

### 3

## Resultados Numéricos do Escoamento na Zona de Impacto

Neste capítulo, apresenta-se os resultado obtidos por meio da simulação numérica do escoamento na zona de impacto, utilizando a metodologia descrita no capítulo anterior. O escoamento nesta zona é importante, porque determina a faixa de operação para um ótimo processo de revestimento por cortina. O domínio do escoamento onde as equações governantes são integradas é apresentado na Fig. (3.1). Na região de interesse do problema temos como variáveis importantes a vazão de alimentação ( $q$ ) na entrada da fenda ( $h$ ) do aplicador, a altura da cortina ( $H_o$ ) e a velocidade do substrato ( $U$ ). O origen da coordenada  $x$ , referencia para a Posição de Linha de Contato Dinâmico ( $X_{LCD}$ ) esta alinhado com a parede ezquerda da fenda do aplicador como mostra a Fig. (3.1).

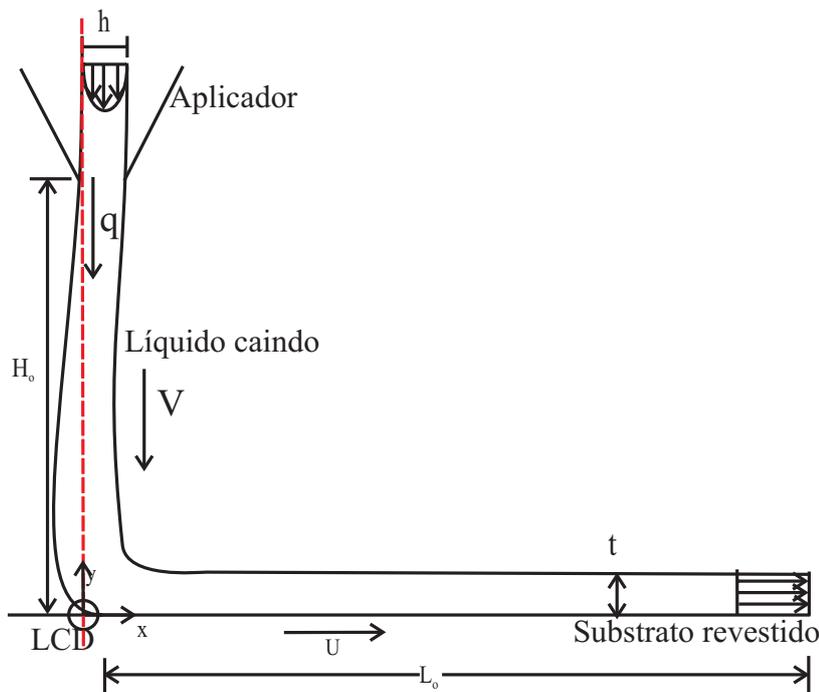


Figura 3.1: Desenho esquemático do domínio do escoamento físico

Como o escoamento apresenta duas superfícies livres foi feito um mapeamento do domínio físico para o domínio de referencia. Como foi dito, a presença da superfície livre torna o problema fortemente não linear e o processo iterativo bastante complexo mesmo para a simulação de escoamento de líquido Newtoniano. No caso particular deste tipo de revestimento, temos a presença de duas superfícies livres, na zona do escoamento da cortina, além da linha de

contato dinâmico LCD na zona de impacto que aumenta o grau de dificuldade na simulação do problema.

### 3.1 Topologia do mapeamento

A Fig. (3.2) representa o mapeamento entre os domínios. Divide-se o domínio em varias regiões de geometria quadrilátera. Esta divisão foi feita procurando obter uma topologia adequada que ajude na convergência durante a obtenção da solução do sistema de equações que descreve o problema. Num primeiro passo foi testada uma topologia simples, o domínio dividido em quatro regiões, mas a complexidade do problema não permitia obter convergência. Na segunda tentativa dividimos o domínio em sete regiões adequadamente distribuídas.

