

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.

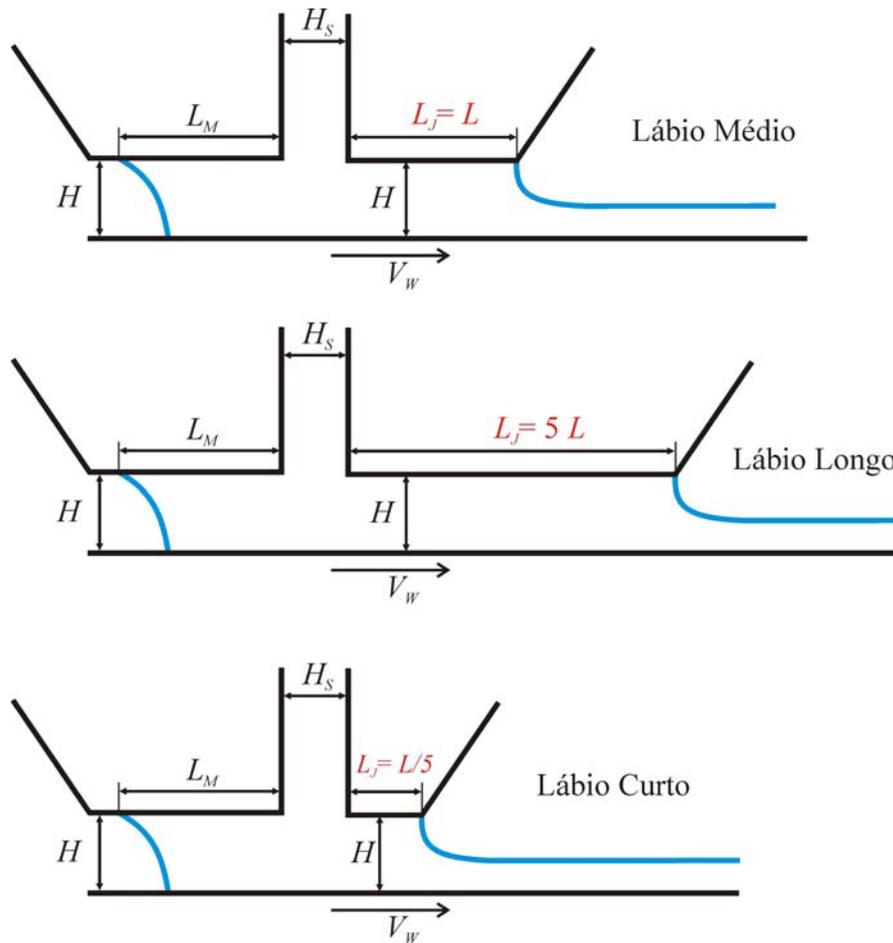


Figura 4.1 - Diferentes configurações geométricas analisadas no processo de revestimento por Extrusão.

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.

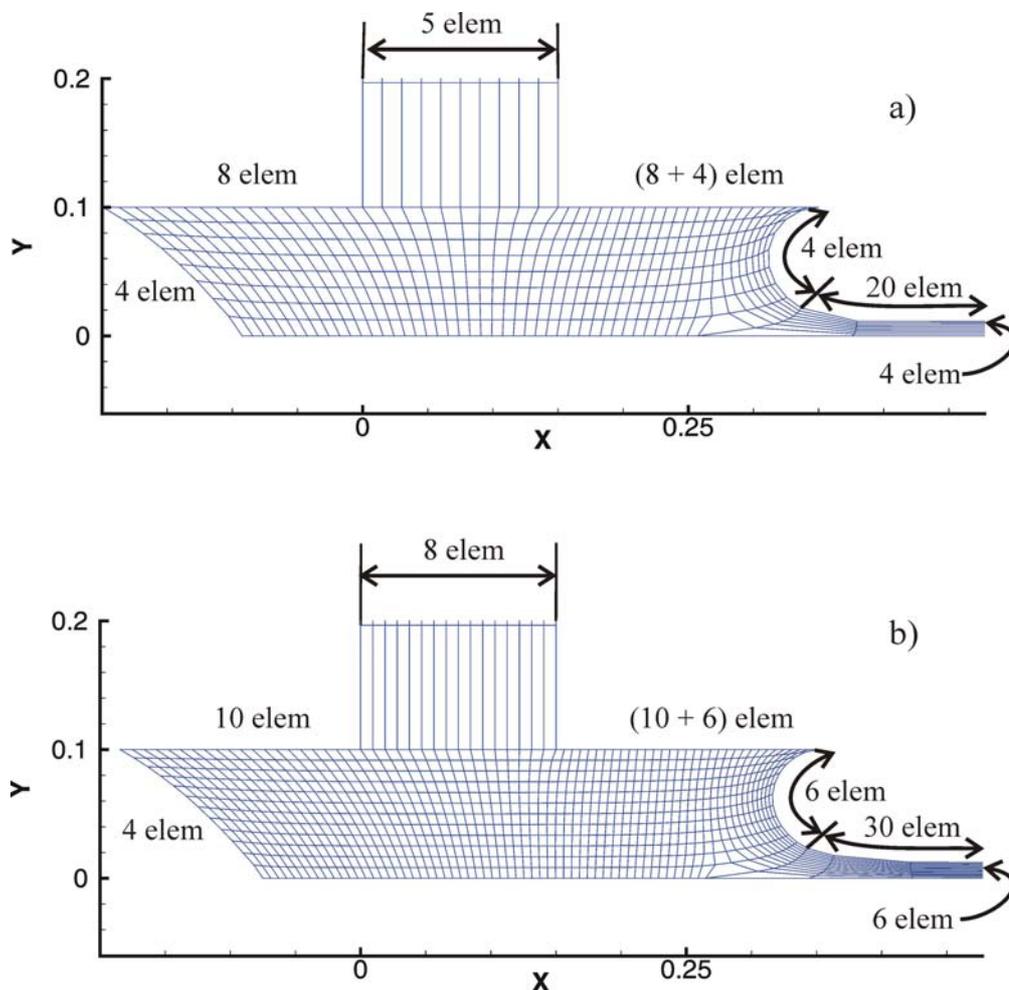


Figura 4.2 - Detalhe do domínio da malha da geometria de lábios curtos: a) M2, b) M2S.

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.

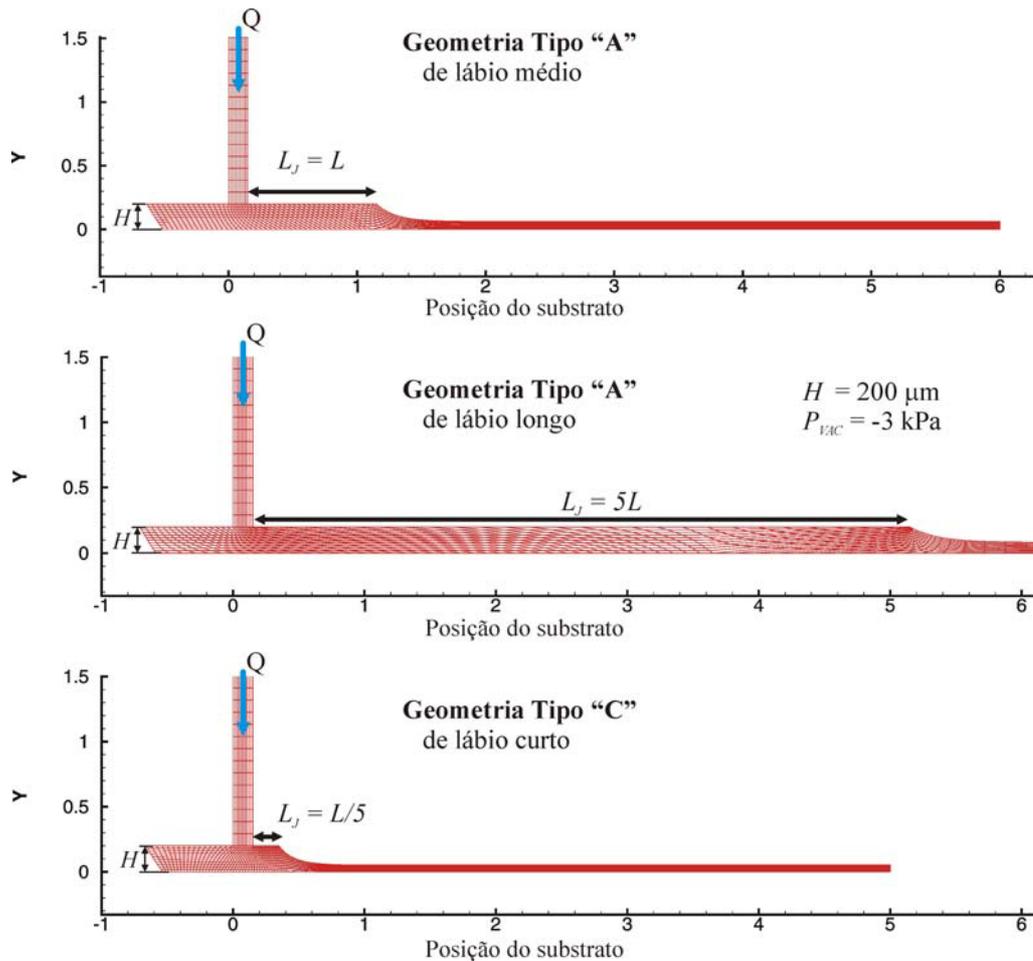


Figura 4.3 - Representação das Malhas M3, M4 e M5 analisadas no processo de revestimento por Extrusão para valores iguais de H e P_{vac} .

