

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Danmer Paulino Maza Quinones

**Elastohidrodinâmica do Processo de
Revestimento por Extrusão com
Cilindro Deformável**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Rio de Janeiro, Abril de 2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Danmer Paulino Maza Quinones

**Elastohidrodinâmica do Processo de
Revestimento por Extrusão com
Cilindro Deformável**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Profa. Angela Ourivio Nieckele

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Dr. Oldrich Joel Romero Guzmán

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – Puc-Rio

Rio de Janeiro, 08 de Abril de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Danmer P. Maza Quinones

Graduou-se em Engenharia Mecânica-Elétrica na UNI (Universidad Nacional de Ingeniería - Lima, Perú) em 2001.

Ficha catalográfica

Quinones, Danmer P. Maza

Elastohidrodinâmica do processo de revestimento por extrusão com cilindro deformável / Danmer P. Maza Quinones ; orientador: Márcio da Silveira Carvalho. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005.

93 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Processo de revestimento. 3. Elastohidrodinâmica. 4. Superfície livre. 5. Método de elementos finitos. I. Carvalho, Márcio da Silveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Dedicado a meus irmãos e para
toda minha família Maza e Quiñones
pelo apoio e confiança.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que tornaram possível a elaboração deste trabalho, em especial:

Aos meus irmãos e a toda minha família por terem me incentivado a realizar este curso de Mestrado.

Ao professor Márcio da Silveira Carvalho pela orientação, pela sua paciência e pelo constante incentivo na pesquisa.

Aos Professores membros da banca, pela participação, comentários e sugestões feitas ao trabalho apresentado.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e ao pessoal do grupo de REOLOGIA, tanto pelos momentos compartilhados, quanto pelos conselhos e dicas a nível acadêmico.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À todas as pessoas que de uma ou outra forma me deram apoio durante a minha estada neste país.

Resumo

Maza Quinones, Danmer P.; Carvalho, Márcio. **Elastohidrodinâmica do Processo de Revestimento por Extrusão com Cilindro Deformável**. Rio de Janeiro, 2005. 93p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O processo de revestimento por Extrusão é amplamente usado nos processos de manufatura de diferentes produtos. Em geral a mínima espessura de filme que pode ser obtida é proporcional à distância entre a barra de revestimento e o substrato (usualmente apoiado por um cilindro rígido) e inversamente proporcional à viscosidade do líquido. Na prática, existe uma distância mínima de operação, tipicamente em torno de 100 μm , abaixo da qual o processo torna-se perigoso com o risco de colisão do cilindro de apoio com a barra e de quebra do substrato. Conseqüentemente, existe um limite da menor espessura de filme que pode ser depositada, principalmente no caso de líquidos de alta viscosidade. Uma solução comum é usar um cilindro rígido de apoio coberto com uma camada de borracha, que se deforma durante a operação. O líquido na região de aplicação produz uma pressão suficiente para deformar a camada elástica, mudando a geometria do escoamento, caracterizando uma interação *elastohidrodinâmica*. Apesar de muito usado na indústria, o conhecimento fundamental deste processo é bastante limitado. O entendimento desta interação líquido/sólido é vital para a otimização deste processo de revestimento. Um modelo teórico para descrever este processo deve considerar o escoamento viscoso, a deformação do cilindro e os efeitos da superfície livre a fim de prever o comportamento do escoamento e conseqüentemente os limites de operação do processo. Uma análise teórica é apresentada neste trabalho, que consiste em resolver a equação de Navier-Stokes para descrever o escoamento com superfície livre acoplado a um arranjo de molas para modelar a deformação da camada elástica. O sistema de equações foi resolvido pelo método Galerkin/MEF. O sistema de equações algébrica não-linear resultante foi resolvido pelo método de Newton. Os resultados indicam como os parâmetros de operação, as propriedades do líquido e da cobertura do cilindro afetam os limites de operação do processo.

Palavras-chave

Processo de revestimento, elastohidrodinâmica, superfície livre, método de elementos finitos.

Abstract

Maza Quinones, Danmer P.; Carvalho, Márcio. **Elastohydrodynamics of Slot Coating Process with Deformable Roll**. Rio de Janeiro, 2005. 93p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Slot coating is largely used in the manufacturing process of many products. In general, the minimum thickness that can be coated is proportional to the gap between the coating die and the substrate (usually backed-up by a rigid roll) and inversely proportional to the liquid viscosity. Therefore, in order to obtain thin films with liquid of high viscosity, a very small gap would be necessary. In practice, the clearance between the die and the web has to be large enough to avoid the risk of clashing two hard surfaces. A common solution is the use a backup rolls covered with an elastomeric layer. The liquid in the coating bead develops high enough pressure to deform the resilient cover, which changes the geometry of the flow, characterizing an elastohydrodynamic action. The understanding of the flow is vital to the optimization of this widely used coating method. Theoretical model has to take into account the viscous flow, the roll deformation and the free surface effects in order to predict the flow behavior. A theoretical analysis is presented here, that consisted of solving the Navier-Stokes equation to describe the free surface flow coupled with an array of springs to model the elastic cover deformation. The equation system was solved by the Galerkin / Finite element method. The resulting set of non-linear algebraic equations was solved by Newton's method. The results indicate how different operating parameters, liquid and roll cover properties affect the flow.

Keywords

Slot coating, elastohydrodynamics, free boundary problem, finite element method.

Sumário

1	Introdução	20
1.1	Generalidades sobre processos de revestimento	20
1.2	Método de Revestimento por Extrusão	22
1.2.1	Descrição geral do processo de revestimento por Extrusão	23
1.2.2	Descrição dos equipamentos no processo de revestimento por Extrusão	24
1.2.3	Principais características do método de revestimento por Extrusão com lábios uniformes	29
1.3	As forças que agem no processo de revestimento	31
1.3.1	Fundamentos básicos de forças viscosas em escoamentos de revestimento	31
1.3.2	Fundamentos básicos da ação de tensão superficial em escoamentos de revestimento	32
1.4	A Janela de Operação do Processo	34
1.5	Escoamento em Superfícies Deformáveis	35
1.6	Escopo e Roteiro da Tese	38
2	Formulação Matemática	39
2.1	Equações de Conservação	39
2.2	Condições de contorno para resolver as equações de conservação	40
2.2.1	Deformação da superfície do cilindro - Modelo unidimensional de molas	42
2.2.2	Parâmetros que governam o problema	44
2.3	Escoamento viscoso em processos de revestimento por Extrusão	44
2.3.1	Relação entre o Vácuo e a longitude da região de aplicação	46
2.4	Solução de Problemas com superfícies livres e deformáveis	47
2.4.1	Geração de Malha Elíptica	50
2.4.2	Condições de contorno para a Geração da Malha	52
3	Modelagem computacional do escoamento com superfícies livres e deformáveis	55
3.1	Solução do sistema de equações pelo método de Galerkin/ Elementos	

Finitos	55
3.1.1 Representação dos campos através de funções base	57
3.2 Solução do sistema de equações não lineares pelo método de Newton	58
3.3 Estratégia de continuação para obter o ponto de dobra	59
4 Resultados Numéricos	60
4.1 Validação do código computacional	60
4.2 Teste de malha	62
4.3 Problemas preliminares	64
4.3.1 Caso com superfície rígida:	65
4.3.2 Caso com superfície deformável:	66
4.4 Resultados da modelagem utilizando cilindro com superfície rígida, considerando Vazão constante	67
4.4.1 Resultados considerando Vazão constante	67
4.5 Resultados da modelagem utilizando cilindro com superfície rígida considerando Vazão mínima	75
4.6 Resultados da modelagem utilizando cilindro com superfície deformável	80
4.6.1 Comparação da geometria tipo “A” de lábios médios e “C” de lábios curtos usando o método de Molas	87
5 Comentários Finais e sugestões	89
5.1 Comentários finais	89
5.2 Sugestões	90
6 Bibliografia	91

Lista de figuras

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.	20
Figura 1.2 – Alguns métodos de revestimento: (a) por extrusão, (b) por cortina, (c) de rotação direta, (d) tipo faca raspadora, (e) de imersão.	22
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.	23
Figura 1.4 - Esquema bi-dimensional do processo de revestimento por Extrusão (secção de corte mostrado na Figura 1.3).	24
Figura 1.5 - Esquema dos equipamentos básicos que estão vinculados com o processo revestimento por Extrusão.	25
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.	26
Figura 1.7 - Configurações externas da barra de revestimento: a) lábio à jusante divergente, b) lábio á jusante convergente, c) lábio à jusante com duas zonas convergente/divergente e d) lábio à jusante convergente/divergente.	27
Figura 1.8 - Configurações externas da barra de revestimento: A1 de lábios uniformes, A2 tipo “ <i>Overbite</i> ”.	28
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.	28
Figura 1.10 - Esquema da aplicação do vácuo no processo de revestimento por extrusão.	29
Figura 1.11 - Principais características e nomenclatura no revestimento por Extrusão de camada única.	30

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.	31
Figura 1.13 - Janela de operação no plano P_{VAC} vs H/t .	35
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.	36
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.	37
Figura 2.1 - Esquema mostrando a numeração utilizada para descrever as condições de contorno para a equação de quantidade de movimento linear.	42
Figura 2.2 - Esquema do modelo de molas.	42
Figura 2.3 - Esquema da deformação da superfície com o modelo de molas.	43
Figura 2.4 - Esquema dos perfis de velocidade no processo de revestimento por extrusão.	45
Figura 2.5 - Esquemas dos escoamentos de Couette e Poiseuille entre duas placas paralelas.	46
Figura 2.6 - Esquema do método dos Splines.	49
Figura 2.7 - Esquema mostrando o processo de mapeamento.	52
Figura 2.8 - Representação das condições de contorno para a geração da malha: a) η da eq. (2-25), b) ξ da eq. (2-24).	52
Figura 2.9 - Condição de contorno das equações de geração de malha elíptica. A condição de pontos nodais fixos é apropriada para contornos cuja localização é fixa e conhecida. A condição de não penetração é apropriada para superfícies livres. A condição de ângulo prescrito, distribuição nodal prescrita, e a equação prescrita dos contornos (pontos nodais que podem deslizar) são apropriadas para contornos conhecidos tanto quanto contornos cuja localização forma parte do problema.	54

Figura 4.1 - Diferentes configurações geométricas analisadas no processo de revestimento por Extrusão.	61
Figura 4.2 - Detalhe do domínio da malha da geometria de lábios curtos: a) M2, b) M2S.	62
Figura 4.3 - Representação das Malhas M3, M4 e M5 analisadas no processo de revestimento por Extrusão para valores iguais de H e P_{vac} .	64
Figura 4.4 - Primeiro caso preliminar para a solução de problemas de superfícies livres, a face C e D é considerada como parede deslizante.	65
Figura 4.5 - Segundo caso preliminar para a solução de problemas de superfícies livres, a face D já é considerada como superfície livre mas a face C ainda continua como parede deslizante.	66
Figura 4.6 - Caso considerando superfícies livres nos meniscos a montante e a jusante.	66
Figura 4.7 - Mostra-se um caso na qual aplicou-se o modelo de Molas.	66
Figura 4.8 - Janela de Operação de Processos da Geometria tipo "A" de lábio médio, para dois valores de vazão constantes Q e $2Q$ e limitados pelas $P_{VAC} = -3\text{kPa}$ e -1 kPa .	68
Figura 4.9 - Estes gráficos correspondem aos pontos "a" e "c" da Figura 4.8. a) Início do processo onde o escoamento é bem comportado, b) Representação do mecanismo de falha do processo pela invasão no menisco à montante.	69
Figura 4.10 - Caminho da solução representada pela posição da linha de contato dinâmica para diferentes velocidades do substrato, com vazão constante $2Q$ e pressão de vácuo $P_{VAC} = -3\text{kPa}$, para a geometria de lábio médio.	69
Figura 4.11 - Caminho da solução adimensional representada pela posição da linha de contacto dinâmica para diversas velocidades do substrato, com vazão constante $2Q$ e uma pressão de vácuo $P_{VAC} = -3\text{kPa}$. - Geometria Tipo "A" de lábio médio.	70
Figura 4.12 - Perfis de pressão ao longo do substrato para uma vazão e um vácuo constante de $0,10\text{mm}^2/\text{s}$ e de -3 kPa respectivamente para $Ca(V_W)$ de $0,04$; $0,08$; $0,1$ e $0,11$. - Geometria Tipo "A" de lábio médio.	71

- Figura 4.13 - Linhas de corrente e de pressão presentes no caso “a” e “c” da Figura 4.10 e Figura 4.11 mostrando a presença de recirculação e pontos de estagnação para a barra de lábio médio. 72
- Figura 4.14 - Acima: Linhas de corrente e de pressão, no caso de $P_{VAC} = 1\text{kPa}$ mantendo a mesma vazão $2Q$; embaixo: perfis de velocidade do mesmo caso. 73
- Figura 4.15 - Janelas de Operação de Processo para a Geometria tipo “A” para diferentes valores de viscosidade considerando uma faixa de vazão entre Q e $2Q$. 73
- Figura 4.16 - As Janelas de Operação de Processo da Geometria tipo “B” para diferentes valores de viscosidade considerando uma faixa de vazão entre Q e $2Q$. 74
- Figura 4.17 - As Janelas de Operação de Processo da Geometria tipo “C” para diferentes valores de viscosidade considerando uma faixa de vazão entre Q e $2Q$. 75
- Figura 4.18 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo “A” de lábio médio, dado uma $Ca = 0,5$ e um distância da barra/substrato $H = 100\mu\text{m}$. 76
- Figura 4.19 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo “C” de lábio curto, dado uma $Ca = 0,5$ e um uma distância da barra/substrato $H = 100\mu\text{m}$. 77
- Figura 4.20 - Comparação dos perfis do menisco à jusante das duas configurações A e C da barra de revestimento para Ca de $0,1; 0,5$ e $1,0$. 78
- Figura 4.21 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo “C”, para $Ca = 0,1; 0,5$ e $1,0$ e com uma distância da barra de revestimento ao substrato $H = 100\mu\text{m}$. 78
- Figura 4.22 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo “A”, para $Ca = 0,1; 0,5$ e $1,0$ e com uma distância da barra/substrato $H = 100\mu\text{m}$. 79
- Figura 4.23 - Limite de vazão mínima no plano número de capilaridade Ca e da inversa da espessura de filme H_3/t , obtidos para as duas configurações A e C. 79
- Figura 4.24 - Janelas de operação no plano número de elasticidade Ne e

a inversa da espessura de filme, considerando o modelo de molas de um sistema elastohidrodinâmico – Configuração da barra “C” de lábios curtos.

81

Figura 4.25 - Região à montante e à jusante dos pontos a”, b” e c” da

Figura 4.24 – Configuração da barra “C” de lábios curtos.

82

Figura 4.26 - Padrão do escoamento dos pontos a’, b’ e c’ – Configuração da barra “C” de lábios curtos.

83

Figura 4.27 - Padrão do escoamento dos pontos r , s e t do gráfico da figura 4.24 onde $Ne = 2 \times 10^{-6}$. Configuração da barra “C” de lábios curtos.

84

Figura 4.28 - Gráfico da pressão do fluido que age na face da superfície deformável para as diferentes distâncias barra/revestimento –

Configuração da barra “C”.

85

Figura 4.29 - Janelas de operação que mostra o comportamento das diferentes distâncias barra/substrato da barra de lábio curto para diferentes valores de número de capilaridade.

86

Figura 4.30 - Detalhe das linhas de corrente da barra tipo “C” de lábio curto, considerando números de capilaridade $Ca = 0,012$ e $Ca = 0,005$ para uma relação $H/H_S = 0,33$.

87

Figura 4.31 - Gráfico comparativo das Janelas de operação para as duas configurações da barra “A” e “C”, no plano Ne e a inversa da espessura do filme.

88

Lista de tabelas

Tabela 1 - Faixas típicas dos parâmetros de operação em processos de revestimento por extrusão - Gates, (1999).	44
Tabela 2. - Número de elementos e incógnitas das diferentes malhas usadas para resolver o escoamento no processo de revestimento por Extrusão, onde mostra a independência do número de elementos para obter a espessura t , nas mesmas condições de operação.	63

Nomenclatura

Símbolos Romanos

I	tensor unitário
t	espessura media de filme depositado
t_{min}	espessura mínima de filme depositado
Q^*	vazão de alimentação
Q	vazão de alimentação por unidade de comprimento
W	comprimento da barra
H_M	distância da separação barra/substrato na região à montante
H_J	distância da separação barra/substrato na região à jusante
H	distância barra/substrato para caso de lábios uniformes
H_S	altura da fenda de alimentação
A	área da secção característica da cavidade
L_f	comprimento característico da fenda
L_M	longitude do lábio da barra à montante
L_J	longitude do lábio da barra à jusante
P_C	pressão na câmara de distribuição
P_E	pressão na região de aplicação
P_0	pressão de ar próxima ao menisco à montante
P_M	pressão na região de aplicação sob o lábio à montante
P_J	pressão na região de aplicação sob o lábio à jusante
P_1	pressão de ar próxima ao menisco à jusante
P_{atm}	pressão atmosférica
P_{VAC}	pressão subatmosférica
Vac	diferença de pressão atmosférica e pressão subatmosférica
K	constante de proporcionalidade da mola
\mathbf{K}	curvatura da superfície livre
E	modulo de elasticidade
Ne	número adimensional de elasticidade $\left(Ne \equiv \frac{\mu V_w}{KH_s^2} \right)$

Re	número de Reynolds $\left(Re = \frac{\rho V_w H}{\mu} \right)$
Ca	número de capilaridade $\left(Ca = \frac{\mu V_w}{\sigma} \right)$
\vec{n}	vetor normal na interface líquida
\vec{n}_w	vetor normal à superfície sólida
X_0, Y_0	posição de um ponto da parede no seu estado não deformado.
\vec{N}_0	vetor normal unitário de uma superfície sólida não deformada
$\frac{dt}{ds}$	curvatura do menisco
s	coordenada medida ao longo da superfície livre
\vec{x}	vetor posição no domínio físico
x, y	coordenada horizontal e vertical respectivamente
x_q	posição horizontal fixa numa quina
T	tensor das tensões
J	matriz jacobiana do método de Newton
J_{ij}	componentes da matriz jacobiana do método de Newton
p	é a pressão
\vec{v}	vetor velocidade
u, v	componente horizontal e vertical da velocidade respectivamente
V_w	velocidade do substrato
\vec{R}	vetor de resíduos ponderados
Rci	resíduos da equação da continuidade
Rm^i	resíduos da equação da quantidade de movimento linear
$R\chi^i$	resíduos da equação de geração da malha
\vec{c}	vetor solução
\vec{p}	vetor de parâmetros
\vec{W}	vetor resíduo ponderado
J_T	jacobiano de transformação de coordenadas
U_j	velocidade horizontal no nó j
V_j	velocidade vertical no nó j

P_j	pressão no nó j
X_j	coordenada horizontal no nó j
Y_j	coordenada vertical no nó j
D_{\approx}	tensor dos coeficientes de difusão
D_{η}	coeficiente de difusão da coordenada η
D_{ξ}	coeficiente de difusão da coordenada ξ

Símbolos Gregos

σ	tensão superficial
θ_d, θ_e	ângulo de contato dinâmico e estático
β	coeficiente de deslizamento de Navier
μ	viscosidade newtoniana
μ_c e μ_f	viscosidades dentro da cavidade e da fenda respectivamente
ρ	massa específica do fluido
(η, ξ)	coordenadas do domínio de referência (horizontal, vertical)
Γ	simboliza o contorno do domínio físico
Ω	simboliza o interior do domínio físico
$\bar{\Gamma}$	simboliza o contorno do domínio de referência
$\bar{\Omega}$	simboliza o interior do domínio de referência
Γ_{def}	simboliza o contorno do domínio físico deformável
$d\Omega$	área diferencial do domínio físico
$d\bar{\Omega}$	área diferencial do domínio de referência
ϕ_j	funções peso da equação da conservação da quantidade de movimento
χ_j	funções peso da equação de continuidade
ϕ_i	funções base para as velocidades e de geração da malha
χ_i	funções base da pressão
$\nabla \vec{u}$	gradiente de velocidade
δ_i	funções Delta Dirac

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.

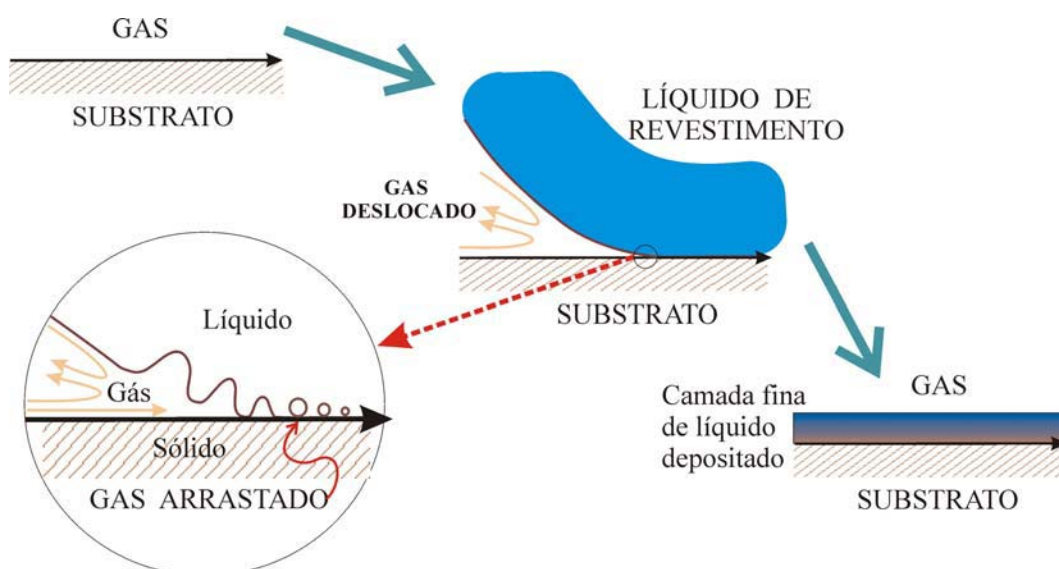


Figura 1.1 - Revestir é deslocar o gás da superfície pelo líquido, assim durante todo processo de molhamento interagem três fases: Sólido Líquido e Gás.

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).

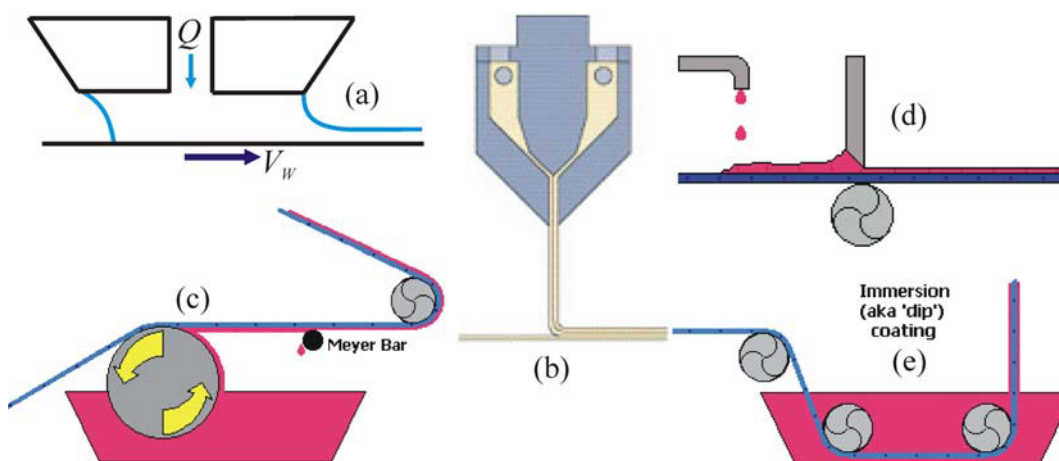


Figura 1.2 – Alguns métodos de revestimento: (a) por extrusão, (b) por cortina, (c) de rotação direta, (d) tipo faca raspadora, (e) de imersão.

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.