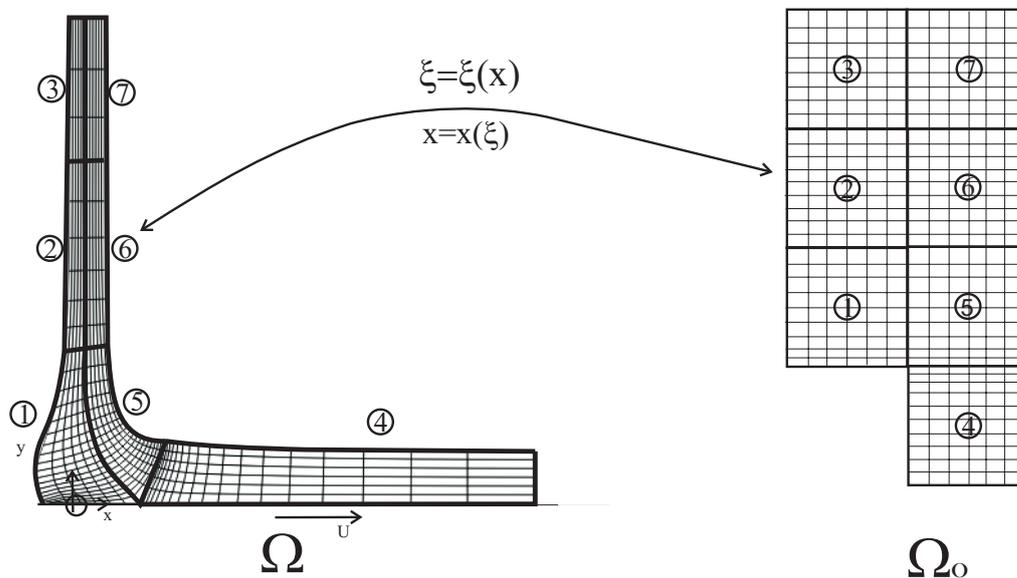


Figura 3.2: Domínios físico ( $\Omega$ ) e computacional ( $\Omega_o$ ) dividido em regiões.

### 3.2 Soluções preliminares

No capítulo dois foi descrito o método numérico utilizado para resolver o sistema de equações algébricas resultantes da modelagem do problema, o método de Newton. Neste método, para obter convergência, é necessária uma estimativa inicial próxima à solução do problema. Para isto resolvem-se dois problemas preliminares em seqüência. Estes problemas preliminares são mostrados na Fig. (3.3) e descritos a seguir:

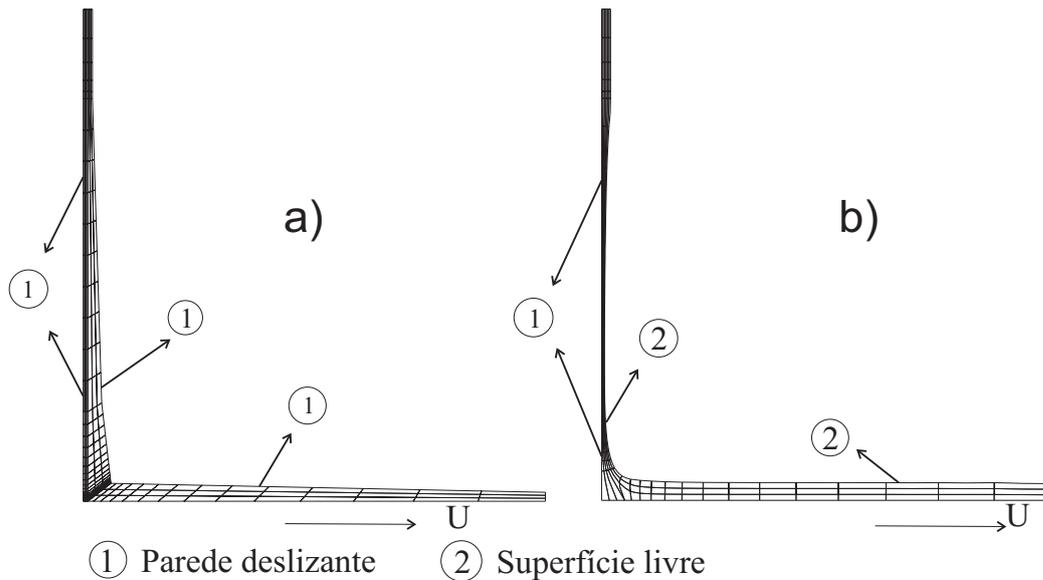


Figura 3.3: Problemas preliminares: a) Duas paredes deslizantes b) Uma parede deslizante e uma superfície livre.