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.

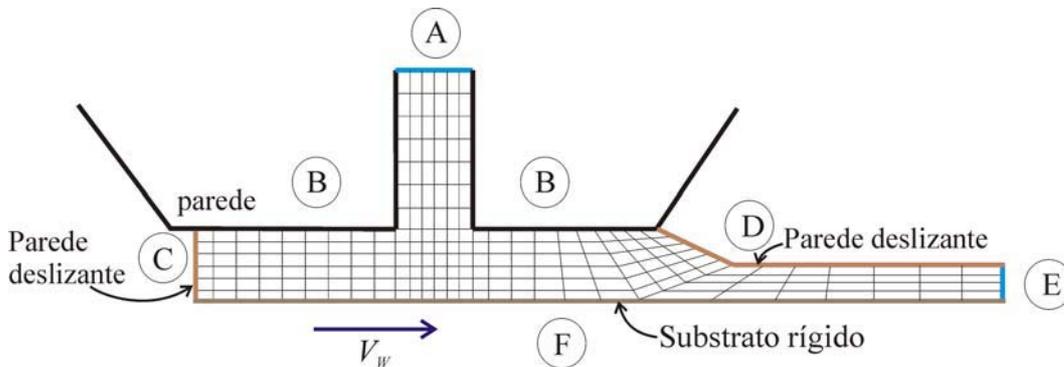


Figura 4.4 - Primeiro caso preliminar para a solução de problemas de superfícies livres, a face C e D é considerada como parede deslizante.

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.

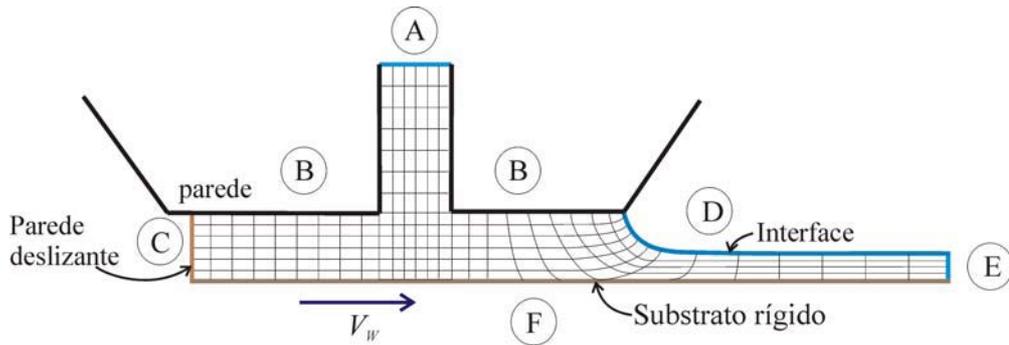


Figura 4.5 - Segundo caso preliminar para a solução de problemas de superfícies livres, a face D já é considerada como superfície livre mas a face C ainda continua como parede deslizante.

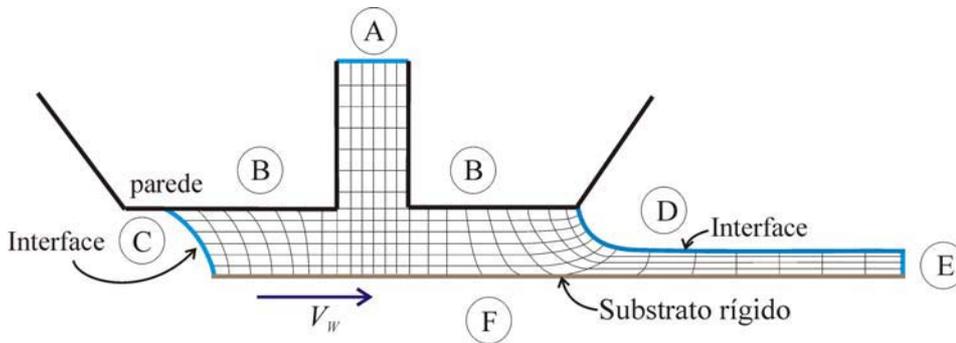


Figura 4.6 - Caso considerando superfícies livres nos meniscos a montante e a jusante.

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.

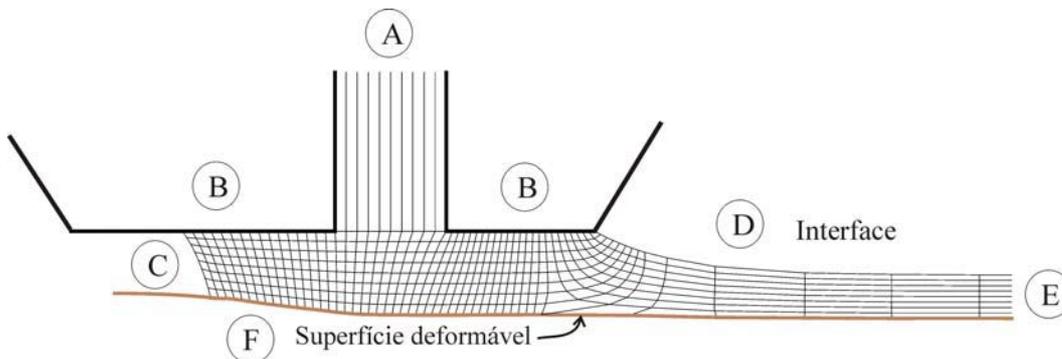


Figura 4.7 - Mostra-se um caso na qual aplicou-se o modelo de Molas.

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 .

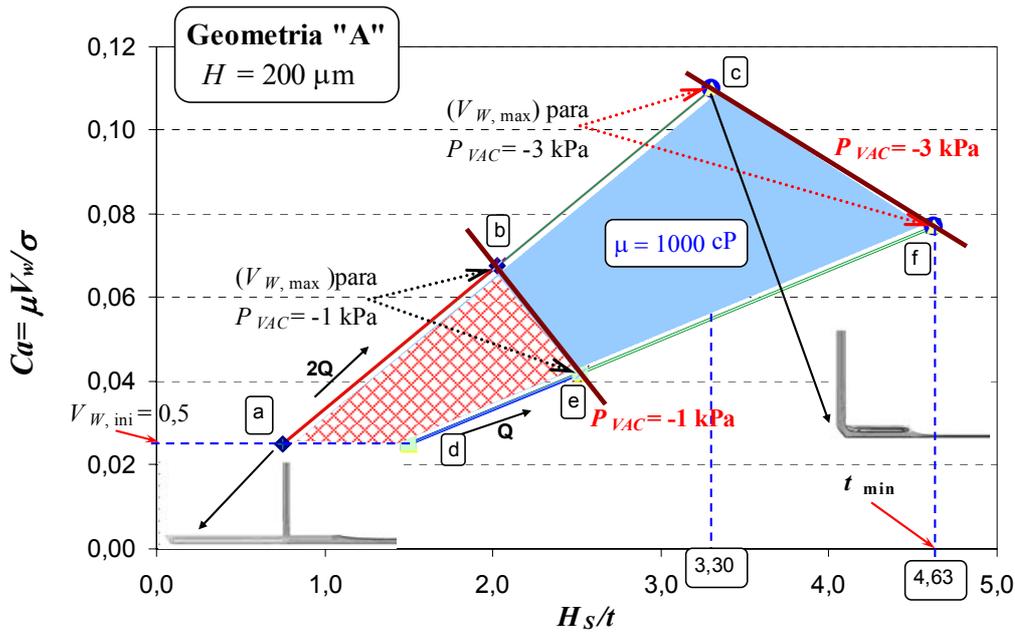


Figura 4.8 - Janela de Operação de Processos da Geometria tipo "A" de lábio médio, para dois valores de vazão constantes Q e $2Q$ e limitados pelas $P_{VAC} = -3\text{kPa}$ e -1 kPa .

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.