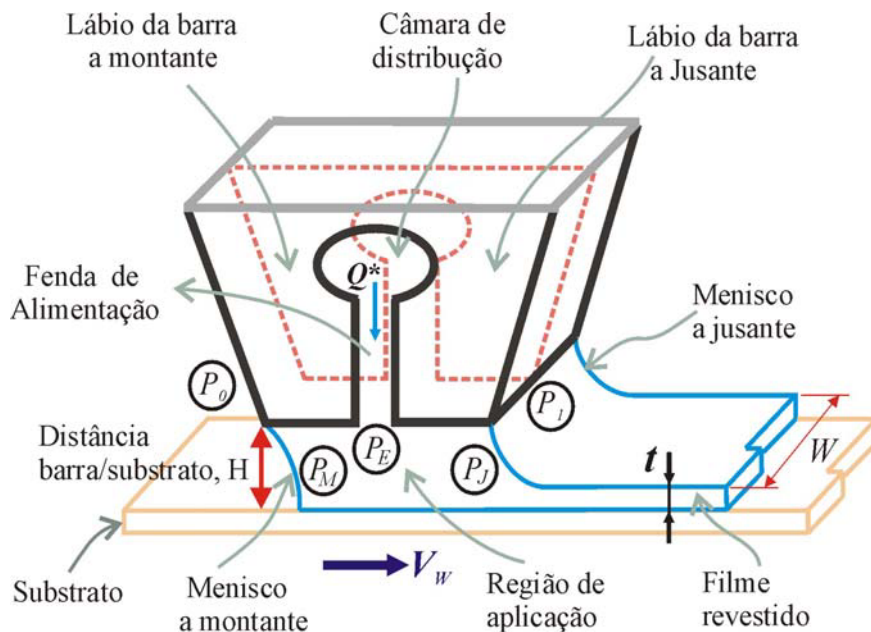


Figura 1.3 - Esquema típico do processo de revestimento por Extrusão, mostrando seus parâmetros mais importantes: Q^* é a vazão de alimentação; P_E , P_M , P_J são as pressões nas diferentes regiões de aplicação; P_0 , P_1 são as pressões à montante e à jusante.

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.

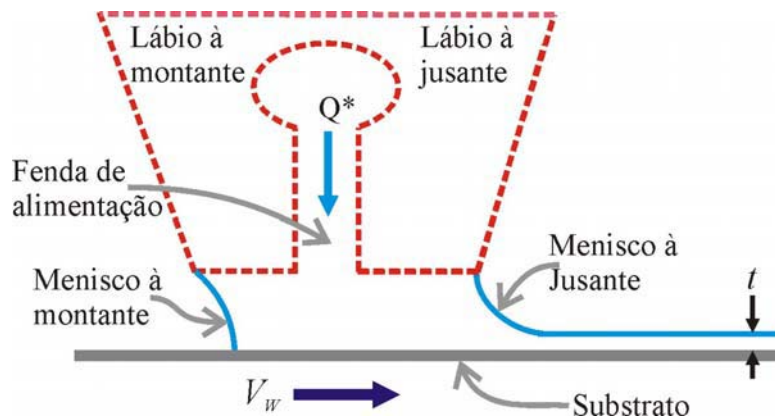


Figura 1.4 - Esquema bi-dimensional do processo de revestimento por Extrusão (secção de corte mostrado na Figura 1.3).

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.

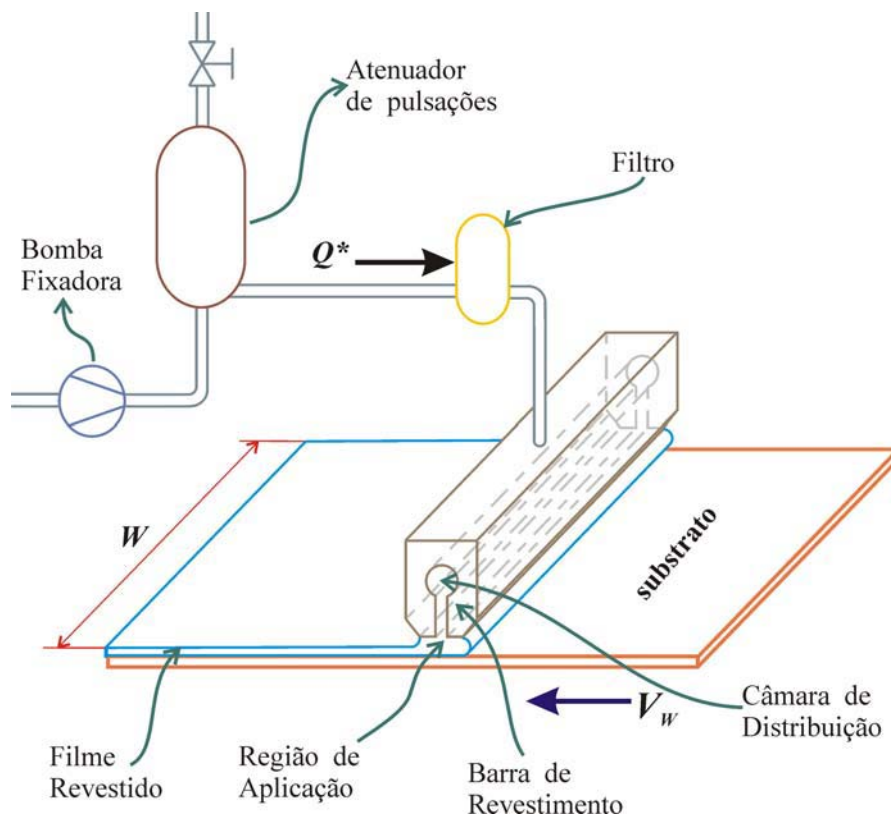


Figura 1.5 - Esquema dos equipamentos básicos que estão vinculados com o processo revestimento por Extrusão.

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.

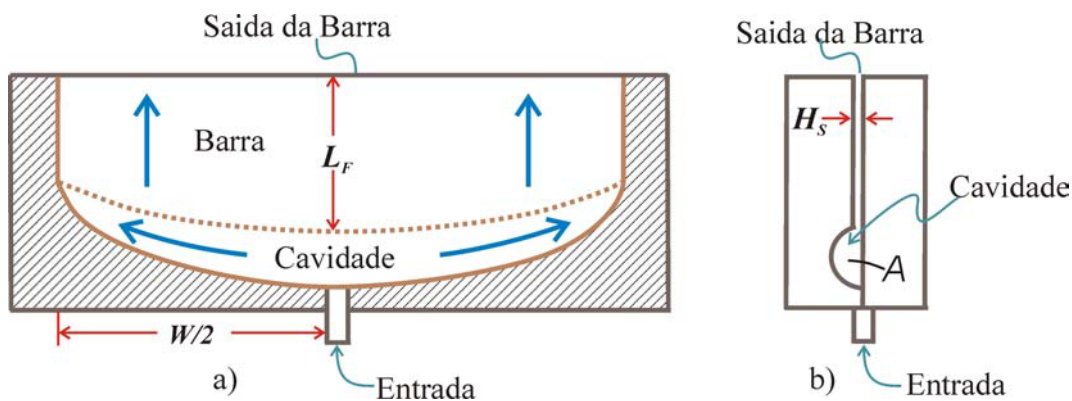


Figura 1.6 - Esquema geométrico da barra de revestimento com cavidade única. a) Vista de planta; b) Vista frontal. As setas na cavidade e ao longo da fenda indicam a predominância do escoamento nessas direções.

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 varias fendas de alimentação dependendo do numero 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).

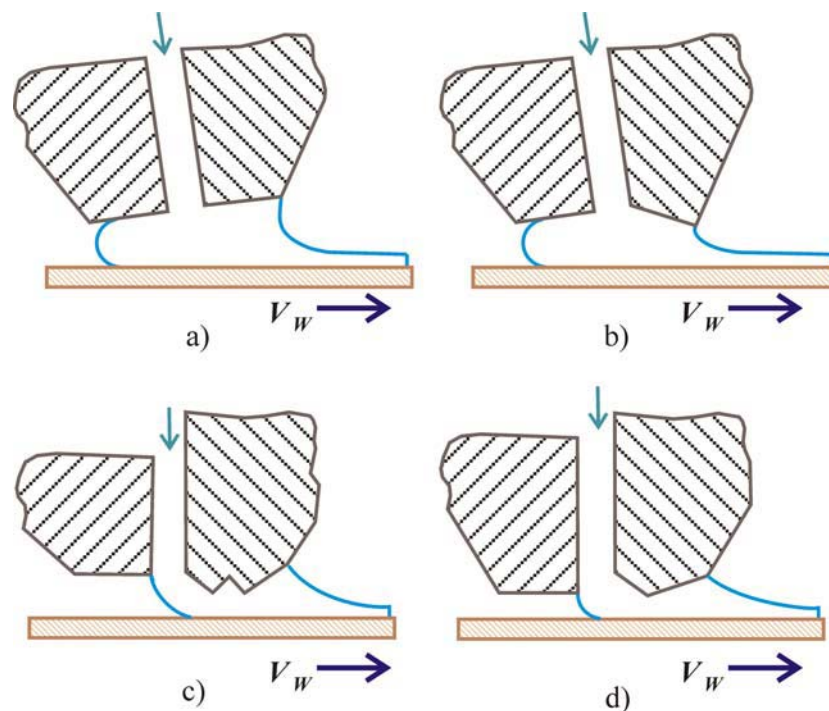


Figura 1.7 - Configurações externas da barra de revestimento: a) lábio à jusante divergente, b) lábio à jusante convergente, c) lábio à jusante com duas zonas convergente/divergente e d) lábio à jusante convergente/divergente.

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).

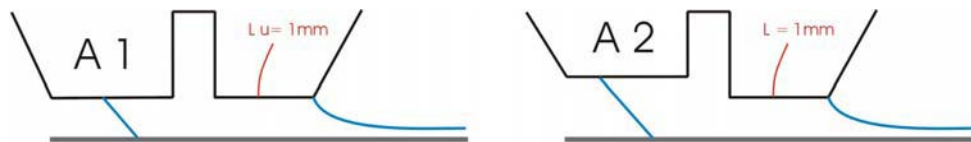


Figura 1.8 - Configurações externas da barra de revestimento: A1 de lábios uniformes, A2 tipo "Overbite".

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.

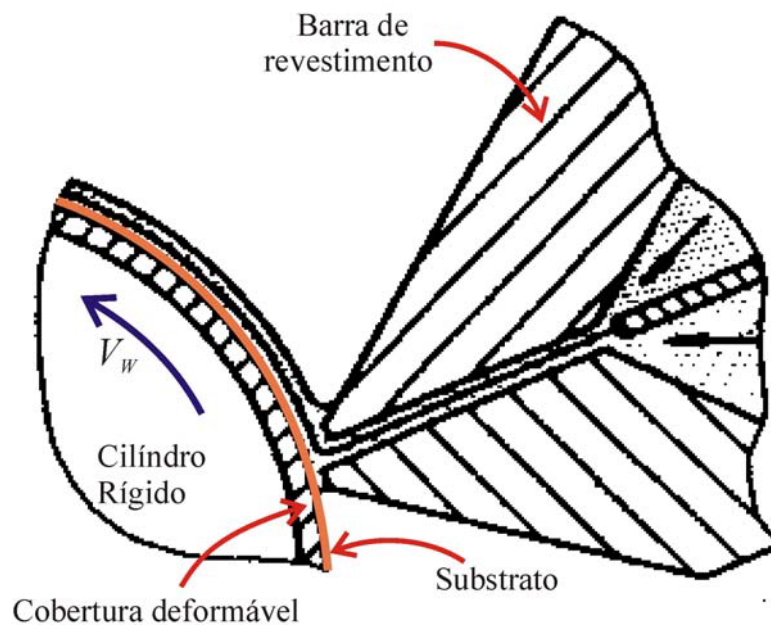


Figura 1.9 - Esquema de revestimento por extrusão num processo de duas camadas e a presença de uma cobertura no cilindro por uma camada deformável.

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.

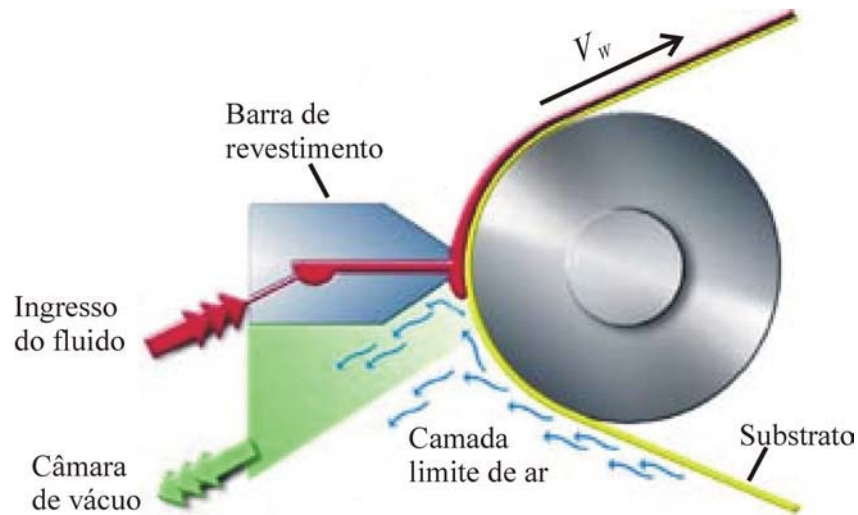


Figura 1.10 - Esquema da aplicação do vácuo no processo de revestimento por extrusão.

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 adequada 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.

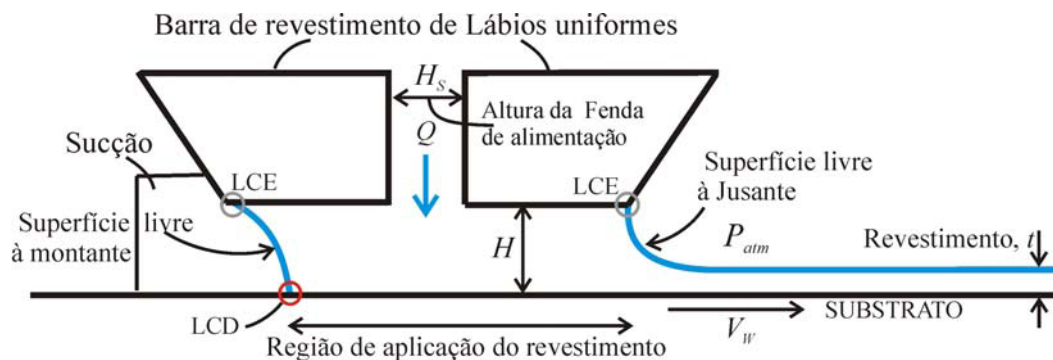


Figura 1.11 - Principais características e nomenclatura no revestimento por Extrusão de camada única.

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.

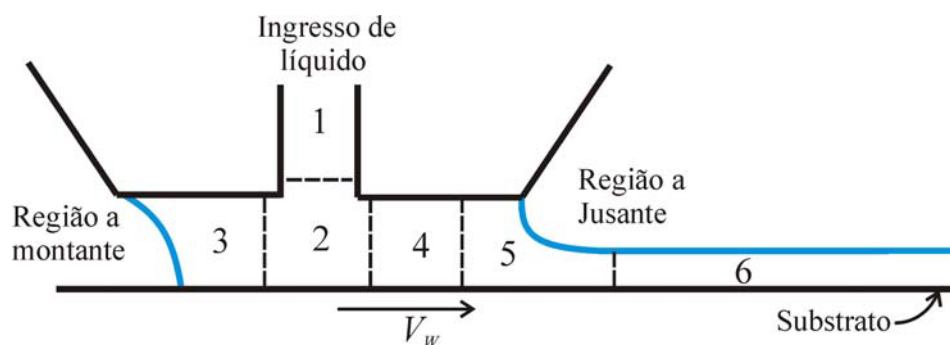


Figura 1.12 - Regiões do escoamento no processo de revestimento por extrusão: 1 região de escoamento retilíneo, escoamento de pressão; 4 também de escoamento retilíneo mas com superposição dos escoamentos de arrasto e de pressão; 2, 3 e 5 escoamento curvado.

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	(1-4)
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.

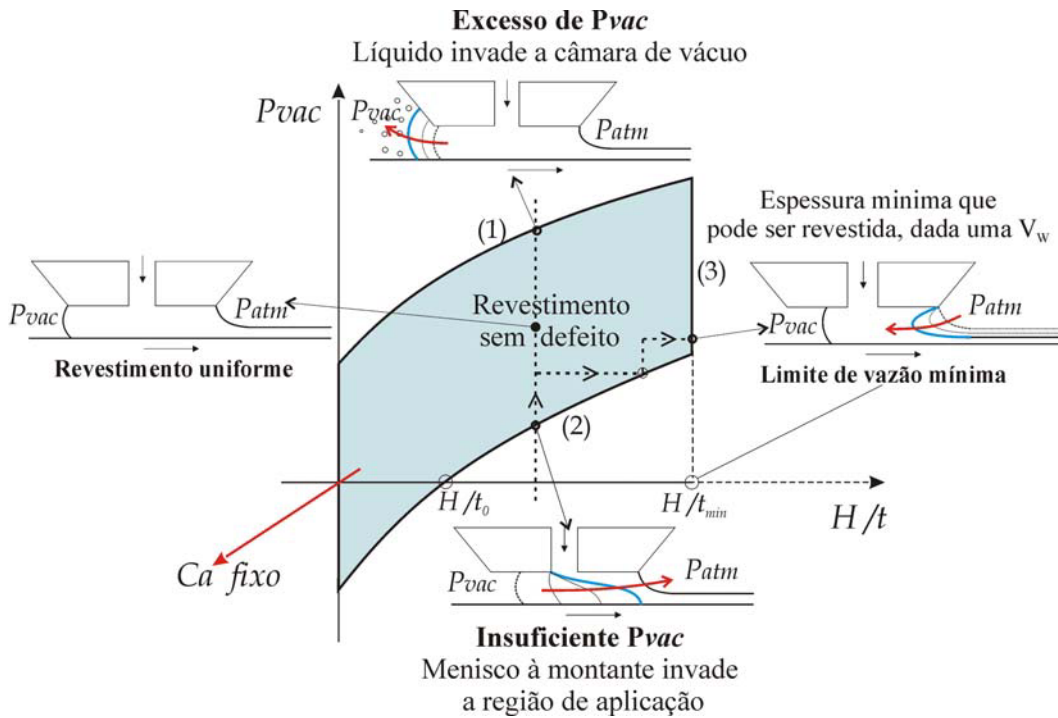


Figura 1.13 - Janela de operação no plano P_{VAC} vs H/t .

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.

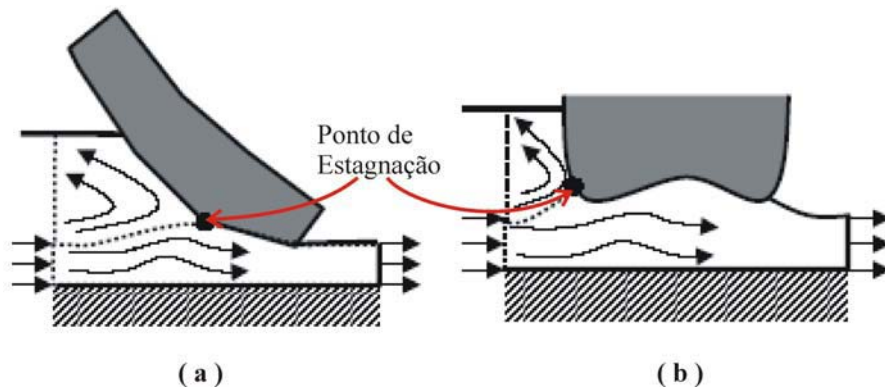


Figura 1.14 - Esquemas de alguns sistemas de revestimento que fazem uso da ação elastohidrodinâmica, (a) revestimento por faca raspadora e (b) revestimento por membrana flexível.

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.

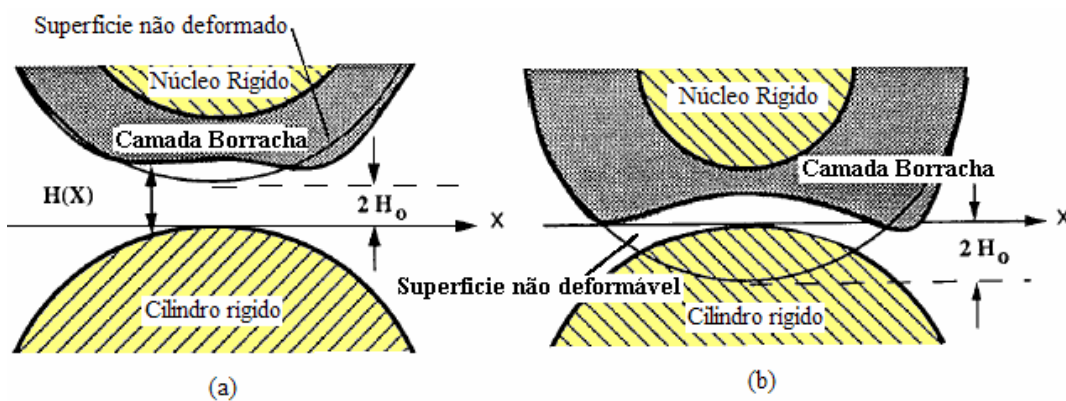


Figura 1.15 - Esquema do sistema usado por Carvalho e Scriven (1997) para o análise da elastohidrodinâmica entre cilindro rígido e cilindro deformável. (a) com espaçamentos positivos e (b) com espaçamentos negativos.

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.

2

Formulação Matemática

Apresenta-se neste capítulo a descrição matemática do problema físico proposto, isto é o escoamento bi-dimensional, em regime permanente de um líquido newtoniano na região limitada pela fenda de alimentação, o substrato apoiado em um cilindro deformável, e dos meniscos à montante e à jusante. Certamente será requerido um conjunto de ferramentas para realizar tal tarefa.

2.1

Equações de Conservação

Num processo de revestimento deseja-se que a camada de filme depositada seja uniforme tanto na direção longitudinal quanto transversal do substrato. Pode-se por tanto considerar o escoamento como bi-dimensional. Adicionalmente também se pode considerar o processo em regime permanente e em condições isotérmicas. Como a região de análise onde ocorre o revestimento é pequena pode-se desprezar o efeito gravitacional.

Nos processos de revestimento os escoamentos são usualmente dominados por efeitos viscosos e apresentam superfícies livres, este último significa que o domínio do escoamento é desconhecido a priori.

Os parâmetros que descrevem o escoamento são a pressão e o campo de velocidades e elas são governadas pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear.

A equação vetorial simplificada da quantidade de movimento é:

$$\rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \nabla \cdot \underline{\underline{T}} \quad (2-1)$$

onde \vec{v} é o vetor de velocidade, $\underline{\underline{T}}$ é o tensor das tensões e ρ é a densidade do fluido.

A equação de conservação de massa para um líquido incompressível também de forma simplificada é dada por:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2-2)$$

Para avaliar as tensões é necessário introduzir uma equação constitutiva. O líquido é considerado como sendo líquido Newtoniano, e assim:

$$\underline{\underline{T}} = -p \underline{\underline{I}} + \nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \quad (2-3)$$

onde \vec{v} é o vetor velocidade e p é a pressão (parte isotrópica do tensor) e $\underline{\underline{I}}$ é o tensor unitário.

2.2

Condições de contorno para resolver as equações de conservação

As equações diferenciais parciais de conservação de quantidade de movimento precisam de condições de contorno. As condições de contorno podem ser de dois tipos: informação sobre a velocidade na fronteira, ou informações sobre a força (tração) que atua na fronteira.

A Figura 2.1 apresenta esquematicamente as condições de contorno utilizadas:

1. Na superfície da barra, aplicação da condição de não deslizamento e não penetração

$$\vec{v} = \vec{0}$$

2. No substrato, condição de não deslizamento e não penetração

$$\vec{v} = V_w \vec{i}$$

3. Entrada do escoamento, perfil parabólico

$$\vec{v} = -\frac{6Q}{H} \left[\left(\frac{x}{H} \right) - \left(\frac{x}{H} \right)^2 \right] \vec{j}$$

4. Saída do escoamento, completamente desenvolvido

$$\vec{n} \cdot \nabla \vec{v} = \vec{0}$$

5. Superfícies livres,

- Condição cinemática

$$\vec{n} \cdot \vec{v} = 0$$

- Balanço de forças na interface

$$\vec{n} \cdot \underline{\underline{T}} = \mathbf{K} \sigma - \vec{n} \cdot Pa$$

$$\vec{n} \cdot \left(\underline{\underline{T}} \cdot \vec{n} \right) = \mathbf{K} \sigma - \vec{n} \cdot Pa$$

$$\vec{t} \cdot (T \cdot \vec{n}) = 0$$

onde σ é a tensão superficial, \mathbf{K} é a curvatura da superfície livre e Pa é a pressão atmosférica.

6. Linha de contato dinâmica (LCD)

- Condição de Navier-Slip

$$\vec{t} \cdot (T \cdot \vec{n}) = \frac{1}{\beta} \vec{t} (\vec{v} - \vec{V}_w)$$

onde β é o coeficiente de deslizamento, \vec{v} é vetor velocidade do fluido e \vec{V}_w é o vetor velocidade da superfície sólida.

- Ângulo de molhamento

$$\vec{n} \cdot \vec{n}_w = \cos \theta_d$$

\vec{n} e \vec{n}_w são o vetor normal na interface líquida e a superfície do substrato respectivamente, θ_d é o ângulo de contato dinâmico aparente imposto para especificar a inclinação do menisco a montante sobre o substrato.