- No primeiro problema substituí-se as duas superfícies livres por paredes deslizantes. Obtendo-se a primeira solução. Neste caso, o problema é linear para número de Reynolds nulo.
- No segundo problema, só uma das superfícies livres é substituída por parede deslizante. A solução do primeiro problema é usada como estimativa inicial de solução do segundo problema.
- E por último, usando esta segunda solução como estimativa inicial, pode-se conseguir o primeiro caso convergido do problema em estudo, isto é considerado as duas superfícies livres.

### 3.3

#### Teste de malha

Testaram-se duas malhas distintas com diferentes graus de refinamento, isto para concluir que a solução independe do refinamento utilizado. O critério de avaliação foi a comparação dos resultados obtidos da posição da linha de contato dinâmico,  $X_{lcd}$ , na Zona de impacto, mostrada na Fig. (3.4), para as malhas usadas. O número de elementos de cada uma das sete regiões em que foi dividido o domínio e o número de nós para as malhas testada são indicados na Tab. (3.1) a seguir:

Como pode-se observar na Fig. (3.5), que apresenta a posição da linha de contato dinâmico para diferentes números de Reynolds, tem-se uma boa concordância entre os resultados obtidos para as malhas usadas.

| Malha | Núm. de Elementos | Núm. de nós |
|-------|-------------------|-------------|
| 1     | 240               | 1067        |
| 2     | 456               | 1935        |

Tabela 3.1: Refinamento de Malha.

