

1 Introdução

1.1 Generalidades sobre processos de revestimento

Processo de revestimento consiste na deposição de uma camada fina de líquido aplicada sobre uma superfície sólida (substrato) em movimento, como mostrado na Figura 1.1. Fisicamente o gás em contato com o substrato é substituído pelo líquido; assim durante todo o processo interagem três fases: sólido, líquido e gás.

Este processo é uma parte fundamental na fabricação de diferentes produtos manufaturados tais como folhas poliméricas, fitas magnéticas e adesivas, folhas de aço galvanizado, placas de impressão, dentre muitos outros como citados em S.F.Kistler e P.M. Schweizer (1997). Frequentemente a etapa de revestimento no processo de manufatura é significativo em custo, tempo envolvido, e o nível de tecnologia requerida para a produção. Para serem competitivos dentro do mercado, todos os processos de manufatura deveriam ser eficientes e manter um aceitável nível de controle de qualidade.

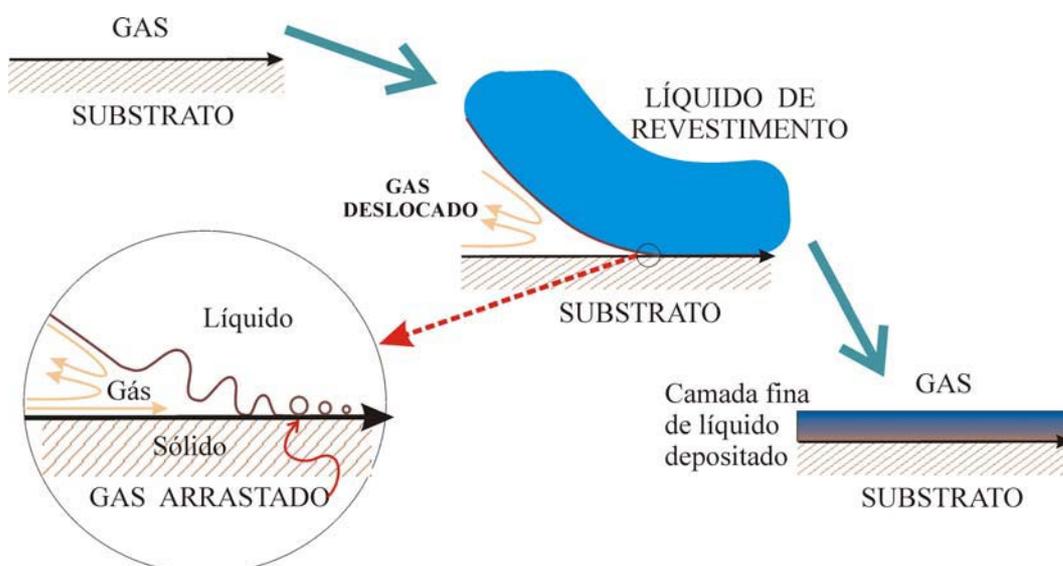


Figura 1.1 - Revestir é deslocar o gás da superfície pelo líquido, assim durante todo processo de molhamento interagem três fases: Sólido Líquido e Gás.

De maneira geral, o processo de revestimento de um substrato pode ser dividido em quatro etapas:

Alimentação do líquido a revestir;

Aplicação do líquido ao substrato;

Distribuição ao longo da largura do substrato;

Fixação em um filme uniforme.

A ordem em que as diferentes etapas são realizadas distingue os processos de revestimento. Os métodos de revestimento são variados em forma e custo.

Os métodos de revestimento podem ser classificados de um modo geral em três tipos:

- a) **Vazão Auto-fixada**, o controle da espessura do filme é feito simultaneamente à aplicação da camada de líquido sobre o substrato, como no processo de revestimento por imersão (Figura 1.2e).
- b) **Pré-fixada**, o controle de espessura do filme é feito antes da etapa de aplicação, como por exemplo no processo de revestimento por extrusão (Figura 1.2a).
- c) **Pós-fixada**, o controle de espessura do filme é feito após a aplicação. Uma grande quantidade de líquido é depositada sobre o substrato e o excesso removido posteriormente, como no processo de faca raspadora (Figura 1.2d).

Nos processo de vazão pré-fixada, a espessura da camada de líquido depositada independe das propriedades do líquido e das condições de operação de processo.

A Figura 1.2 mostra alguns métodos de revestimento comumente utilizados: revestimento por Extrusão (a), revestimento por cortina (b), por rotação direita (c), faca raspadora (d), de imersão (e). Uma Descrição mais detalhadas dos processos de revestimento podem ser encontrada em S.F.Kistler e P.M. Schweizer (1997).

A escolha de um determinado método para uma aplicação específica requer uma ampla experiência, são diversos os fatores que devem ser levados em consideração:

- a) Número de camadas funcionais do produto,
- b) Espessura final da camada líquida a ser depositada, que geralmente varia entre 10 μ m e 100 μ m,

- c) Propriedades do líquido (viscosidade, tensão superficial e densidade), a maioria destes fluidos possui um comportamento não newtoniano,
- d) Precisão, uniformidade e continuidade da camada a ser depositada, sendo que o grau de uniformidade depende da aplicação final do produto (produtos óticos e magnéticos possuem graus de uniformidade mais rígidos que produtos adesivos, por exemplo).
- e) Velocidade do substrato, que não pode ser aumentada indiscriminadamente, pois existe uma determinada velocidade crítica na qual o escoamento na região de aplicação torna-se instável comprometendo a uniformidade da camada de líquido depositado.
- f) Tipo de substrato que pode ser liso, rugoso, flexível, rígido, poroso, impermeável, etc.

Os diversos critérios para a seleção do método de revestimento são discutidos por Cohen e Guttrof (1992).

