. (1.9).

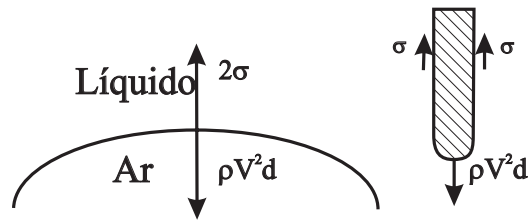


Figura 1.9: Forças atuando do lado livre, resultado da ruptura da cortina.

Considerando d a espessura da cortina e q a vazão volumétrica por unidade de largura, a condição resultante para a estabilidade é dada por

$$\rho V^2 d > 2\sigma, \tag{1-3}$$

em forma adimensional, a Eq.(1-3) é escrita como

$$We > 2, \tag{1-4}$$

onde $We = \rho q V / \sigma$ é o número de Weber, que representa a razão entre forças inerciais com as forças de tensão superficial. Assim a conclusão de Brown [7] foi que o número de Weber tem que ser maior que 2 para prevenir qualquer quebra de cortina, em outras palavras se a vazão é diminuída até certo valor, a cortina quebra e colunas individuais de fluido são formadas, como descrito por Pritchard [8] e mostrado na Fig. (1.10) Esta interpretação física pioneira permanece usada até hoje. Vazões críticas para transições entre as diferentes regiões de escoamentos foram determinados experimentalmente por Limat *et al.* [9] e Hu *et al.* [10].

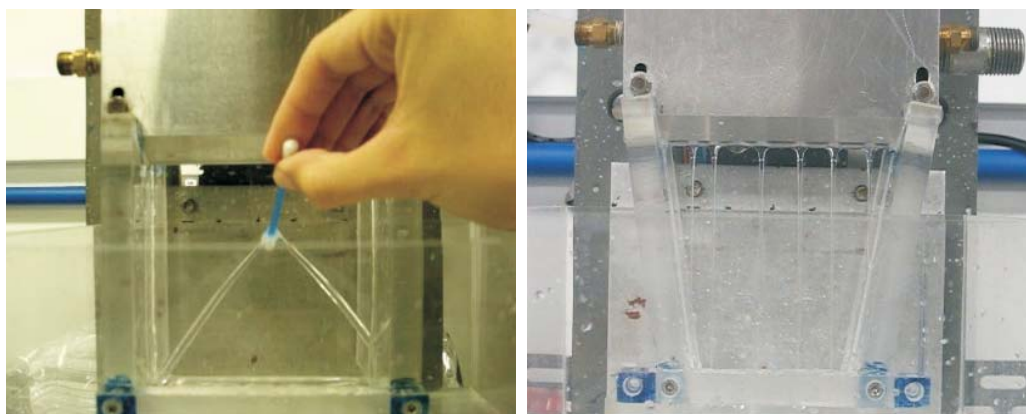


Figura 1.10: a) Perturbação da cortina. b) Cortina completamente desintegrada.

A quebra da cortina pode ser iniciada perto das guias ou dentro da cortina (longe da guia) pela geração de furos ocasionados por impurezas

(bolhas ou partículas pequenas). Enquanto o mecanismo de quebra perto das guias é importante, o grau de dificuldade de análise é maior que para a quebra por defeito local da cortina. Porém um dos últimos trabalhos feito pelo Roche *et al.* [11], que apresenta a resposta da cortina a perturbações locais, chegando a conclusão que o critério de estabilidade da cortina de líquido proposto pelo Brown falha: furos não necessariamente expandem para valores de $We > 2$. Assim a quebra por defeito local na cortina e o crescimento de um furo nela ainda não é esclarecido totalmente apesar dos estudos experimentais como Finnicum *et al.* [12] e De Luca [13], e teóricos como Lin *et al.* [14], De Luca *et al.* [15] e Teng *et al.* [16], principalmente devido a forte não-linearidade envolvida neste processo.

Zona de impacto: Nesta zona, a cortina de líquido impacta o substrato em movimento, troca de direção abruptamente e desloca o gás da superfície do substrato. Uma das superfícies livres termina na linha de contato dinâmico, onde o gás é substituído pelo líquido.