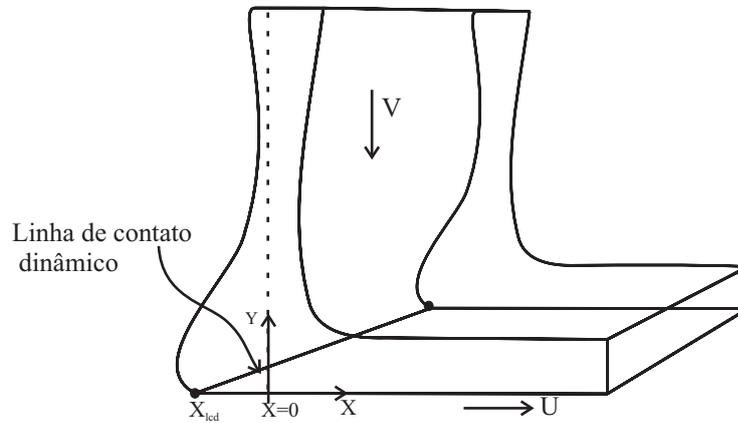


Figura 3.4: Linha de contato dinâmico,  $X_{lcd}$ , na zona de impacto

$$Ca = \mu U / s = 1.5, \quad H_o = 45 \text{ mm}$$

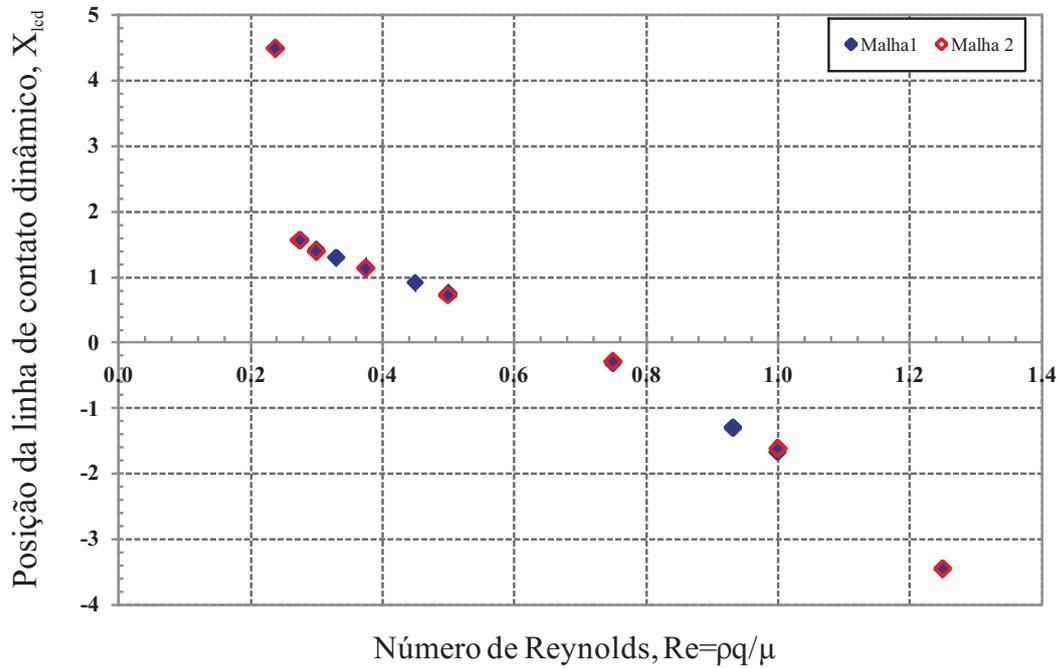


Figura 3.5: Posição da linha de contato dinâmico,  $Ca = 1,5$  e  $H_o = 45$  mm, para as diferente malhas.

Tentou-se refinar a malha ainda mais, porém não foi possível por atingir os limites computacionais disponíveis. Assim para preservar a confiabilidade dos cálculos e para se ter maior informação dos campos (velocidade e pressão) escolheu-se a malha mais fina, malha 2.

### 3.4 Resultados

O estudo numérico do comportamento do escoamento na cortina de um líquido Newtoniano foi desenvolvida variando os principais parâmetros operacionais. Os primeiros avanços deste estudo já mostravam a existência da alta sensibilidade da convergência com a geometria do problema, especificamente altura da cortina, presença das superfícies livres e a linha de contato dinâmico.

A zona de impacto, que como descrito no capítulo 1, é onde a cortina de líquido encontra o substrato em movimento. Para um bom processo de revestimento devemos garantir que a cortina de líquido não se desloque muito da linha perpendicular formada da saída do aplicador até o substrato. Por tal motivo concentramos a nossa atenção na determinação da posição da linha de contato dinâmico. Os parâmetros adimensionais utilizados para o estudo são: Número de Reynolds,  $Re = \rho q / \mu$ , Número de capilaridade,  $Ca = \mu U / \sigma$  e a relação de velocidades do substrato ( $U$ ) e a cortina caindo ( $V$ ),  $U/V$ . Os valores dos parâmetros geométricos fixos são:  $h = 1\text{mm}$  e  $L = 50\text{mm}$

Os limites dos casos simulados foram dados pela convergência obtida da solução do problema.

#### 3.4.1 Ângulo de contato dinâmico

No capítulo 2 foram descritas as condições de contorno para resolver o sistema de equações que descreve o problema. O ângulo de contato dinâmico neste estudo foi imposto como uma condição de contorno necessária para determinar a posição da linha de contato dinâmico. Nos resultados apresentados neste estudo foi usado um ângulo de contato,  $\theta_{lcd}$ , igual a  $10^\circ$ . Para determinar o efeito do ângulo imposto na solução obtida, foram realizadas simulações com diferentes valores. A Fig. (3.6) apresenta a variação da posição da linha de contato dinâmico com o número de Reynolds, para dois números de Capilaridade e dois ângulos de contato diferentes.

Os resultados mostram que existe uma pequena variação da posição de linha de contato dinâmico ao mudar o ângulo de contato dinâmico nos extremos da faixa do número de Reynolds simulados numericamente. Porém, com o aumento do número de capilaridade, a variação tende a diminuir. Concluímos