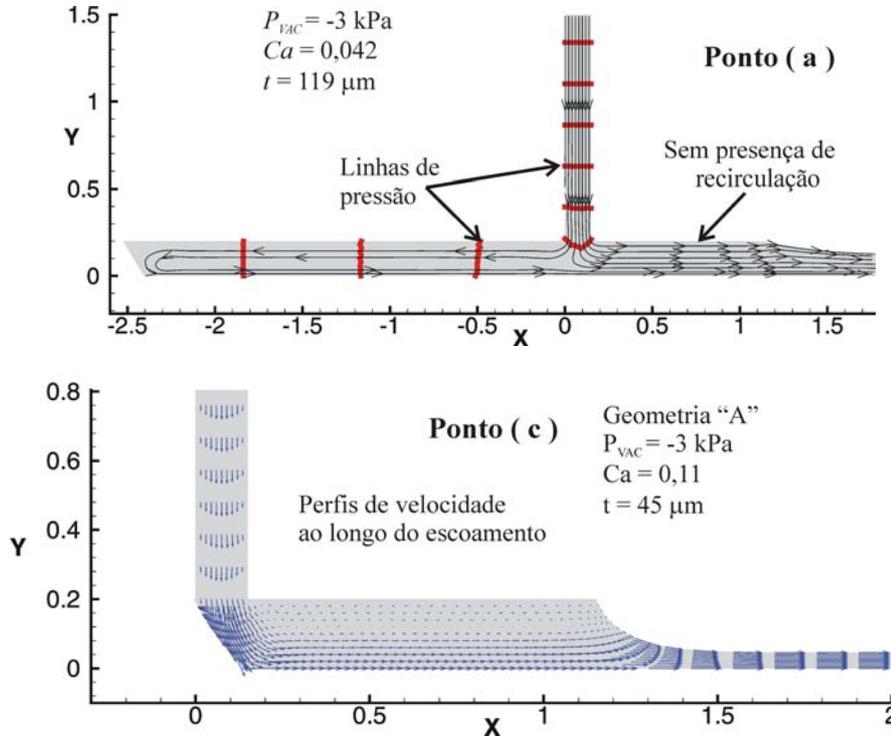


Figura 4.9 - Estes gráficos correspondem aos pontos "a" e "c" da Figura 4.8. a) Início do processo onde o escoamento é bem comportado, b) Representação do mecanismo de falha do processo pela invasão no menisco à montante.

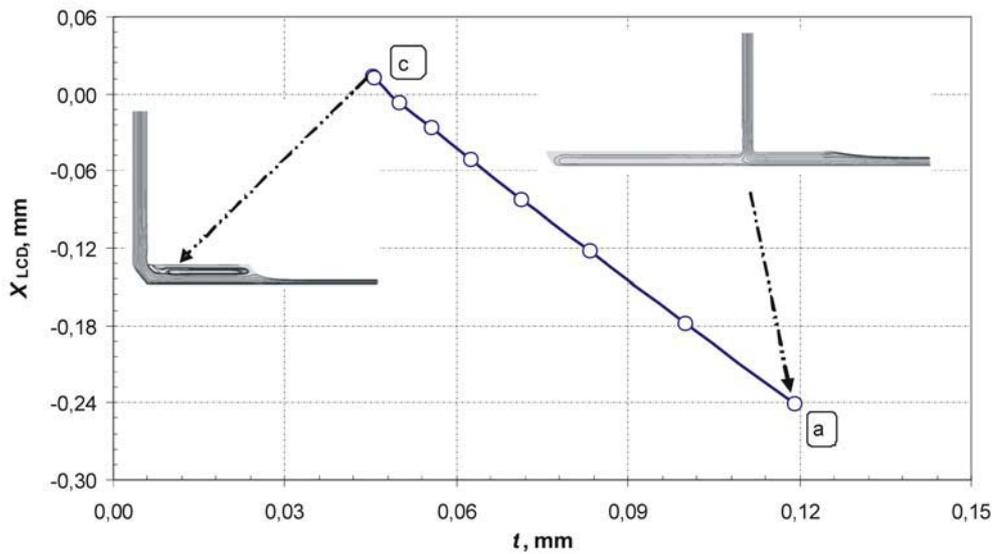


Figura 4.10 - Caminho da solução representada pela posição da linha de contato dinâmica para diferentes velocidades do substrato, com vazão constante $2Q$ e pressão de vácuo $P_{vac} = -3\text{kPa}$, para a geometria de lábio médio.

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.

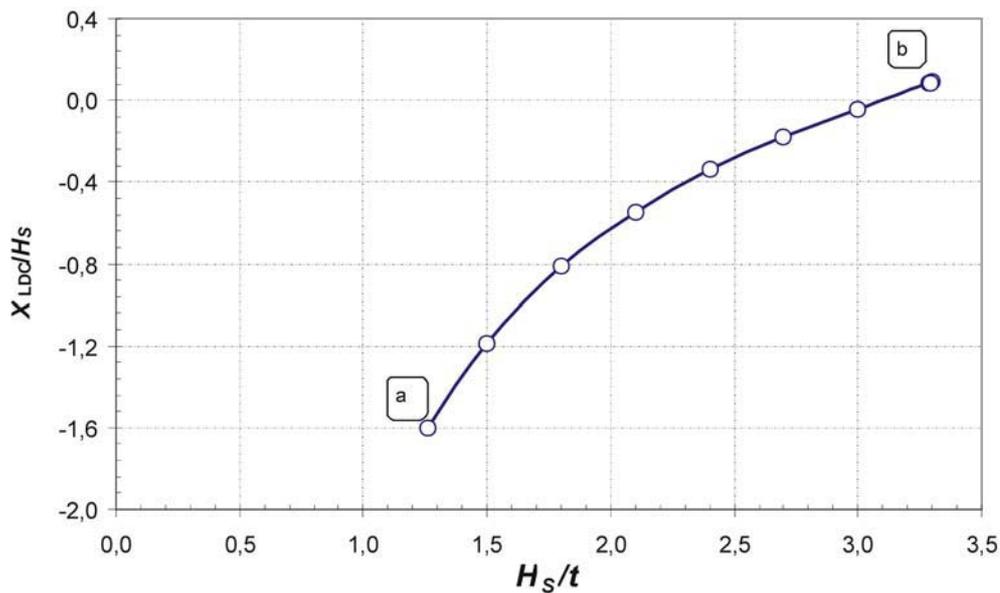


Figura 4.11 - Caminho da solução adimensional representada pela posição da linha de contacto dinâmica para diversas velocidades do substrato, com vazão constante $2Q$ e uma pressão de vácuo $P_{VAC} = -3\text{kPa}$. - Geometria Tipo "A" de lábio médio.

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.

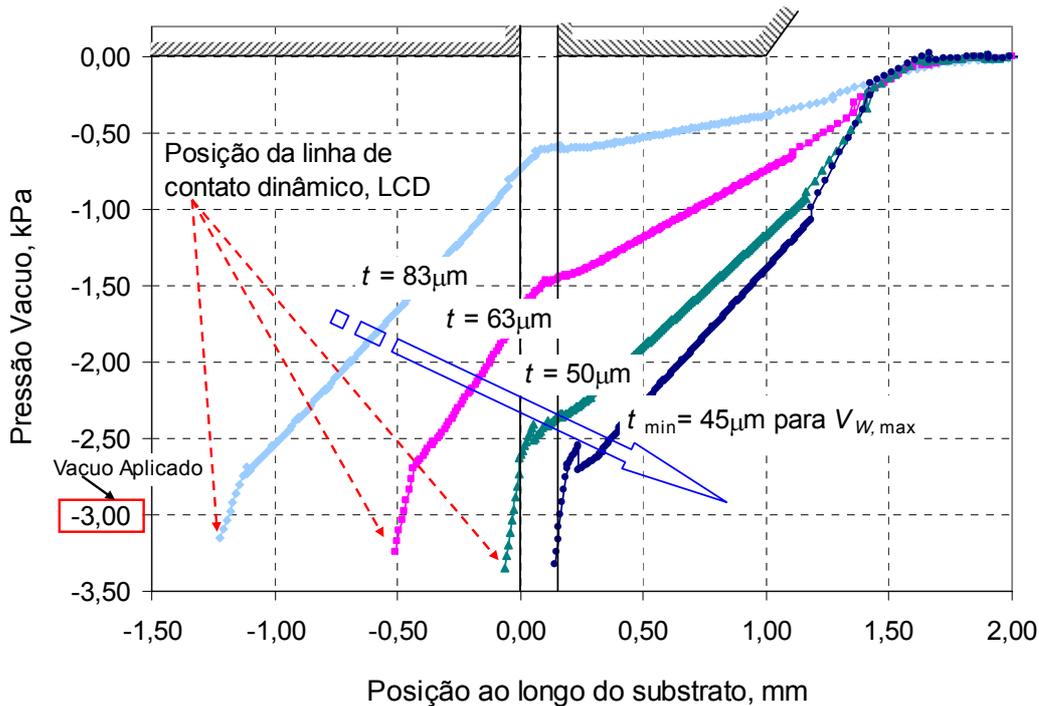


Figura 4.12 - Perfis de pressão ao longo do substrato para uma vazão e um vácuo constante de $0,10\text{mm}^2/\text{s}$ e de -3 kPa respectivamente para $Ca(V_w)$ de $0,04$; $0,08$; $0,1$ e $0,11$. - Geometria Tipo “A” de lábio médio.

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.

