

# 1 Introdução

Revestimento é o processo de aplicação de uma ou várias camadas de líquido sobre um substrato e posterior solidificação por evaporação de solvente, polimerização ou simplesmente resfriamento de polímero fundido.

A espessura da camada aplicada depende da finalidade do produto, geralmente entre 1 micrometro e 500 micrometros.

Diversos produtos consumidos diariamente passam pelo processo de revestimento em alguma etapa da fase produtiva. Fitas adesivas, etiquetas, mídia magnética, telas de cristal líquido e papéis em geral são alguns exemplos de uma imensa variedade existente.

Vários métodos de revestimento estão disponíveis e a escolha do método apropriado depende de requisitos específicos do produto (espessura de revestimento, tolerância de uniformidade de camada, etc.), propriedades do líquido a ser revestido (viscosidade, elasticidade, tensão superficial, etc.) ou disponibilidade do método no fabricante (Carvalho, 1995).

Uma classe especial de métodos de revestimento são os “métodos com vazão pré-fixada”, que utilizam barras de revestimento para a distribuição e aplicação do fluido na largura do substrato.

A barra de revestimento é um dispositivo feito de aço com uma entrada para o líquido, uma câmara interna para distribuição e uma fresta de saída do líquido (fresta de alimentação) que é posicionada de forma que o líquido vindo da barra se deposite sobre o substrato na forma de uma fina película.

A fig. (1) apresenta uma barra de revestimento típica.

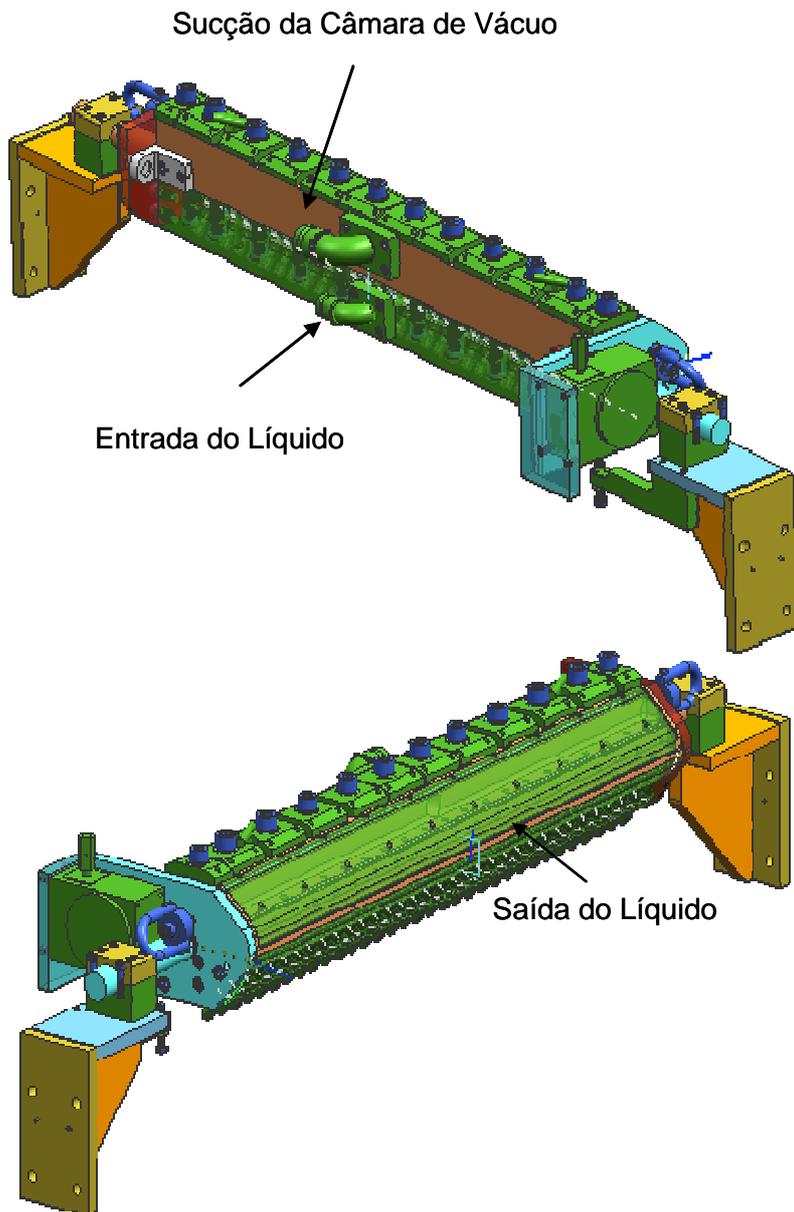


Figura 1 – Barra de revestimento por extrusão

A barra de revestimento é projetada para se obter uma espessura uniforme do líquido na sua fresta de alimentação, considerando-se as propriedades reológicas do líquido, a temperatura de trabalho e a faixa de vazão requerida. A fabricação requer rigidez estrutural para suportar as altas pressões internas, tolerâncias apertadas e acabamento superficial de qualidade. O custo de uma barra chega a US\$ 100.000,00 por metro de largura.

Todo método de revestimento possui uma faixa de ajuste de seus parâmetros de operação que possibilita seu funcionamento. Fora desta faixa de ajuste não é possível obter a camada uniforme de líquido, portanto o método não funciona.

A faixa de ajuste dos parâmetros de operação que permite o funcionamento do método de revestimento é chamada de janela de operação.

Alguns estudos foram feitos para a determinação da janela de operação de métodos de revestimento com vazão pré-fixada (Romero, 2003) e para a otimização do projeto da câmara interna da barra de revestimento (Kistler, 1987) (Sartor, 1990).

A porção externa da barra de revestimento adjacente e separada pela fresta de alimentação é chamada de lábio, fig. (2).

Inúmeras patentes foram depositadas atribuindo vantagens a certas geometrias de lábio para as barras de revestimento, como: aumento de velocidade máxima atingível a certa espessura, redução da espessura mínima a certa velocidade de revestimento, eliminação de recirculações e instabilidades no escoamento.