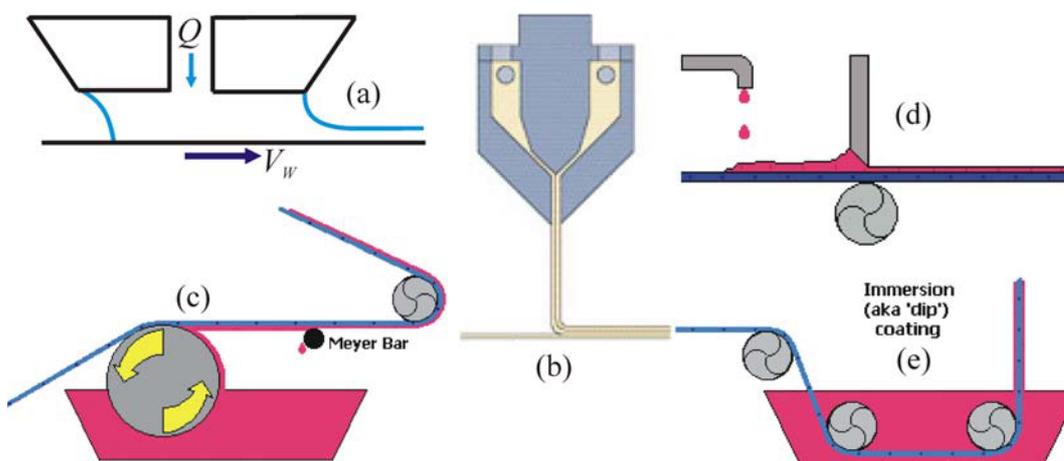


Figura 1.2 – Alguns métodos de revestimento: (a) por extrusão, (b) por cortina, (c) de rotação direta, (d) tipo faca raspadora, (e) de imersão.

1.2

Método de Revestimento por Extrusão

O método de revestimento por Extrusão é um dos mais utilizados dentro os métodos com vazão pré-fixada. Como já comentado no item anterior, todo o líquido bombeado para a barra de revestimento é depositado sobre o substrato. Assim, a espessura média de filme revestido, t , é determinada pela vazão de alimentação Q , largura do revestimento na direção transversal ao substrato W , e a

velocidade do substrato V_w , mas é independente das propriedades reológicas do líquido a revestir como indicado em S.F.Kistler e P.M. Schweizer (1997).

1.2.1

Descrição geral do processo de revestimento por Extrusão

Como mostrado na Figura 1.3, o líquido do revestimento é bombeado para a barra de revestimento. Dentro da barra de revestimento, o sistema de distribuição consiste de uma câmara de distribuição e de uma fenda de alimentação, fornecendo uma vazão de líquido uniforme ao longo da largura de revestimento W . A fenda de alimentação separa os lábios à montante e à jusante. O líquido entra em contato com o substrato formando a região de aplicação, que é delimitada pelas superfícies da barra e do substrato separados por uma distância H , e pelas interfaces gás-líquido à montante e à jusante. A Figura 1.4 apresenta uma representação bi-dimensional da região de aplicação.

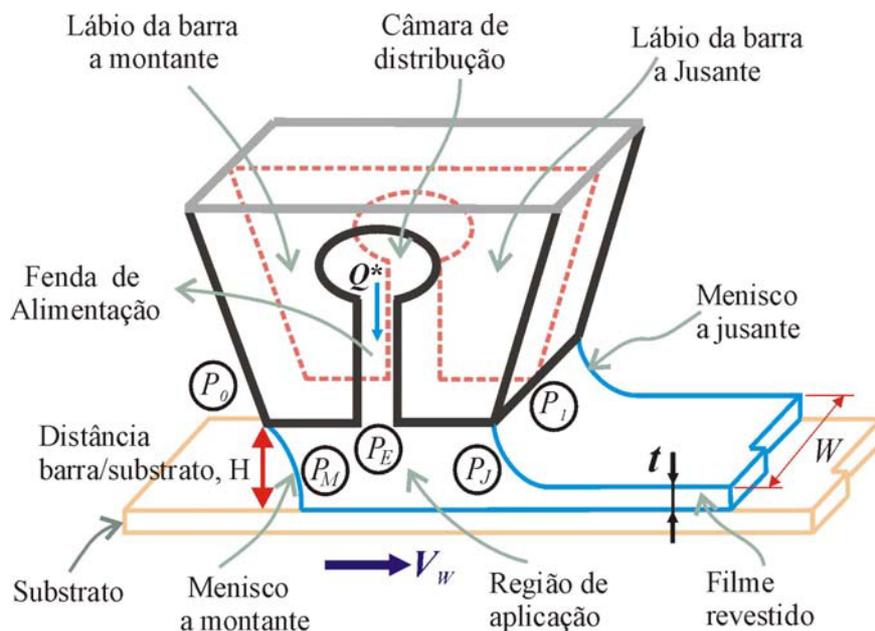


Figura 1.3 - Esquema típico do processo de revestimento por Extrusão, mostrando seus parâmetros mais importantes: Q^* é a vazão de alimentação; P_E , P_M , P_J são as pressões nas diferentes regiões de aplicação; P_0 , P_1 são as pressões à montante e à jusante.

O método de revestimento por Extrusão é bastante versátil para revestir camadas únicas sobre um substrato. Com uma dada geometria externa da barra, uma ampla faixa de espessura da camada revestida pode ser obtida com viscosidade do líquido de revestimento variando de 1 mPa-s até milhares de Pa-s.

As velocidades do substrato podem estar na faixa de 0,1 m/s a 5 m/s. A mínima espessura de revestimento é função da velocidade do substrato. Algumas aplicações industriais utilizam o revestimento por Extrusão para depositar camadas com espessura inferior a 10 μ m.

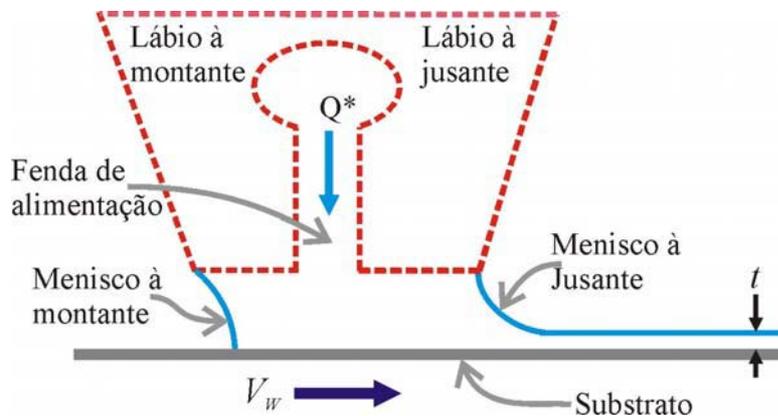


Figura 1.4 - Esquema bi-dimensional do processo de revestimento por Extrusão (secção de corte mostrado na Figura 1.3).