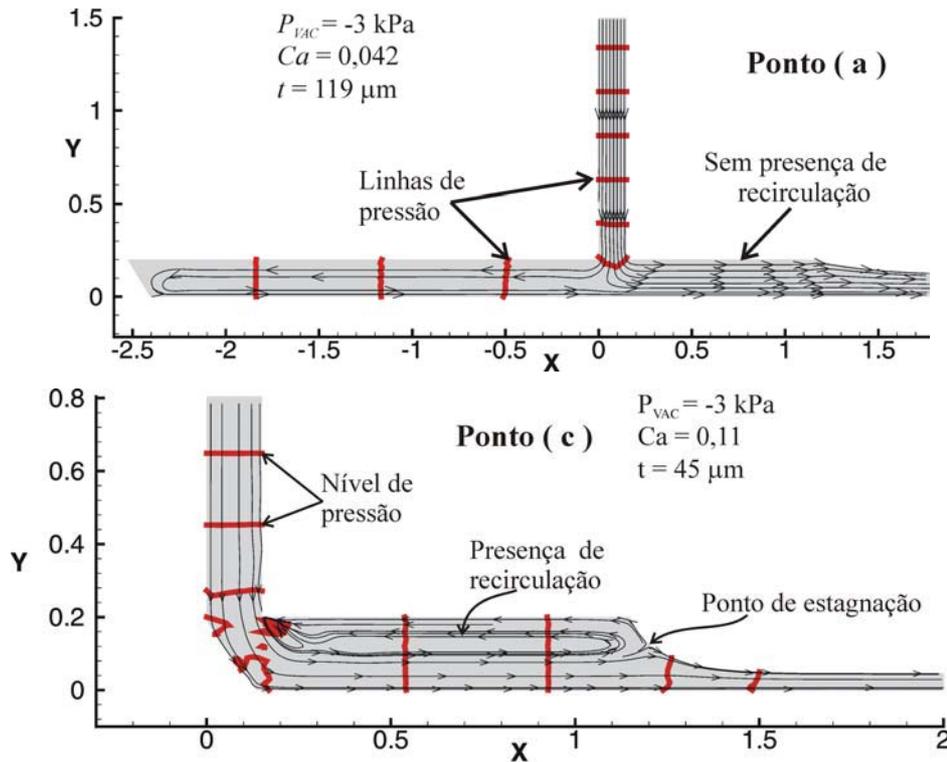


Figura 4.13 - Linhas de corrente e de pressão presentes no caso “a” e “c” da Figura 4.10 e Figura 4.11 mostrando a presença de recirculação e pontos de estagnação para a barra de lábio médio.

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 e 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.

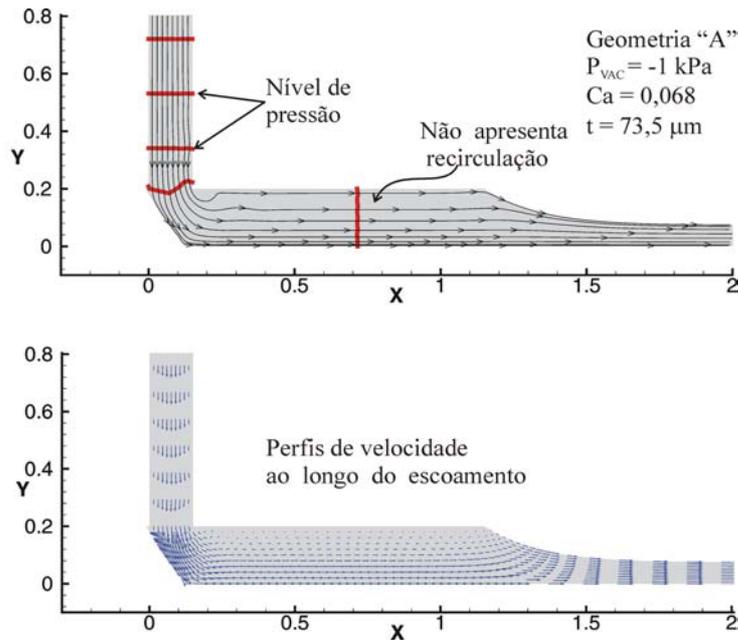


Figura 4.14 - Acima: Linhas de corrente e de pressão, no caso de $P_{VAC} = 1\text{kPa}$ mantendo a mesma vazão $2Q$; embaixo: perfis de velocidade do mesmo caso.

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 $H_s = 150 \mu\text{m}$.

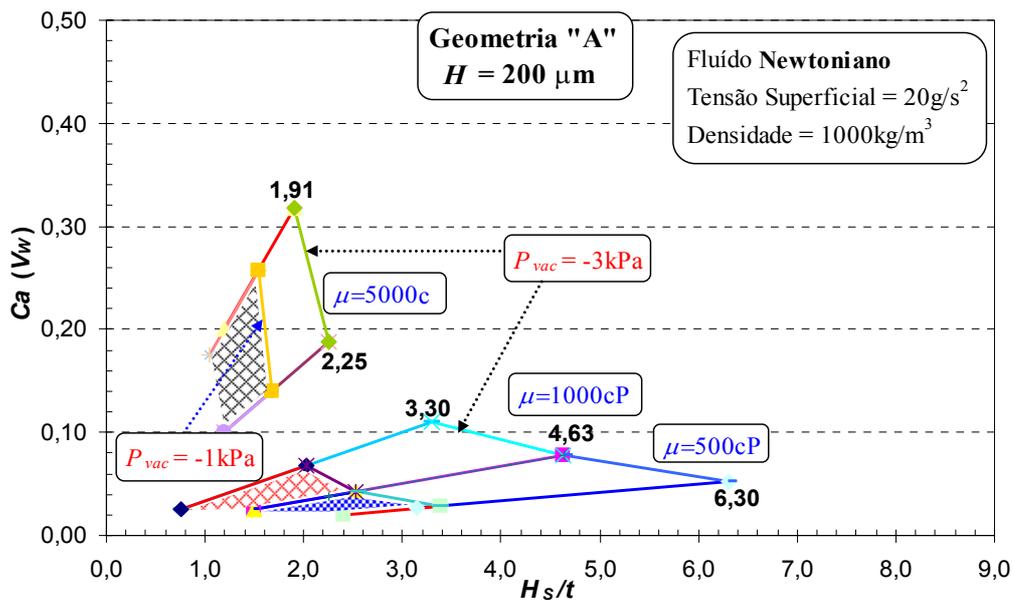


Figura 4.15 - Janelas de Operação de Processo para a Geometria tipo "A" para diferentes valores de viscosidade considerando uma faixa de vazão entre Q e $2Q$.

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} .

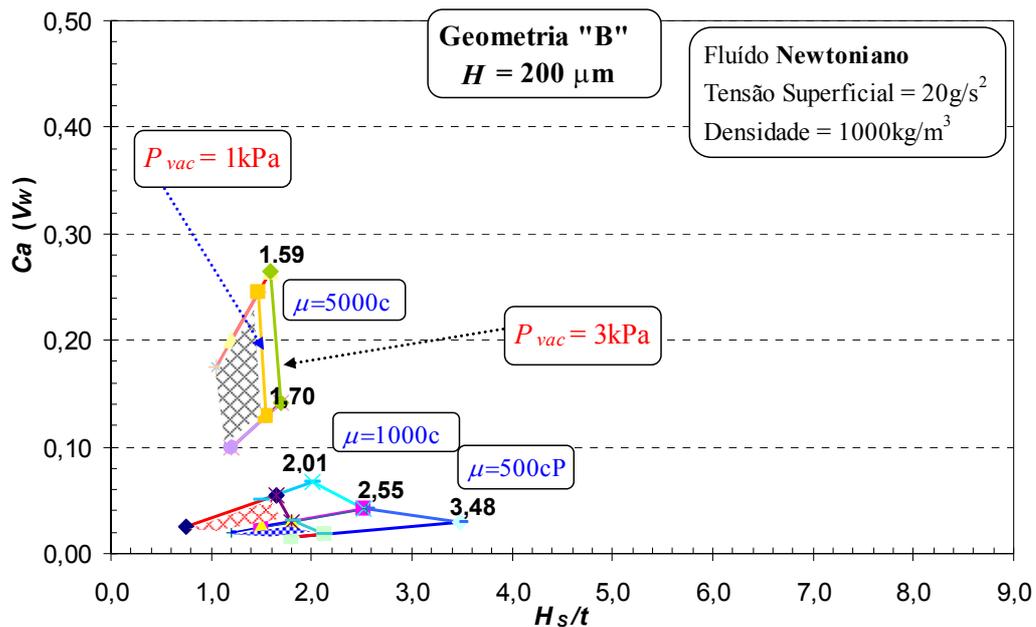


Figura 4.16 - As Janelas de Operação de Processo da Geometria tipo “B” para diferentes valores de viscosidade considerando uma faixa de vazão entre Q e 2Q.