Com base nos estudos e experimentos realizados sabe-se que a geometria dos lábios da barra de revestimento tem um grande efeito no escoamento e por consequência pode alterar muito a janela de operação (Park et al., 2005).

Apesar de existirem inúmeros trabalhos sobre otimização da geometria dos lábios de barras de revestimento, a maioria absoluta aborda aspectos do escoamento em regime permanente, onde não há qualquer modificação temporal do campo de velocidade ou pressão.

Recentemente Romero & Carvalho (2008) utilizaram simulação numérica para analisar o processo de revestimento por extrusão (*slot coating*) em regime transiente. A variável analisada foi a amplitude de variação de espessura do revestimento em decorrência de oscilação periódica conhecida na distância entre os lábios da barra de revestimento e o rolo suporte do substrato (fresta de revestimento, fig.(2)).

O estudo demonstrou que modificações na geometria dos lábios da barra de revestimento podem alterar a amplitude de variação de espessura do filme revestido.

Além da geometria dos lábios, os parâmetros de processo (tamanho da fresta de revestimento, nível de vácuo, velocidade do substrato) e propriedades do líquido (viscosidade e tensão superficial) também alteram a amplitude de variação da espessura de revestimento.

O projeto ótimo dos lábios de uma barra de revestimento e o ajuste correto dos parâmetros de processo podem gerar vantagem competitiva para uma companhia em termos de maior produtividade e qualidade do produto, atributos altamente desejáveis no cenário competitivo atual.

O uso de *softwares* CFD (dinâmica de fluidos computacional) tem auxiliado no entendimento do escoamento na região da fresta de revestimento. A integração da simulação computacional à validação experimental é um grande passo no sentido da redução do tempo de projeto e aumento da probabilidade de sucesso.

O objetivo desta tese é entender como a geometria de lábios de barras de revestimento e os parâmetros de processo alteram a amplitude de variação da espessura do líquido revestido na ocorrência de uma oscilação periódica conhecida da fresta de revestimento. Estas oscilações estão sempre presentes em processos industriais.

Todos os resultados são obtidos por simulação computacional baseada no modelo matemático descrito no cap. 2.

A premissa básica é escoamento laminar, incompressível e isotérmico de fluido Newtoniano.

## 1.1 Escoamento com superfície livre

Escoamentos com superfície livre são caracterizados pela presença de interface líquido-gás e/ou líquido-líquido. Como a posição destas interfaces não é fixa, o domínio do escoamento não é conhecido, mas um resultado a ser determinado.

A fig. (2) mostra uma vista lateral de uma barra de revestimento. A região “B” contém as interfaces líquido-gás “c” e “d”.

Forças capilares atuam nas interfaces e se somam às forças viscosas, de inércia, do campo gravitacional e outras que influem no escoamento. Em problemas de superfície livre, a tensão superficial da interface é a propriedade adicional que aparece no sistema de equações que descreve o escoamento.

Escoamentos com superfície livre são representados por equações diferenciais altamente não lineares e na grande maioria das vezes só podem ser resolvidas por métodos numéricos.

O método de resíduos ponderados de Garlekin com geração de malhas e funções base de elementos finitos associados à resolução de sistemas algébricos não lineares pelo método de Newton é uma opção de sucesso para resolução de problemas com superfície livre (Carvalho, 1995).

A convergência dos métodos numéricos para obtenção da solução de um escoamento com superfície livre é dificultada pela existência de fortes não linearidades. A convergência do método de Newton é assegurada desde que a estimativa inicial esteja próximo o suficiente da solução. Assim surge a necessidade de técnicas que propiciem uma boa inicialização para o método de Newton (Zevallos & Carvalho, 2003).