Alguns exemplos dos materiais revestidos usando o método de revestimento por Extrusão são materiais fotossensíveis, suspensões magnéticas, ceras, tintas, adesivos quentes, borrachas e espumas (Aurim 1985; Campbell 1980, Lippert 1987). Revestimento por Extrusão pode ser usado também para aplicações simultâneas de camadas múltiplas. Neste caso, a barra de revestimento possui duas ou mais fendas de alimentação.

1.2.2

Descrição dos equipamentos no processo de revestimento por Extrusão

Os elementos básicos dos processos de revestimento por Extrusão são mostrados na Figura 1.5. O líquido de revestimento é bombeado desde a linha de preparação até a barra de revestimento. O atenuador de pulsações reduz as oscilações induzidas pelo sistema de alimentação, que poderia criar instabilidades no escoamento. O sistema de filtragem detém as impurezas e as partículas grandes para prevenir defeitos no produto final. Detalhes sobre preparação de líquidos e transporte até a barra de alimentação são discutidos por Schweizer, P. (1992).

O equipamento principal no processo é a barra de revestimento. Diferentes geometrias de barras de revestimentos são apresentadas na literatura de patentes, publicações e folhetos de fabricantes de barras.

Barra de Revestimento

A barra de revestimento é usada para aplicar a camada de líquido uniforme sobre o substrato. O desempenho de uma barra é avaliado pela uniformidade do filme de líquido (i.e., direção transversal à direção de movimento do substrato) ao longo da largura da barra. A uniformidade da vazão de alimentação depende da configuração da câmara de distribuição, da fenda de alimentação, da qualidade da bomba de alimentação e das propriedades do líquido.

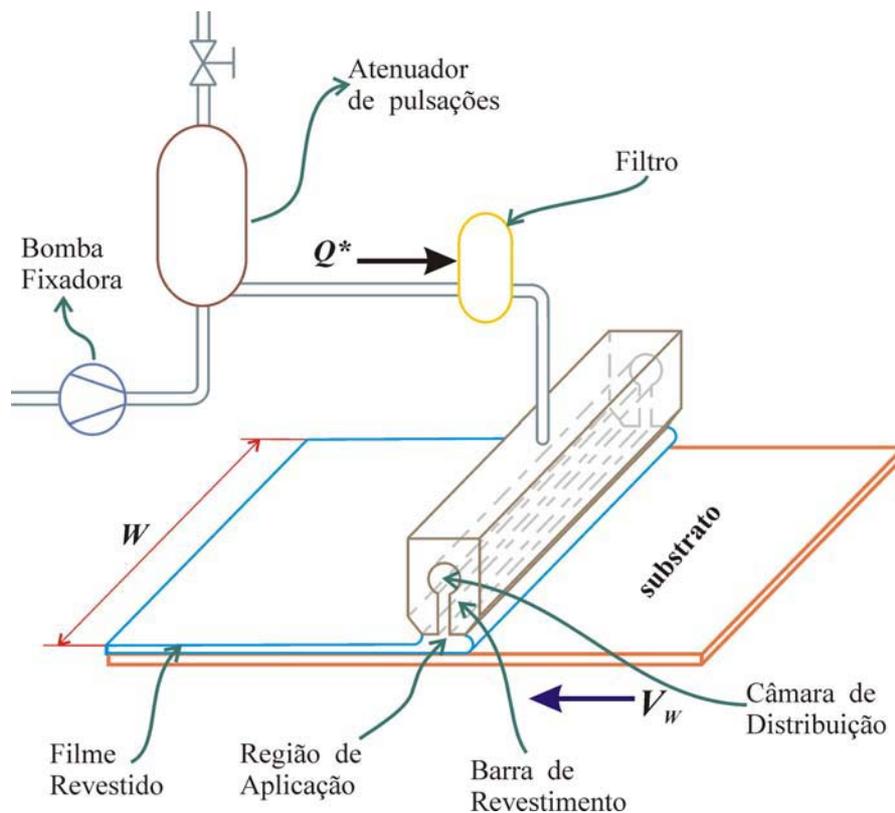


Figura 1.5 - Esquema dos equipamentos básicos que estão vinculados com o processo revestimento por Extrusão.

O princípio de operação da barra de revestimento

O princípio da distribuição do líquido ao longo da largura de uma barra de revestimento é esquematizado na Figura 1.6. A resistência ao escoamento na direção transversal à barra dentro da câmara de distribuição é bem menor do que a resistência do escoamento através da fenda de alimentação de líquido. As geometrias da cavidade de distribuição e da fenda devem ser determinadas de forma a obter uma vazão constante ao longo da largura através da fenda. Steven J. Weinstein e Kenneth J. Ruschak (2004) desenvolveram uma estimativa do desempenho de uma barra de revestimento levando em conta a variação da

viscosidade do líquido com a taxa de deformação. Eles consideram a viscosidade na câmara de distribuição μ_c diferente da viscosidade na fenda μ_f , dado que as taxas de deformação nas fendas são bem maiores. O escoamento na barra é predominantemente viscoso e a razão da queda de pressão ao longo da cavidade ΔP_c e na fenda ΔP_f é dada por:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_f} \propto \left(\frac{\mu_c}{\mu_f} \right) \left(\frac{W^2 H_s^3}{L_f A^2} \right); \quad (1-1)$$

onde $W/2$ é a distância da entrada à extremidade da barra (a barra tem uma largura de W), H_s é a altura da fenda, L_f é um comprimento característico da fenda, e A é uma área de secção característica da cavidade, ver Figura 1.6.

O desempenho da barra melhora quando a relação de $\Delta P_c / \Delta P_f$ da equação acima decresce e a cavidade se aproxima a um reservatório com pressão constante. O segundo termo da equação mencionada indica a eficácia da pequena altura da fenda, H_s , e da maior área da cavidade.

A geometria da barra é alterada para incrementar o seu desempenho. Por exemplo, uma diminuição de L_f ao longo da largura compensa em parte a queda de pressão ao longo da cavidade ver Figura 1.6a.