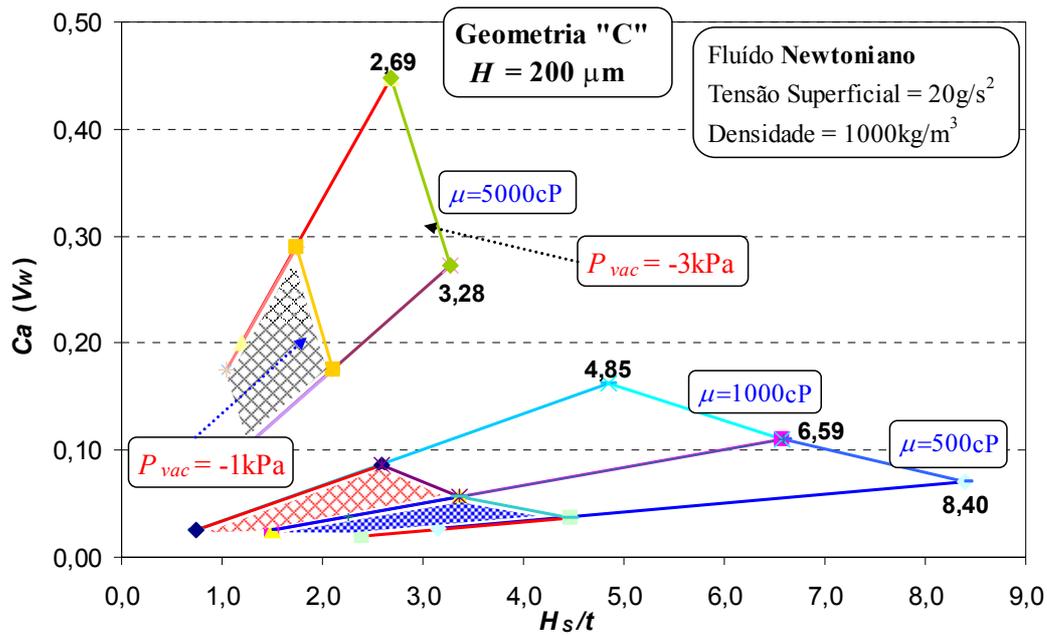


Figura 4.17 - As Janelas de Operação de Processo da Geometria tipo "C" para diferentes valores de viscosidade considerando uma faixa de vazão entre Q e 2Q.

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.

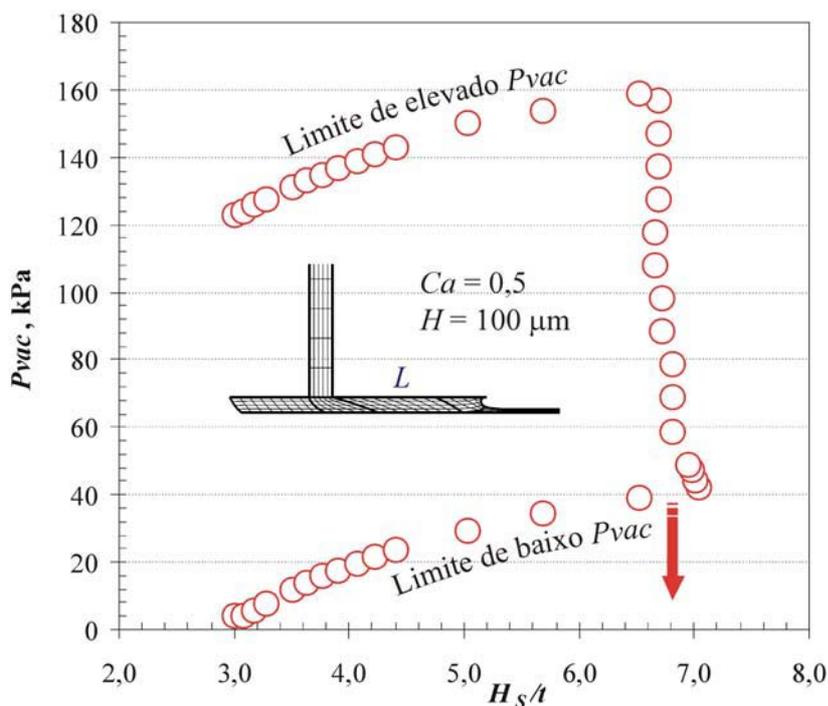


Figura 4.18 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo "A" de lábio médio, dado uma $Ca = 0,5$ e um distância da barra/substrato $H = 100\mu\text{m}$.

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 $H_s/t_{max} = 7,1$.

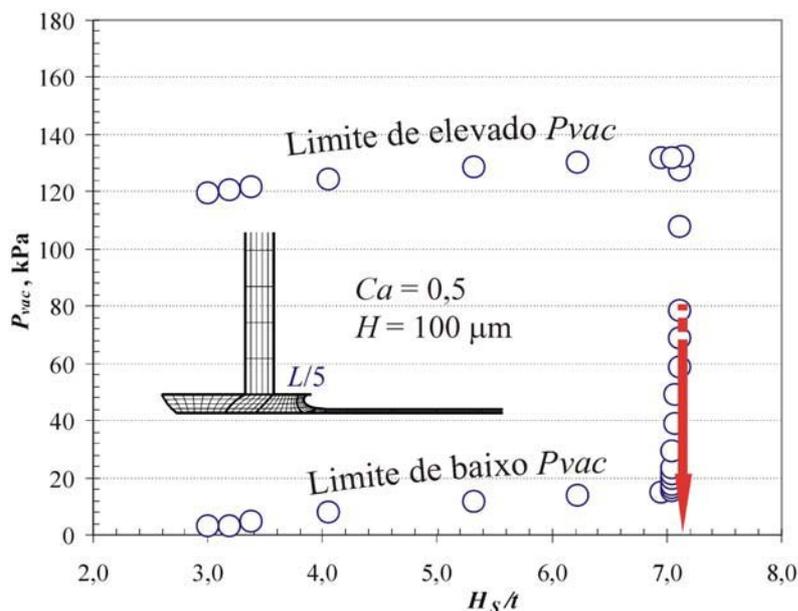


Figura 4.19 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo “C” de lábio curto, dado uma $Ca = 0,5$ e um uma distância da barra/substrato $H = 100\mu\text{m}$.

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.

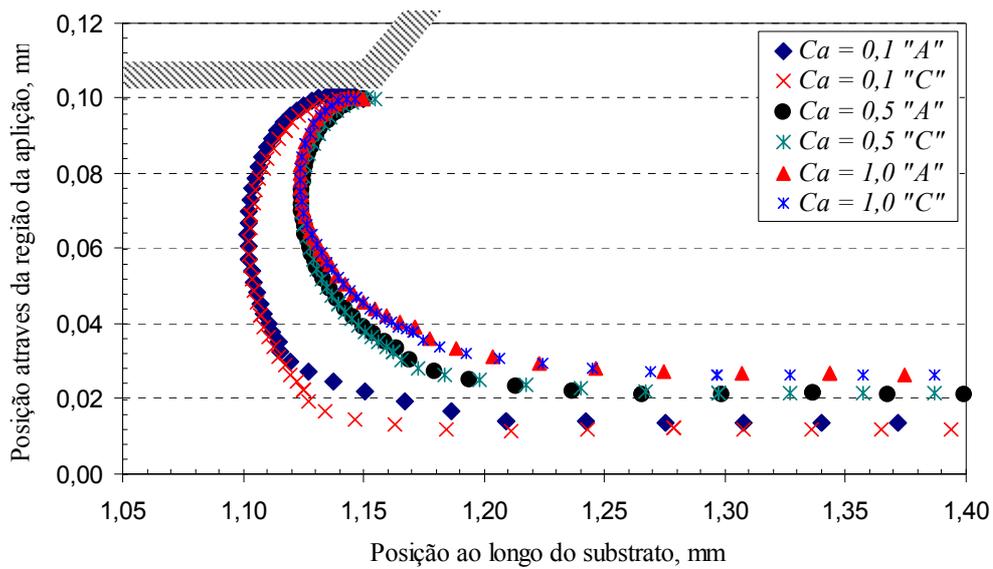


Figura 4.20 - Comparação dos perfis do menisco à jusante das duas configurações A e C da barra de revestimento para Ca de 0,1; 0,5 e 1,0.

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.

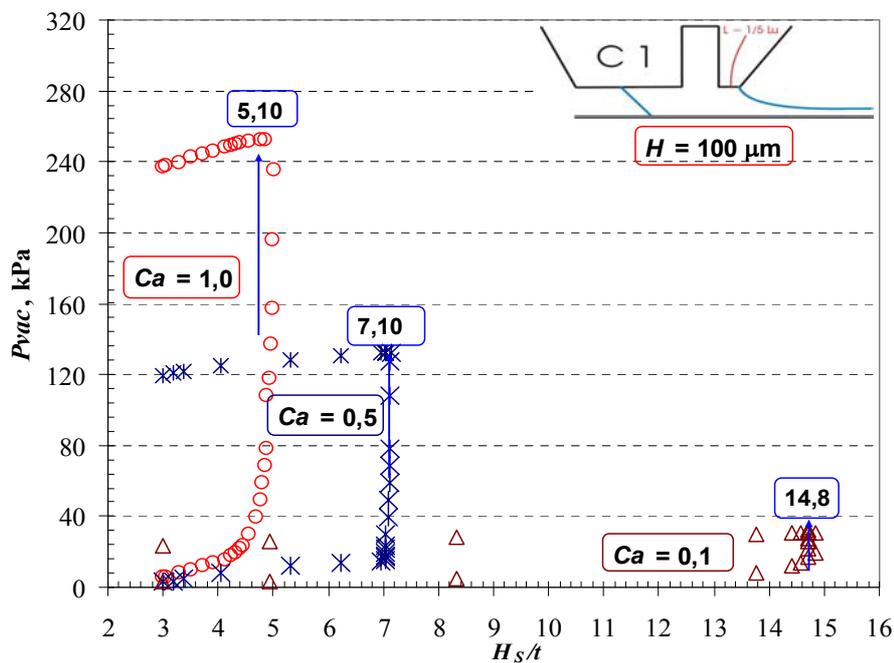


Figura 4.21 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo “C”, para $Ca = 0,1$; 0,5 e 1,0 e com uma distância da barra de revestimento ao substrato $H = 100\mu\text{m}$.