7. Linha de contato estática à Jusante

$$\vec{x}_{LCE} = \vec{x}_{quina}$$

onde \vec{x}_{LCE} é o vetor posição do fluido que fica na linha de contato estática a jusante que é fixada na quina da barra de revestimento \vec{x}_{quina}

8. Linha de contato estática à Montante

$$\vec{n} \cdot \vec{n}_w = \cos \theta_d$$

também se deve impor um ângulo de contato entre a interface líquida e a superfície da barra de revestimento, sendo que ele pode se movimentar ao longo da geometria da barra assim:

$$\vec{j} \cdot \vec{x} = H$$

onde H é a posição do perfil do lábio a montante da barra de revestimento acima do substrato

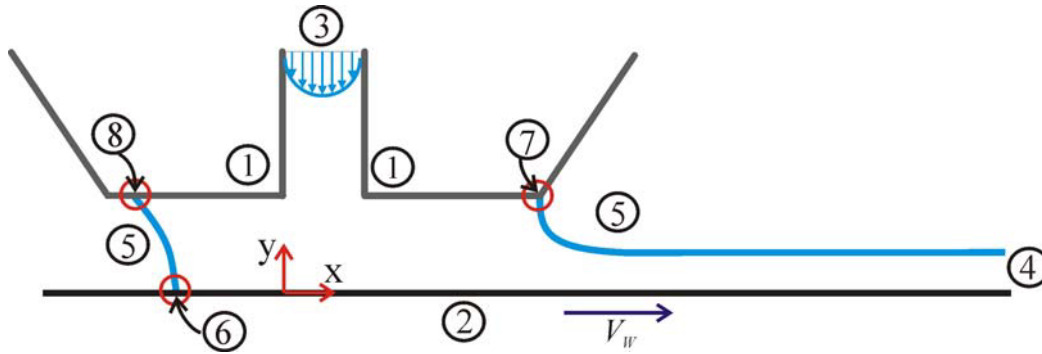


Figura 2.1 - Esquema mostrando a numeração utilizada para descrever as condições de contorno para a equação de quantidade de movimento linear.

2.2.1

Deformação da superfície do cilindro - Modelo unidimensional de molas

Um dos objetivos importantes a se tratar neste trabalho é o análise do processo de revestimento com o substrato apoiado em um cilindro deformável, esta secção apresenta o modelo utilizado para descrever esta interação fluído-estrutura.

Uma simples maneira de descrever a deformação de uma parede elástica é assumindo que o deslocamento de cada ponto na parede não deformada é somente normal a ela e depende apenas da carga aplicada naquele ponto. Tal modelo equivale a uma distribuição contínua de molas independentes orientadas perpendicularmente à parede não deformada, como esquematizado na Figura 2.2.

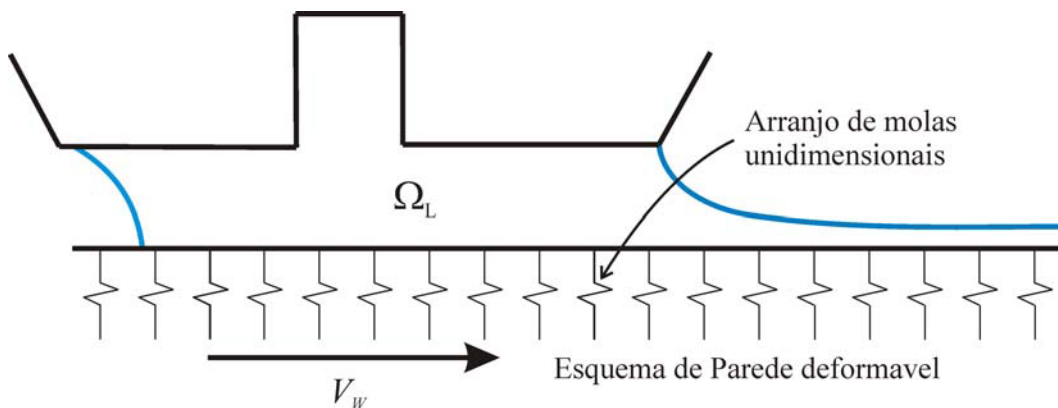


Figura 2.2 - Esquema do modelo de molas.

Na interpretação deste modelo Hookeano, o deslocamento na direção normal na superfície não deformada é uma função linear da componente normal da tração hidrodinâmica, como mostrado na Figura 2.3:

$$\vec{N}_0 \cdot (\vec{n} \cdot \underline{T}) = -K \Delta X \quad (2-4)$$

onde $\Delta X \equiv \vec{N}_0 \cdot (\vec{x} - \vec{X}_0)$ é o deslocamento normal da parede; \vec{X}_0 é a posição de um ponto da parede no seu estado não deformado. \vec{N}_0 é o vetor normal unitário da parede não deformada em \vec{X}_0 ; \vec{n} é o vetor normal unitário da parede deformada em \vec{x} ; \underline{T} é o tensor de tensão de Cauchy no líquido, e K é a constante de proporcionalidade, referido simplesmente como a constante da mola, o qual relaciona-se com as propriedades elásticas da cobertura do cilindro.

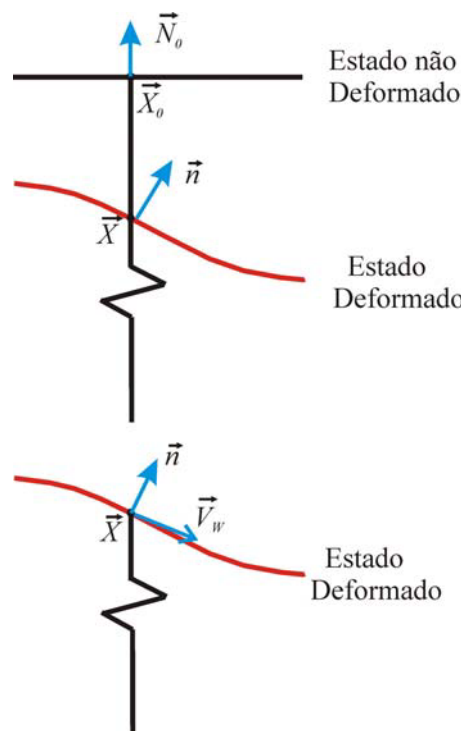


Figura 2.3 - Esquema da deformação da superfície com o modelo de molas.

A força da carga por unidade de área, ou tração, que o líquido faz sobre a parede elástica é $\vec{n} \cdot \underline{T}$. Para o caso de líquido newtoniano, a força de carga é:

$$\vec{n} \cdot \underline{T} = -p\vec{n} + \mu\vec{n} \cdot [\nabla\vec{v} + (\nabla\vec{v})^T] \quad (2-5)$$

Onde p é a pressão do líquido e \vec{v} é a sua velocidade.

A velocidade do fluido que esta em contato com a parede deformável deve ser igual a velocidade da parede, devido à condição de não deslizamento e não penetração. A distribuição da velocidade ao longo da superfície da parede

deformável depende de como se deforma ela. A velocidade da parede deformável é tangencial à parede e corresponde à combinação do movimento de corpo rígido da parede com o movimento de deformação da mola.

A desvantagem deste modelo é que não representa a tensão de cisalhamento que o líquido exerce, a incompressibilidade do material ou o efeito do coeficiente de Poisson.

2.2.2

Parâmetros que governam o problema

No processo de revestimento por extrusão os parâmetros mais importantes estão dados na seguinte tabela Tabela 1:

Parâmetro	Unidades (SI)	Faixa de Operação
Velocidade do substrato, V_w	m/s	0,1 - 5
Distancia barra/substrato, H	m	5 - 1×10^{-4}
Viscosidade do líquido de revestimento, μ	Pa.s	0,0005 - 0,1
Densidade do líquido de revestimento, ρ	Kg/m ³	1000 - 1200
Tensão superficial, σ	Kg/s ²	0,025 - 0,045
Número de Reynolds, Re		0,05 - 1000
Número de Capilaridade, Ca		10^{-4} - 25
Número de elasticidade, Ne		10^{-5} - 0,1

Tabela 1 - Faixas típicas dos parâmetros de operação em processos de revestimento por extrusão - Gates, (1999).

2.3

Escoamento viscoso em processos de revestimento por Extrusão

Analisa-se agora o tipo de escoamento nas zonas de alimentação, na zona à montante e à jusante em função das suas variáveis físicas e geométricas, como mostrado na Figura 2.4. Deve-se indicar que neste análise consideramos a distância barra/substrato diferente na região do lábio à montante H_M e na região do lábio à jusante H_J .

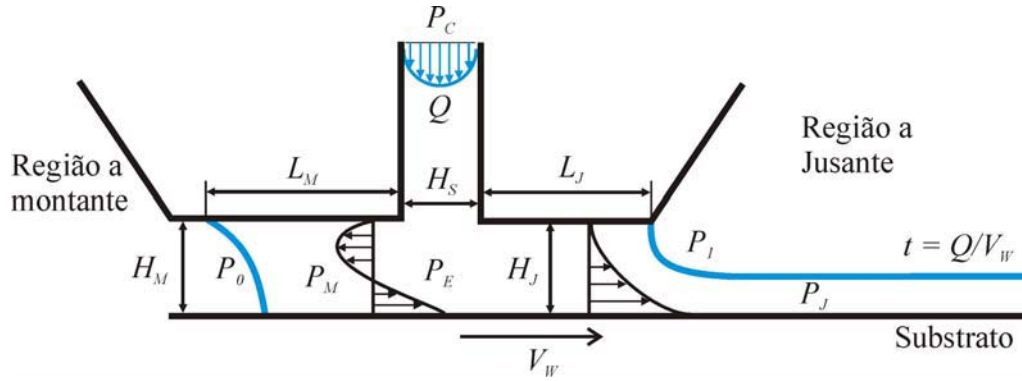


Figura 2.4 - Esquema dos perfis de velocidade no processo de revestimento por extrusão.

A. Escoamento na zona de alimentação (tipo Poiseuille)

$$Q = \frac{H_S^3}{12\mu} \frac{P_C - P_E}{L_F} \quad (2-6)$$

onde P_C é a pressão na câmara de distribuição e P_E é a pressão na região de aplicação sob a fenda de alimentação.

B. Escoamento na zona à montante (combinação Poiseuille + Couette)

$$Q = 0 = \underbrace{\frac{H_M^3}{12\mu} \frac{P_M - P_E}{L_M}}_{< 0} + \frac{V_W H_M}{2} \quad (2-7)$$

$$< 0 \Rightarrow P_M \approx P_0 < P_E$$

onde P_M é a pressão na região de aplicação sob o lábio à montante e P_0 é a pressão do ar próxima ao menisco à montante, H_M distância entre o lábio à montante da barra de revestimento e o substrato.

C. Escoamento na zona à jusante (combinação Poiseuille + Couette)

$$Q = V_W \cdot t = \frac{H_J^3}{12\mu} \cdot \frac{P_E - P_J}{L_J} + \frac{V_W \cdot H_J}{2} \quad (2-8)$$

$$\Rightarrow t = \frac{H_J}{2} + \frac{H_J^3}{12\mu V_W} \cdot \frac{P_E - P_J}{L_J} \quad (2-9)$$

$$\text{caso } t > \frac{H_J}{2} \Rightarrow P_E > P_J \text{ (Para } L_J > 0) \quad (2-10)$$

$$\text{caso } t < \frac{H_J}{2} \Rightarrow P_E < P_J \approx P_1 \text{ (Para } L_J > 0) \quad (2-11)$$

$$\Rightarrow P_0 \approx P_M < P_E < P_J \approx P_1 \quad (2-12)$$

$$\Rightarrow P_1 = P_{atm} \Rightarrow P_0 < P_{atm} \quad (2-13)$$

onde P_J é a pressão na região de aplicação sob o lábio à jusante, P_1 é a pressão do ar próxima ao menisco à jusante e H_J distância entre o lábio à jusante da barra de revestimento e o substrato.

É justamente esse o motivo pelo qual a pressão de vácuo é necessária como mostrado na eq. (1-15), de outro modo o escoamento chegaria a se tornar instável apresentando defeitos.

O escoamento na região à montante e à jusante é uma combinação dos escoamentos de Couette e *Poiseuille*, como se pode observar nos esquemas da Figura 2.5.

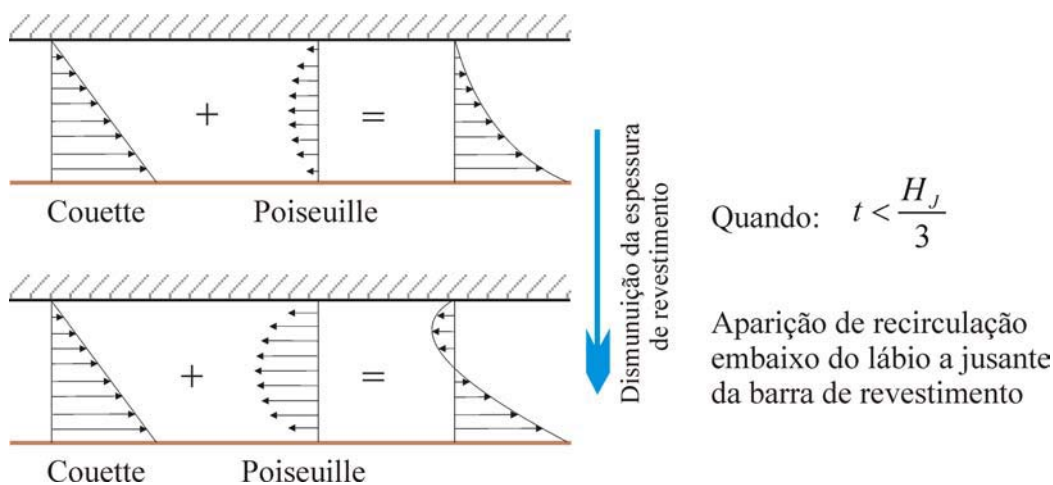


Figura 2.5 - Esquemas dos escoamentos de Couette e Poiseuille entre duas placas paralelas.

2.3.1

Relação entre o Vácuo e a longitude da região de aplicação

Considera-se o termo Vácuo como a diferença entre a pressão ambiental aplicada na região à jusante e a pressão subatmosférica aplicada na região à montante. Analisaremos a influência da pressão de vácuo no comprimento da

região de aplicação, que é a soma dos comprimentos L_M e L_J , mostrados na Figura 2.4.

Da eq. (1.9) e a eq. (1.10) considerando as aproximações da Eq. (1.14), obtemos a seguinte expressão:

$$Vac = P_{atm} - P_{vac} = \frac{12\mu V_w L_J}{H_J^3} \left(\frac{H_J}{2} - t \right) + \frac{6\mu V_w L_M}{H_M^3} (H_M) \quad (2-14)$$

É importante indicar que uma barra de revestimento apresenta uma longitude fixa do lábio à jusante L_J , mais isso não quer dizer que L_J não possa ser uma variável a se analisar, dado que isto implicaria ter outra barra equivalente mas com outra L_J .

Quanto maior for o vácuo, maior será o comprimento à montante L_M , e para o caso limite de não ter a região de aplicação à montante ($L_M = 0$) o mínimo vácuo necessário para obter uma espessura de revestimento, t , é:

$$Vac_{min} = P_{atm} - P_{vac} = \frac{12\mu V_w L_J}{H_J^3} \left(\frac{H_J}{2} - t \right) \quad (2-15)$$

Este regime é instável e impossível de se manter como escoamento permanente e bidimensional, assim o escoamento 2D se tornaria instável dando origem a defeitos no filme revestido.

Quanto maior o comprimento da região de aplicação à montante, maior será a estabilidade do escoamento e maior será a habilidade de acomodar as flutuações na zona de aplicação.

Também existe um valor máximo para o vácuo que pode ser aplicado antes que o comprimento da região à montante aumente demais e o líquido invada a caixa do vácuo.

Desta forma, existe uma faixa de valores de pressão de vácuo de forma que o escoamento seja bi-dimensional e em regime permanente. Fora desta faixa, o processo de revestimento não leva a um produto livre de defeitos.

2.4

Solução de Problemas com superfícies livres e deformáveis

A solução de equações de Navier-Stokes que são validas em domínios fixos podem se tratar sem muita dificuldade, já que a forma do domínio é conhecida.

Geralmente, é suficiente usar um método algébrico para discretizar esses domínios baseados na distribuição dos subdomínios numa fronteira prescrita pelo usuário, por exemplo, a Interpolação Transfinita (Thompson, Warsi e Mastin (1985)). Mas problemas com superfícies livres como os considerados no presente trabalho apresentam uma dificuldade adicional. Porque a forma do domínio é desconhecida *a priori*, a discretização do domínio não pode ser prescrita, porque esta é parte da solução do problema.

Uma maneira de resolver este inconveniente seria transferir aquele domínio físico desconhecido a outro domínio de referencia fixo, i.e. que o sistema de equações conservação e as condições de contorno formuladas no domínio físico devem ser transformadas para um sistema equivalente definido num domínio de referencia fixo. Esta transformação é efetuada mediante um mapeamento. O mapeamento pode ser efetivado por diversos métodos já existentes como são: o método dos “Splines” ou “Geração elíptica da malha” ou por “deformação do domínio”.

O método mais simples é o **Método dos Splines** (Kistler (1984)). Neste método os nós localizados na superfície livre “deslizam” sobre linhas “splines” pré-definidas como mostrado na Figura 2.6. Nos primeiros trabalhos com “splines” apenas os nós da superfície mudavam de posição. Os demais nós eram fixos, então apresentavam problemas com a malha quando esse deslocamento era maior. Nos trabalhos mais recentes, os nós interiores também se deslocam acompanhando o movimento dos nós da superfície livre; a limitação que apresentaram é que as programações não eram generalizadas e novas “splines” teriam que ser definidas para cada problema.

Os outros métodos como de **Geração da Malha Elíptica** (Christodoulou (1991), Benjamin (1994)) e o **Método da Deformação do Domínio** (de Almeida (1995), Musson (2001)) usam equações diferenciais para gerar a malha. O primeiro deles será utilizado no presente trabalho e será explicado com mais detalhes no Capítulo 2.4.1.

Para resolver este problema aplicando os métodos já mencionados para problemas de valor de contorno, o sistema de equações diferenciais e as condições de contorno formuladas no domínio físico Ω devem ser transformadas para um sistema equivalente definido num domínio de referência ou computacional

$\bar{\Omega}$ conhecido. Esta transformação é efetuada mediante um mapeamento $\bar{x} = \bar{x}(\bar{\xi})$ (mapeamento direto) que conecta os dois domínios ($\Omega \rightarrow \bar{\Omega}$). O domínio físico é parametrizado pelo vetor posição $\bar{x} = (x,y)$ e o domínio de referência por $\bar{\xi} = (\xi, \eta)$ como mostrado na Figura 2.7.

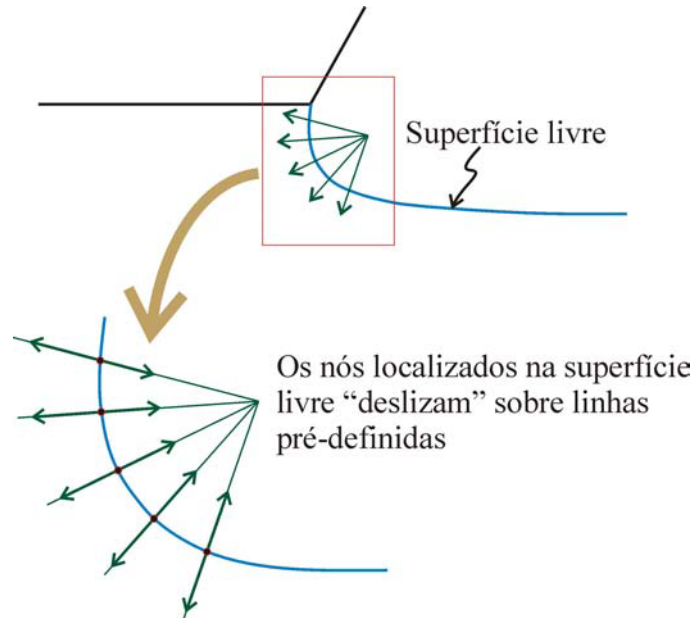


Figura 2.6 - Esquema do método dos Splines.

O mapeamento utilizado faz parte da solução do problema. Existem várias maneiras de definir este mapeamento como já mencionamos acima, como o cálculo de \bar{x} , vetor posição no sistema de coordenadas físicas, corresponde ao cálculo das coordenadas dos pontos nodais da malha, costuma-se denominar as equações que descrevem este mapeamento como equações de geração de malha.

Para escrever as equações que governam o problema no domínio de referência, as derivadas em relação às coordenadas do domínio físico (x,y) devem ser representadas por derivadas em relação as coordenadas do domínio de referência (ξ, η) . Para isto define-se o Tensor Gradiente de Deformação do Mapeamento $(\nabla_{\bar{\xi}} \bar{x})$ que no caso 2D é:

$$\nabla_{\bar{\xi}} \bar{x} = \frac{\partial \bar{x}}{\partial \bar{\xi}} = J_T = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{pmatrix} \quad (2-16)$$

Para uma variável $\varphi = \varphi(\xi, \eta)$ qualquer, temos, aplicando a regra da cadeia

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \end{pmatrix} = J_T \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2-17)$$

Logo, as derivadas em relação às coordenadas x e y podem ser escritas em função das coordenadas do domínio de referência através das seguintes equações:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= \frac{1}{|J_T|} \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial y} &= \frac{1}{|J_T|} \left(-\frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (2-18)$$

onde,

$$|J_T| = J_T = \det J_T = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (2-19)$$

é o determinante do jacobiano da transformação.

Duas condições devem ser satisfeitas pelo mapeamento:

1. O contorno do domínio de referência deve ser mapeado sobre o contorno do domínio físico (ver Figura 2.7)

$$\bar{\Gamma} \Leftrightarrow \Gamma \quad (2-20)$$

2. O mapeamento deve ser inversível

$$J_T > 0 \quad (2-21)$$

O determinante do jacobiano representa a relação entre as áreas diferenciais dos domínios:

$$d\Omega = |J_T| d\bar{\Omega} \quad (2-22)$$

2.4.1

Geração de Malha Elíptica

Uma possibilidade que se tem mostrado satisfatória para a solução de problemas como superfícies livres é utilizar o método proposto por Benjamin (1994), que é uma generalização do método desenvolvido por Christodoulou

(1988) e Christodoulou e Scriven (1991), e baseia-se na idéia de minimizar um funcional que mede o grau de suavidade da malha:

$$\int_{\Omega} (D_{\xi} |\nabla \xi|^2 + D_{\eta} |\nabla \eta|^2) d\Omega = 0 \quad (2-23)$$

D_{ξ} e D_{η} são os coeficientes de difusão das coordenadas potenciais ξ e η , e controlam o espaçamento das curvas de ξ e η constante. As equações de Euler que minimizam este funcional são um par de equações diferenciais parciais elípticas, similares às encontradas em problemas de transferência de calor com condutividade térmica variável.

$$\nabla \cdot (D_{\xi} \nabla \xi) = 0 \quad (2-24)$$

$$\nabla \cdot (D_{\eta} \nabla \eta) = 0 \quad (2-25)$$

A forma geral destas equações pode ser escrita da seguinte forma:

Quando os coeficientes de difusão são constantes, as equações anteriores se reduzem à equação de Laplace.

As equações anteriormente indicadas, formuladas no domínio físico, descrevem o mapeamento inverso $\vec{\xi} = \vec{\xi}(\vec{x})$, isto é ξ e η são variáveis dependentes. Como o objetivo do esquema de geração da malha é encontrar o mapeamento direto $\vec{x} = \vec{x}(\vec{\xi})$, estas equações são reescritas no domínio de referência, calculado assim as coordenadas no domínio físico em função de coordenadas no domínio de referência.

O mais simples domínio de referência a ser adotado é uma região quadrangular dividida em quadrados unitários.

Em muitas situações um domínio físico complexo deve ser dividido em várias regiões, cada uma das quais pode ser mapeada em regiões quadradas de referência, tal como é mostrado na Figura 2.7. Quando isto acontece condições de contorno especiais são necessárias, como por exemplo, para as interfaces entre regiões, ou quando várias regiões coincidem num único ponto.

Esta técnica tem sido aplicada com muito sucesso por diversos pesquisadores porque malhas estruturadas, suaves, quase ortogonais e com espaçamento controlado são obtidas.