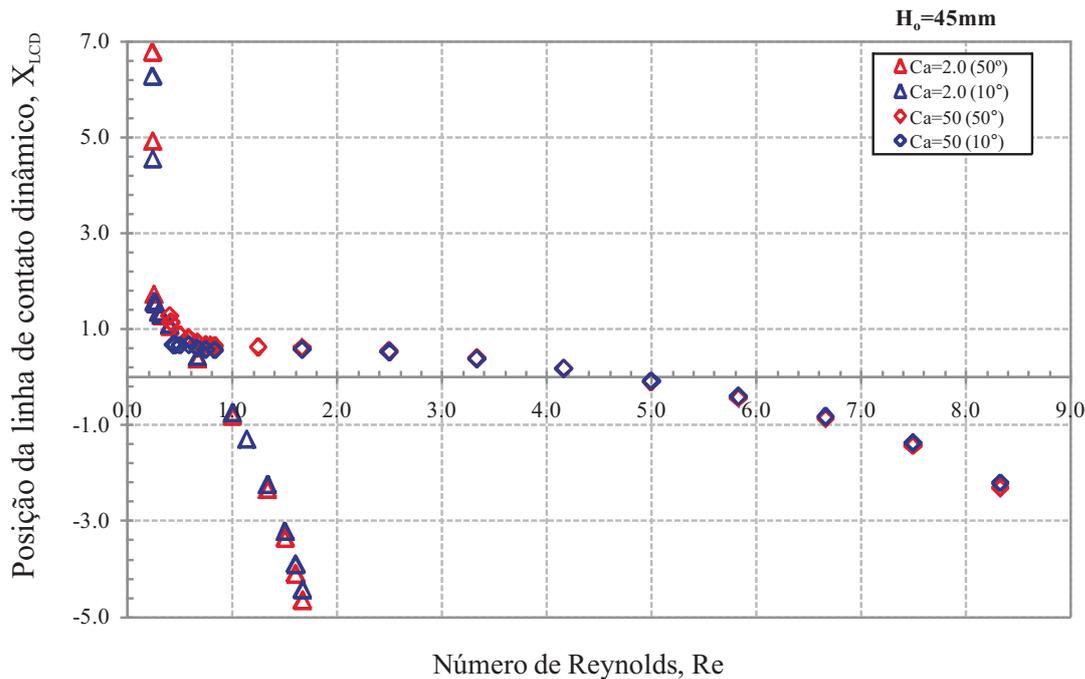


Figura 3.6: Influência do ângulo de contato dinâmico.

que o ângulo de contato dinâmico não tem influencia acentuada na posição da linha de contato dinâmico.

### 3.4.2

#### Configuração do escoamento na zona de impacto

Na Fig. (3.7) apresenta-se as diferentes configurações (geometria da superfície livre) da zona de impacto obtidas pela variação do número de Reynolds (vazão de alimentação do líquido) para um número de capilaridade constante (velocidade do substrato constante), neste caso  $Ca = 1, 5$ . Primeiro é possível observar que para  $Re = 0, 24$ , Fig. (3.7)c, temos que a cortina é puxada pelo substrato, nesta configuração a linha de contato dinâmico encontra-se na parte da frente da cortina. A medida que o número de Reynolds aumenta,  $Re = 0, 75$ , na Fig.(3.7)b, a cortina cai perpendicularmente no substrato até começar a formação de um calcanhar para números de Reynolds ainda maiores,  $Re = 1, 25$ , Fig.(3.7)a. Nestas condições a cortina puxada pelo substrato torna o escoamento vulnerável à entrada de ar entre o substrato e o líquido de revestimento. Na formação de calcanhar pequenas recirculações do líquido aparecem, a recirculação é suscetível a instabilidades que podem ser periódicas, e a entrada de ar pode ocorrer a menores velocidades de substrato que no primeiro caso.

Pode-se observar os campos de pressão para as diferentes condições de operação apresentadas na Fig.(3.7). O campo para  $Re = 0,75$ , Fig.(3.7)b, mostra que existe uma maior pressão perto da linha de contato dinâmico, esta característica é chamada na literatura como “*Hydrodynamic wetting assistance*”, que outorga a habilidade de revestir a altas velocidades. Denominamos esta como a “configuração desejada” de operação. Nas outras duas configurações, Fig.(3.7)a e Fig.(3.7)c, perde-se esta característica.

As configurações descritas anteriormente aparecem para os números de capilaridade simulados, como mostra a Fig. (3.8). A diferença na posição da linha de contato dinâmico, para os diferentes números de capilaridade, se torna visível para  $Re > 1$ . Se fixamos um valor de número de Reynolds a medida que aumentamos o número de capilaridade encontramos que a linha de contato dinâmico se desloca para jusante.