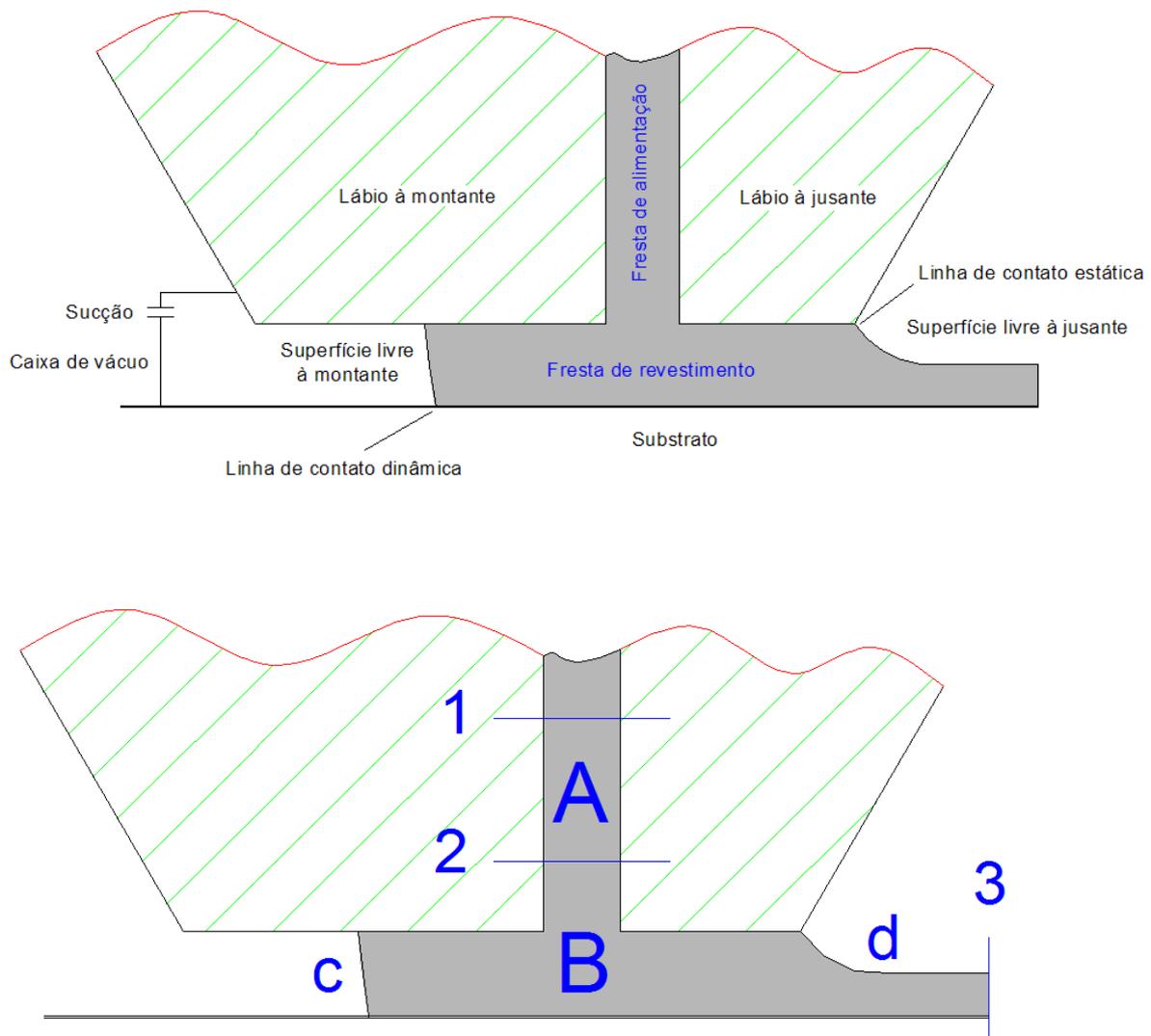


Figura 2 – Seção de uma barra de revestimento por extrusão mostrando a nomenclatura e as regiões com escoamento sem superfície livre (A) e com superfície livre (B)

Em escoamentos sem superfícies livres, o domínio físico em que o escoamento ocorre é bem conhecido e as equações que o regem podem ser aplicadas junto às devidas condições de contorno. Como exemplo deste tipo de escoamento pode-se citar o escoamento interno em barras de revestimento e tubos, onde o domínio físico é formado pelas paredes sólidas e pelas seções de entrada e saída do fluido. As condições de contorno aplicáveis são: não deslizamento e não penetração nas paredes e as condições de contorno sintéticas nas seções de entrada e saída.

O estabelecimento de um perfil de velocidade na seção de entrada e o estabelecimento de uma pressão de referência na seção de saída são condições de contorno sintéticas aplicáveis neste caso.

A região “A” da fig. (2) está delimitada pelas seções 1 e 2 e possui um escoamento sem superfície livre.

Dependendo da geometria e/ou da adoção de hipóteses simplificadoras em problemas sem superfície livre, pode-se conseguir uma solução analítica para a equação de Navier-Stokes, o que torna a análise mais fácil e rápida. Soluções analíticas para um grande número de casos de escoamentos simples sem superfícies livres podem ser encontradas na literatura (Bird et al., 1987).

## **1.2** **Escoamento de revestimento**

O escoamento de revestimento é um tipo de escoamento com superfície livre e está presente em todos os métodos de revestimento.

A função do processo de revestimento é a aplicação de uma camada fina e uniforme de material líquido sobre um substrato e posterior solidificação.

A espessura da camada depende da aplicação final do produto e pode variar entre 1  $\mu\text{m}$  ou menos para revestimento de silicone em papéis antiaderentes, a 500  $\mu\text{m}$  ou mais.

Os líquidos revestidos podem ser monômeros reativos, emulsões, dispersões de partículas, soluções poliméricas ou polímeros fundidos (Perez, 2004) (Perez & Carvalho, 2007).

O escoamento de revestimento bem sucedido é laminar, idealmente bidimensional e em regime permanente. Estas condições garantem a uniformidade transversal e longitudinal requeridas em produtos revestidos. Porém em condições

normais de produção, escoamentos completamente bidimensionais são inexistentes e variações espaciais e temporais estão sempre presentes em níveis aceitáveis.

O processo de revestimento 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.

Os métodos de revestimento se dividem em:

- a) Métodos com vazão pré-fixada (Fig. (3)), e;
- b) Métodos com vazão pós-fixada (Fig. (4)).

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.

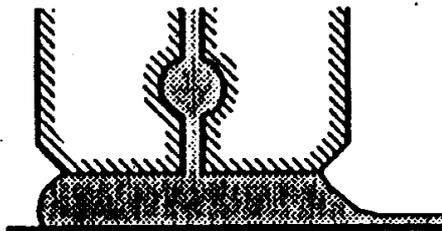


Figura 3 - Método de revestimento com vazão pré-fixada (*Coating fundamentals, University of Minnesota - Jun, 2003*)

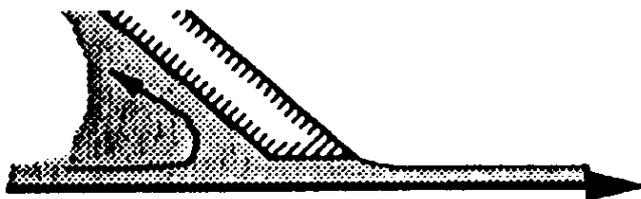


Figura 4 - Método de revestimento com vazão pós-fixada (*Coating fundamentals, University of Minnesota - Jun, 2003*)

Exemplos típicos de método de revestimento com vazão pré-fixada e método de revestimento com vazão pós-fixada são: extrusão, fig. (3), e faca raspadora, fig. (4).

A existência dos vários métodos de revestimento se deve a:

- a) inventores independentes;
- b) evolução de métodos de vazão pós-fixada para métodos de vazão pré-fixada;
- c) 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.

Como dito anteriormente, os vários métodos de revestimento foram desenvolvidos ao longo do tempo para atender certos requisitos do produto ou processo, porém todos têm uma característica em comum – apresentam um ou mais escoamentos com superfície livre.

O uso do número de capilaridade ( $Ca = \mu V / \sigma$ ), junto a outros adimensionais é comum na representação da janela de operação dos métodos de revestimento. O número de capilaridade representa a relação entre a força viscosa e a força capilar,  $\mu$  e  $\sigma$  são, respectivamente, a viscosidade e a tensão superficial do líquido e  $V$  é a velocidade característica do escoamento.