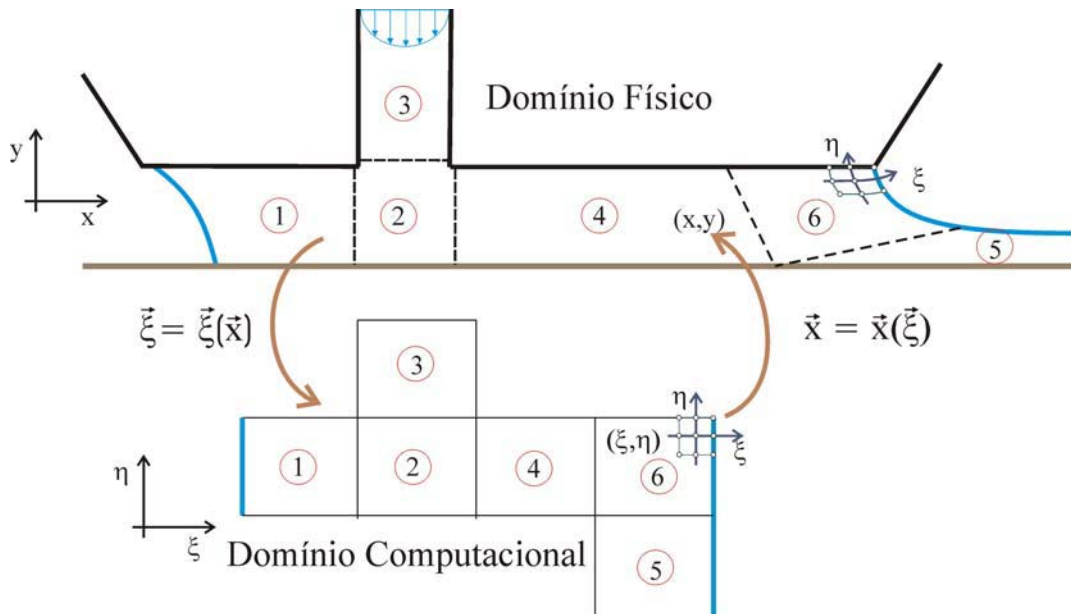


Figura 2.7 - Esquema mostrando o processo de mapeamento.

Para resolver o par de equações diferenciais parciais apresentadas na eq. (2-24), e na eq. (2-25) é necessário ter condições de contorno. Estas são apresentadas à continuação.

2.4.2 Condições de contorno para a Geração da Malha

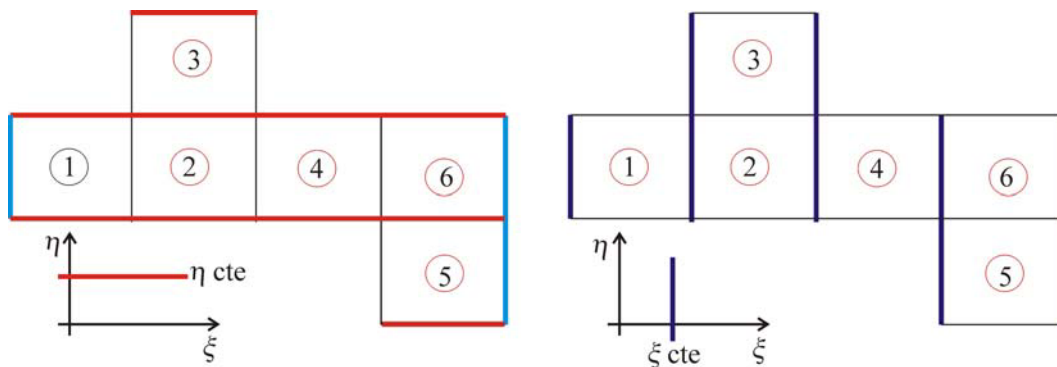


Figura 2.8 - Representação das condições de contorno para a geração da malha: a) η da eq. (2-25), b) ξ da eq. (2-24).

As condições de contorno que são comumente utilizadas para as equações de geração de malha como referenciado com a Figura 2.9, serão descritas a seguir:

1. **Ângulo prescrito:** O ângulo θ formado pelas coordenadas ξ ou η (como mostrado na Figura 2.8) é prescrito ao longo do contorno.

$$\vec{n} \cdot \nabla \vec{\xi} = |\nabla \vec{\xi}| \cos(\theta) \quad (2-26)$$

2. **Nós fixos:** A posição dos nós nos contornos é fixa.
3. **Distribuição nodal prescrita:** uma função de distribuição é utilizada para distribuir os nós ao longo do contorno.

$$\xi = f^{-1}(s), \eta = g^{-1}(s) \quad (2-27)$$

Onde s , é a longitude de arco ao longo do contorno.

4. **Deslizamento sobre o contorno:** Os nós são livres para deslizar sobre o contorno numa linha cuja equação é conhecida.

$$f(x) = 0 \quad (2-28)$$

5. **Condição cinemática:** O líquido não pode atravessar a superfície livre, esta condição associada com a física do problema é formulada por:

$$\vec{n} \cdot \vec{v} = 0 \quad (2-29)$$

Esta relação localiza implicitamente a posição de uma superfície livre, e é responsável pelo acoplamento das equações de conservação e as equações que descrevem a posição dos nós da malha.

Uma representação esquemática das condições de contorno de malha elíptica foram apresentadas no trabalho de Zevallos (2003) como mostrado na Figura 2.9.

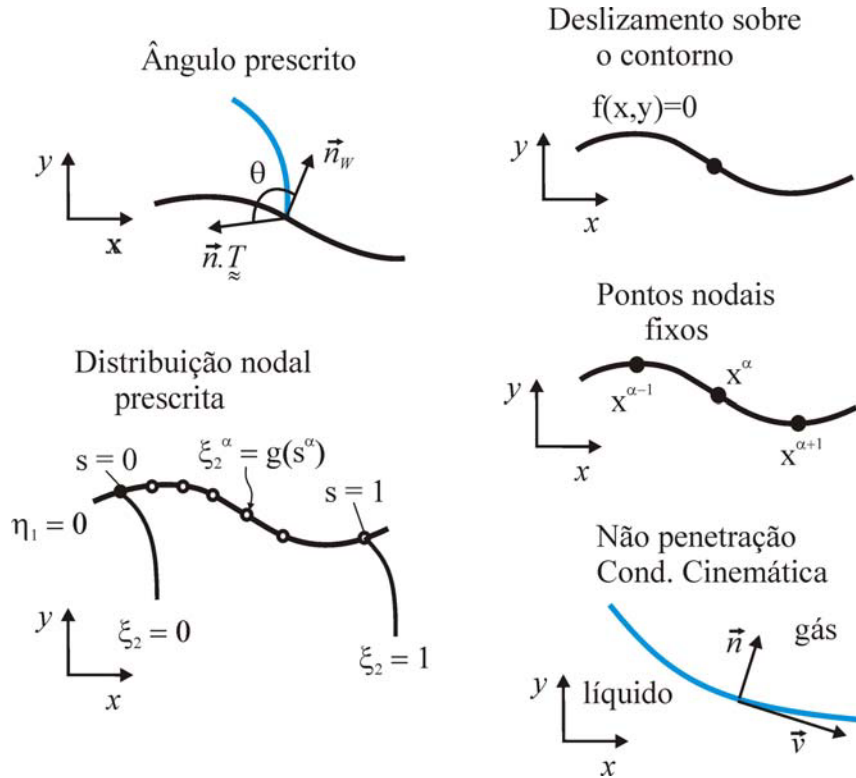


Figura 2.9 - Condição de contorno das equações de geração de malha elíptica. A condição de pontos nodais fixos é apropriada para contornos cuja localização é fixa e conhecida. A condição de não penetração é apropriada para superfícies livres. A condição de ângulo prescrito, distribuição nodal prescrita, e a equação prescrita dos contornos (pontos nodais que podem deslizar) são apropriadas para contornos conhecidos tanto quanto contornos cuja localização forma parte do problema.

3

Modelagem computacional do escoamento com superfícies livres e deformáveis

Para resolver o escoamento em processos de revestimentos por Extrusão, se fizeram uso do sistema de equações de Navier-Stokes na forma bidimensional e as condições de contorno apropriadas e como o problema apresenta superfícies livres foi preciso transferir aquele domínio físico desconhecido a outro domínio de referencia fixo, esta transformação é efetuada mediante um mapeamento representado por um par de equações diferenciais parciais elípticas indicadas no capítulo anterior. Todas estas equações diferenciais deveram ser resolvidas de forma acoplada resultando num sistema de equações diferenciais. O sistema de equações diferenciais parciais será resolvido pelo método dos Elementos Finitos especificamente o método de Galerkin.

3.1

Solução do sistema de equações pelo método de Galerkin/ Elementos Finitos

As equações da continuidade, da conservação da quantidade de movimento, da geração da malha são resolvidas utilizando o método de Galerkin. As formas fracas das equações de continuidade, da quantidade de movimento e da malha são escritas da seguinte maneira:

$$Rc = \int_{\Omega} (\nabla \cdot \vec{v}) \chi J_T d\bar{\Omega}, \quad (3-1)$$

$$Rm = \int_{\Omega} \rho (\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}) \vec{W} J_T d\bar{\Omega} + \int_{\Omega} (T : \nabla \vec{W}) J_T d\bar{\Omega} - \int_{\Gamma} (\vec{n} \cdot \vec{T}) \cdot \vec{W} \left(\frac{d\Gamma}{d\bar{\Gamma}} \right) d\bar{\Gamma}, \quad (3-2)$$

$$Rx = - \int_{\Omega} (\nabla \vec{W} \cdot D \cdot \nabla \vec{\xi}) J_T d\bar{\Omega} + \int_{\Gamma} (\vec{n} \cdot D \cdot \nabla \vec{\xi}) \cdot \vec{W} \left(\frac{d\Gamma}{d\bar{\Gamma}} \right) d\bar{\Gamma}, \quad (3-3)$$

$\vec{W} = (\phi_1, \phi_2)$ é o vetor função peso da equação da conservação da quantidade de movimento e de geração da malha, χ é a função peso da equação de continuidade, e D é o tensor de coeficientes de difusão.

Uma expansão das equações acima em coordenadas cartesianas é apresentada a seguir.

- **Resíduos da equação da continuidade: Rc^i**

$$Rc^i = \int_{\Omega} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \chi_i J_T d\bar{\Omega} \quad (3-1)$$

- **Resíduos da equação da conservação da quantidade de movimento linear: Rm^i**

$$Rm_x^i = \int_{\Omega} \left[\rho \phi_i \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial x} T_{xx} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} T_{xy} \right) \right] J_T d\bar{\Omega} - \int_{\Gamma} \phi_i (\vec{n} \cdot \vec{T})_x \left(\frac{d\Gamma}{d\bar{\Gamma}} \right) d\bar{\Gamma} \quad (1-2)$$

$$Rm_y^i = \int_{\Omega} \left[\rho \phi_i \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial x} T_{xy} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} T_{yy} \right) \right] J_T d\bar{\Omega} - \int_{\Gamma} \phi_i (\vec{n} \cdot \vec{T})_y \left(\frac{d\Gamma}{d\bar{\Gamma}} \right) d\bar{\Gamma} \quad (1-3)$$

- **Resíduos da equação de geração da malha: Rx^i**

$$Rx_x^i = - \int_{\Omega} D_{\xi} \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \right) d\bar{\Omega} + \int_{\Gamma} D_{\xi} \frac{1}{J} \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \eta_x - \frac{\partial x}{\partial \eta} \eta_y \right) \phi_i \left(\frac{d\Gamma}{d\bar{\Gamma}} \right) d\bar{\Gamma} \quad (1-4)$$

$$Rx_y^i = - \int_{\Omega} D_{\eta} \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} - \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \right) d\bar{\Omega} + \int_{\Gamma} D_{\eta} \frac{1}{J} \left(- \frac{\partial y}{\partial \xi} \eta_x + \frac{\partial x}{\partial \xi} \eta_y \right) \phi_i \left(\frac{d\Gamma}{d\bar{\Gamma}} \right) d\bar{\Gamma} \quad (1-5)$$

Quando o Modelo de Molas é usado para descrever a deformação da camada elástica do cilindro, o balanço de forças na parede deformável representado pela eq. (2.4), é também aplicado dentro de uma forma integral. Uma das equações residuais da geração de malha é substituída pelo resíduo ponderado do balanço de tensões normais.

$$R_y^i = \int_{\Gamma} \left\{ \frac{1}{K} \vec{N}_0 \cdot (\vec{n} \cdot \vec{T}) + \vec{N}_0 \cdot (\vec{x} - \vec{X}_0) \right\} \delta_i \left(\frac{d\Gamma_{def}}{d\bar{\Gamma}} \right) d\bar{\Gamma} = 0 \quad (1-6)$$

A deformação somente será na coordenada “y” como mostrada do domínio físico da Figura 2.7. As funções ponderadas δ são escolhidas para representar funções Delta Dirac (método de colocação), tais que o resíduo se torne num avaliador da condição de contorno, assim:

$$R_y^i = \left\{ \frac{1}{K} \vec{N}_0 \cdot (\vec{n} \cdot \vec{T}) + \vec{N}_0 \cdot (\vec{x} - \vec{X}_0) \right\}_{yi} = 0 \quad (1-7)$$

3.1.1

Representação dos campos através de funções base

As funções base são iguais às funções pesos (fundamento do método de Galerkin) e os campos desconhecidos são então representadas como uma combinação linear destas.

Os campos desconhecidos como as velocidades u e v , pressão p , posição dos nós da malha x, y são escritos em cada elemento como:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^9 (U_j \phi_j) \\ \sum_{j=1}^9 (V_j \phi_j) \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{2 \times 9 \text{ incógnitas;}} \quad (1-8)$$

$$\vec{p} = \begin{bmatrix} p \\ \partial p / \partial x \\ \partial p / \partial y \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^3 (P_j \chi_j) \Rightarrow \mathbf{3 \text{ incógnitas;}} \quad (1-9)$$

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^9 (X_j \phi_j) \\ \sum_{j=1}^9 (Y_j \phi_j) \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{2 \times 9 \text{ incógnitas;}} \quad (1-10)$$

onde $\phi_j(\xi, \eta)$ são funções bases representadas por polinômios lagrangeanos biquadráticos, $\chi_j(\xi, \eta)$ são funções base linear descontínuas, U_j, V_j, P_j, X_j e Y_j são os coeficientes da expansão de cada campo em termo das funções base e representam as incógnitas do problema discretizado.

A escolha da combinação de funções base não é arbitrária porque a convergência do método pode ser prejudicada. Para o caso Newtoniano é provado que elementos biquadráticos para a velocidade e linear descontínua para a pressão funcionam bem (Santos, J. M. 0). Para esta combinação a condição de Ladyzhenskaya-Babûska-Brezzi (Brezzi e Fortin (1991)) é satisfeita.

3.2

Solução do sistema de equações não lineares pelo método de Newton

A integração numérica das equações dos resíduos ponderados é efetuada utilizando o Método da Quadratura Gaussiana com três pontos de integração em cada direção.

Quando as variáveis independentes são escritas em termos das funções base, obtém-se um sistema de equações algébricas não lineares, cuja representação em notação compacta é:

$$\vec{R}(\vec{c}; \vec{b}) = 0 \quad (1-11)$$

\vec{R} é o vetor de resíduos ponderado associado como os graus de liberdade de cada elemento, \vec{c} representa o vetor solução (coeficientes das funções base que são as incógnitas do problema) e \vec{b} é o vetor de parâmetros do qual o problema depende. A equação anterior é resolvida de forma iterativa através do método de Newton:

$$J\delta\vec{c} = -\vec{R}(\vec{c}; \vec{b}) \quad (1-12)$$

$$\delta\vec{c} = \vec{c}^{k+1} - \vec{c}^k \quad (1-13)$$

\vec{R} é avaliado em $c^{(k)}$, \mathbf{J} é a matriz Jacobiana cujos componentes são dados por:

$$\mathbf{J}_{ij} \equiv \frac{\partial \vec{R}_i}{\partial \vec{c}_j} \quad (1-14)$$

Neste trabalho os coeficientes da matriz Jacobiana são calculados analiticamente

A iteração começa com um valor inicial estimado c^0 e continua até que a equação da notação compacta seja aproximadamente satisfeita, isto significa que a norma L_2 dos vetores resíduos e vetor solução devem satisfazer a desigualdade

$$\|\delta\vec{c}\|_2 + \|\delta\vec{R}\|_2 \leq \varepsilon$$

O método de Newton converge quadraticamente quando a estimativa inicial está perto da solução, mas pode divergir quando esta aproximação inicial cai fora do raio de convergência. Métodos de continuação são utilizados para garantir boas inicializações.

Em cada iteração de método de Newton, a matriz banda resultante é resolvida mediante decomposição LU utilizando o método frontal proposto por Hood (1976). Subrotinas denominadas *Basic Linear Algebra Subprograms* (BLAS) são utilizadas para melhorar a portabilidade do código quando plataformas diferentes são usadas. O método frontal oferece a vantagem de economia de memória.

3.3

Estratégia de continuação para obter o ponto de dobra

Pontos críticos geralmente estão presentes na solução de equações diferenciais não lineares. Dentre estes, encontra-se com mais frequência os pontos chamados de pontos de dobra, os quais podem ser determinados por análise de estabilidade ou construindo o caminho da solução (como feito neste trabalho). Em um ponto de dobra, a matriz Jacobiana do método de Newton é singular. Análises de estabilidade linear com respeito a perturbações 2D de um sistema físico prevêem uma mudança de estabilidade precisamente no ponto de dobra. Então traçando o lugar geométrico dos diversos pontos de dobra em função das variáveis de operação, encontra-se a região de operação estável do processo. Neste trabalho os pontos de dobra correspondem ao limite de espessura.

Em solução de escoamento com superfícies livres, obter uma primeira solução numérica convergida é complicado. As presenças das superfícies livres e das linhas de contato tornam as equações altamente não lineares e o processo de solução bastante complexo. O elevado número de parâmetros que controlam o escoamento e o elevado número de incógnitas incrementa o tamanho e a esparcidade da matriz a ser invertida dificultando ainda mais o processo de obtenção da solução.

Para obter uma boa estimativa inicial para o problema com superfície livre, resolve-se o escoamento em uma geometria fixa e as superfícies livres são substituídas por paredes deslizantes. Esta solução é utilizada como “chute inicial” para resolver o problema com a superfície livre com tensão superficial alta. Uma explicação detalhada das estimativas é apresentada na próxima secção.

4

Resultados Numéricos

Neste capítulo apresentam-se os resultados da modelagem teórica obtido através da técnica descrita no capítulo anterior. O fluido analisado foi considerado como sendo newtonianos altamente viscosos, aplicados sobre um substrato flexível que fica apoiado sobre um cilindro. Uma propriedade característica do material do cilindro será analisada, i.e, sendo com cilindro rígido e cilindro deformável.

Para cada característica material do cilindro é estudada as influências do número de capilaridade Ca , da geometria da barra de revestimento, da pressão de vácuo P_{vac} , e da viscosidade μ .

Primeiro faremos uma análise da geometria da barra de revestimento, como mostrado na Figura 4.1. foram estudados três comprimentos de lábio à jusante L_J , portanto três geometrias diferentes: lábios longos, lábios médios e lábios curtos.

O critério de dimensionamento, das geometrias utilizadas, foi o seguinte: A geometria do tipo “A” representa uma barra de revestimento de lábio à jusante médio com $L_J = L$, a geometria tipo “B” apresenta um comprimento do lábio à jusante longo com $L_J = 5L$, e a geometria tipo “C” de lábio à jusante curto com $L_J = 1/5L$. Todos eles apresentam igual altura de fenda de alimentação H_S . As malhas obtidas para as geometrias selecionadas são mostradas na Figura 4.1.

4.1

Validação do código computacional

O código computacional utilizado é parte do programa desenvolvido por Carvalho (1994) para problemas envolvendo fluidos newtonianos e que logo depois foi ampliado por Romero (2003) para casos não newtonianos. Originalmente escrito na linguagem de programação FORTRAN 77/90. O programa já foi amplamente testado em problemas relacionados com superfícies livres envolvendo fluidos Newtonianos e não Newtonianos.

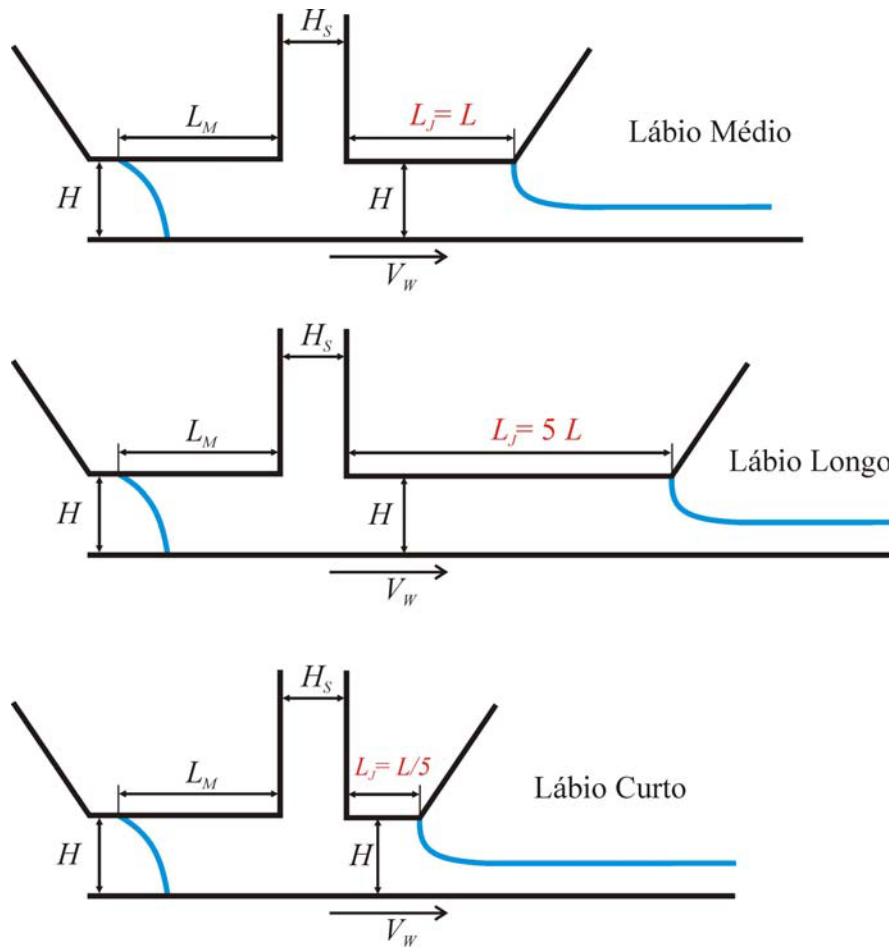


Figura 4.1 - Diferentes configurações geométricas analisadas no processo de revestimento por Extrusão.

O programa consta de três partes principais que trabalham em seqüência, identificadas como: PREPRO6 (pré-processador), solver6 (solução) e POSTPRO6 (pós-processador). As informações referentes a número de regiões, elementos, nós, conectividade, condição de contorno, malha, etc. são definidas no PREPRO6. Os campos de interesse são obtidos no SOLVER6 e a geração de arquivos capazes de serem interpretados e visualizados através do software TECPLOT, é feita através do pós-processador POSTPRO6.

A plataforma utilizada para compilar e executar o código foi um computador com processador INTEL(R) Pentium(R) 4 CPU 2.00GHz, com 1.50 GB de memória física (RAM), sistema operacional *Microsoft Windows XP Professional*.

4.2 Teste de malha

Foram usados malhas com diferentes graus de refinamento para cada tipo de geometria testada. O número de elementos das malhas testadas foi de 255 e de 504. A Figura 4.2 apresenta detalhes da discretização dos domínios entre as superfícies livres. Os testes de malha foram executados utilizando $Ca = 0,1$ e para um mesmo valor da Pressão de vácuo. A espessura mínima obtida com cada malha bem como o número de elementos e graus de liberdade são apresentados na Tabela 2.

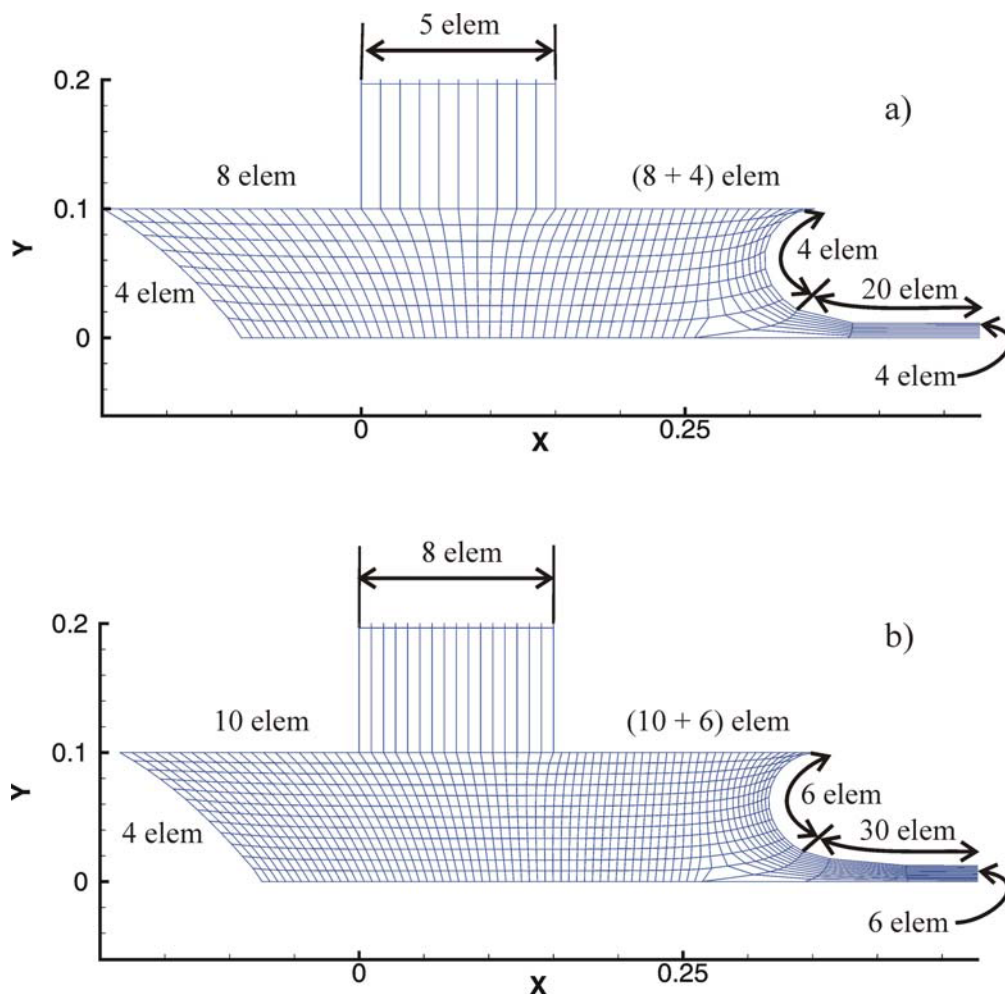


Figura 4.2 - Detalhe do domínio da malha da geometria de lábios curtos: a) M2, b) M2S.