A faixa de Reynolds, onde podemos encontrar uma caída perpendicular da cortina no substrato, isto é, posição da linha de contato dinâmico ( $X_{lcd}$ ) próximo de  $x = 0$  na Fig. (3.8), se torna pequena quando o número de capilaridade diminui indicando que no método de revestimento por cortina, a deposição deve ser efetuada a elevados números de Capilaridade.

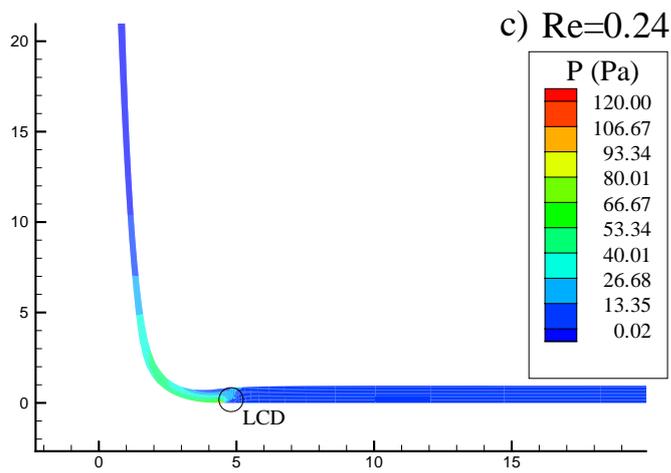
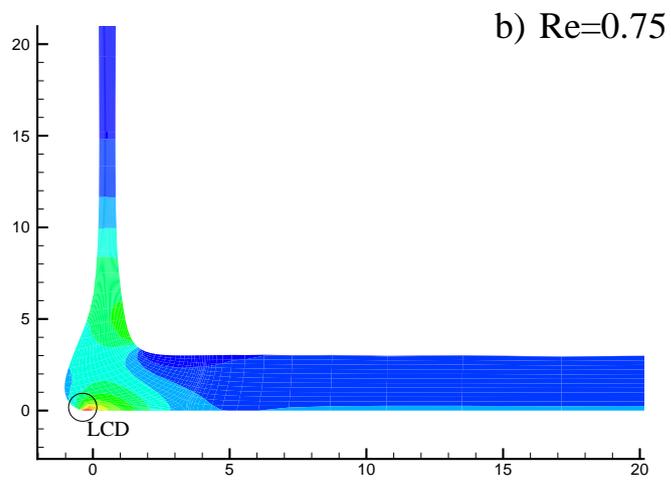
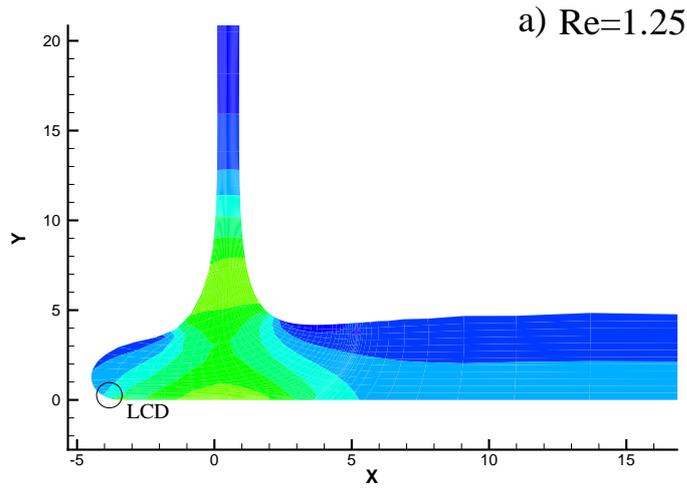


Figura 3.7: Configurações da zona de impacto  $Ca = 1,5$  e  $H_o = 45$  mm: Formação de calcanhar e cortina puxada pelo substrato.