### 1.3 Barras de revestimento

O revestimento de substratos em movimento com o uso de barras de revestimento é um processo amplamente utilizado na indústria. A principal vantagem deste processo é a uniformidade da espessura do líquido revestido e em

alguns casos a possibilidade de revestir várias camadas simultaneamente na mesma etapa do processo.

O uso de barras de revestimento é característica dos métodos de vazão pré-fixada, pois todo o líquido que é enviado para a cavidade da barra de revestimento é aplicado no substrato.

Vários métodos utilizam barras de revestimento, dentre os principais estão o revestimento por cortina, o revestimento por cascata e o revestimento por extrusão (*slot coating* no caso de líquidos de viscosidade baixa ou moderada, e *extrusion coating* no caso de líquidos elásticos).

As fig. (5) e (6) mostram várias geometrias de lábio do processo de revestimento por extrusão e o processo de revestimento por extrusão sobre substrato tensionado, respectivamente.

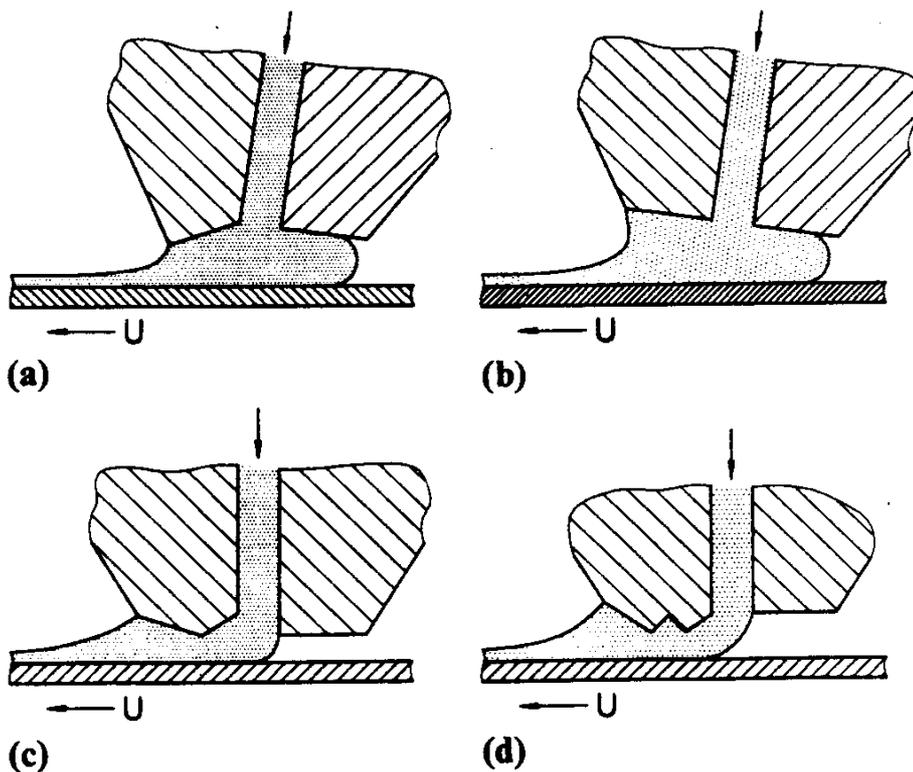


Figura 5 - Método de revestimento por extrusão (Kistler S., *Liquid film coating*, 1997)

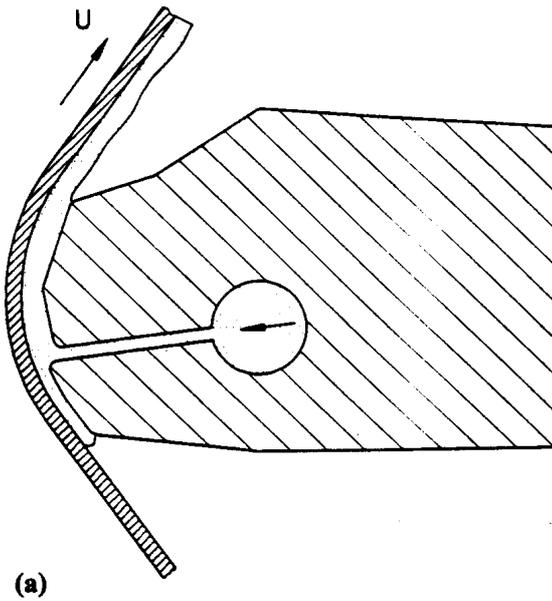


Figura 6 - Método de revestimento por extrusão sobre substrato tensionado (Kistler S., *Liquid film coating*, 1997)

A fig. (7) mostra uma visão lateral do processo de revestimento por cascata, muito utilizado para revestir várias camadas ao mesmo tempo.

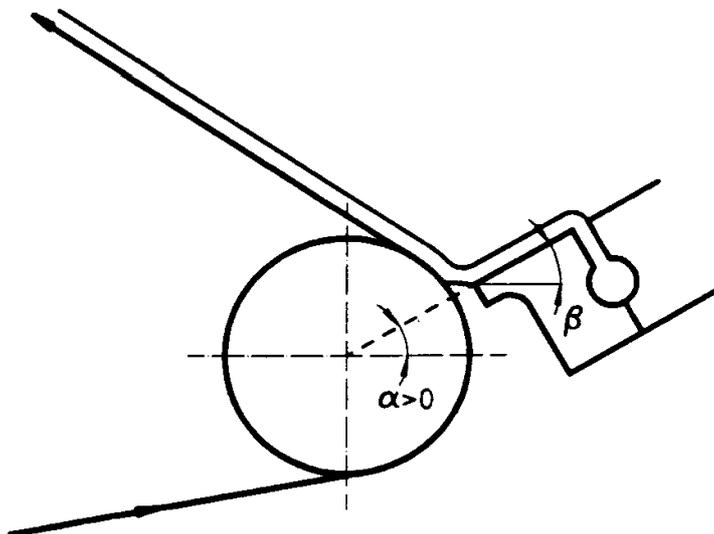


Figura 7 - Método de revestimento por cascata (Kistler S., *Liquid film coating*, 1997)

A fig. (8) representa o processo de revestimento por cortina de duas camadas ao mesmo tempo.