O domínio do problema foi dividido em 6 regiões como indicado na Figura 2.7 e estruturada como segue, a malha:

- M1 e M2: 255 elem. $(4 \times 8 + 4 \times 5 + 15 \times 5 + 4 \times 8 + 20 \times 4 + 4 \times 4)$ e $H = 2/3H_S$.
- M1S e M2S: 504 elem. $(6 \times 10 + 6 \times 8 + 15 \times 8 + 6 \times 10 + 30 \times 6 + 6 \times 6)$, e $H = 2/3H_S$.

- M3, M4 e M5: 305 elem. ($5 \times 8 + 5 \times 5 + 15 \times 5 + 5 \times 8 + 20 \times 5 + 5 \times 5$), e $H = 4/3 H_s$.
Lembrando que H é a distancia da separação barra/substrato e H_s é a altura da fenda de alimentação.

A comparação das respostas para estas diferentes malhas foi feita através do limite de vazão mínima, t , obtida para cada discretização. A malha com 255 elementos para as duas geometrias, i.e. malha M1 e M2 não apresentaram uma variação significativa comparativamente aos mais refinados M1S e M2S respectivamente, como ilustrado na Tabela 2. Também indicamos que as malhas M3, M4 e M5 que apresentam um grau de refinamento intermédio entre M1 e MS1 ou M2 e MS2 foram utilizadas para seleccionar a melhor geometria. Para a modelagem da elastohidrodinâmica usou-se a malha M1 e M2.

Tipo de Geometria	Malha	Nome do Projeto	Número de Elementos	Graus de liberdade	Gap, H , mm	t mm
Geo. A	M1	Slota3	255	5361	0,1	0,0231
	M1S	sslota3	504	10260	0,1	0,0230
Geo. C	M2	slot3c	255	5361	0,1	0,0113
	M2S	Sslot3c	504	10260	0,1	0,0119
Geo. A	M3	Proy3a	305	6327	0,2	-
Geo. B	M4	Proy3b	305	6327	0,2	-
Geo. C	M5	Proy3c	305	6327	0,2	-

Tabela 2. - Número de elementos e incógnitas das diferentes malhas usadas para resolver o escoamento no processo de revestimento por Extrusão, onde mostra a independência do número de elementos para obter a espessura t , nas mesmas condições de operação.

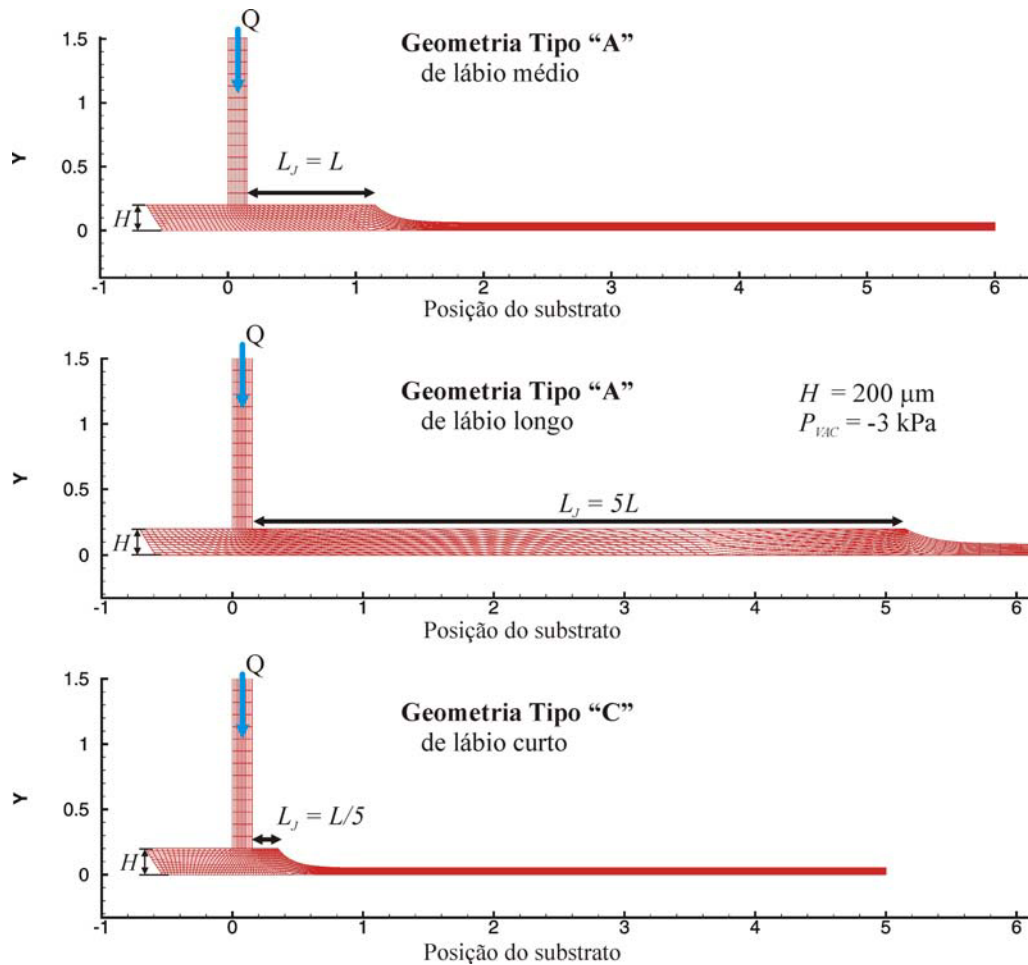


Figura 4.3 - Representação das Malhas M3, M4 e M5 analisadas no processo de revestimento por Extrusão para valores iguais de H e P_{vac} .

4.3 Problemas preliminares

Nesta parte mostram-se os problemas preliminares sequenciais resolvidos para assegurar uma boa aproximação inicial para o problema de superfície livre. Para isto é necessário obter boas estimativas para a análise do caso com superfície rígida e com superfície deformável. No primeiro caso se resolveu três problemas preliminares, iniciou-se a análise com uma malha fixa, sem considerar superfície livre como se mostra na Figura 4.4, e os outros dois são considerando superfície livre somente à jusante ver Figura 4.5 e quando apresenta superfície livre à montante e à jusante ver Figura 4.6. E para o último caso i.e. para modelar a superfície deformável usa-se a solução do problema final do caso com superfície rígida como estimativa inicial.

4.3.1

Caso com superfície rígida:

No primeiro problema preliminar usado para resolver a simulação do processo de revestimento com cilindro de apoio rígido, é representado na Figura 4.4, a condição de contorno na face (A) é de escoamento desenvolvido com perfil de velocidade prescrita. As faces (B) são paredes, logo a condição é de impermeabilidade e não deslizamento. Nas faces (C) e (D) condição de placa deslizante onde o fluido pode deslocar sem atrito. A face (E) é de escoamento desenvolvido. E finalmente, na face (F) a placa se desloca com velocidade constante V_w . Neste problema não se resolve a malha, o que facilita o processo de convergência.

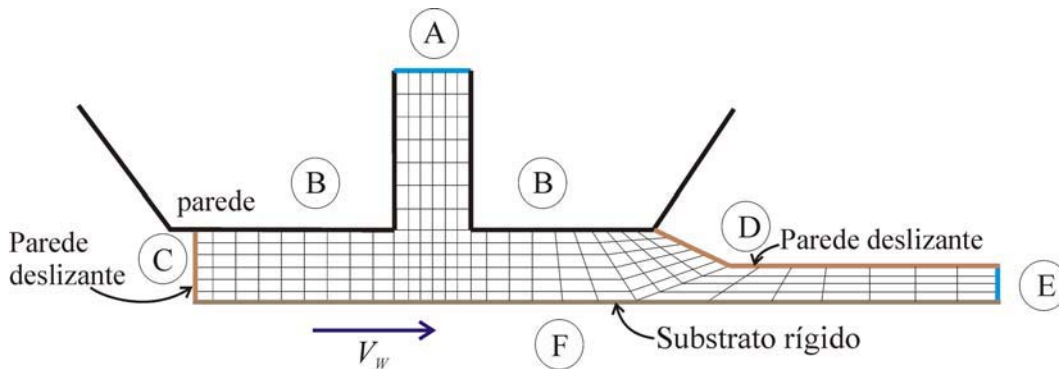


Figura 4.4 - Primeiro caso preliminar para a solução de problemas de superfícies livres, a face C e D é considerada como parede deslizante.

A solução deste caso é utilizada como aproximação inicial para o segundo problema preliminar em que a parede deslizante (D) é substituído pela superfície livre como representado na Figura 4.5. As condições de contorno das faces (A), (B), (C), (E) e (F) são as mesmas do problema anterior. Neste caso resolve-se a malha impondo-se a condição de superfície livre na face (D).

Finalmente a parede deslizante à montante é substituída pela superfície livre (Figura 4.6), e os resultados do caso anterior são utilizados como aproximação inicial, mas considerando um valor de tensão superficial considerável como para manter a superfície livre quase reta. Além disso a espessura de filme deve ser considerada a metade da separação barra/substrato como uma boa aproximação de acordo com a eq. (2.9), para facilitar a convergência.

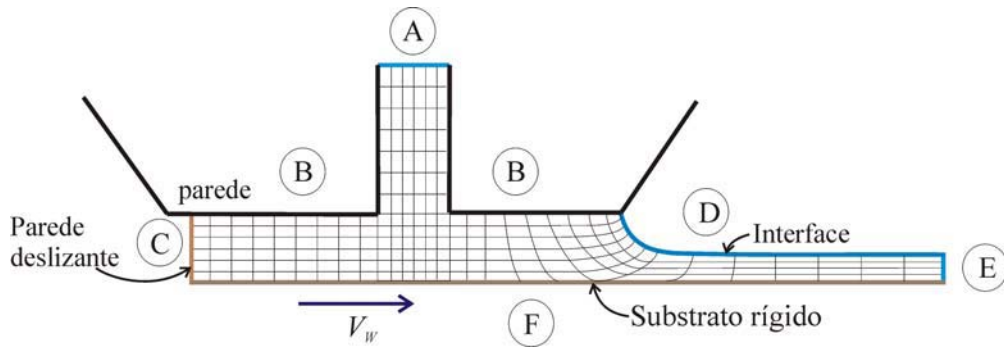


Figura 4.5 - Segundo caso preliminar para a solução de problemas de superfícies livres, a face D já é considerada como superfície livre mas a face C ainda continua como parede deslizante.

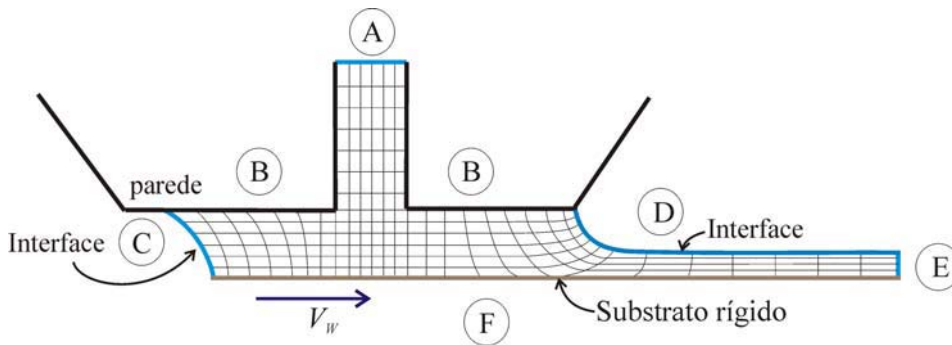


Figura 4.6 - Caso considerando superfícies livres nos meniscos a montante e a jusante.

4.3.2

Caso com superfície deformável:

Para o caso em que o cilindro é considerado deformável, a solução final considerando cilindro rígido é utilizado como estimativa inicial, mas considerando que sua deformação seja quase nula, isto é, utilizando um valor da constante da mola, K , da ordem de 10^8 , para manter quase a mesma geometria do caso anterior, uma vez obtida a convergência do problema, o valor de K é reduzido para o valor adequado de forma a representar uma maior deformação da superfície em questão como é mostrado na Figura 4.7.

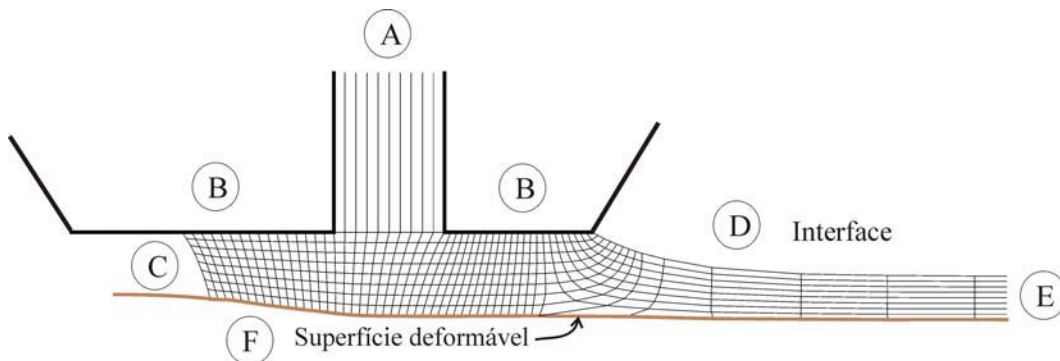


Figura 4.7 - Mostra-se um caso na qual aplicou-se o modelo de Molas.

Mantêm-se as condições nas faces (A), (B), (C), (D) e (E) iguais ao terceiro problema preliminar e aplica-se a condição de superfície deformável na face (F), i.e, aplicação do modelo de molas.

4.4

Resultados da modelagem utilizando cilindro com superfície rígida, considerando Vazão constante

Nos processo de revestimento por Extrusão, o escoamento na zona de aplicação é fortemente afetado pelos parâmetros de operação, como foi discutido no Capítulo 2.3.1. Fixaremos alguns daqueles parâmetros para obter as janelas de operação de processos em função destes parâmetros adimensionais: Ca e da relação H_S/t , lembrando também que a altura da fenda de alimentação H_S (ver Figura 4.1) é invariável para todos os casos analisados. Poderia ter sido usado a distancia barra/substrato H porém ela será variável quando modelamos com cilindro deformável.

4.4.1

Resultados considerando Vazão constante

Inicialmente, serão apresentados os resultados obtidos com a configuração da geometria “A” que foi descrito no inicio deste capítulo. Considerando dois valores de pressão de vácuo P_{VAC} a montante iguais a -1 kPa e -3kPa e uma distancia barra/substrato $H = 200 \mu\text{mm}$, obtemos uma região de operação da Ca (V_W) versus H_S/t tal como se mostra na Figura 4.8. A maneira de como foram obtidos os pontos desta região de operação serão explicadas a seguir.

O ponto “a” é obtido para uma vazão de alimentação de $2Q$, uma pressão de vácuo de -1 kPa e uma velocidade do substrato $V_{W,ini}$, um semelhante padrão de escoamento para esta condição é mostrado na Figura 4.9 “a”. Se incrementarmos a velocidade do substrato V_W até um valor limite onde ocorre a falha do processo, mantendo constante as outras variáveis, obtemos o ponto “b” que indica uma velocidade do substrato $V_{W,Max}$. Agora se incrementarmos P_{VAC} até -3 kPa, mantendo as mesmas condições de alimentação, i.e. com vazão $2Q$, podemos obter maiores velocidades de produção ou seja maiores V_W até um valor máximo como indicado no ponto “c”. Os pontos “d”, “e” e “f” foram obtidos de forma semelhante considerando uma vazão de alimentação menor Q .

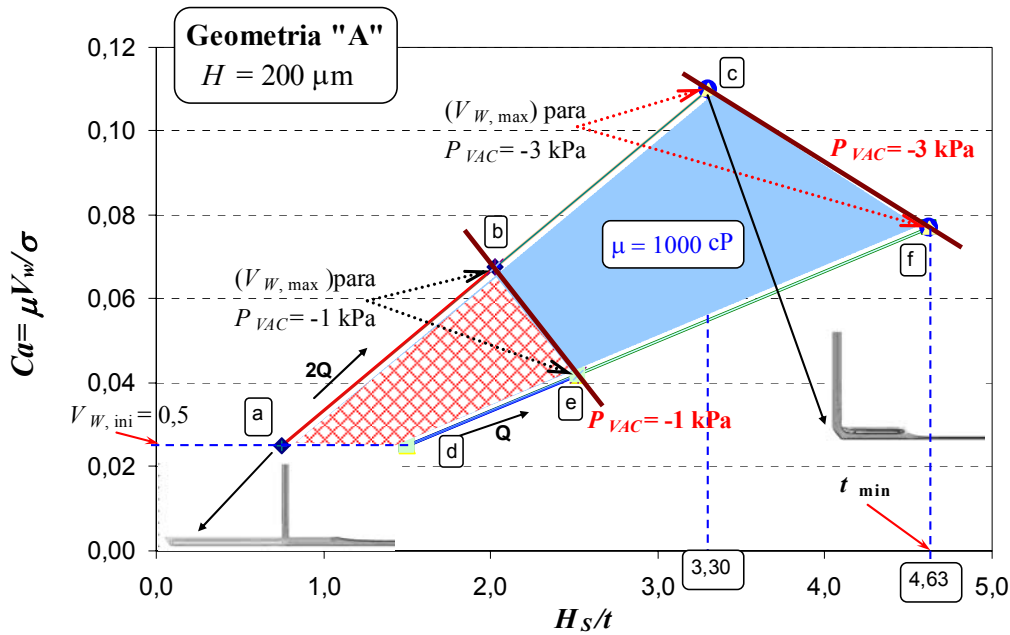


Figura 4.8 - Janela de Operação de Processos da Geometria tipo "A" de lábio médio, para dois valores de vazão constantes Q e $2Q$ e limitados pelas $P_{VAC} = -3\text{kPa}$ e -1 kPa .

O mecanismo de falha do processo, correspondente a uma velocidade é identificado quando o menisco à montante invade a fenda de alimentação, conforme indicado na Figura 4.9(b).

Neste tipo de procedimento a variação da espessura de revestimento é obtida aumentando a velocidade do substrato quando são mantidas fixas as vazões a Q ou a $2Q$.

A janela de operação mostrada (região sombreada) corresponde a um fluido newtoniano com viscosidade de 1000 cP , e uma densidade $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. A menor espessura é obtida quando se aplica uma maior pressão de vácuo ao menisco à montante conforme esperado.

O gráfico da Figura 4.10 apresenta a variação da posição da linha de contato dinâmica X_{LCD} com a espessura do filme depositado t para uma vazão por unidade de largura constante e igual a $2Q = 0.10\text{mm}^2/\text{s}$, e o vácuo é mantida constante em $P_{vac} = -3 \text{ kPa}$. Onde se mostra o caminho da solução partindo de uma espessura grande no ponto "a" como é mostrado na Figura 4.9(a), onde o escoamento é bem comportado, até o ponto "c" que representa o mecanismo de falha do processo esquematizado na Figura 4.9(c). Pode-se observar o avanço da linha de contato dinâmica em direção da fenda de alimentação, o incremento da curvatura do menisco à jusante e o crescimento da recirculação com a diminuição da espessura

do filme este comportamento é previsto para de $t < H/3$ (mostrado na Figura 2.5). O comportamento obtido com a pressão de vácuo de -1kPa foi similar ao descrito acima.

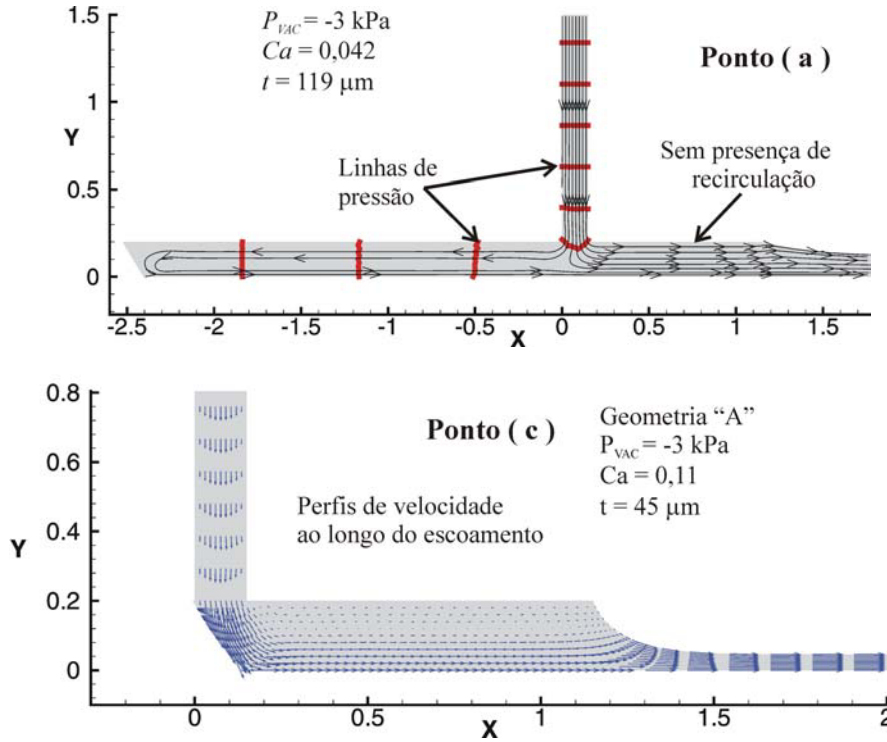


Figura 4.9 - Estes gráficos correspondem aos pontos "a" e "c" da Figura 4.8. a) Início do processo onde o escoamento é bem comportado, b) Representação do mecanismo de falha do processo pela invasão no menisco à montante.

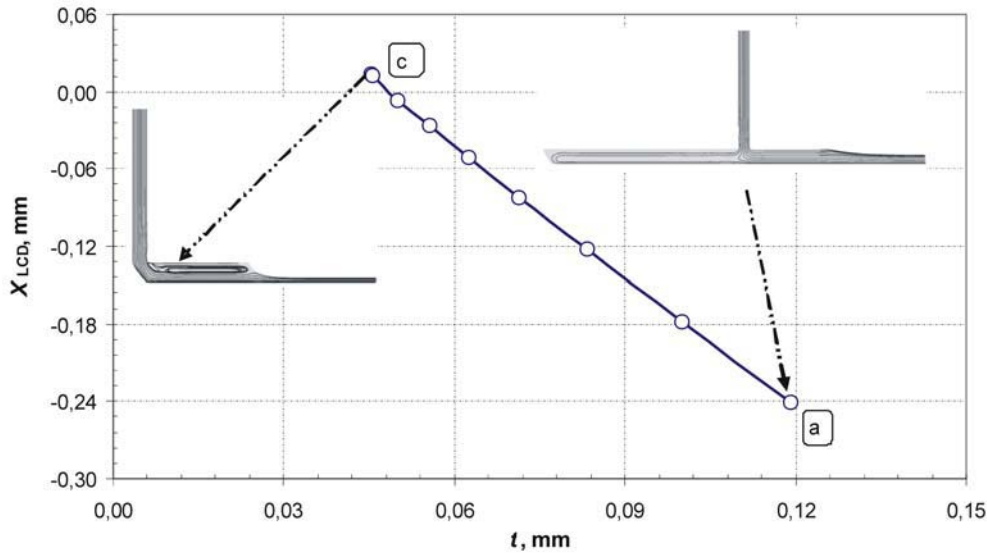


Figura 4.10 - Caminho da solução representada pela posição da linha de contato dinâmica para diferentes velocidades do substrato, com vazão constante $2Q$ e pressão de vácuo $P_{vac} = -3\text{kPa}$, para a geometria de lábio médio.

No gráfico da Figura 4.11 o caminho da solução é apresentado novamente, porém agora no plano com coordenadas em forma adimensional para as mesmas condições de operação anterior, já mencionadas. Para cada condição de operação pode-se calcular a espessura do filme na qual o mecanismo de falha do processo ocorre. Esta condição determina o limite de velocidade máxima: não existe solução bidimensional para o sistema de equações para velocidade maior do que a velocidade onde ocorre o mecanismo de falha de processo.