Kistler [1] foi o primeiro a pesquisar a evolução da forma da superfície livre e o campo de escoamento associado com esta região. Ele fez um estudo numérico, baseado no método de elementos finitos, para altos números de capilaridades onde o número de Reynolds $Re = \rho q/\mu$ e a razão das velocidades U/V (U é a velocidade do substrato e V é a velocidade de chegada da cortina ao substrato) são os parâmetros dominantes. Exemplos dos resultados obtidos são apresentados na Fig. (1.11).

Nesta região, dois mecanismos principais fixam os limites dos parâmetros de operação: 1) Se a velocidade do substrato for muito alta, ocorre entrada de ar entre o líquido e o substrato, como resultado do insuficiente deslocamento de gás que fica confinado entre o substrato e a camada de líquido de revestimento, sendo prejudicial para a obtenção de um revestimento uniforme (Kistler e Schweizer[4]. A entrada de ar é muitas vezes sinônimo de falha de molhamento dinâmico que, apesar de ter sido principal alvo de estudos de muitos trabalhos de pesquisa, é um dos fenômenos em dinâmica dos fluidos que não é muito bem entendido. Miyamoto e Scriven [17] apresentaram as hipóteses que “uma fina camada de ar está sempre entrando no escoamento”. Essa hipótese foi comprovada pelo trabalho de Muës *et al.* [18] e Miyamoto [19]. A entrada de ar, que provavelmente acontece durante um bem sucedido processo de revestimento é local e não afeta o escoamento global (o ar é dissolvido durante o revestimento). Para não causar nenhuma instabilidade no revestimento

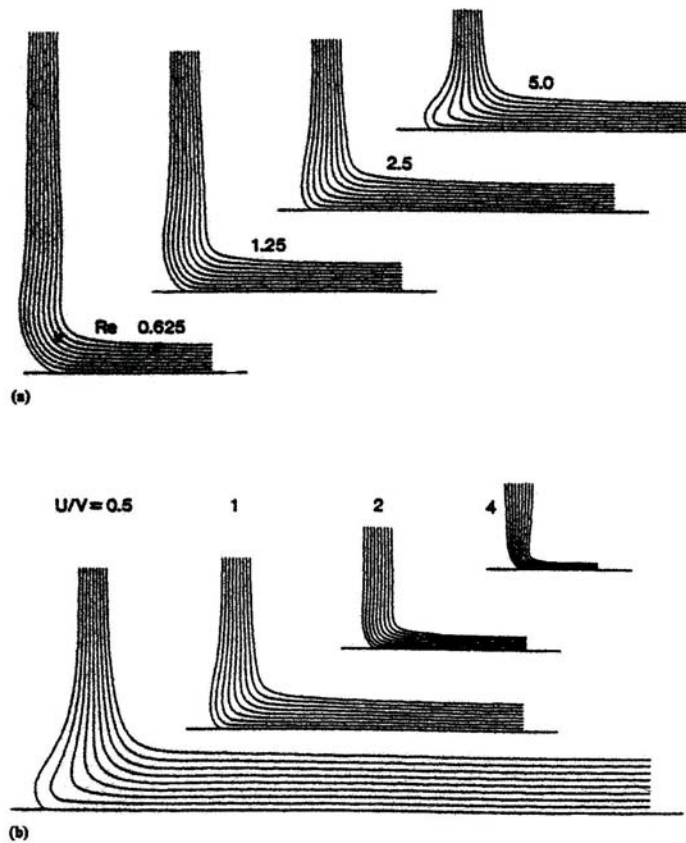


Figura 1.11: Forma da zona de choque $Ca = 100$ (Kistler 1983) a) $U/V = 1$
b) $Re = 2, 5$.

a camada de ar tem que ser suficientemente fina. 2) Se a velocidade do substrato for muito baixa, a forma da seção transversal desta zona desenvolve um calcanhar. É considerado limite por várias razões, pequenas recirculações do líquido aparecem, a recirculação é suscetível a instabilidades que podem ser periódicas, na direção transversal, ou caóticas; e a entrada de ar pode ocorrer a menores velocidades de substrato que no primeiro caso. A baixas velocidades do substrato, o calcanhar formado tem maior espessura que a cortina de líquido caindo.