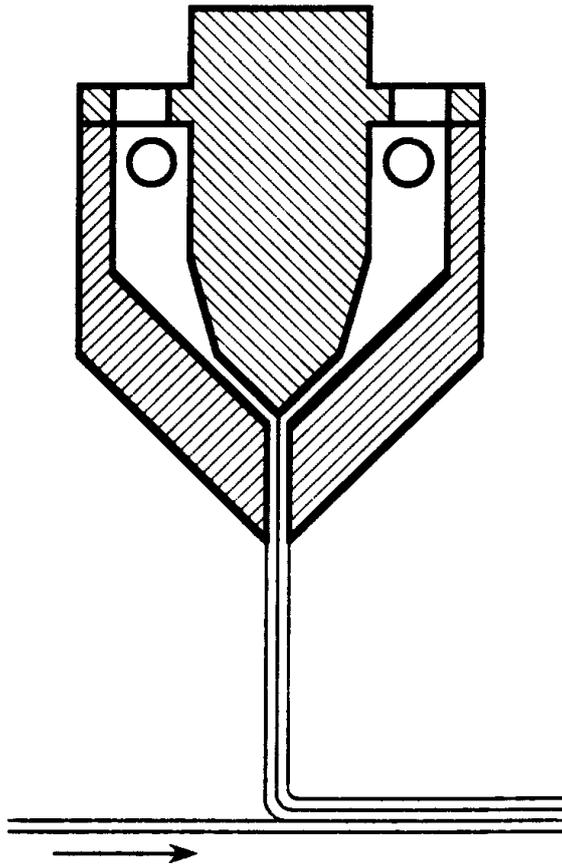


Figura 8 - Método de revestimento por cortina (Kistler S., *Liquid film coating*, 1997)

Os métodos de vazão pré-fixada apresentam algumas vantagens sobre os métodos de vazão pós-fixada, como: espessura de revestimento independente das propriedades do líquido a ser revestido, redução da probabilidade de contaminação do líquido pela eliminação de piscinas abertas de fluido, fácil ajuste da espessura de revestimento pelo controle de vazão, etc.

A grande desvantagem dos métodos que utilizam barra de revestimento é o próprio custo da barra e do sistema de dosagem do fluido.

O sistema de dosagem deve ser projetado para fornecer uma vazão constante de fluido para a barra de revestimento sob quaisquer condições admissíveis de pressão. Os principais componentes do sistema de dosagem são: bomba de deslocamento positivo (engrenagens ou parafuso), filtro antes da barra de revestimento e componentes de segurança (disco de ruptura e pressostatos) contra pressão excessiva na linha.

A rotação da bomba dosadora deve ser proporcional à velocidade do substrato para garantir espessura constante do revestimento.

O projeto geral de uma barra de revestimento envolve variáveis associadas à uniformidade de distribuição do líquido na largura desejada e à resistência estrutural necessária para suportar as altas pressões internas (Sartor, 1990), além de variáveis associadas ao projeto externo.

É interessante notar a grande flexibilidade de utilização da barra de revestimento quando utilizada no processo de revestimento por extrusão. A barra pode ser utilizada para revestir substratos suportados por rolo rígido, rolo elastomérico ou sem rolo suporte. Nos dois últimos casos a presença de uma superfície de contorno elástica (rolo de borracha ou o próprio substrato tensionado) causa efeitos adicionais no campo de escoamento, classificado como escoamento elasto-hidrodinâmico.

O método de revestimento por extrusão de líquidos com comportamento elásticos tem a vantagem que a fresta de revestimento é da ordem de milímetros, enquanto que no processo de extrusão de líquidos inelásticos a fresta de revestimento é da ordem de microns. O aumento da fresta reduz a possibilidade de quebra do substrato na passagem de emendas e a incidência de riscos decorrentes do aprisionamento de partículas entre o rolo suporte e a barra de revestimento.

Em particular, o processo de revestimento por extrusão sobre substratos tensionados tem sido muito usado para obtenção de espessuras de revestimento pequenas a altas velocidades.

Muitos fabricantes têm se especializado no projeto e produção de barras de revestimento, e um grande número de opções está disponível no mercado. Algumas empresas manufactureiras de produtos revestidos fabricam suas próprias barras de revestimento e mantêm seus projetos como segredos industriais ou protegidos por patentes.

Neste estudo o foco está no método de revestimento por extrusão. A fig. (9) mostra este método de revestimento em vista lateral com alguns detalhes.

Note que há uma caixa de vácuo posicionada a montante da barra de revestimento e sua função é estabilizar o escoamento na fresta de revestimento, ampliando a janela de operação para velocidades maiores e/ou espessuras menores.