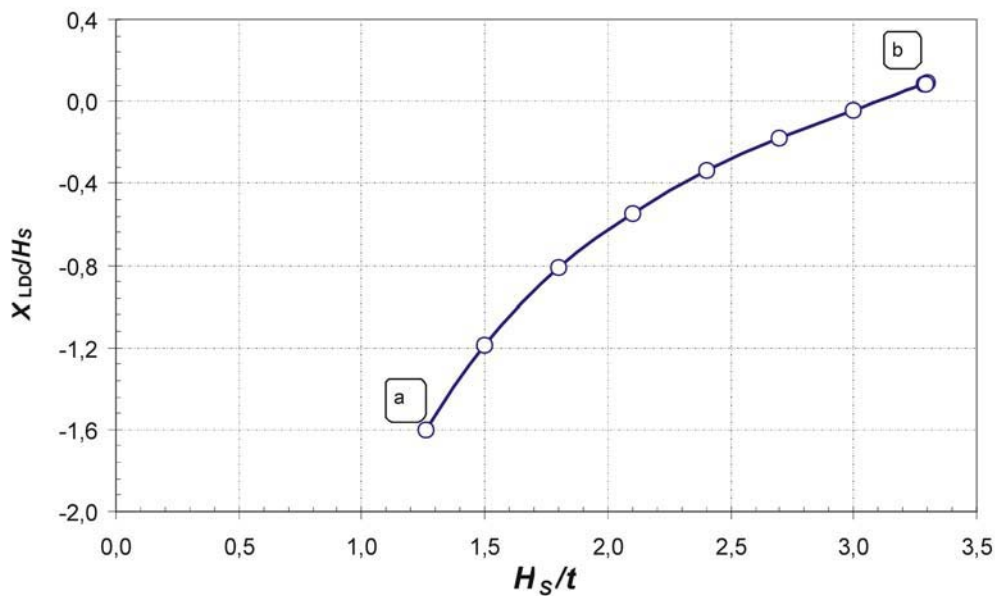


Figura 4.11 - Caminho da solução adimensional representada pela posição da linha de contacto dinâmica para diversas velocidades do substrato, com vazão constante $2Q$ e uma pressão de vácuo $P_{VAC} = -3\text{kPa}$. - Geometria Tipo "A" de lábio médio.

A variação da pressão na região de revestimento ao longo do substrato é apresentada na Figura 4.12 para as condições mencionadas. Quatro perfis são ilustrados correspondentes a espessuras de filme variando entre $t = 83 \mu\text{m}$ ($V_W = 1,2 \text{ mm/s}$) a $t_{min} = 45 \mu\text{m}$ ($V_{W,max} = 2,2 \text{ mm/s}$) este último corresponde a uma condição crítica. O vácuo constante prescrito no menisco à montante é de -3 kPa e a pressão na superfície à jusante é atmosférica. Para o caso de $t = 83 \mu\text{m}$ o gradiente de pressão é mais acentuado sob o lábio à montante por que a vazão devido a escoamento de *Poiseuille* tem que contrabalançar completamente a vazão devido a escoamento de *Couette* como já analisado na secção 2.3.

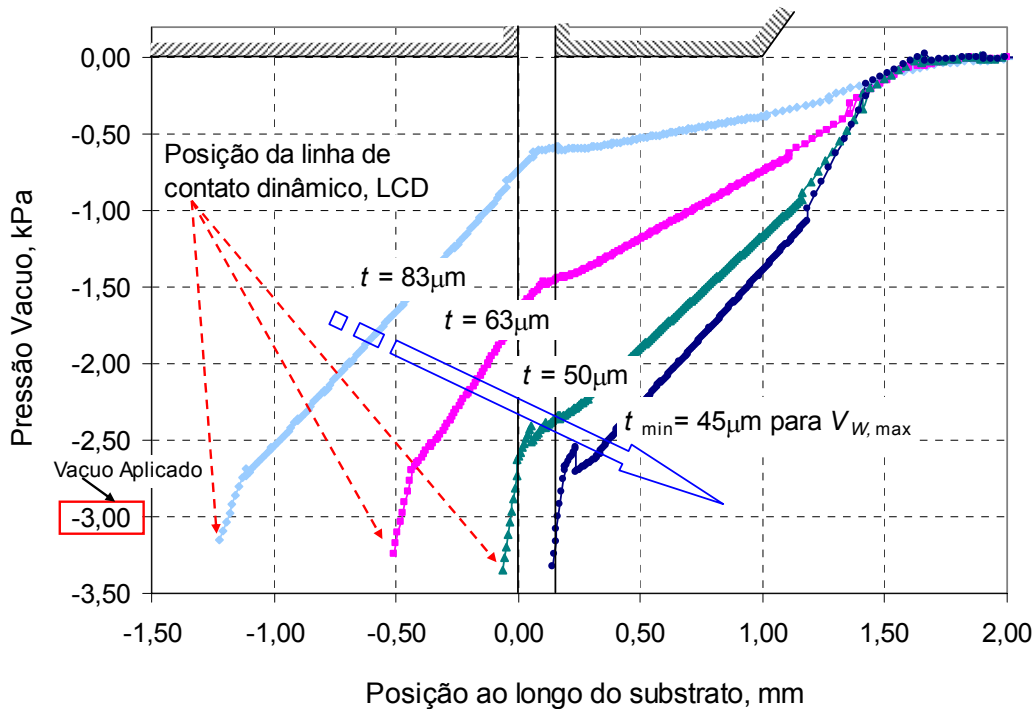


Figura 4.12 - Perfis de pressão ao longo do substrato para uma vazão e um vácuo constante de $0,10\text{mm}^2/\text{s}$ e de -3 kPa respectivamente para $Ca(V_w)$ de $0,04$; $0,08$; $0,1$ e $0,11$. - Geometria Tipo "A" de lábio médio.

A posição da linha de contato dinâmico é alterada quando o vácuo é mantido constante e os outros parâmetros operacionais são modificados. Na Figura 4.13 verificou-se que o aumento da velocidade e conseqüente incremento do número de capilaridade, faz com que a linha de contato dinâmico se desloque na direção da fenda de alimentação. Se o vácuo não for aumentado o suficiente, o menisco à montante invade completamente a fenda de alimentação chegando a se posicionar na região à jusante tal como mostrado na Figura 4.13. Esta situação acontece durante processos reais de revestimento com conseqüências negativas comprometendo a uniformidade do filme revestido.

A presença de recirculações na zona de aplicação ocorre para $t < H/3$, como mostrado na Figura 4.13. Também se pode observar um ponto de estagnação no menisco à jusante e escoamento de separação na parede superior do lábio à jusante da barra de revestimento. A causa deste comportamento é pela presença de pressões adversas causados pela forte contribuição do escoamento de *Poiseuille* como se mostra na Figura 2.5.

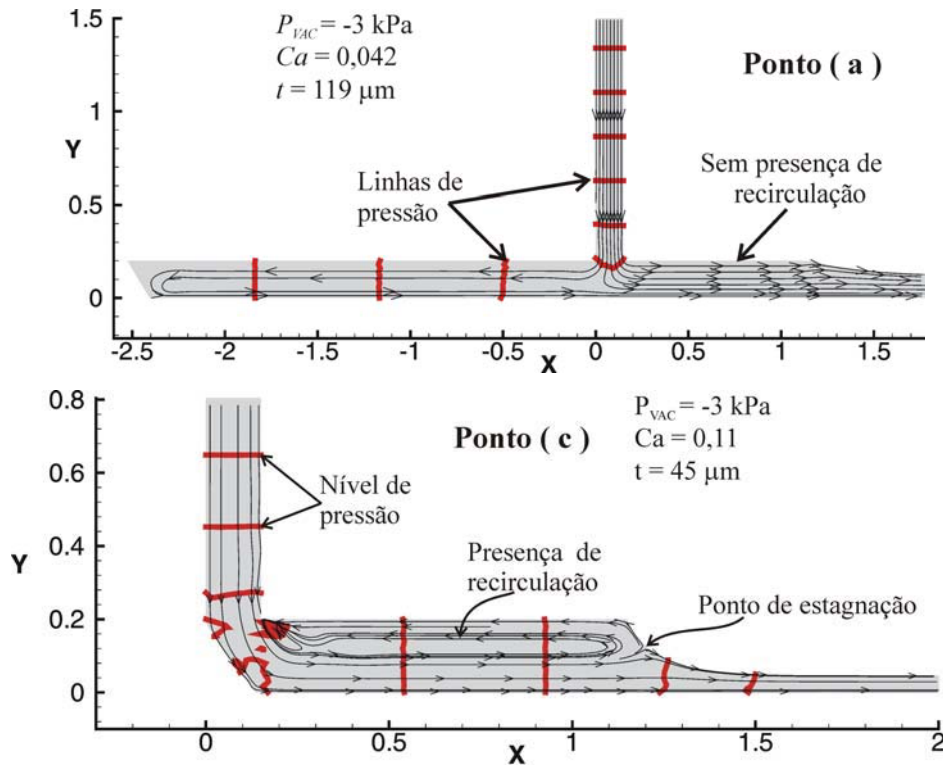


Figura 4.13 - Linhas de corrente e de pressão presentes no caso “a” e “c” da Figura 4.10 e Figura 4.11 mostrando a presença de recirculação e pontos de estagnação para a barra de lábio médio.

Na Figura 4.13, o detalhe da região de revestimento é apresentado para os dois casos extremos, pontos (a) e (b) da Figura 4.10 e Figura 4.11 com vazão $2Q$ e $P_{VAC} = -3 \text{ kPa}$. As diferenças na resposta do escoamento são visíveis: (i) inicialmente não apresenta recirculações sob o lábio à jusante; (ii) a curvatura do menisco à montante aumenta e invade o espaço da zona de aplicação e apresenta um ponto de estagnação deslocando-se ao longo do menisco à jusante. Além disso a presença de uma pequena recirculação na fenda de alimentação é observada, tal como apresentado também por Sartor (1990).

Para o caso de menores valores de pressão de vácuo, por exemplo, para o caso de $P_{VAC} = -1 \text{ kPa}$ o menisco à montante invade rapidamente a fenda de alimentação sem ter formado a recirculação embaixo do lábio à jusante devido que a pressão de vácuo não é ser suficiente para gerar um mínimo gradiente de pressão na região de aplicação para ter um considerável escoamento de *Poiseuille* e assim diminuir a espessura do revestimento, tal como se pode observar na Figura 4.14.

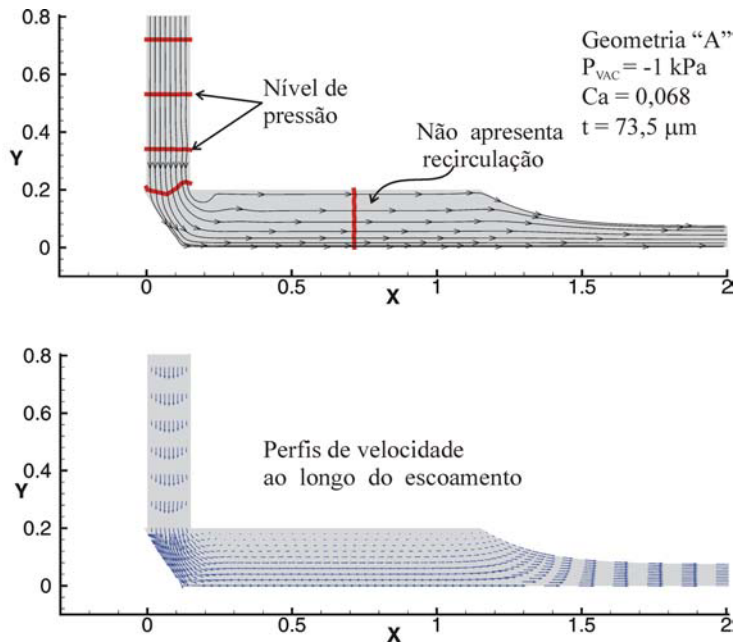


Figura 4.14 - Acima: Linhas de corrente e de pressão, no caso de $P_{VAC} = 1\text{kPa}$ mantendo a mesma vazão $2Q$; embaixo: perfis de velocidade do mesmo caso.

Agora faremos uma análise da influência da viscosidade para a mesma geometria. São consideradas as mesmas condições de pressão de vácuo e vazões, isto é $P_{VAC} = -1 \text{ kPa}$ e -3kPa e vazões Q e $2Q$. Na Figura 4.15, pode-se observar que para o mesmo nível de vácuo aplicado o líquido menos viscoso permite obter menores espessuras de filme.

Em todos os casos até aqui apresentado, o parâmetro de separação barra/substrato foi mantido constante em $H = 200 \mu\text{m}$ e $H_S = 150 \mu\text{m}$.

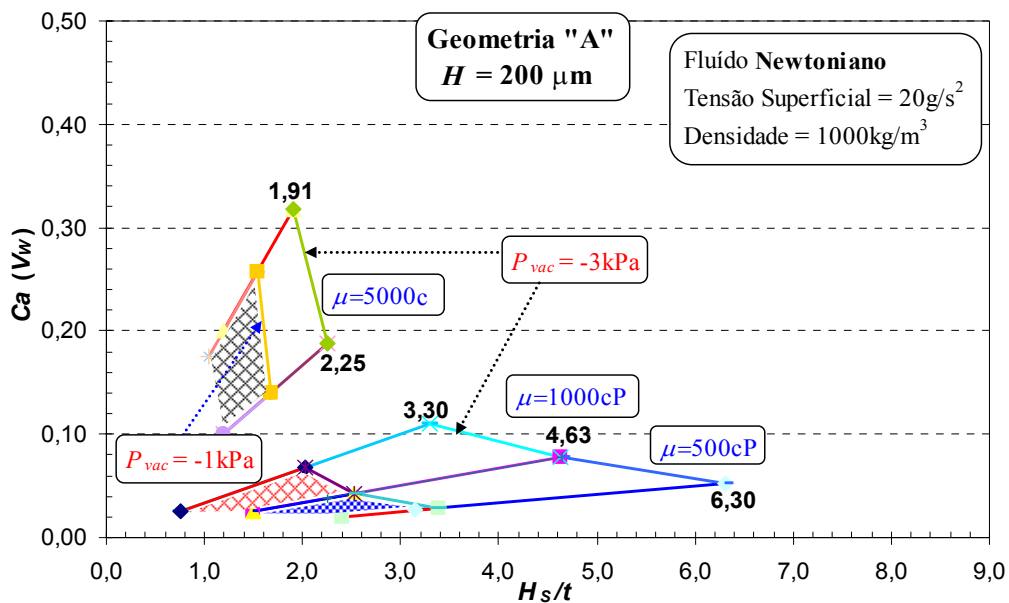


Figura 4.15 - Janelas de Operação de Processo para a Geometria tipo "A" para diferentes valores de viscosidade considerando uma faixa de vazão entre Q e $2Q$.

Os resultados para os casos das geometrias B e C são apresentados na Figura 4.16 e Figura 4.17. A estrutura da malha utilizada foi a mesma para todas as geometrias, i.e. Malha M4 e Malha M5 respectivamente como indicado na Tabela 2 e considerando diversos valores de viscosidade para o liquido, isto é, $\mu = 500$ cP, 1000 cP e 5000 cP.

Estas Janelas de Operação nos permitem identificar a geometria ótima considerando que todas elas foram analisadas com as mesmas condições de operação. A geometria que apresenta maior faixa de operação é a geometria tipo “C”, que possui um comprimento do lábio à jusante menor.

A geometria tipo “B” foi descartada por apresentar restritas faixas de operação na simulação do processo de revestimento, devido que precisa de maior gradiente de pressão na região de aplicação para poder obter menores espessuras de revestimento, i.e maiores P_{VAC} .

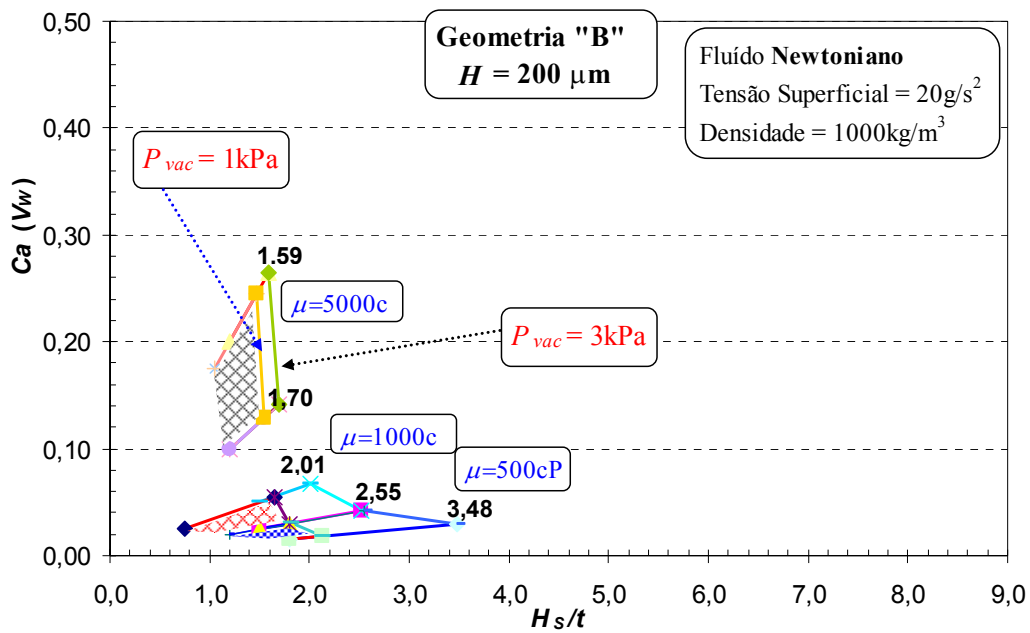


Figura 4.16 - As Janelas de Operação de Processo da Geometria tipo “B” para diferentes valores de viscosidade considerando uma faixa de vazão entre Q e 2Q.

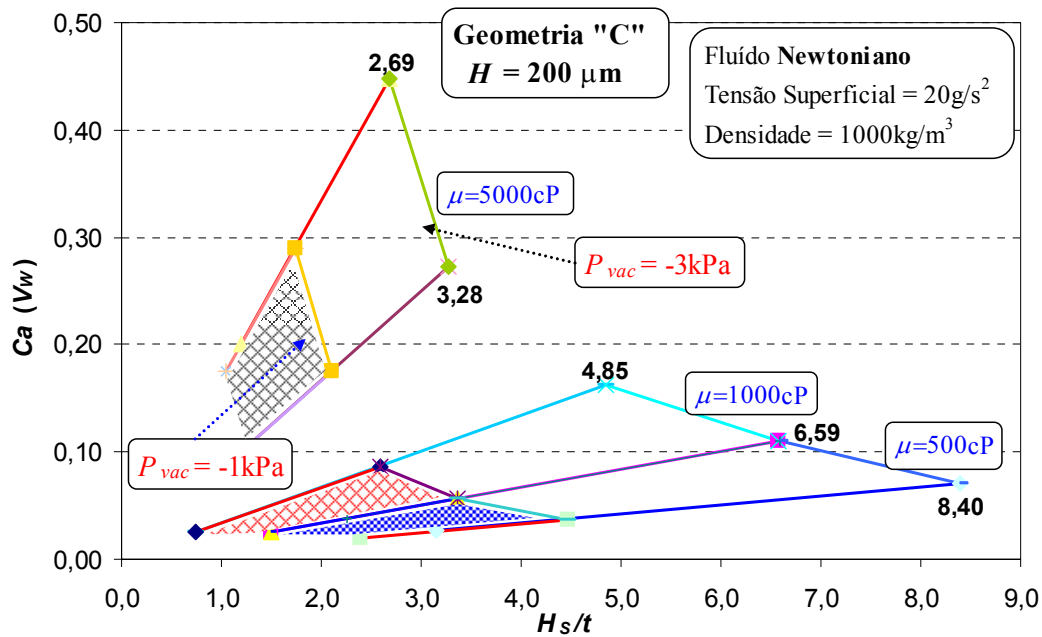


Figura 4.17 - As Janelas de Operação de Processo da Geometria tipo “C” para diferentes valores de viscosidade considerando uma faixa de vazão entre Q e 2Q.

4.5

Resultados da modelagem utilizando cilindro com superfície rígida considerando Vazão mínima

As Janelas de operação discutidas até o momento foram obtidas fixando-se as pressões de vácuo, a vazão e aumentando a velocidade do substrato até que o menisco à montante invada a fenda de alimentação.

Nesta subseção, o menisco à montante é mantido longe o suficiente da fenda de alimentação utilizando um nível de vácuo apropriado, de tal maneira de evitar o mecanismo de falha do processo por invasão do menisco a montante, e a mínima espessura de filme é obtida quando para uma dada velocidade do substrato a diminuição da vazão de alimentação origina uma curvatura máxima no menisco à jusante. Isto é denominado limite de vazão mínima. Estudos de este limite foram feitos para fluidos newtonianos e não-newtonianos por Carvalho e Kheshgi (2000), e Romero (2003).

Deve-se indicar que para estas análises consideramos somente as geometrias tipo “A” e tipo “C” com suas respectivas malhas M1 e M2, como foram mostrado na Figura 4.1.

Na Figura 4.18 obtemos uma janela de operação no plano H_s/t em função da P_{vac} . A janela foi obtida para caso da geometria tipo “A”, a um número de

capilaridade de $Ca = 0,5$ e para uma separação barra-substrato de $100 \mu\text{m}$, ambos constantes.

Os pontos desta janela representam limites das condições de operação e foram obtidos da seguinte maneira: os pontos da linha superior (1) representam limites onde ocorrem vazamentos para a caixa de vácuo quando a pressão aplicada é muito baixa (“Vácuo alto”), refletidos na solução numérica como sendo que a longitude da região a montante $L_M > L_{MBarra}$; os pontos da linha inferior (2) indicam que 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. Isto é, $L_M \approx 0$; e finalmente os pontos da linha (3) representam um 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, refletida numericamente com a presença de pontos de dobra.

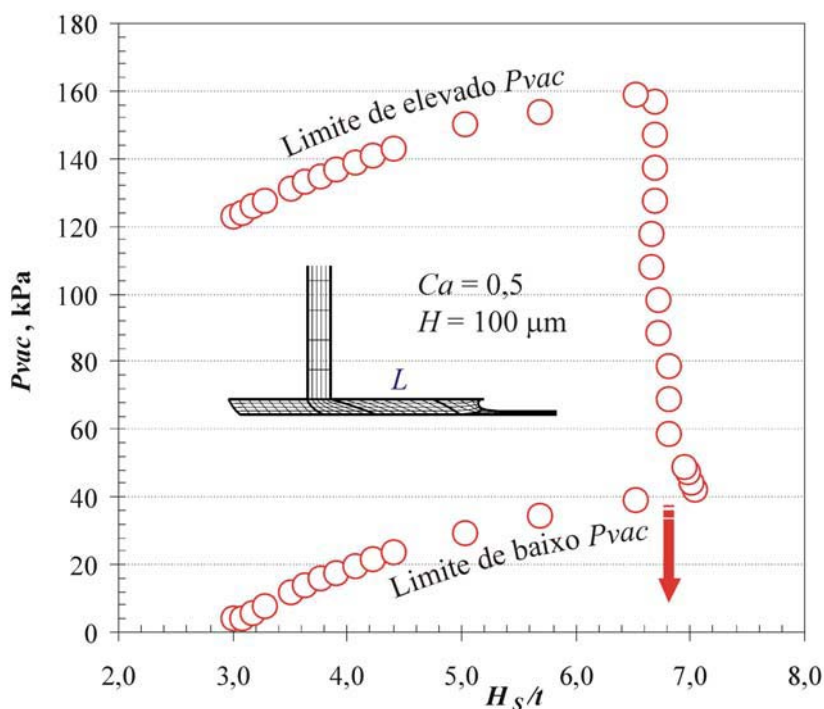


Figura 4.18 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo "A" de lábio médio, dado uma $Ca = 0,5$ e um distância da barra/substrato $H = 100\mu\text{m}$.

A relação H_s/t máxima média obtida para as condições indicadas no parágrafo anterior é aproximadamente 7, o que é independente do nível de vácuo

aplicado. A comparação dos valores críticos $H_s/t_{m\acute{a}x}$ ou $H_s/t_{m\acute{i}n}$ considerando $Ca = 0,5$; mostrado na Figura 4.15 indica que o limite de vazão mínima é a condição que permite obter a mínima espessura de filme.

A influência da configuração do lábio à jusante na análise de vazão mínima é mostrada no gráfico da Figura 4.19. A geometria tipo “C” de lábios curtos com as mesmas condições de capilaridade de $Ca = 0,5$ e uma distância da barra/substrato $H = 100\mu\text{m}$ é utilizada. Os resultados mostram que a condição crítica é obtida na relação $H_s/t = 7,1$; maiores ao caso da geometria “A” que é $H_s/t_{max} = 7,1$.