A zona de impacto do processo de revestimento por cortina é particularmente um exemplo notável de molhamento dinâmico por duas razões: Primeiro um requisito para obter um bom revestimento é que o líquido molhe dinamicamente a superfície do sólido a revestir. Este tipo de processo de revestimento tem habilidade de revestir à altas velocidades, tipicamente da ordem de 1000 m/min (sem entrada de ar), que é atribuído a carga de pressão inercial da cortina de líquido suprimindo a entrada de ar na linha de contato dinâmico. Esta característica foi chamada de “*hydrodynamic assist*” por Blake *et al.* [20]. Nesse estudo experimen-

tal pode-se observar que, para uma dada velocidade de molhamento, o ângulo de contato medido entre a superfície livre e o substrato em movimento depende do campo de escoamento e da geometria na vizinhança da linha de contato dinâmico. Este fenômeno tem sido estudado por vários pesquisadores como Blake *et al.*[21], Blake *et al.*[22], Yamamura *et al.*[23], Clarke [24], Martson *et al.*[25] e Martson *et al.*[26]. Todos estes trabalhos mencionados mostram uma característica importante na mudança no comportamento da dependência entre viscosidade e máxima velocidade do substrato, usualmente inversamente proporcional, Benkreira [27].

Weinstein e Ruschak [28] mencionam que para influenciar o molhamento dinâmico, o escoamento deve ser alterado em uma escala longitudinal comparável à região perto da linha de contato dinâmico onde opera a hidrodinâmica não clássica, assim a pequena escala da zona de impacto no processo de revestimento por cortina, aproximadamente $100 \mu m$, pode ser crucial. Lukyyanov *et al.*[29] pesquisa teoricamente o processo de revestimento por cortina na escala típica de microfluidos e os resultados dele foram consistentes com os resultados de estudos experimentais feitos anteriormente na escala macroscópica.

Zona revestida Nesta zona, o escoamento de líquido de revestimento rapidamente se desenvolve para um escoamento de corpo rígido (*plug flow*). Este rápido desenvolvimento do escoamento é devido às fortes tensões cisalhantes impostas pelo substrato.

Se a cortina de líquido sai diretamente da fenda, de uma barra de revestimento, em vez de ser formada no lábio do aplicador, através de um deslizamento inclinado, a zona de alimentação liga diretamente à zona de formação da cortina onde o líquido adquire duas superfícies livres.

1.4

Janela de Operação

Kistler [1] mostrou com uma análise numérica, que altos números de capilaridades proporcionam uma boa aproximação do processo de revestimento por cortina à altas velocidades. As condições físicas limites pode ser dada no plano de Re versus U/V . A Fig. (1.12) mostra um esquema da janela de operação. Os limites do processo são dados por:

- Desintegração da cortina causada por uma vazão insuficiente.
- A cortina é puxada pelo substrato a baixas vazões e baixas velocidades de substrato.

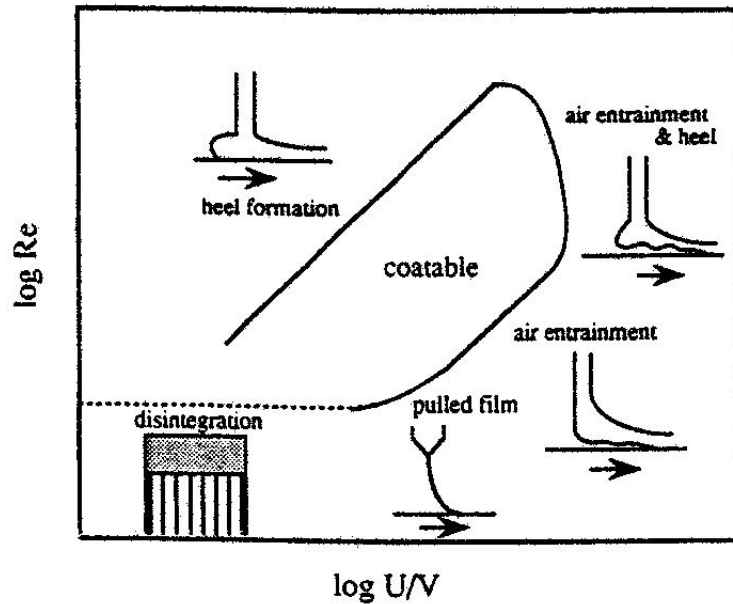


Figura 1.12: Janela de operação no processo de revestimento por cortina apresentada pelo Kistler[1].