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.

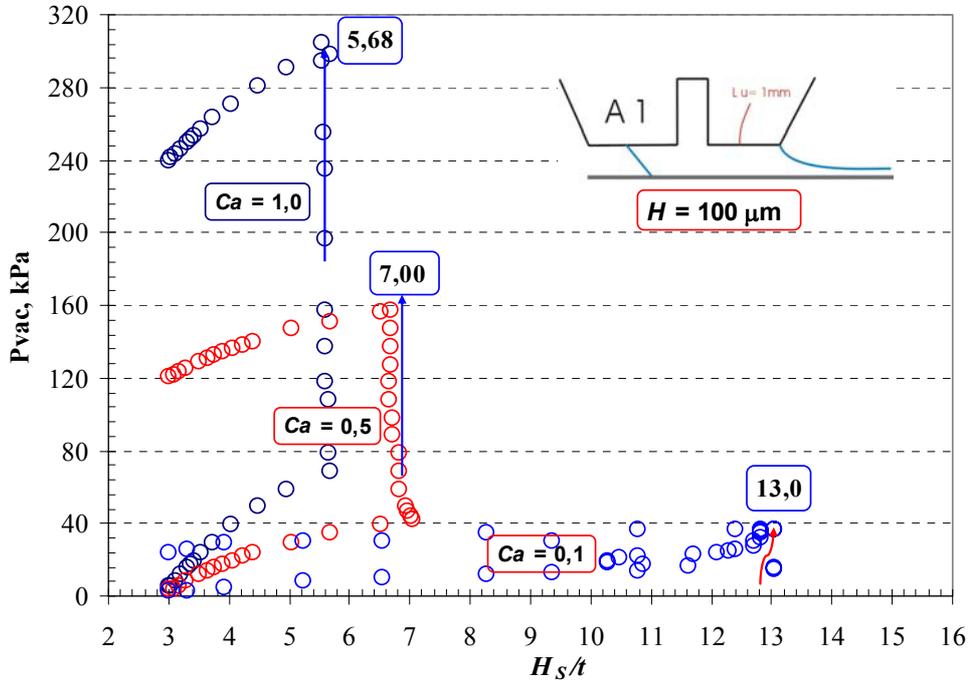


Figura 4.22 - Janela de operação de processos da barra de revestimento tipo “A”, para $Ca = 0,1; 0,5$ e $1,0$ e com uma distância da barra/substrato $H = 100 \mu m$.

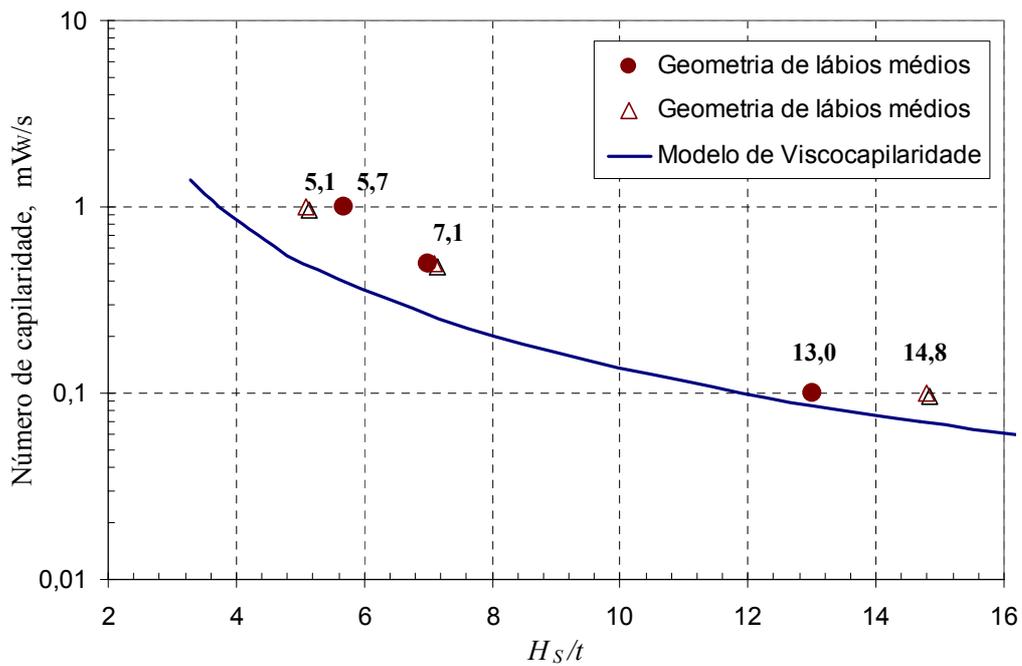


Figura 4.23 - Limite de vazão mínima no plano número de capilaridade Ca e da inversa da espessura de filme H_s/t , obtidos para as duas configurações A e C.

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.

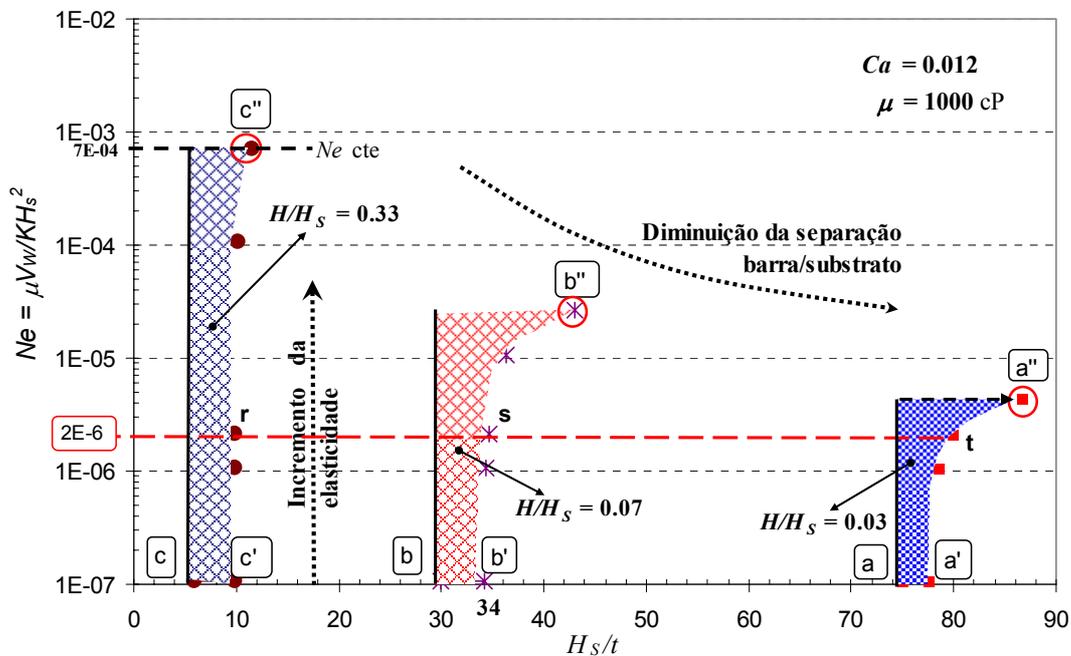


Figura 4.24 - Janelas de operação no plano número de elasticidade Ne e a inversa da espessura de filme, considerando o modelo de molas de um sistema elastohidrodinâmico – Configuração da barra “C” de lábios curtos.

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.

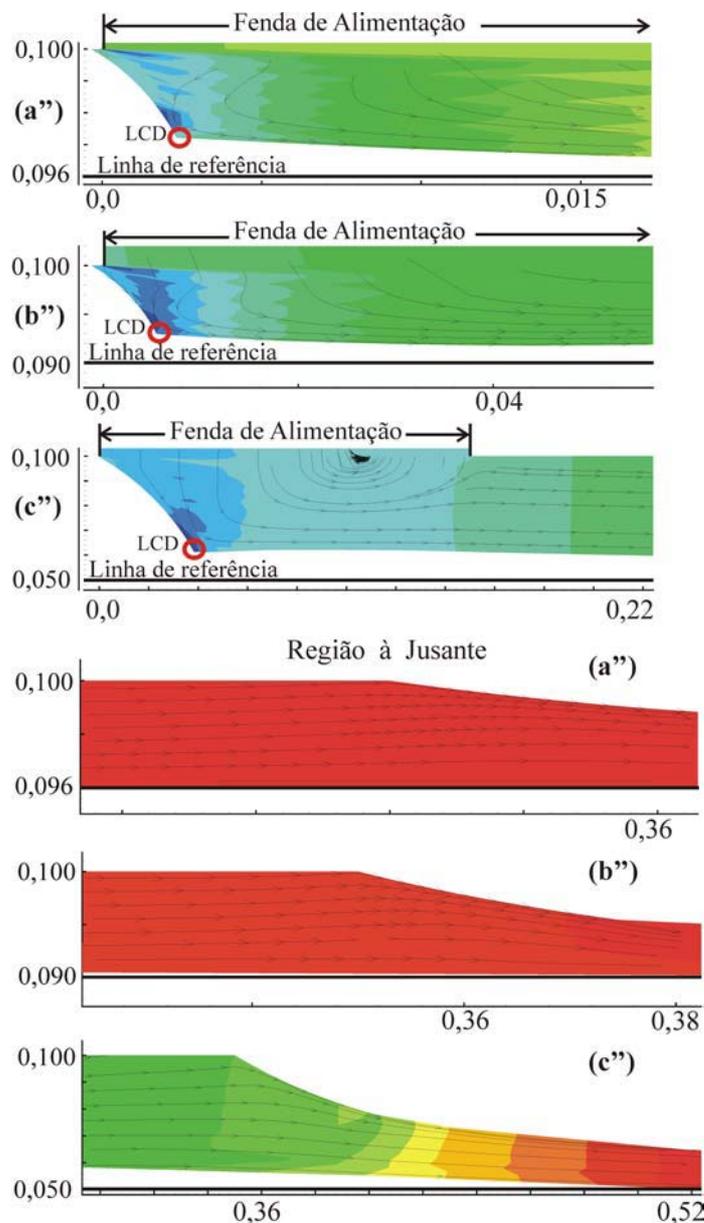


Figura 4.25 - Região à montante e à jusante dos pontos a'' , b'' e c'' da Figura 4.24 – Configuração da barra “C” de lábios curtos.