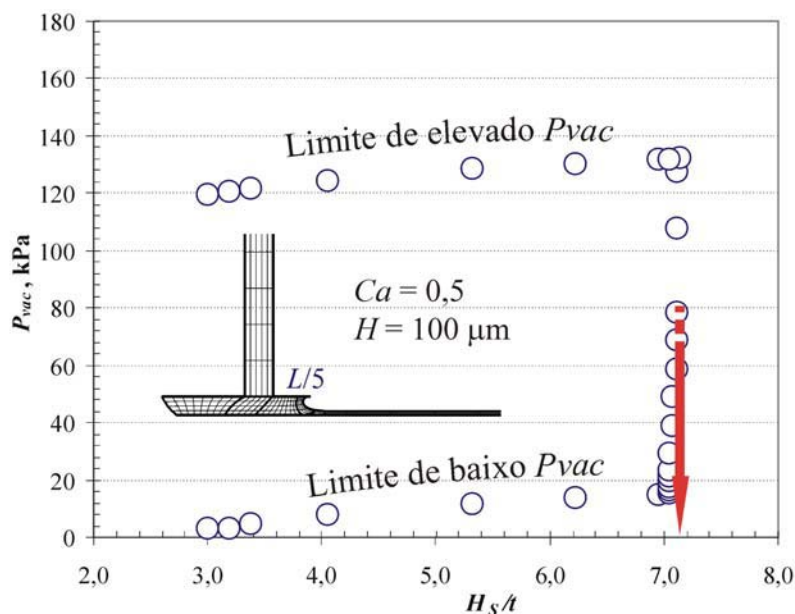


Figura 4.19 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo “C” de lábio curto, dado uma $Ca = 0,5$ e um uma distância da barra/substrato $H = 100\mu\text{m}$.

Na Figura 4.20 se mostra os diferentes perfis do menisco a jusante das geometrias mencionadas para três números de capilaridade, Ca iguais a 0,1; 0,5 e 1,0. Onde pode-se notar que para o números de capilaridade mais baixo, i.e. $Ca = 0,1$ o perfil do menisco a jusante da geometria “C” de lábios curtos fica por embaixo do perfil do menisco da geometria “A” que reflete na obtenção da espessura de revestimento t , para o caso de Ca maiores i.e 0,5 e 1,0 os perfis de menisco a jusante entre as duas geometrias não são notoriamente diferentes.

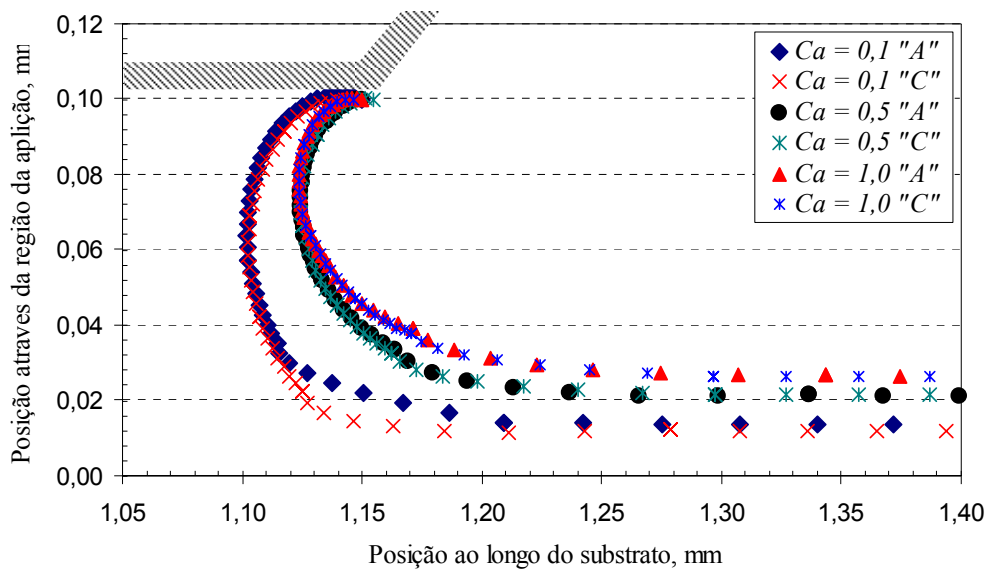


Figura 4.20 - Comparação dos perfis do menisco à jusante das duas configurações A e C da barra de revestimento para Ca de 0,1; 0,5 e 1,0.

Na Figura 4.21 se mostra diferentes janelas de operação no caso da geometria da barra tipo “C” de lábios curtos, para os casos de $Ca = 0,1$; 0,5 e 1,0. nota-se a influencia do número de capilaridade na obtenção da mínima espessura de revestimento.

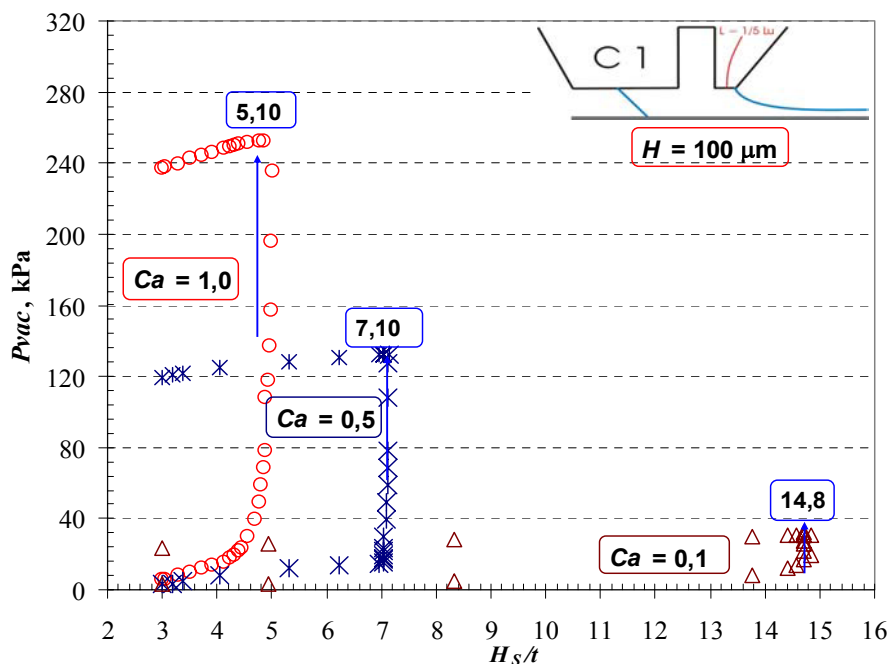


Figura 4.21 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo “C”, para $Ca = 0,1$; 0,5 e 1,0 e com uma distância da barra de revestimento ao substrato $H = 100\mu\text{m}$.

Para o caso da Geometria tipo “A” mantendo as mesmas condições de operação apresenta um conjunto de janelas de operação qualitativamente similares ao caso da geometria “C” de lábios curtos como se pode observar na Figura 4.22.

Os valores críticos para diversos Ca da Figura 4.21 e Figura 4.22 são apresentados na Figura 4.23. onde se observa que o melhor desempenho da geometria “C” de lábios curtos.

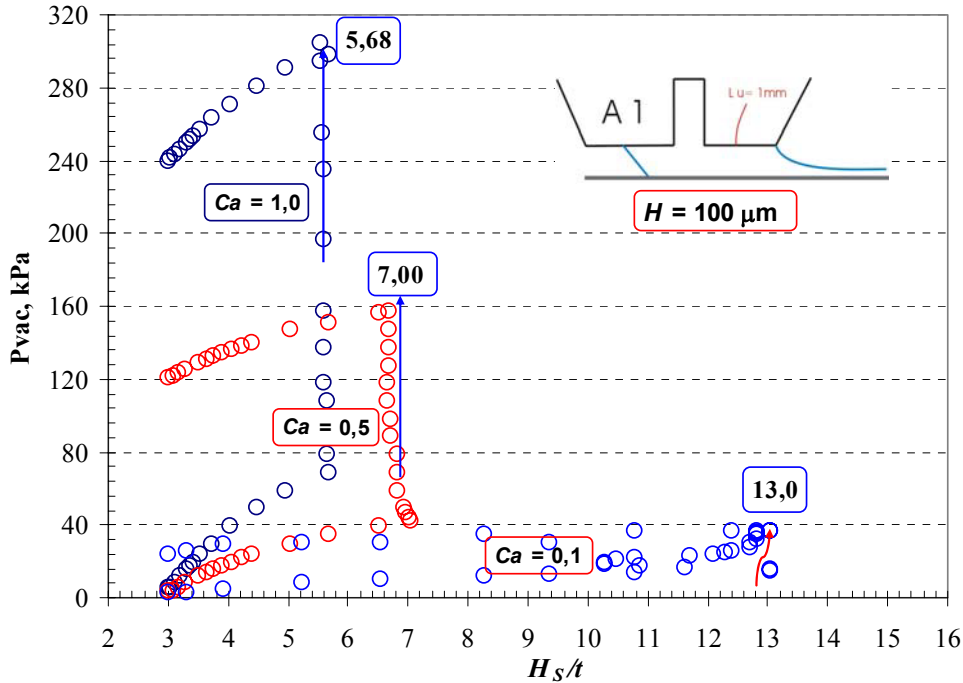


Figura 4.22 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo “A”, para $Ca = 0,1; 0,5$ e $1,0$ e com uma distância da barra/substrato $H = 100\mu\text{m}$.

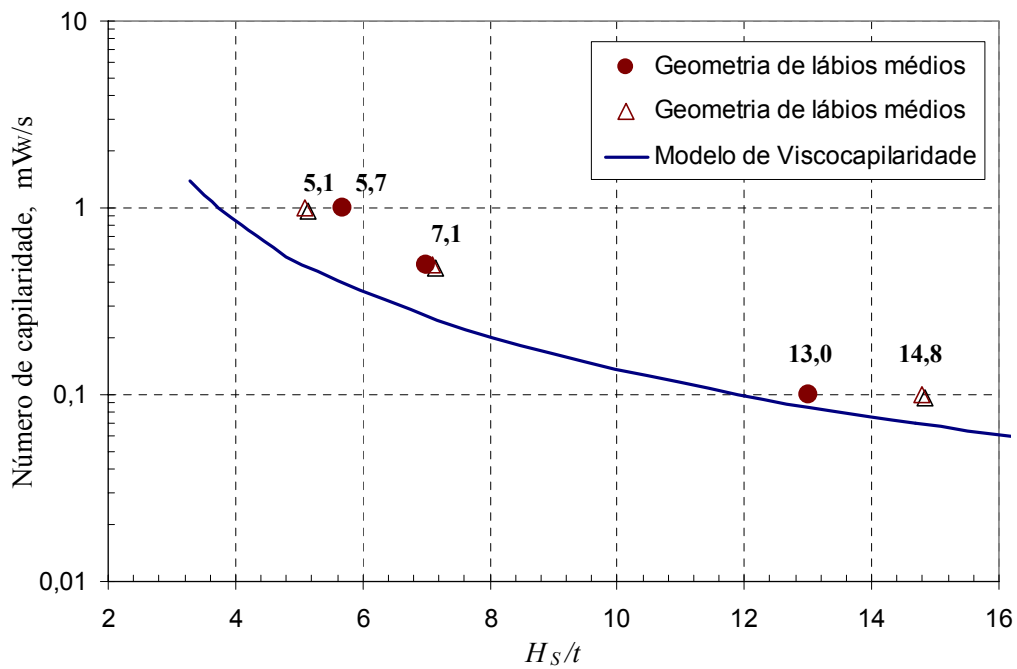


Figura 4.23 - Limite de vazão mínima no plano número de capilaridade Ca e da inversa da espessura de filme H_s/t , obtidos para as duas configurações A e C.

4.6

Resultados da modelagem utilizando cilindro com superfície deformável

Como mostrado nos resultados com o substrato apoiado em um cilindro rígido, a espessura mínima do revestimento é proporcional à distância entre a barra e o substrato. Desta forma, filmes muito finos ($<10\mu\text{m}$) só podem ser obtidos com uma distância barra/substrato muito pequena. Na prática, existe uma distância mínima de operação abaixo da qual o processo torna-se perigoso, com o risco de colisão do cilindro de apoio com a barra e de quebra do substrato. Por este motivo, em aplicações com líquidos de viscosidade alta e espessuras pequenas, é comum o uso de um cilindro de apoio coberto com uma camada de borracha que se deforma durante a operação. A deformação deste cilindro de apoio diminui os riscos associados a operações com pequena abertura da barra em relação ao substrato.

Nesta seção são apresentados os resultados que mostram a influência da deformação do cilindro de apoio no escoamento e na janela de operação do processo de revestimento por extrusão. Os resultados foram obtidos usando o modelo unidimensional de deformação i.e. o modelo de molas é adaptado ao sistema de equações de Navier-Stokes, como descrito no Capítulo 3. Em todos os casos apresentados, considera-se a pressão de vácuo nula.

Mantemos inalterável a malha do caso com superfície rígida, tanto para a geometria tipo A de lábios meio e tipo C de lábios curtos, i.e, continuaremos usando as malhas M1 e M2 respectivamente, descritas na Tabela 2

A rigidez do cilindro de apoio pode ser caracterizada pelo número de elasticidade Ne definido como:

$$Ne \equiv \mu V_w / KH_s^2,$$

onde μ é a viscosidade do líquido, V_w é a velocidade do substrato, K é a constante de mola do modelo unidimensional e H_s é uma dimensão característica neste caso a abertura da fenda de alimentação.

O número de elasticidade representa a razão entre as forças viscosas do escoamento e a força elástica necessária para deformar o cilindro de apoio. Uma superfície rígida corresponde a $Ne = 0$, já que $K \approx \infty$, e quanto maior o valor do número de elasticidade, mais complacente é o cilindro.

O mecanismo de falha, como anteriormente mencionado, é identificado quando o menisco à montante (ou melhor, a posição da linha de contacto dinâmica LCD) invade a fenda de alimentação na medida que a vazão de alimentação é gradativamente diminuída, i.e. a espessura do filme depositado. Esta condição crítica é conhecida como ponto de dobra.

A Figura 4.24 mostra uma janela de operação para o caso do cilindro deformável para um número de capilaridade fixo, $Ca = 0,012$, onde os pontos a, b, c representam soluções da modelagem na qual é considerado $K \approx 10^8$ e a espessura é a metade da distancia barra/substrato, isto é $t = H/2$. Sendo que o ponto a é diferente dos outros na relação H/H_s , assim como é indicado na Figura 4.24 a tem 3%, b tem 7% e c 33%, podemos perceber que a apresenta uma menor distancia barra/substrato, H . Os pontos a', b', c' são pontos críticos obtidos diminuindo gradativamente a vazão de tal maneira a conseguir espessuras mínimas mantendo as mesmas propriedades elásticas ao cilindro deformável, onde apresentam o mecanismo de falha indicada no parágrafo anterior. Enquanto a'', b'', c'' são pontos críticos, para baixos valores de K embaixo das quais o modelo não consegue representar o escoamento.

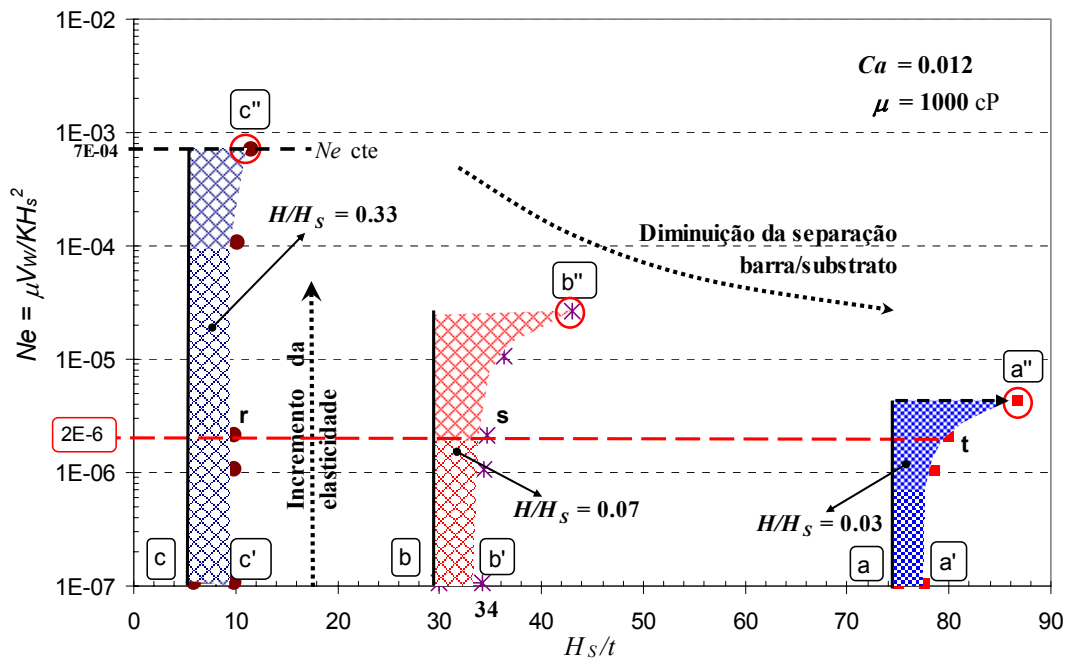


Figura 4.24 - Janelas de operação no plano número de elasticidade Ne e a inversa da espessura de filme, considerando o modelo de molas de um sistema elastohidrodinâmico – Configuração da barra “C” de lábios curtos.

A janela de operação da Figura 4.24 comprova que para todos os valores de H/H_S , analisados, a espessura mínima diminui à medida que o número de elasticidade aumenta (cilindro de apoio de menor rigidez). Os valores do número de elasticidade correspondentes aos pontos a'' , b'' e c'' da Figura 4.24, representam os valores máximos deste parâmetro na qual uma solução bi-dimensional pode ser obtida. Os campos de pressão na região à montante e à jusante são mostrados na Figura 4.25, nesta figura é também observada a posição da linha de contacto dinâmica identificando a condição crítica.

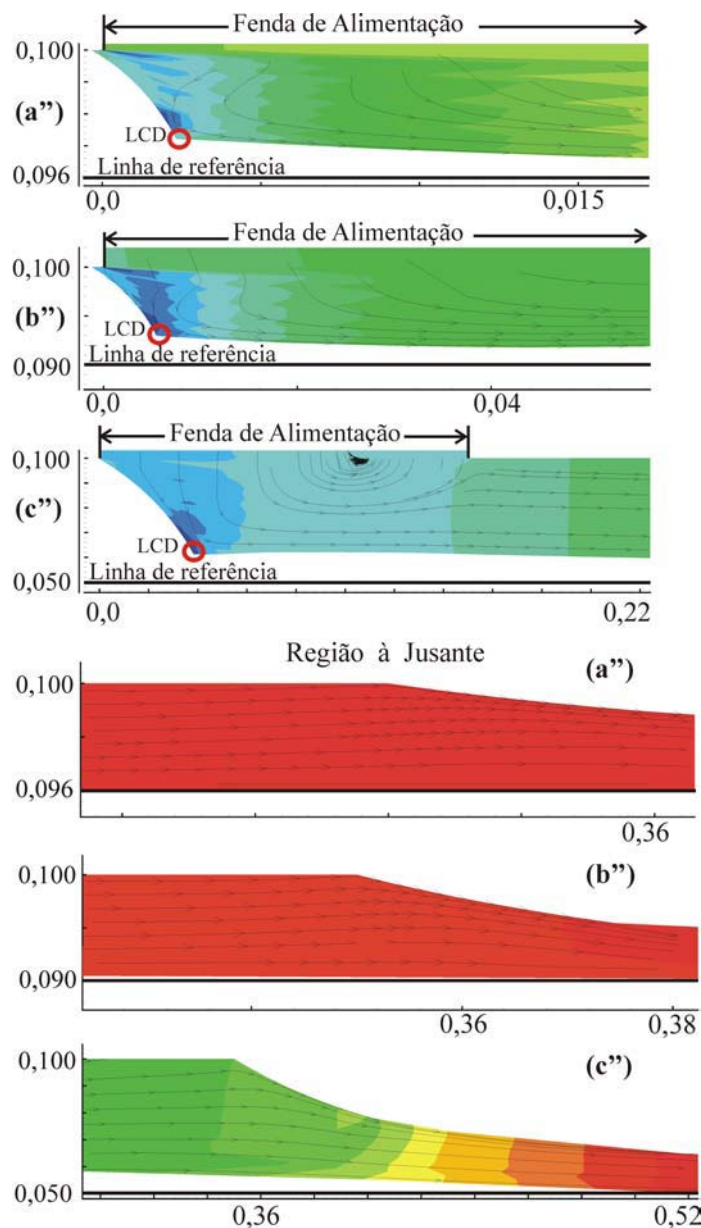


Figura 4.25 - Região à montante e à jusante dos pontos a'' , b'' e c'' da Figura 4.24 – Configuração da barra “C” de lábios curtos.

O padrão do escoamento nos casos de espessura mínima, a' , b' , c' da Figura 4.24, para três diferentes distâncias barra/substrato e $Ne = 1 \times 10^{-7}$, são apresentadas na Figura 4.25. Para o caso de $H/H_S = 33\%$ pode-se observar uma recirculação sobre o lábio à jusante, isto acontece quando $t < H/3$ tal como indicado na Figura 4.26, e uma outra recirculação na saída da fenda de alimentação.

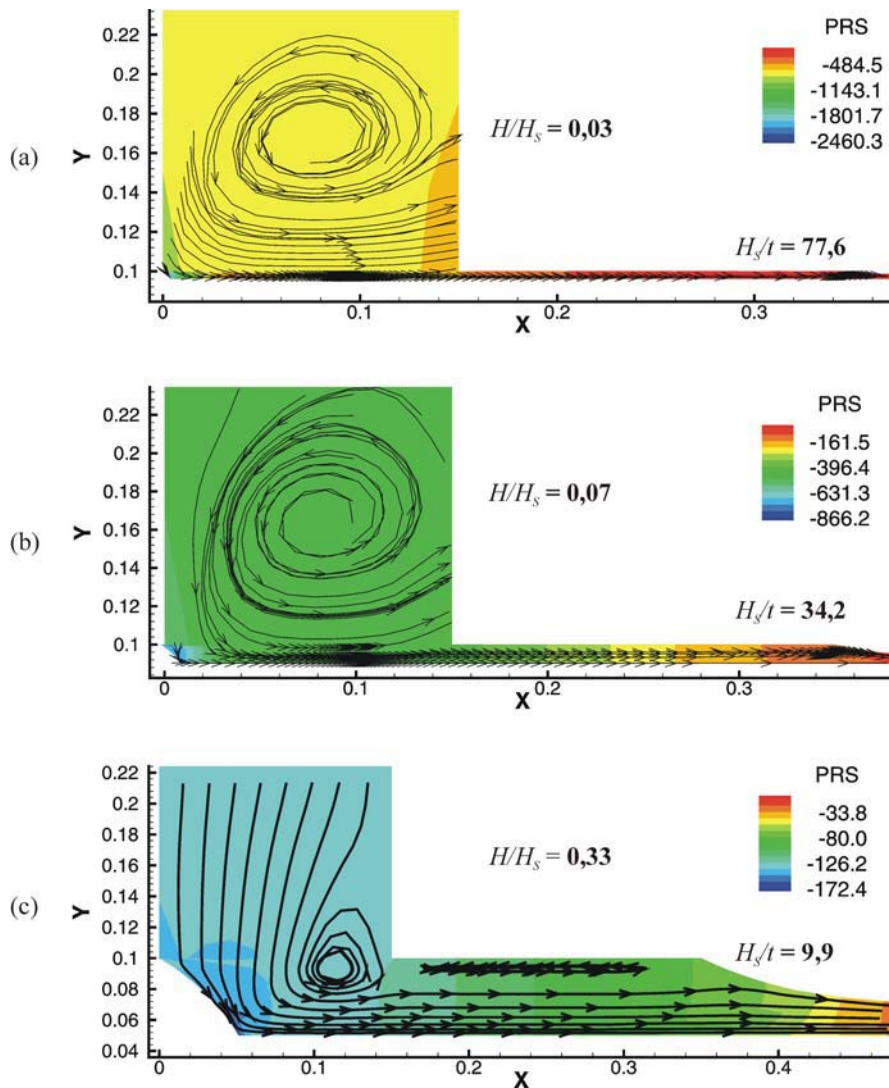


Figura 4.26 - Padrão do escoamento dos pontos a', b' e c'– Configuração da barra “C” de lábios curtos.

Quando a barra é aproximada do substrato como nos casos $H/H_S = 3\%$ e $H/H_S = 7\%$, a recirculação sobre o lábio desaparece e a recirculação na saída da fenda de alimentação se incrementa e bloqueia grande parte da saída da fenda, este fenômeno é apresentado na Figura 4.26. Na figura também é apresentado o campo de pressão. Observa-se também nesta figura que a relação adimensional

obtida é a maior que os outros casos, i.e., $H_s/t|_{(a)} = 77,6 > H_s/t|_{(b)} = 34,2 > H_s/t|_{(c)} = 9,9$.