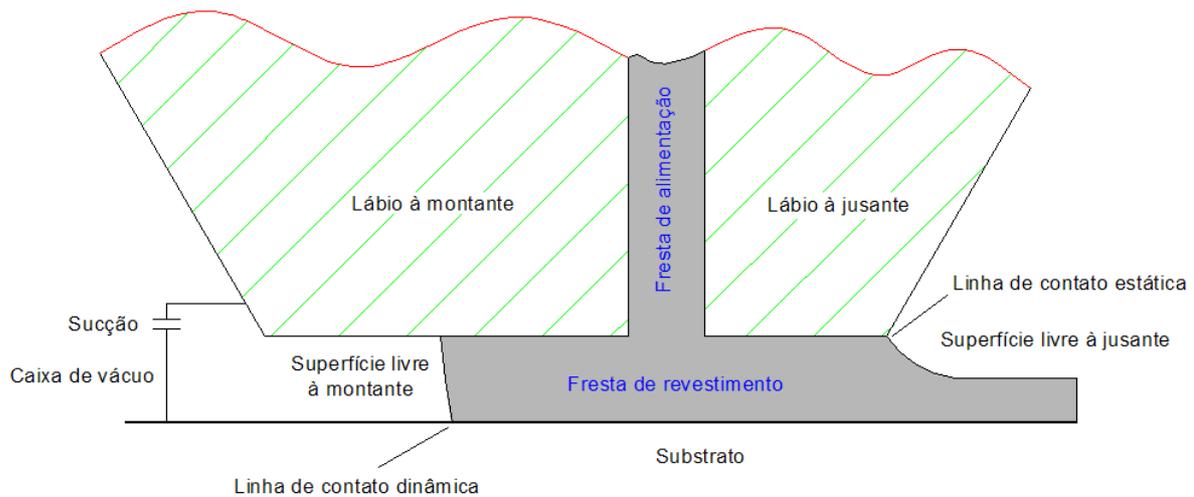


Figura 9 – Visão lateral do método de revestimento por extrusão

#### 1.4 Importância da geometria dos lábios da barra de revestimento

Estudos anteriores sobre revestimento em regime permanente utilizando barras de revestimento (Sartor, 1990) (Romero, 2003) (Park et al., 2004) têm mostrado que uma das variáveis importantes no projeto da barra é a geometria dos lábios. Esta tem impacto direto na máxima velocidade que pode ser atingida pelo processo a uma dada espessura ou a mínima espessura que pode ser atingida a uma dada velocidade.

As fig. (10), (11) e (12) ilustram o grande impacto que a geometria dos lábios e a fresta de revestimento têm na janela de operação do processo de revestimento por extrusão. Na fig. (12) a janela de operação é muito mais ampla que nos outros dois arranjos.

O eixo horizontal é a velocidade do substrato e o eixo vertical é o nível de vácuo utilizado.

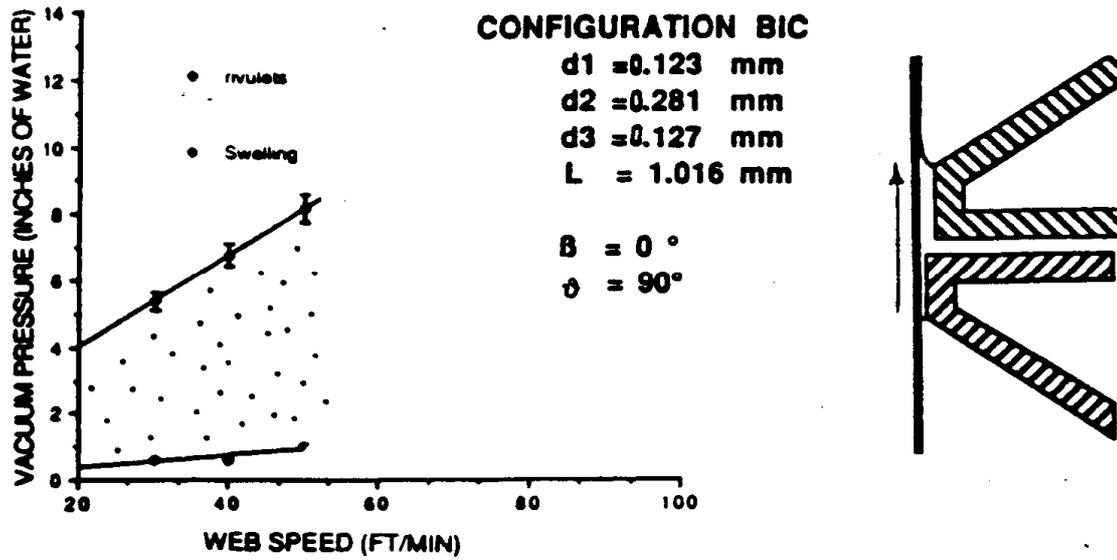


Figura 10 – Janela de operação de uma configuração específica de barra de revestimento (Sartor L., 1990)

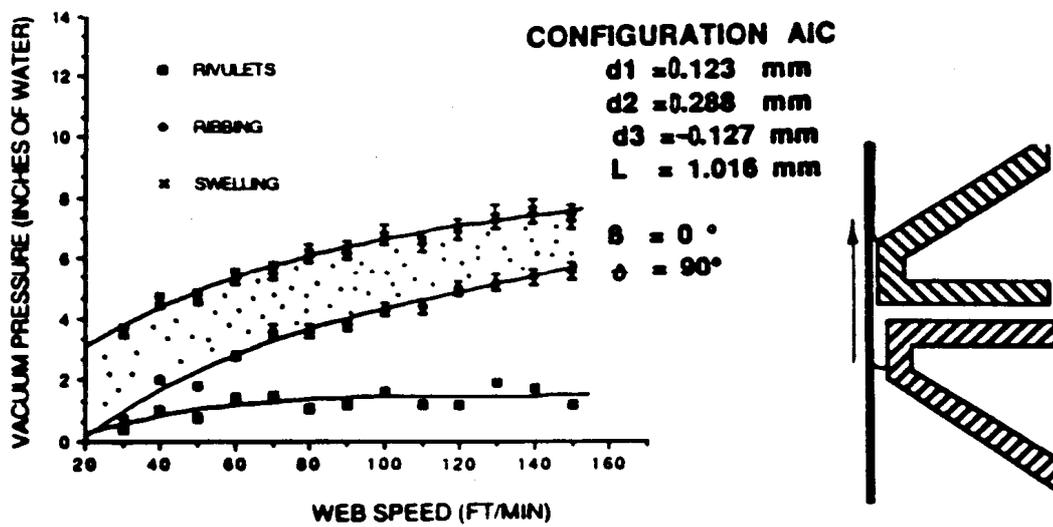


Figura 11 – Janela de operação de uma configuração específica de barra de revestimento (Sartor L., 1990)