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.

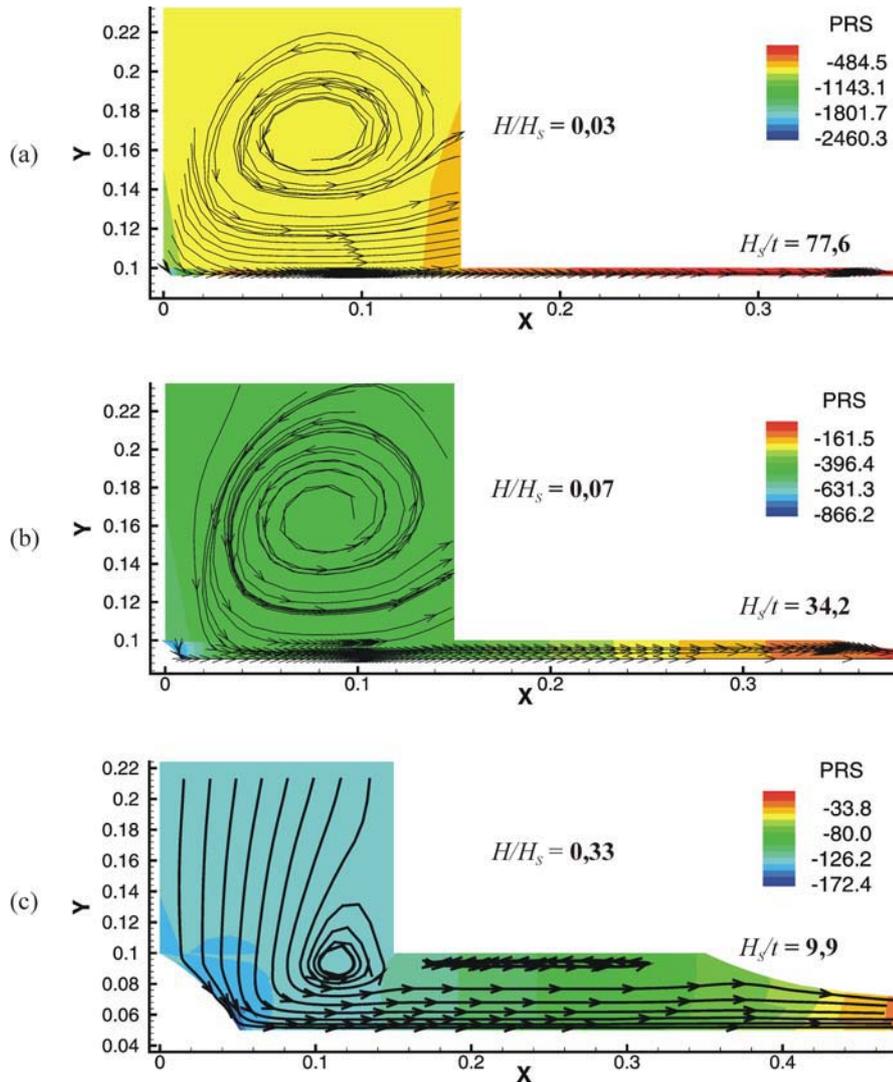


Figura 4.26 - Padrão do escoamento dos pontos a', b' e c'– Configuração da barra "C" de lábios curtos.

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., $H_s/t|_{(a)} = 77,6 > H_s/t|_{(b)} = 34,2 > H_s/t|_{(c)} = 9,9$.

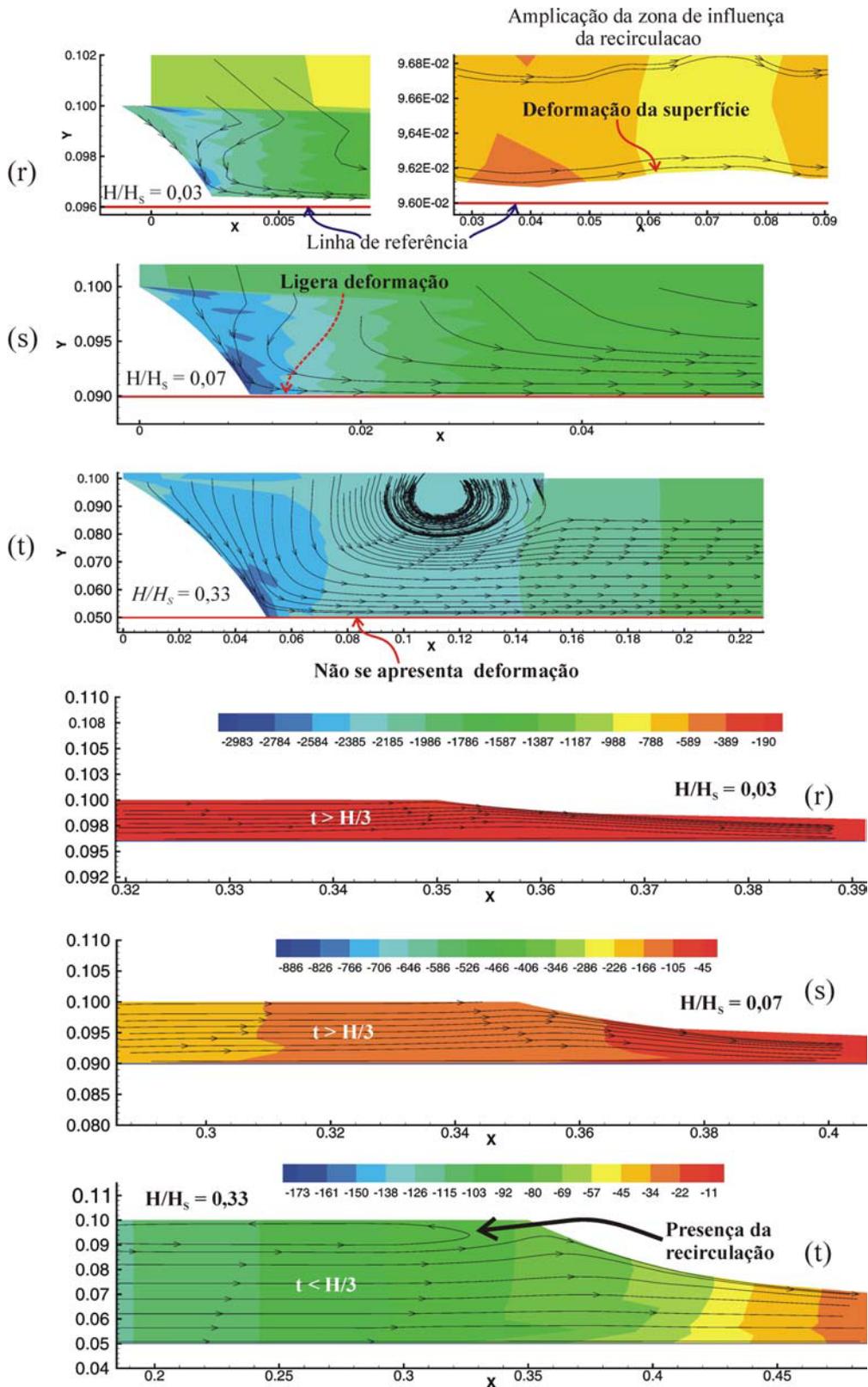


Figura 4.27 - Padrão do escoamento dos pontos r, s e t do gráfico da figura 4.24 onde $Ne = 2 \times 10^{-6}$. Configuração da barra "C" de lábios curtos.

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.