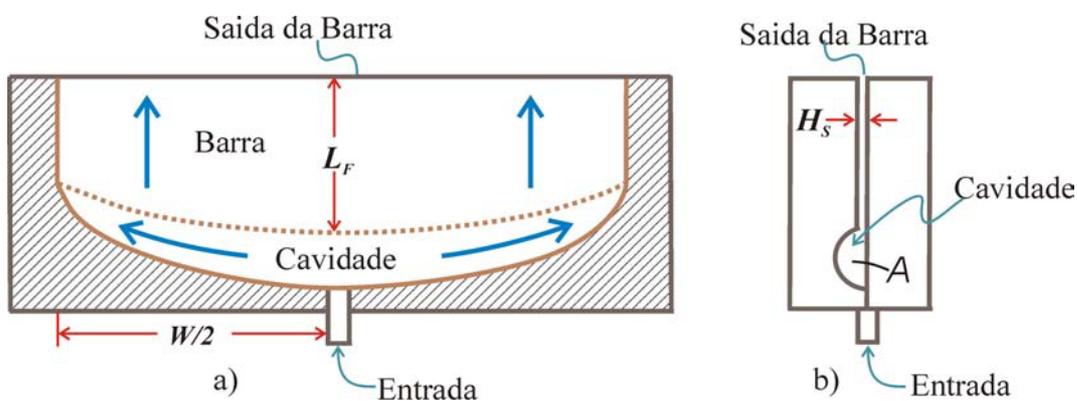


Figura 1.6 - Esquema geométrico da barra de revestimento com cavidade única. a) Vista de planta; b) Vista frontal. As setas na cavidade e ao longo da fenda indicam a predominância do escoamento nessas direções.

Configurações típicas das barras de revestimento

Existem muitas variantes nas configurações externas da barra de revestimento que são usadas na indústria, como por exemplo: configurações com diferentes formas dos lábios, diferentes inclinações, e com várias fendas de alimentação dependendo do número de camadas do produto final. Cada tipo tem

uma aplicação determinada e muitas empresas têm suas próprias tecnologias criadas para propósitos específicos. Algumas das configurações mais difundidas são apresentadas na Figura 1.7, Figura 1.8 e na Figura 1.9. Uma extensa explicação referente às vantagens e desvantagens de cada configuração é discutida por Sartor (1990) e Gates (1999).

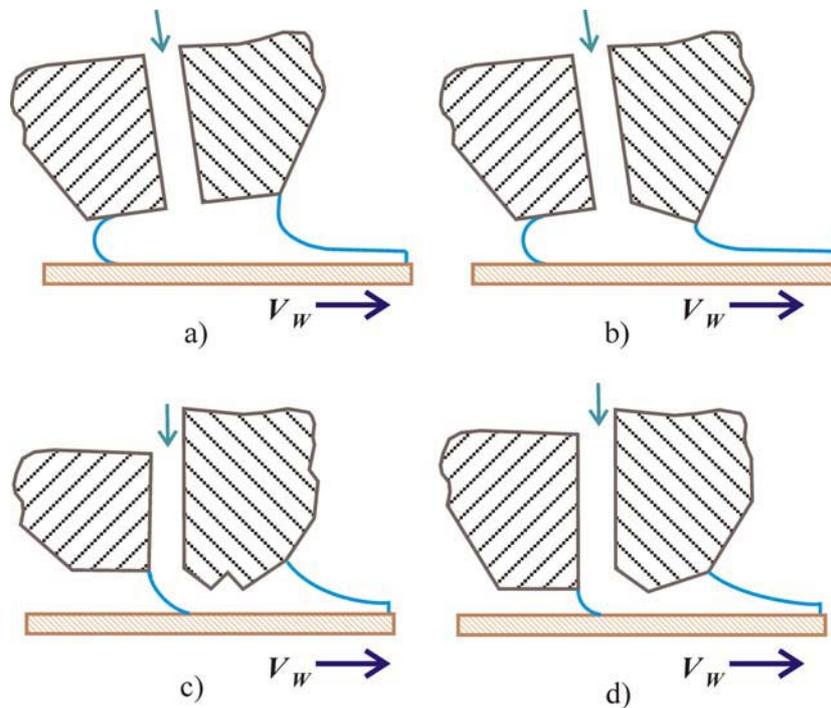


Figura 1.7 - Configurações externas da barra de revestimento: a) lábio à jusante divergente, b) lábio à jusante convergente, c) lábio à jusante com duas zonas convergente/divergente e d) lábio à jusante convergente/divergente.

A geometria dos lábios influencia o escoamento do líquido e a distribuição da pressão dentro da região de aplicação. Para o caso de líquido de revestimento de alta viscosidade, a pressão dentro da região de aplicação pode tornar-se importante. A máxima pressão pode ser reduzida pela inclinação dos lábios (O'Brien, 1984) como é indicado na Figura 1.7a e Figura 1.7b ou com variação do perfil dos lábios como mostrados por Kageyama e Yoshida (1986), Figura 1.7c e Figura 1.7d. os quais criam variação de pressão sinusoidal dentro da região de aplicação.

A figura 1.8 mostra uma barra com lábios uniformes (A1) ou seja apresentam uma mesma distancia barra/substrato, e barra tipo “*overbite*” (A2).



Figura 1.8 - Configurações externas da barra de revestimento: A1 de lábios uniformes, A2 tipo "Overbite".

O Substrato de Revestimento

O substrato a ser revestido pode ser suportado por um cilindro rígido ou com uma cobertura deformável (material elástico), ver Figura 1.9. Os substratos podem ser rugosos, lisos, flexíveis ou porosos; o uso de cada um deles vai depender do produto a ser fabricado.

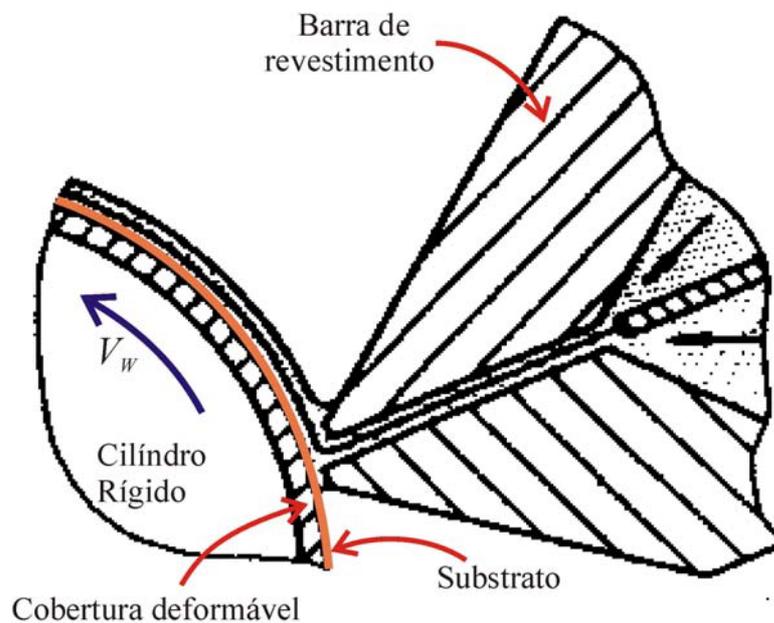


Figura 1.9 - Esquema de revestimento por extrusão num processo de duas camadas e a presença de uma cobertura no cilindro por uma camada deformável.