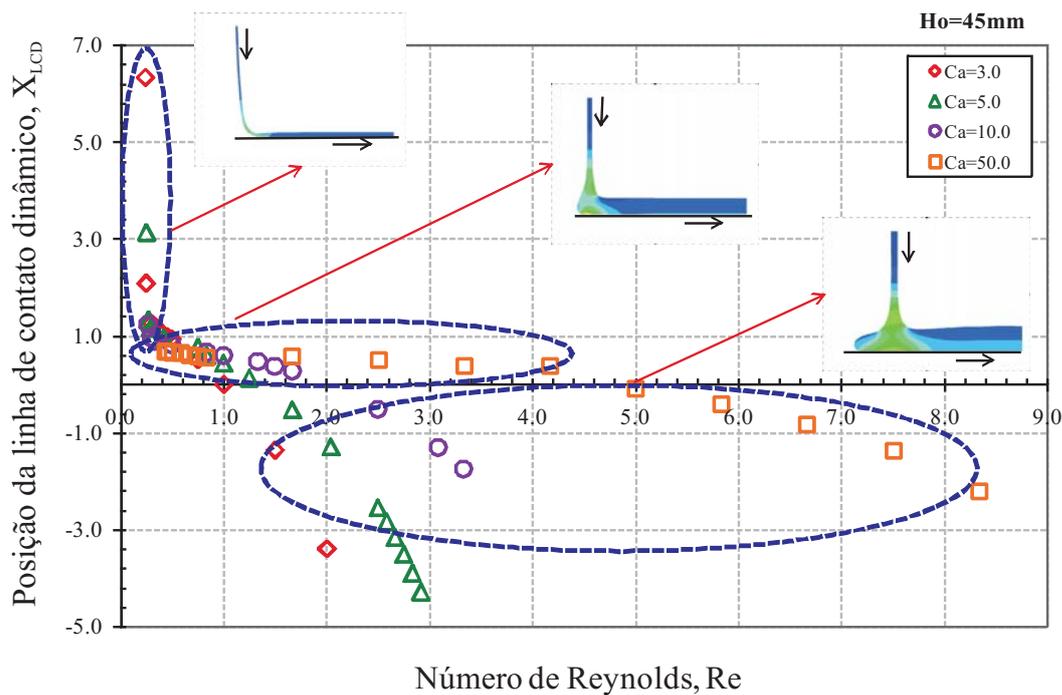


Figura 3.8: Posição da linha de contato dinâmico em função do número de Reynolds.

### 3.4.3 Altura da cortina

A altura é uma variável importante no processo. Quanto maior a altura da cortina, maior será a velocidade da cortina na zona de impacto. Os resultados da simulação numérica, mostram que mantendo as condições de número de Reynolds e de número de capilaridade para diferentes alturas da cortina, a pressão perto da linha de contato dinâmico varia e a posição desta muda, como é mostrado na Fig.(3.9).

Para uma altura de 100 mm a pressão perto da linha de contato dinâmico é maior, comparado com uma cortina de 45 mm de altura. Além disto, pode-se observar que a cortina é mais fina no caso de maior altura, já que a velocidade de queda é maior

No gráfico da posição da linha de contato dinâmico em função do número de Reynolds e de duas alturas diferentes de cortina, Fig(3.10), observa-se que para a maior altura da cortina, o número de Reynolds (vazão) onde o substrato começa a puxar a cortina é reduzido. Além disto, a faixa de número de Reynolds na qual podemos obter a configuração desejada para o processo é mais estreita para alturas maiores.