- Entrada de ar à altas velocidades do substrato.
- Quando a cortina não é completamente movimentada na direção do substrato (escoa suavemente na direção contrária) produz-se a formação do calcanhar.
- Entrada de ar com formação de calcanhar à vazões grandes e altas velocidades de revestimento.

1.5 Líquido de Revestimento

O líquido de revestimento pode apresentar comportamento Newtoniano ou não-Newtoniano e dependendo de sua composição, o comportamento reológico dos líquidos pode ser muito complexo. A maioria destes líquidos são soluções poliméricas, suspensões e/ou polímeros fundidos e eles apresentam comportamento não-Newtoniano. Líquidos não-Newtonianos não podem ser caracterizados por uma única propriedade, como os líquidos Newtonianos que possuem viscosidade constante a uma temperatura, pressão e composição fixa. O comportamento de um líquido não-Newtoniano é caracterizado por uma viscosidade dependente do cisalhamento, viscosidade extensional (dependente da taxa de extensão), diferença de tensões normais não nula mesmo em escoamentos de cisalhamento simples e tensão dependente da história de deformação do material (efeito memória), que dão origem a comportamentos particulares que

exigem um estudo aprofundado a fim de otimizar os processos que utilizam tais líquidos.

1.6 Objetivos do Trabalho

No processo de revestimento, o escoamento ocorre em regiões de pequena escala, com presença de superfícies livres, e tipicamente apresenta regiões de intenso cisalhamento e extensão. Além disso os líquidos utilizados normalmente apresentam comportamento não-Newtoniano. Este trabalho tem como objetivo o estudo, numérico e experimental, da influência de diferentes parâmetros operacionais no processo de revestimento por cortina na zona de impacto e na zona de escoamento da cortina. Líquidos Newtonianos e não-Newtonianos serão utilizados neste trabalho, sendo que o tipo de comportamento do líquido pode alterar completamente a natureza do escoamento. Altas tensões elásticas, que alteram o balanço de força e conseqüentemente a estabilidade da cortina de líquido, estão presentes quando pequenas quantidades de polímeros flexíveis de alto peso molecular são contidas na solução de revestimento. Esta característica torna importante o estudo do comportamento deste tipo de líquidos no processo, para assim poder determinar o efeito das propriedades reológicas nos limites de estabilidade da cortina. Uma vez conhecido e entendido este efeito, formulações podem ser alteradas de forma a tornar o processo possível a vazões cada vez menores.

1.7 Roteiro da Teses

O capítulo 2 apresenta a modelagem numérica do escoamento que ocorre no processo de revestimento por cortina, onde se faz uma descrição detalhada do problema, a sua formulação e o método de solução utilizado. Nele são examinadas as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento junto com as condições de contorno utilizadas para ter completa a formulação matemática do problema. Também são apresentados o método de discretização utilizado para resolver este sistema de equações e o tratamento dado ao problema com superfícies livres.

O capítulo 3 apresenta os resultados numéricos do escoamento no processo de revestimento por cortina. A análise é focada na zona de impacto do processo onde é analisado o comportamento da linha de contato dinâmico em função dos diferentes parâmetros do processo.

A descrição da bancada experimental, a montagem e o procedimento usado para realizar a análise experimental do escoamento na zona de impacto,

assim como os resultados provenientes desta análise são mostrados no capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta uma análise experimental do processo de quebra de cortina. a vazão mínima abaixo da qual a cortina torna-se instável e a quebra é determinada em função das propriedades reológicas dos líquidos utilizados.

A retração da extremidade de um filme fino de líquido devido às forças capilares é estudada numericamente no capítulo 6.

E por último, no capítulo 7, como conclusão do trabalho, apresentam-se os comentários finais e as sugestões para trabalhos futuros.