Aplicação de Vácuo

Beguin (1954) mostrou que usando uma ligeira redução de pressão na interface à montante (ver Figura 1.10) as forças viscosas e capilares que agem no escoamento seriam equilibradas (se estabilizaria o escoamento) e tornaria possível o revestimento a altas velocidades e menores espessuras.

Uma explicação analítica da importância da aplicação do vácuo na região à montante é proporcionada na seção 2.3.1 do seguinte capítulo.

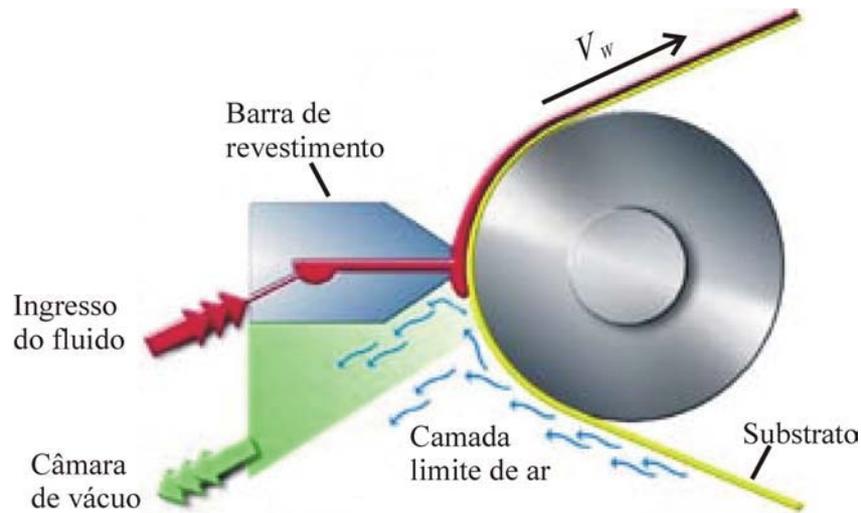


Figura 1.10 - Esquema da aplicação do vácuo no processo de revestimento por extrusão.

1.2.3

Principais características do método de revestimento por Extrusão com lábios uniformes

Para uma dada velocidade do substrato V_w , e uma determinada separação barra/substrato H , e altura da fenda H_s , a espessura do filme a ser depositado t é controlada pela vazão do fluido, $Q = Q^*/W$ que ingressa na barra de revestimento e independe de outras variáveis de operação (Q é a vazão por unidade de largura da barra de revestimento):

$$t = \frac{Q}{V_w} \quad (1-2)$$

Como a espessura da camada de líquido depositada só depende da vazão de alimentação, o método por Extrusão é ideal para revestimento de alta precisão. No entanto, a qualidade do revestimento é fortemente afetada pelas condições de operação do processo tais como velocidade e tipo de substrato (rígido, deformável, rugoso, liso poroso, etc), configuração da barra de revestimento, propriedades do líquido (viscosidade, tensão superficial, características elásticas, presença de surfactantes, etc.), nível de vácuo aplicado, oscilações nas bombas de alimentação do líquido e de vácuo, dentre outros.

As principais características do método de revestimento por Extrusão de camada única são mostradas na Figura 1.11. O líquido é bombeado até a barra de revestimento por uma bomba de deslocamento positivo (para melhor controle da vazão). Após ser distribuído lateralmente na câmara de distribuição, o líquido sai

dela e escoar pela fenda de alimentação. A superfície da barra de revestimento paralela ao substrato é chamada de lábios da barra. Se a distância entre a barra de revestimento e o substrato em movimento for adequado o líquido irá formar uma ponte entre a barra e o substrato, conforme ilustrado na Figura 1.11. Esta é a Região de aplicação do líquido; e é limitada pelas superfícies sólidas da barra e do substrato e pelas interfaces à montante e à jusante.

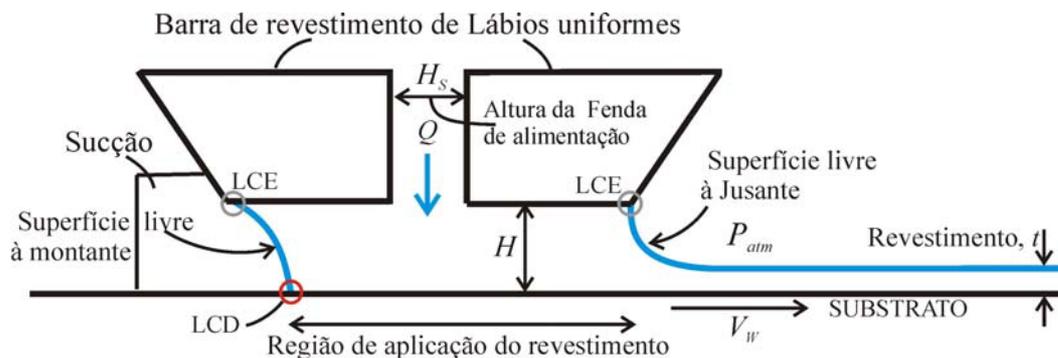


Figura 1.11 - Principais características e nomenclatura no revestimento por Extrusão de camada única.

Os termos de LCE e LCD mostrado na Figura 1.11, referem-se às Linhas de contato estática e linha de contato dinâmica, respectivamente. Na LCD, o líquido é continuamente arrastado e levado na direção à jusante como consequência do fluxo contínuo de quantidade de movimento transferido pelo substrato. Localmente a partícula de líquido sofre uma brusca mudança de velocidade. Uma análise extensa da descrição física do processo de molhamento é tratada por Srinath Madasu (2002).