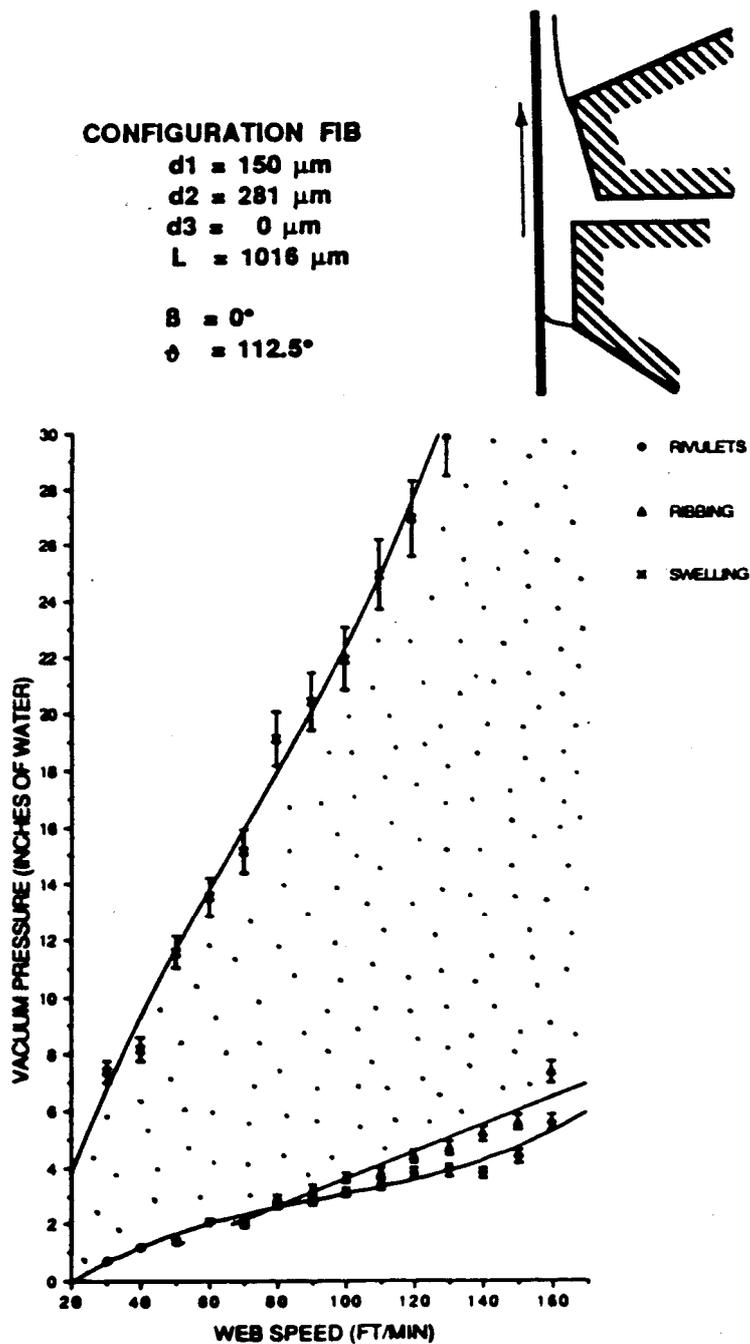


Figura 12 – Janela de operação de uma configuração específica de barra de revestimento (Sartor L., 1990)

As fig. (13) e (14) apresentam muitas geometrias de barras de revestimento que foram patenteadas ao longo dos anos e que dizem apresentar melhor performance para dado produto.

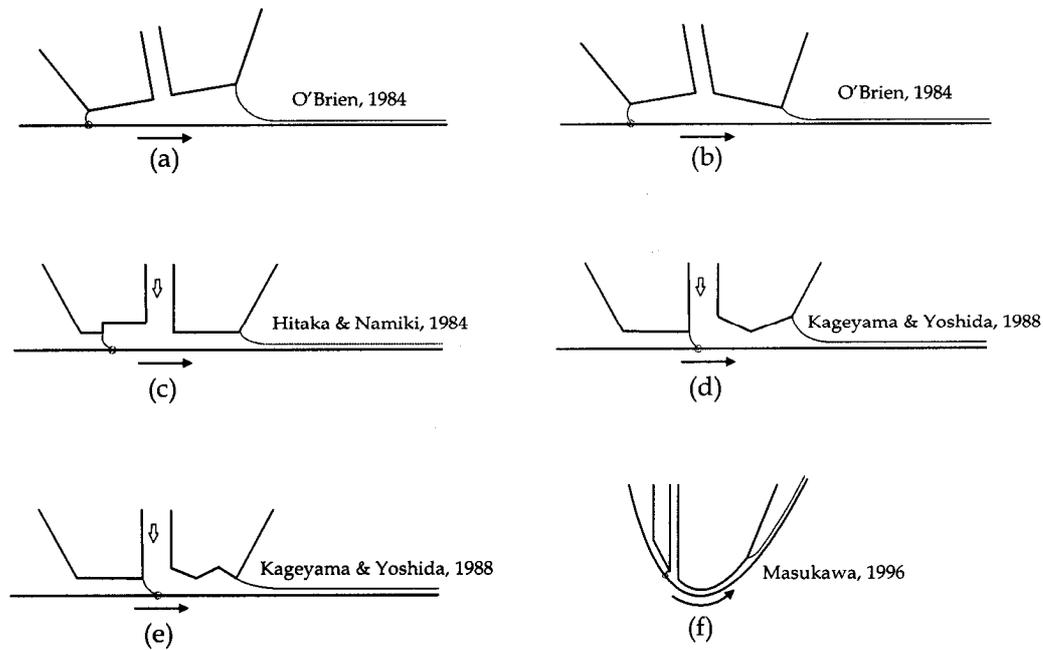


Figura 13 – Patentes de barras de revestimento mostrando diferentes geometrias externas (Romero, 2003)