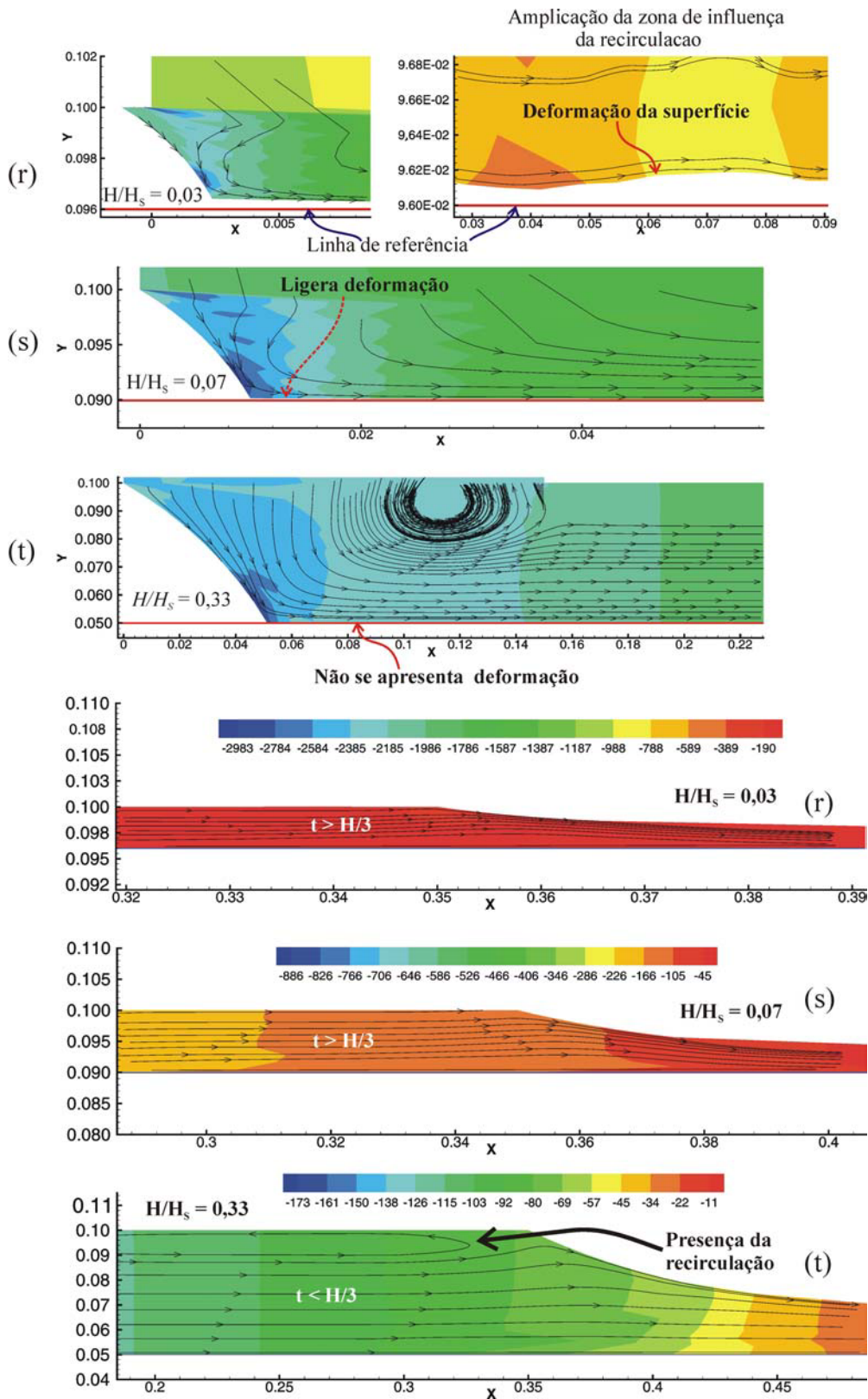


Figura 4.27 - Padrão do escoamento dos pontos r, s e t do gráfico da figura 4.24 onde $Ne = 2 \times 10^{-6}$. Configuração da barra "C" de lábios curtos.

Se aumentarmos as características elásticas do cilindro de apoio, isto é diminuimos o valor de K e mantendo-o para todos os valores de abertura barra/substrato observamos uma maior interação fluido-estrutura para o caso $H/H_s = 3\%$ como se esperava, ver Figura 4.27 (a).

Para o caso (c) da Figura 4.26, analisou-se os perfis de pressão ao longo do substrato, três zonas foram criados para poder explicar o comportamento da pressão para as três diferentes distâncias de separação barra/substrato H , Zona A, Zona B, Zona C, ver Figura 4.28.

Analisando a Zona A se fez uma linha que indica aproximadamente o centro da recirculação que aparece na fenda de alimentação quando a relação H/H_s é 3% e 7% que já foi mencionado anteriormente. Os pontos da linha “mn” mostram a diminuição da pressão sub-atmosférica pela presença da recirculação na fenda de alimentação que gera um momento positivo ao escoamento situado perto do substrato, e assim o efeito inverso no tramo “np”.

Na ZONA B a pressão ao longo do substrato é incrementada pelo predomínio viscoso (nesta região o escoamento na configuração barra/substrato é similar à geometria dos mancais, portanto o escoamento do fluido nessa zona produz elevadas pressões). Na ZONA C o líquido está submetido ao ambiente externo e, por conseguinte a pressão atmosférica prevalece ao longo do substrato já revestido.

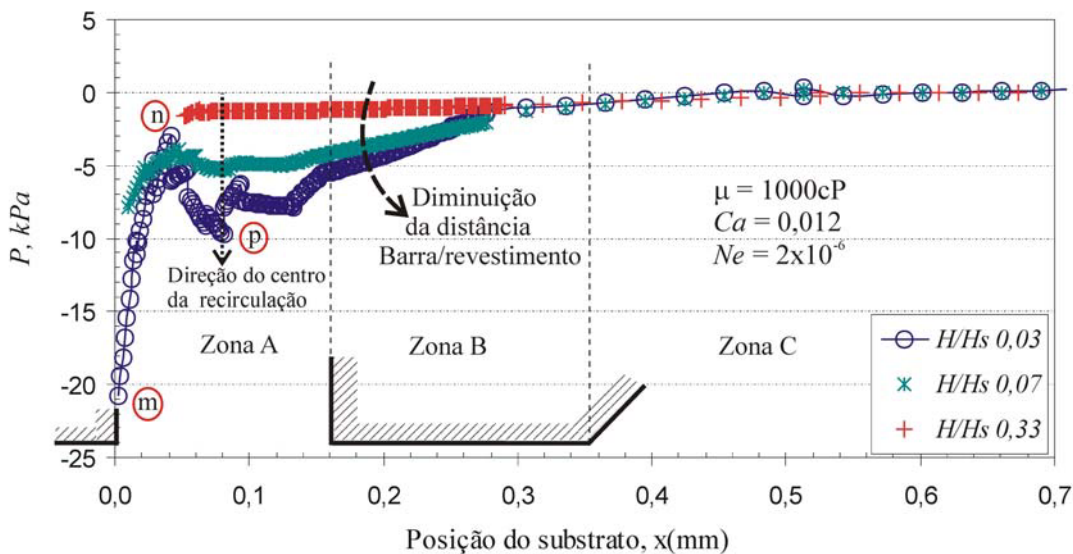


Figura 4.28 - Gráfico da pressão do fluido que age na face da superfície deformável para as diferentes distâncias barra/revestimento – Configuração da barra “C”.

Para a relação $H/H_s = 33\%$ o perfil de pressão nas três zonas é quase uniforme uma vez que sua vazão é maior e pela presença de um vórtice na fenda de alimentação situado de tal maneira que mantém a superfície deformável na posição como se fosse superfície rígida.

A Figura 4.29 mostra as janelas de operação para números capilares $Ca = 0.005$, $Ca = 0.012$ e $Ca = 0.016$. Para uma determinada distância barra/substrato e para menores valores de Ca obtemos menores espessuras de revestimento como esperado.

Para uma relação $H/H_s = 33\%$ e com número de capilaridade baixa, i.e. $Ca = 0,05$, aprecia-se um comportamento contrario isto é, um aumento na espessura de filme com aumento da deformação do cilindro. Isto pode explicar-se pela presença de recirculações na zona de aplicação na zona intermédia sob o lábio à jusante e outra perto do menisco à jusante, evitando este último a formar uma maior curvatura do menisco à jusante para assim diminuir a espessura de revestimento, como mostrado na Figura 4.30.

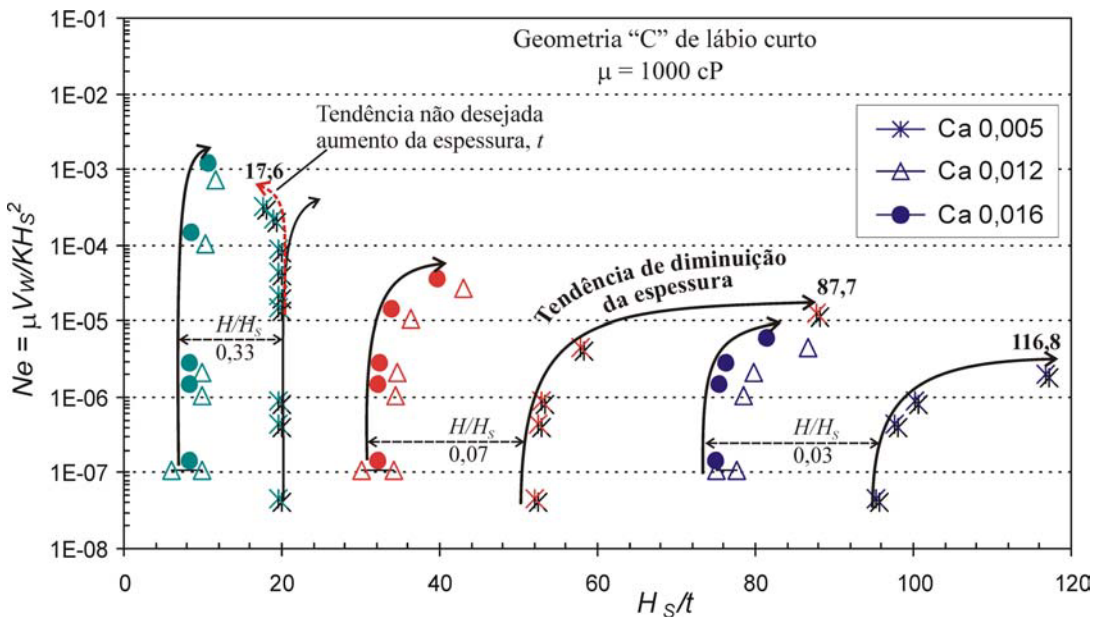


Figura 4.29 - Janelas de operação que mostra o comportamento das diferentes distâncias barra/substrato da barra de lábio curto para diferentes valores de número de capilaridade.

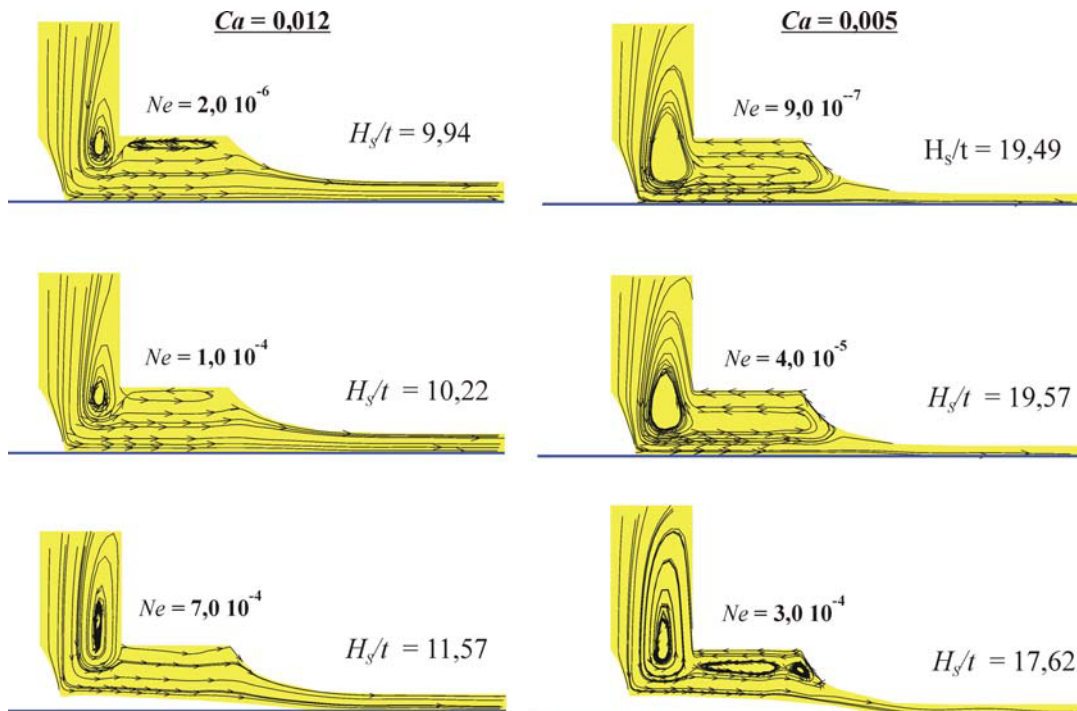


Figura 4.30 - Detalhe das linhas de corrente da barra tipo “C” de lábio curto, considerando números de capilaridade $Ca = 0,012$ e $Ca = 0,005$ para uma relação $H/H_S = 0,33$.

4.6.1

Comparação da geometria tipo “A” de lábios médios e “C” de lábios curtos usando o método de Molas

Nesta seção são apresentados os resultados que mostram a influência da configuração do lábio à jusante junto com a deformação do cilindro de apoio no escoamento. Os resultados foram obtidos usando as mesmas características elásticas, isto é para iguais Ne , e mesmos números capilares para as duas geometrias “A” e “C”.

A mesma análise feita para o caso da geometria tipo “C”, na secção anterior, também foi feito para o caso da geometria tipo “A” lembrando que este tem um maior comprimento do lábio à jusante. As mesmas distâncias barra/substrato foram consideradas.

Para a geometria “A” considerando uma capilaridade de 0,012 para as diferentes distâncias barra/substrato, obtemos uma janela de operação de processo mais restrita do que a geometria tipo “C”, ver Figura 4.31. Observamos claramente que a geometria tipo “C” apresenta um melhor desempenho na obtenção da menor espessura. Os resultados para uma relação $H/H_S = 33\%$ a maior relação obtida de H_s/t é de 8,9 para o caso da geometria tipo “A”, usando a

Geometria tipo “C” podemos incrementar este valor até 11,6 i.e, quase 2,6 unidades a mais. Esta comparação se realizou considerando as mesmas condições de operação, i.e., igual número de elasticidade, Ne , e igual número de capilaridade, Ca .

Para relações de $H/H_s = 7\%$ a geometria tipo “C” atinge valores maiores de H_s/t que obtidas com a geometria tipo “A” em 8,2 unidades. A menor relação $H/H_s = 4\%$ com a geometria “C” se atinge valores menores de espessura, isto é maiores valores de H_s/t .

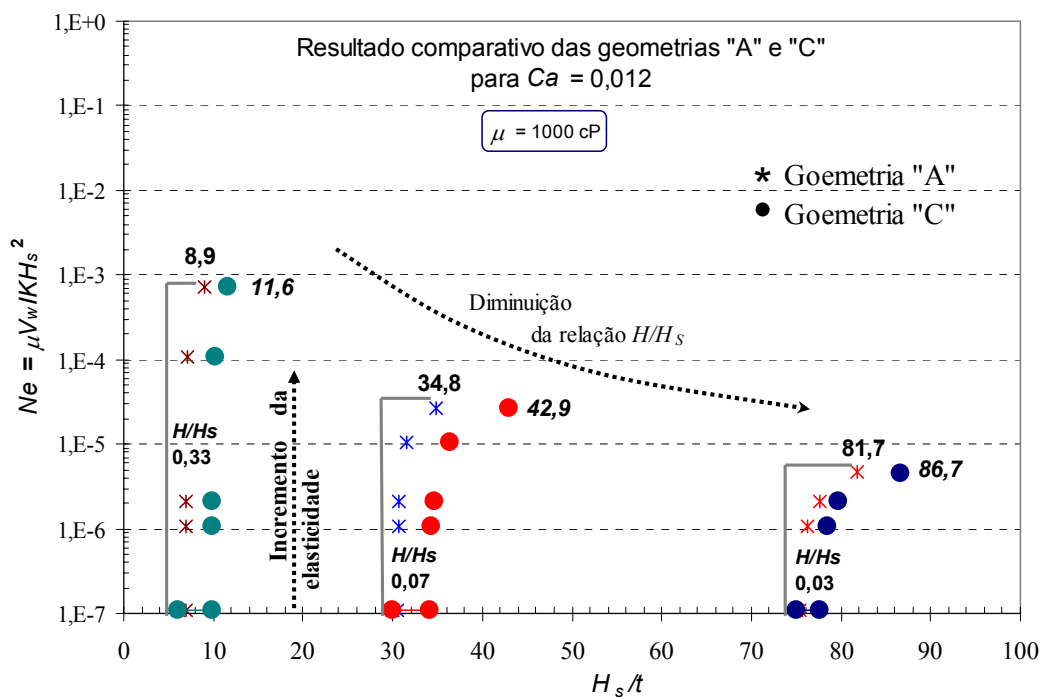


Figura 4.31 - Gráfico comparativo das Janelas de operação para as duas configurações da barra “A” e “C”, no plano Ne e a inversa da espessura do filme.

5 Comentários Finais e sugestões

5.1 Comentários finais

No presente trabalho analisou-se teoricamente o processo de revestimento por extrusão com cilindro rígido e com cilindro deformável e também a influência da geometria do lábio à jusante da barra de revestimento considerando as duas situações, tendo como objetivo obter uma menor espessura de filme revestido.

O escoamento do líquido viscoso, e a deformação elástica do cilindro estão acoplados o que constitui uma ação elastohidrodinâmica.

O modelo teórico considera o escoamento viscoso, a deformação do cilindro e os efeitos da superfície livre a fim de prever o comportamento do escoamento e conseqüentemente os limites de operação de processos. A análise teórica apresentado, consiste na solução da equação de Navier-Stokes que descreve a superfície livre acoplada com um arranjo de molas unidimensionais para representar a deformação elástica do cilindro.

O sistema de equações diferenciais parciais resultantes foi resolvido pelo método de Galerkin/Elementos finitos. O método de Newton foi usado para resolver o sistema de equações algébricas não linear obtida pela discretização do problema. Na abordagem do sistema acoplado, a convergência foi obtida em 5 e 6 iterações, quando iniciada com uma boa estimativa inicial em cada condição.

Nos resultados teóricos usando o cilindro rígido, a melhor configuração geométrica quanto ao melhor desempenho na obtenção de menores espessuras de filme no processo de revestimento por extrusão, foi obtida com a barra com menor longitude do lábio à jusante.

Os resultados considerando cilindro deformável, mostram que menores espessuras de filme podem ser obtidas com esta configuração do que quando usando um cilindro rígido.

5.2 Sugestões

As propostas futuras em função ao aprendido no presente trabalho nos permitirão certamente ampliar o entendimento do fenômeno estudado, assim são sugeridos como trabalhos futuros:

1. Estudar o processo de revestimento por extrusão com cilindro deformável considerando a posição da barra de revestimento embaixo da linha de referência onde se situa o substrato na saída da região de aplicação.
2. Aplicar uma análise bidimensional no plano de deformação na representação da deformação do cilindro deformável e comparar com o modelo de molas unidimensional.
3. E seria de interesse a visualização ou análise experimental do processo de revestimento por extrusão com cilindro deformável para diferentes características elásticas e diferentes números de capilaridade, e assim verificar os resultados teóricos apresentados.

Bibliografia

ALMEIDA, V. F. **Gas-Liquid Counter flow Through Constricted Passages**. Ph.D. Thesis University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, 1995.

AURIM, W. **Hot Melt Pressure Sensitive Adhesive Coating Equipment**. Polymers, laminations and Coating Conference, Atlanta TAPPI, 1985. 43-49 p.

BEGUIN, A. E. **US Patent 2681294**. Eastman Kodak Co. Rochester, N.Y. 1954.

BENJAMIN, D. F. **Roll Coating Flows and Multiple Rolls Systems**. PhD thesis University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, 1994.

BREZZI ; FORTIN M. **Mixed and Hybrid Finite Element Methods**, Springer Series in Computational Mathematics, Springer-Verlag, New York, 1991, Vol, 15

CAMPBELL, D. P. **Slot Orifice Coating 1980**, paper synthetics Conference, Cincinnati, Ohio. Atlanta TAPPI, 1980. 309-313 p.

CARVALHO M.S; KHESHGI H. S. **Low-flow limit in slot coating: theory and experiments**. AIChE J. 46(10):1907-17, 2000.

CARVALHO, M. S. ; SCRIVEN, L. E. **Effect of Deformable Roll Cover on Roll Coating**, Tappi J. 77, 201, 1994.

CARVALHO, M.S.; SCRIVEN L. E. **Flows in Forward Deformable Roll Coating Gaps: Comparison Between Spring and Plane-Strain Models of Roll Cover**. J. Comp. Phys. 138: 449-79, 1997.

COHEN, D. **Two-Layer Slot Coating: Flow Visualization And Modeling**, M.S. thesis, University of Minnesota, Minneapolis 1993.

COHEN, E. D.; GUTTOF, E. B. **Modern Coating and Drying Technology**. VCH publishers, New York, USA, 1992.

COYLE, D. J. **Forward Roll Coating with Deformable Rolls: A Simple One-Dimensional Elastohydrodynamic Model**, Chem. Eng. Sci. 43, 2673, 1988.

CHRISTODOULOU, K. N. **Computational Physics of Slide Coating Flow**. Phd thesis, University of Minnesota. Published by University Microfilms International, Ann Arbor, MI, 1990.

CRISTODOULOU, K. N.; SCRIVEN, L. E. **Discretization of free surface flows and other moving boundary problems**. Journal of computational Physics, 99:39-55, 1991.

DOWSON, D.; HIGGINSON, G. R. **Elastohydrodynamic Lubrication**, Pergamon, Oxford, 1966.

DOWSON, Z.; JIN, Z. **The influence of elastic deformation upon film thickness in lubricated bearing with low elastic modulus coating**. Proceedings of the 16th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, 1989. 263p.

GATES, I. D. **Slot Coating Flows: Feasibility, Quality**, Ph.D. Thesis, University of Minnesota, Minneapolis, 1999.

HOOD, P. **Frontal Solution Program for Unsymetric Matrices**. Int. J. Num. Meth. Eng, 10, 1976.

JHONSON, K. L. **Contact mechanics**, Cambridge University, Cambridge, UK, 1985.

DE SANTOS, J. M. **Two-phase Cocurrent Downflow through Constricted Passages**. PhD thesis, University of Minnesota, Minneapolis, MN. Available from UMI, Ann Arbor, MI, order number 9119386., Pág 5-2, 1991

KAGEYAMA, T.; YOSHIDA, T. **Extrusion Coating Apparatus**. UK Patent 2120132, 1986.

KISTLER, S. F. **The Fluid Mechanics of Curtain Coating and Related Viscous Free-Surface Flows whit Contact Lines**. PhD Thesis University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, 1984.

KISTLER, S. F.; SCHWEIZER, P. M. **Liquid Film Coating** Chapman & Hall, London, 1997.

LIPPERT, H.G. **Slot Die Coating - A technical update on recent techniques and design developments**. Polymers, laminations and Coating Conference Book 1. Atlanta TAPPI, 1987.

MUSSON, L.C. **Two-Layer Slot coating**, PhD Thesis, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, 2001.

O'BRIEN, W. G. **Beveled Edge metered bead extrusion coating apparatus**. US Patent 4445458, 1984.

ROMERO, J. O. **Limite de vazão mínima do Processo de revestimento por Extrusão de soluções poliméricas**, PhD Thesis, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

RUSCHAK, K. J. **Coating Flows**, Ann. Rev. Fluid mech 17: Pág. 65-89, 1985.

SARTOR, L. **Slot Coating: Fluid Mechanics and Die Design**. PhD Thesis, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, 1990.

SRINATH, M. **Wetting on Flexible Substrates: A Finite Element Formulation**, PhD Thesis, Drexel University, USA, 2002.

SCHWEIZER, P. **Fluid Handling and Preparation**, in Modern Coating and Drying Technology, pp. 23-62, New York, 1992.

THOMPSON, J. F.; WARSI, Z. U.A.; MASTIN, C. W. **Numerical Grid Generation**. Elsevier science publishing Co., Inc., New York, USA, 1985.

WEINSTEIN S. J.; RUSCHAK K. J. **Coating Flows**, Annu. Rev. Fluid Mech. 2004.

ZEEVALLOS GLADYS, Estabilidade do Escoamento Viscoelástico em Processo de Revestimento por Rotação Direta, PhD Thesis PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)