O escoamento na região de aplicação pode ser dividido em diferentes regiões para facilitar o entendimento do processo como um todo, assim como ilustrado na Figura 1.12:

- Região 1: Escoamento Retilíneo de *Poiseuille* na fenda de alimentação;
- Região 2: Região de distribuição, uma parte escoar na direção à montante e a outra à jusante.
- Região 3: Uma parte do escoamento é curvilíneo onde primeiro molha o substrato e a outra é uma Mistura de escoamento de *Poiseuille* e de Couette;
- Região 4: Escoamento quase- retilíneo sob o lábio à jusante.
- Região 5: Região de escoamento altamente complexo (as partículas são cisalhadas e estendidas).

Região 6: O líquido traslada-se com o substrato em movimento de corpo rígido.

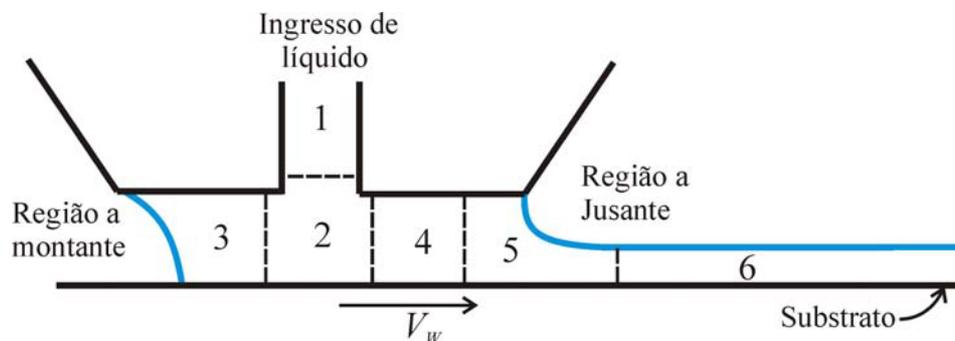


Figura 1.12 - Regiões do escoamento no processo de revestimento por extrusão: 1 região de escoamento retilíneo, escoamento de pressão; 4 também de escoamento retilíneo mas com superposição dos escoamentos de arrasto e de pressão; 2, 3 e 5 escoamento curvado.

O escoamento na zona de aplicação é fortemente afetado pelos parâmetros de operação os quais são a distância entre o substrato e a barra de revestimento H , a vazão que tem relação com a espessura t , a velocidade do substrato V_w , a configuração geométrica da barra de revestimento e a pressão do vácuo.

1.3

As forças que agem no processo de revestimento

As forças de pressão, viscosa, tensão superficial e inercial devem estar balanceadas para permitir um escoamento estável e bidimensional (2D). Caso as forças não estejam balanceadas, o escoamento 2D na região de aplicação poderia tornar-se instável e dar origem a um escoamento 3D apresentando defeitos na camada de líquido revestido.

1.3.1

Fundamentos básicos de forças viscosas em escoamentos de revestimento

A viscosidade opera em fluidos que apresentam escoamento, não em fluidos estáticos. Em todo fluido que escoar há partes que se movem relativamente a outras partes. A viscosidade aparece na fricção interna e opõe-se sempre ao movimento relativo. Assim os fenômenos básicos da viscosidade são fenômenos de escoamento. Em relação ao seu comportamento mecânico, os líquidos podem ser classificados como newtonianos e não newtonianos. Todos os líquidos de peso

molecular baixo são newtonianos, as soluções de polímeros de alto peso molecular e polímeros fundidos são geralmente não newtonianos.

Os fluidos newtonianos são aqueles em que a tensão viscosa (força por unidade de área) é proporcional a taxa de deformação. O fator de proporcionalidade é a viscosidade. Para uma tensão de cisalhamento a lei de Newton de viscosidade é dada como:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (1-3)$$

1.3.2

Fundamentos básicos da ação de tensão superficial em escoamentos de revestimento

A tensão superficial atua onde existe uma interface fluida, isto é, a interface entre um gás e um líquido ou um líquido e outro líquido imiscível. Entre líquidos miscíveis não existe tensão superficial pelo fato que eles se difundem rapidamente na escala molecular na qual a tensão superficial aparece. Entre líquidos imiscíveis as moléculas estão organizadas de tal maneira que sustentam permanentemente uma interface continua, na qual a tensão superficial é apreciável.

A tensão superficial opera de três maneiras. A Primeira forma de a tensão atuar é quando a interface fluida intersecta com outra fase sólida (ou líquida) ao longo de uma linha de contato, e nessa linha de contato a tensão superficial da interface dá origem a uma **força** diretamente no sólido (ou líquido).

$$F_s = \sigma \cdot l \quad (1-4)$$

Força de	Tensão	Longitude da
tensão superficial	superficial	linha de contato
(N)	(N/m)	(m)

A segunda forma é quando a interface fluida é curvada, sua tensão superficial dá origem a uma tensão (força por unidade de área) resultante perpendicular, ou normal, à interface. Este resultante é conhecido como **pressão** capilar. Ela é proporcional à tensão superficial e a curvatura média da interface.

$$P_C = (p_A - p_B) = \sigma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1-5)$$

Pressão	Pressão	Pressão	Tensão	Curvatura
Capilar	Acima da	Embaixo da	superficial	média
(N/m²)	Interface	Interface	(N/m)	(1/m)

onde r_1 e r_2 são os raios principais da curvatura de uma determinada região da interface.

Finalmente a terceira maneira de atuar é se a tensão superficial varia ao longo da interface, o gradiente de tensão superficial da origem a uma tensão tangencial sob o fluido adjacente, e esta tensão tangencial pode ser balanceada pela tensão viscosa cisalhante sob a interface. Assim todo gradiente de tensão superficial causa escoamento; o mecanismo básico deste fenômeno é chamado de Efeito de Marangoni.

$$\frac{d\sigma}{dx} = \tau_{yx}^B - \tau_{yx}^A \quad (1-6)$$

Gradiente de	Tensão Cisalhante	Tensão Cisalhante
tensão superficial	pelo fluido acima	pelo fluido embaixo
(N/m²)	da interface	da interface
	(Pa)	(Pa)

Se o líquido é newtoniano, se reduz a:

$$\frac{d\sigma}{dx} = -\mu_B \frac{\partial v_x^B}{\partial y} + \mu_A \frac{\partial v_x^A}{\partial y} \quad (1-7)$$

Os dois primeiros fenômenos básicos de tensão superficial podem ser avaliados de acordo com sua importância relativa com a força viscosa. A razão das intensidades das forças viscosas e capilares é medida por um número adimensional conhecido como *número de capilaridade* Ca , que é o produto da viscosidade pela velocidade característica dividido pela tensão superficial. No terceiro fenômeno físico, no escoamento com gradiente de tensão superficial também pode-se avaliar a tensão superficial de acordo com sua importância relativa com a força viscosa. Esta razão dá origem ao número de Marangoni, que é a divisão do gradiente de tensão superficial entre o produto das viscosidades.