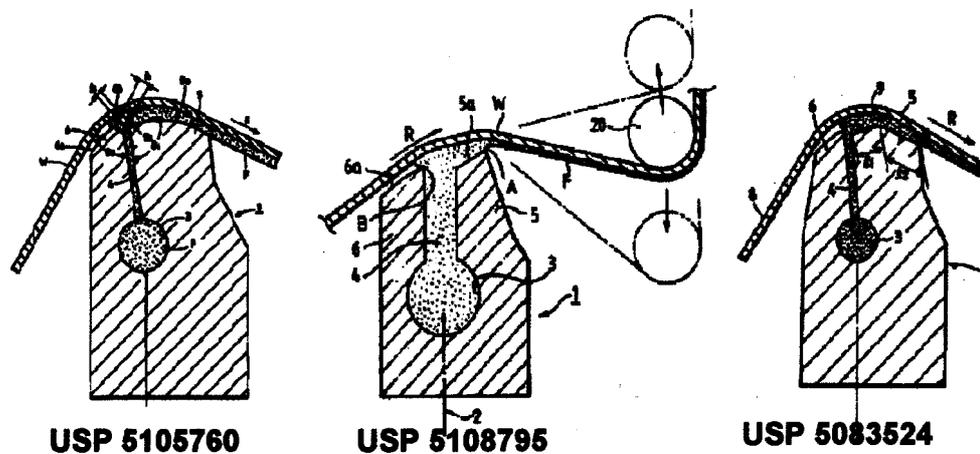


Figura 14 – Patentes de barras de revestimento mostrando diferentes geometrias externas (Park, 2004)

Não há informação disponível descrevendo uma metodologia sistemática para projeto dos lábios da barra de revestimento nem mesmo para otimização de variáveis do escoamento em regime permanente (máxima velocidade a dada espessura, mínima espessura a dada velocidade, ausência de recirculações, etc), embora deva haver um critério de projeto baseado em dados experimentais e/ou simulação numérica. Além disso, a escolha da configuração ótima não deve ser

baseada apenas no escoamento em regime permanente. Oscilações estão sempre presentes no processo real e o projeto ideal deve minimizar o efeito destas oscilações na espessura do filme revestido.

A influência da geometria dos lábios da barra de revestimento para situações transientes foi estudada por simulação numérica por Romero & Carvalho (2008).

A geometria dos lábios da barra de revestimento e seu impacto no escoamento de revestimento é somente um exemplo de como as condições de contorno afetam o escoamento.

A definição do contorno ótimo para um escoamento é um problema de ampla aplicação prática, tanto para escoamentos internos como de superfície livre.

## 1.5

### **Métodos numéricos de otimização**

Uma rotina para otimização envolve uma função objetivo que se queira maximizar ou minimizar, variáveis de projeto e, geralmente, algumas restrições nos valores possíveis destas variáveis de projeto. A relação funcional entre a função objetivo e as variáveis de projeto nem sempre é conhecida.

Os problemas de otimização podem ser classificados pela:

- Natureza da função objetivo e das restrições nas variáveis de projeto: linear ou não linear, convexa ou não convexa.
- Número de variáveis de projeto: pequeno ou grande.
- Suavidade da função objetivo e restrição nas variáveis de projeto: diferenciável ou não diferenciável.
- Presença ou não de restrições nas variáveis de projeto.

Há um grande número de algoritmos para otimização de funções de uma ou várias variáveis, todos iterativos. Alguns não necessitam avaliação das derivadas (métodos diretos), outros necessitam desta avaliação (métodos gradientes). De uma forma ou outra todos os algoritmos de otimização procuram pontos estacionários dentro do domínio das variáveis de projeto, ou seja, pontos ao redor dos quais a função objetivo não sofre decréscimo.

Algoritmos de otimização numérica raramente levam a ótimos globais, mesmo porque muitas vezes não é possível saber se um ponto extremo é ótimo

local ou global. O algoritmo utilizado e a estimativa inicial influem na velocidade de convergência para o ponto ótimo.

Em geral os métodos gradientes são mais elaborados e convergem mais rapidamente para o ponto ótimo, porém requerem o trabalho adicional da determinação das derivadas primeiras e talvez das derivadas segundas.

As características desejáveis de um bom algoritmo de otimização são (Nocedal & Wright, 1999):

- Robustez: funcionar bem para uma dada classe de problemas, independentemente da escolha inicial do valor das variáveis.
- Eficiência: não utilizar muita memória ou levar muito tempo para processamento.
- Precisão: ser pouco sensível a erro nos dados e a erro de arredondamentos.

Neste estudo é utilizado um algoritmo de minimização em caixa com região de confiança (Martinez & Santos, 1995) para determinação de pontos no espaço da fresta de revestimento,  $H_d$  (fig. (15)), e nível de vácuo que reduzem o fator de amplificação da variação da espessura.

As variáveis geométricas externas de uma barra de revestimento por extrusão estão ilustradas na fig. (15).

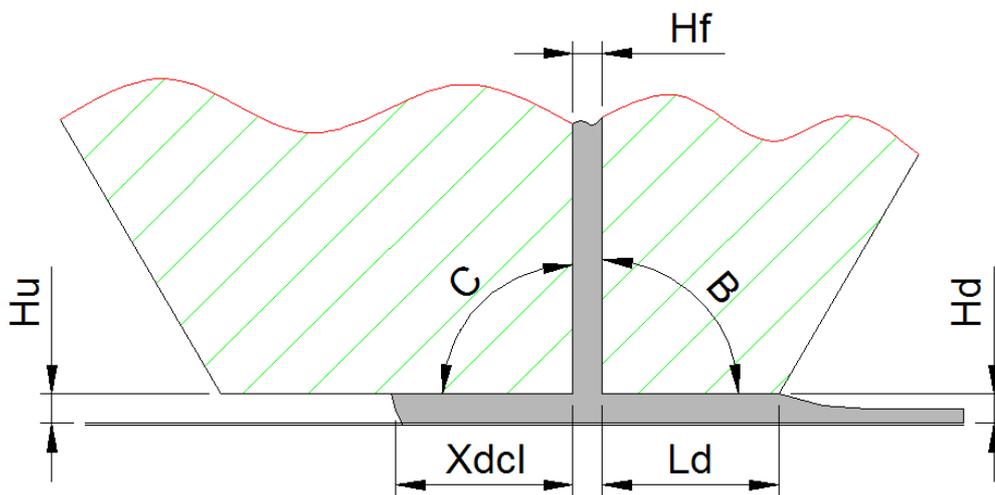


Figura 15 – Variáveis geométricas de uma barra de revestimento por extrusão