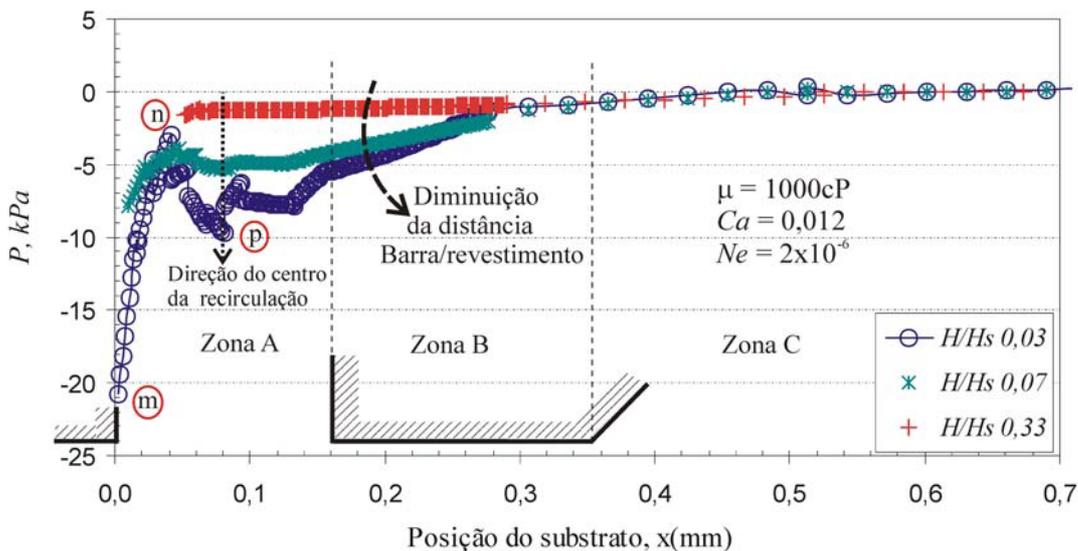


Figura 4.28 - Gráfico da pressão do fluido que age na face da superfície deformável para as diferentes distâncias barra/revestimento – Configuração da barra “C”.

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.

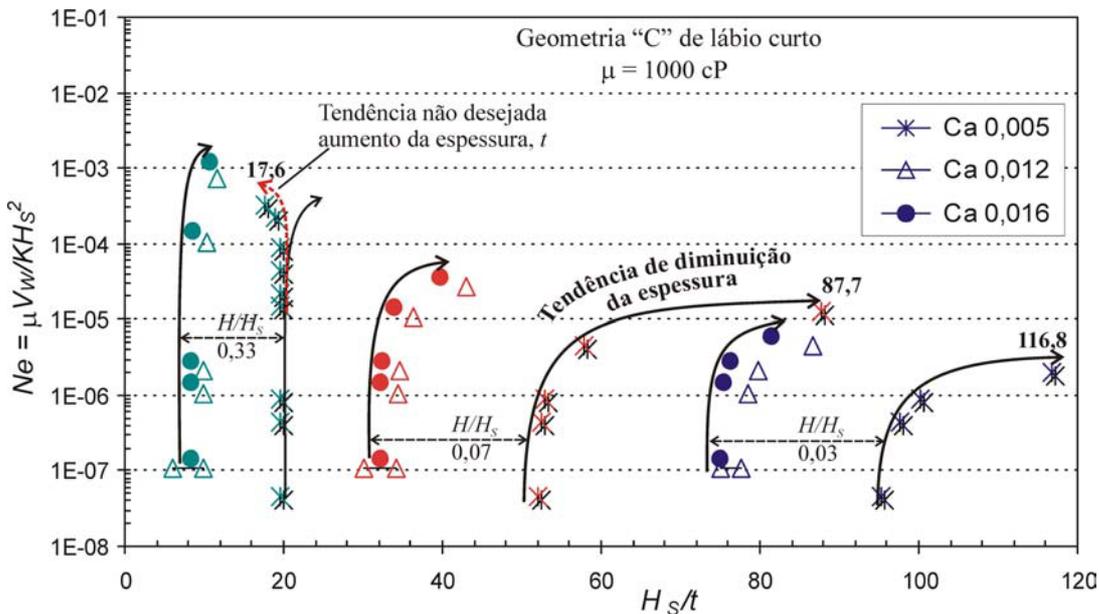


Figura 4.29 - Janelas de operação que mostra o comportamento das diferentes distâncias barra/substrato da barra de lábio curto para diferentes valores de número de capilaridade.

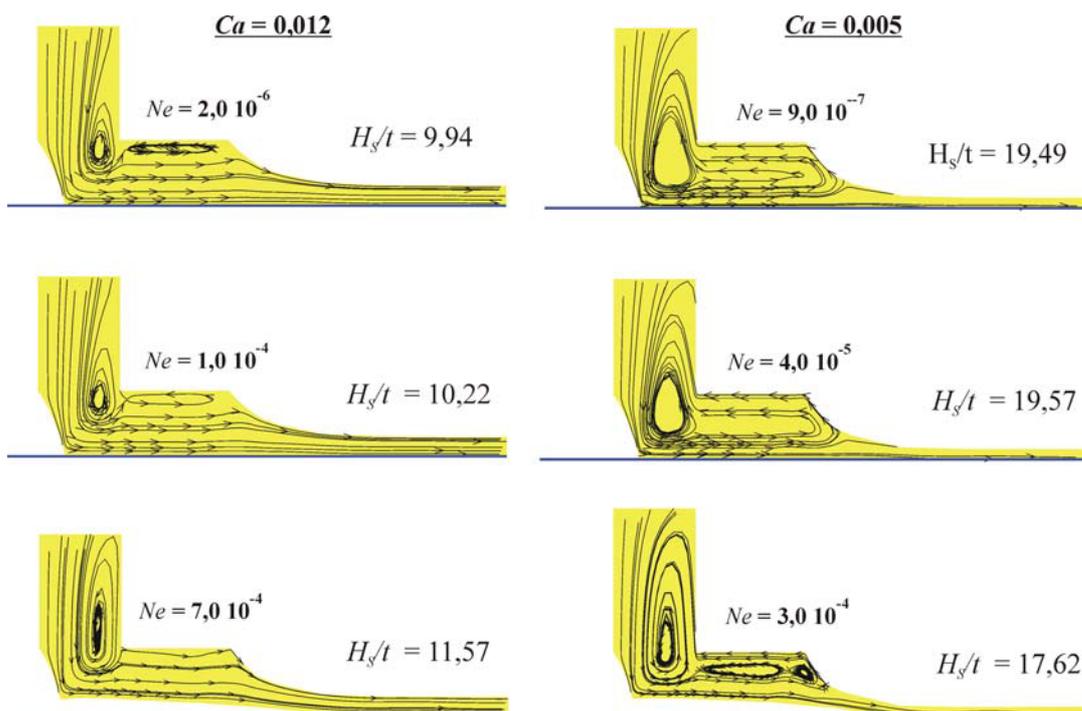


Figura 4.30 - Detalhe das linhas de corrente da barra tipo “C” de lábio curto, considerando números de capilaridade $Ca = 0,012$ e $Ca = 0,005$ para uma relação $H/H_S = 0,33$.

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 .

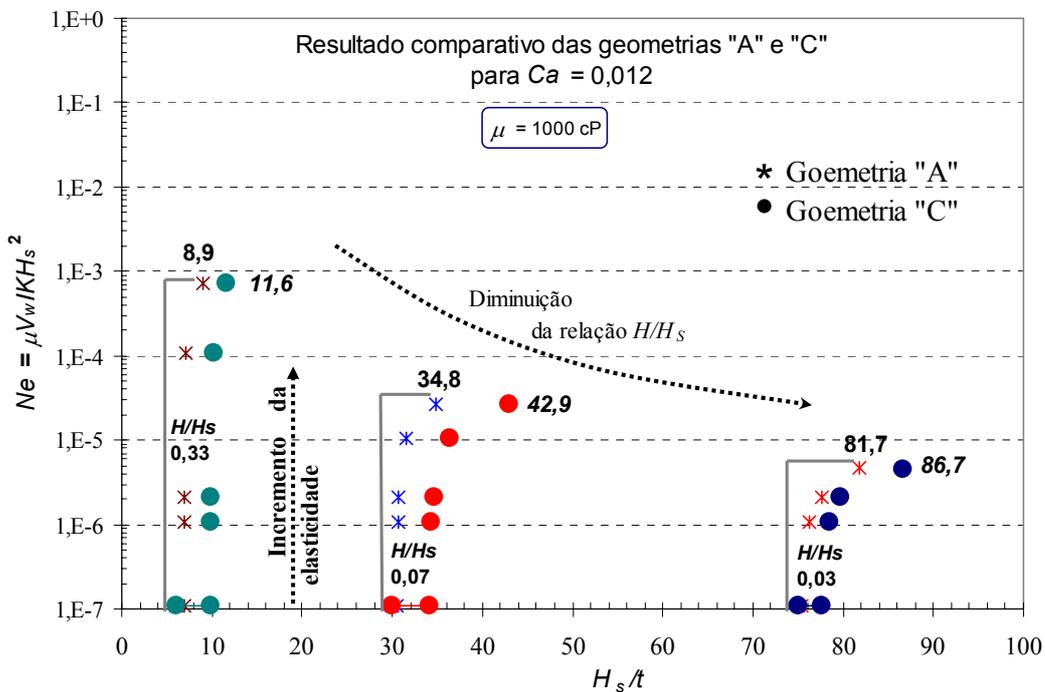


Figura 4.31 - Gráfico comparativo das Janelas de operação para as duas configurações da barra “A” e “C”, no plano Ne e a inversa da espessura do filme.