1.4 A Janela de Operação do Processo

Como discutido anteriormente, para uma dada velocidade do substrato, a espessura do filme revestido é uma função apenas da vazão bombeada para a barra de revestimento e independente das demais variáveis do processo. Porém, o escoamento na região de aplicação somente é 2D e em regime permanente se as diversas variáveis de operação estiveram dentro de uma determinada faixa de valores. O conjunto de valores no qual o processo dá origem a um filme sem defeito é chamado de Janela de operação de processo.

Em revestimento por extrusão, as instabilidades encontradas no escoamento conduzem a diferentes tipos de defeitos no filme revestido como mostrado na Figura 1.13. Os limites das condições de operação satisfatórias são alcançados quando as instabilidades excedem o limite de tolerância da qualidade do produto. A janela de operação inclui o espaço de parâmetro das propriedades líquidas, das condições de operação e da geometria da barra dentro da qual pode-se obter um revestimento livre de defeito.

A Figura 1.13 mostra uma região de operação estável e demarcada no plano das seguintes variáveis de operação: Pressão de vácuo aplicada à montante, P_{vac} , no eixo vertical e o inverso da espessura de líquido depositado adimensionalizado pela distancia barra/substrato, H_0/t , no eixo horizontal. As demais variáveis de operação, como a velocidade do substrato, estão fixas. A área riscada representa a Janela de operação. Fora da área riscada, diversos defeitos podem ocorrer tal como é explicado por Romero, (2003); estes defeitos são: (1) representa vazamentos para a caixa de vácuo quando a pressão aplicada é muito baixa (“Vácuo muito alto”); (2) o vácuo e a pressão capilar não são suficientes para equilibrar o arrasto viscoso; o menisco à montante desloca-se na direção da fenda de alimentação até ficar preso na quina à jusante do lábio à montante. A interface invade a fenda de alimentação e o escoamento passa a ser tridimensional, e assim os chamados “dedos de ar” (*air fingers*) começam a aparecer; (3) num nível de vácuo apropriado à superfície livre à jusante move-se em direção da fenda de alimentação. O escoamento torna-se tridimensional e a camada de líquido depositado não é mais contínua na direção transversal. Este limite é conhecido

como “limite de vazão mínima” e representa a menor espessura da camada de líquido que pode ser depositada numa determinada velocidade do substrato.

Dependendo da qualidade requerida para o produto final, certos tipos de defeitos podem ser tolerados e outros não. A aplicação de alguns produtos requer maior grau de uniformidade no revestimento do que outros produtos.

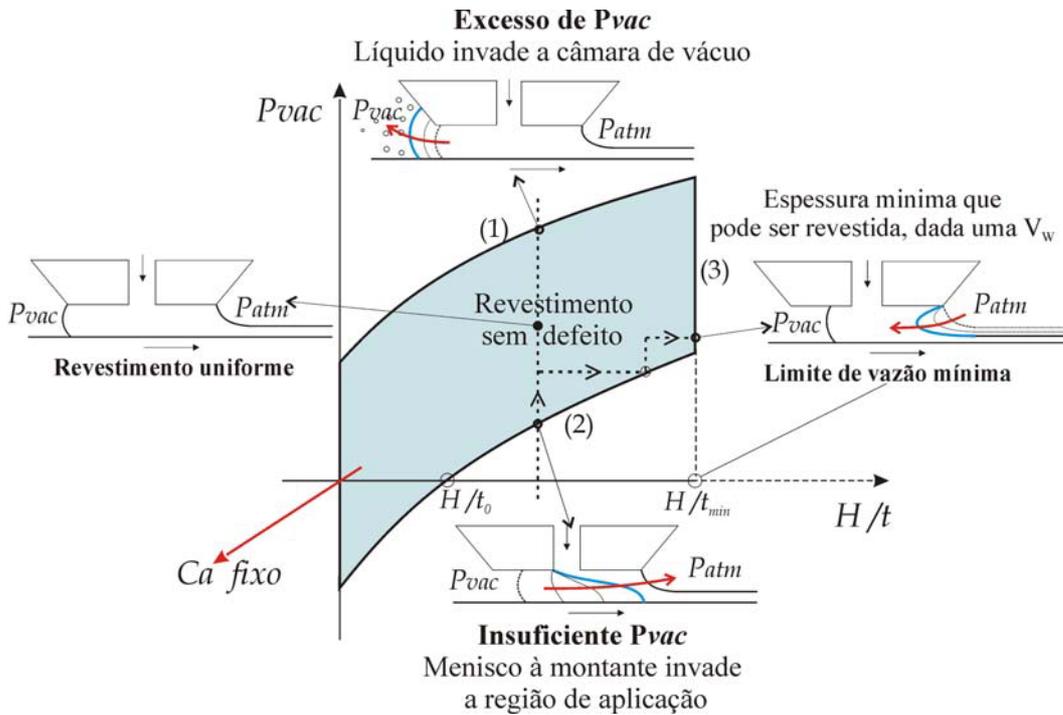


Figura 1.13 - Janela de operação no plano P_{VAC} vs H/t .

1.5 Escoamento em Superfícies Deformáveis

Elementos deformáveis são utilizados na indústria do revestimento geralmente para remoção do excesso de líquido depositado sobre o substrato. Estes elementos deformáveis são geralmente usados nos métodos de revestimento de vazão pós-fixada como é o caso dos processos de revestimentos por faca raspadora e de membrana flexível que são mostrados esquematicamente na Figura 1.14.

Nestes sistemas a distância entre o substrato e o elemento sólido é determinada pelo balanço das forças hidrodinâmicas no líquido e as forças elásticas no sólido. Este acoplamento é conhecido como acoplamento elastohidrodinâmico.

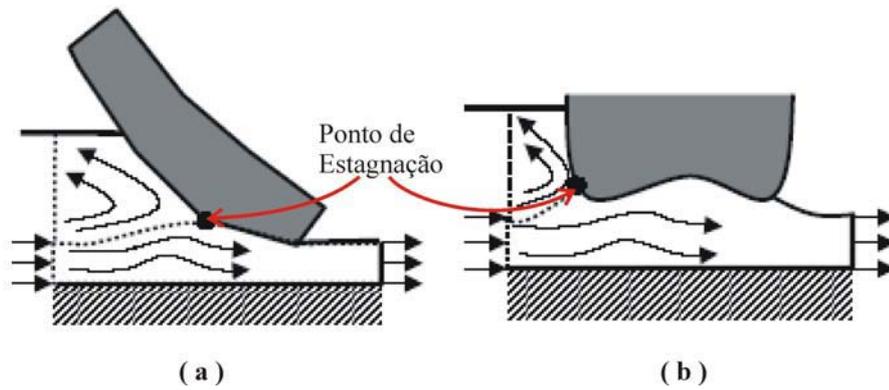


Figura 1.14 - Esquemas de alguns sistemas de revestimento que fazem uso da ação elastohidrodinâmica, (a) revestimento por faca raspadora e (b) revestimento por membrana flexível.

Dowson e Higginson (1966) adotaram um modelo elástico simplificado da deformação (conhecido como o modelo de coluna forçada), na qual a deformação, de um sistema elastohidrodinâmico, num ponto do sólido é somente uma função da pressão do líquido nessa posição. Depois Jhonson (1985) propôs a constante de proporcionalidade de um modelo de molas como função do coeficiente de Poisson ν , módulo de elasticidade E , e a espessura da camada do filme t , isto é dado por:

$$K = \frac{P(x)}{\delta(x)} = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{E}{t} \quad (1-8)$$

É claro que a expressão acima não pode ser aplicada a materiais incompressíveis, i.e, $\nu = 1/2$. Dowson e Jin (1989) sugeriram o modelo de coluna restrita (modelo de molas), com a constante de proporcionalidade proposta por Jhonson e que pode ser aplicado para uma relação de Poisson menor que 0,45. Estes resultados foram previstos, porque quando o valor de K proposto por Jhonson é usado para um tipo de material incompressível, a deformação em cada ponto desaparece não importa quão é a força do carregamento.

Coyle (1988) fez uma análise teórica e experimental do elastohidrodinâmica do revestimento por cilindros girantes. Ele aproximou o comportamento da deformação de uma superfície sólida pelo modelo de molas linearmente elástico (o mesmo enfoque utilizado por Dowson e Higginson (1966)), sendo o comportamento do escoamento foi modelado usando a teoria de lubrificação. Carvalho e Scriven (1994) continuaram a análise de Coyle

examinando as diferenças entre o modelo elástico linear uni-dimensional e o modelo bi-dimensional no plano de deformação. Eles, também, avaliaram o escoamento na região de revestimento utilizando a teoria de lubrificação.

A aproximação da teoria de lubrificação não é válida longe da região de ação elastohidrodinâmica e perto das superfícies livres, onde o escoamento é bi-dimensional. Para superar estas limitações Carvalho e Scriven (1994) utilizaram o modelo de molas acoplado com a formulação completa de Naviers Stokes para o escoamento com superfície livre. Os resultados teóricos mostram boa concordância com resultados experimentais. A Figura 1.15 mostra o sistema analisado por Carvalho e Scriven (1997).

Neste trabalho adaptaremos a mesma análise feita por Carvalho e Scriven (1997) enfocando-se a outro tipo de sistema, i.e aplicado ao processo de revestimento por Extrusão no qual o escoamento do líquido será descrito pelas equações de Navier-Stokes e a deformação será modelada pelo modelo unidimensional de molas.

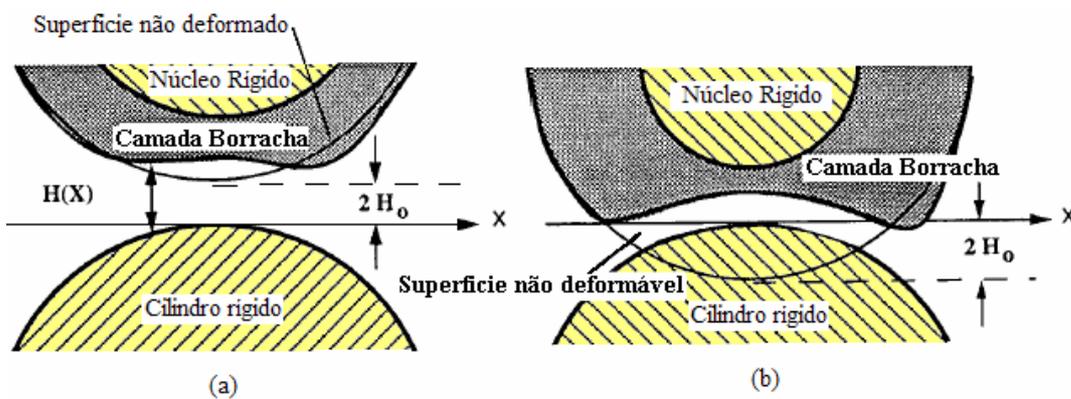


Figura 1.15 - Esquema do sistema usado por Carvalho e Scriven (1997) para o análise da elastohidrodinâmica entre cilindro rígido e cilindro deformável. (a) com espaçamentos positivos e (b) com espaçamentos negativos.

1.6

Escopo e Roteiro da Tese

A análise teórica de como influi a deformação do cilindro (i.e. pela ação elastohidrodinâmica) e o comprimento dos lábios da barra de revestimento para obter uma espessura mínima de filme são os objetivos mais importantes a tratar nesta dissertação.

Para modelar o processo de revestimento por extrusão é preciso considerar algumas hipóteses, no entanto a solução das equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos newtonianos em geometrias complexas com superfícies livres e contornos deformáveis representa um desafio numérico.

O conteúdo da tese está dividido nos seguintes capítulos:

Capítulo 2: A formulação matemática do escoamento com superfície livre de um fluido sobre contornos deformáveis.

Capítulo 3: Descrição do método numérico utilizado para resolver o sistema de equações diferenciais que representa o escoamento em questão.

Capítulo 4: São apresentados os resultados numéricos, para o escoamento no processo de revestimento por extrusão considerando dois casos, um caso com cilindro não deformável e outro com cilindro deformável.

Capítulo 5: Finalmente os comentários finais e sugestões são discutidos neste capítulo.