Resumindo, a maior altura da cortina provoca uma maior pressão na

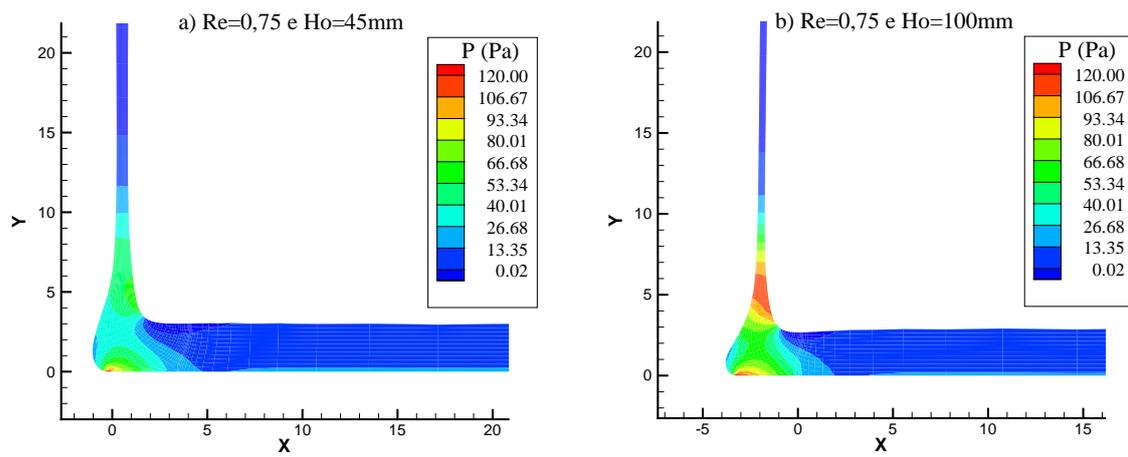


Figura 3.9: Campo de pressão na zona de impacto para  $Ca = 1.5$  e  $Re = 7, 5$ : a)  $H_o = 45$  mm b)  $H_o = 100$  mm.

linha de contato, podendo assim melhorar o molhamento do substrato, porém reduz substancialmente a janela de operação do processo.

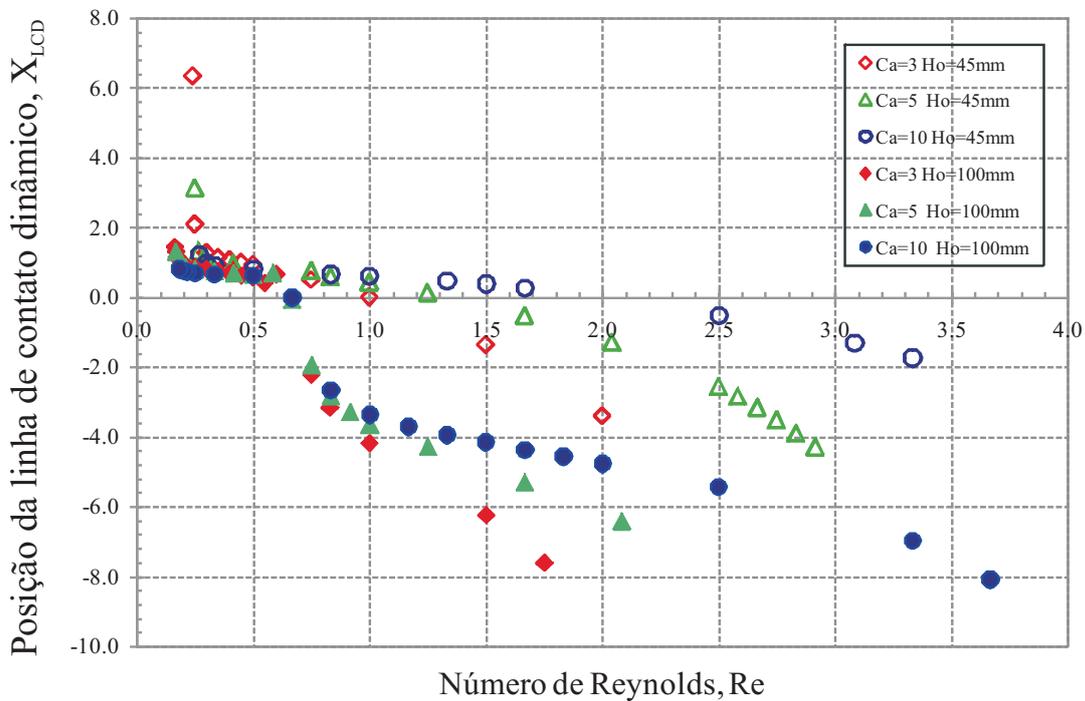


Figura 3.10: Posição da linha de contato dinâmico em função do número de Reynolds. Influência da altura da cortina.

### 3.4.4 Efeito da Tensão Superficial

A forma da superfície livre na zona de impacto é resultado da ação das forças capilares na região. A influência da tensão superficial na posição da linha de contato dinâmico é apresentado na Fig. (3.11).

A cortina tende a se deslocar para jusante quando a tensão superficial é maior. Essa diferença na posição da cortina se torna significativa à medida que o número de Reynolds aumenta. Porém ela diminui à medida que as forças capilares ficam menores, isto é para altos valores do número de capilaridade.

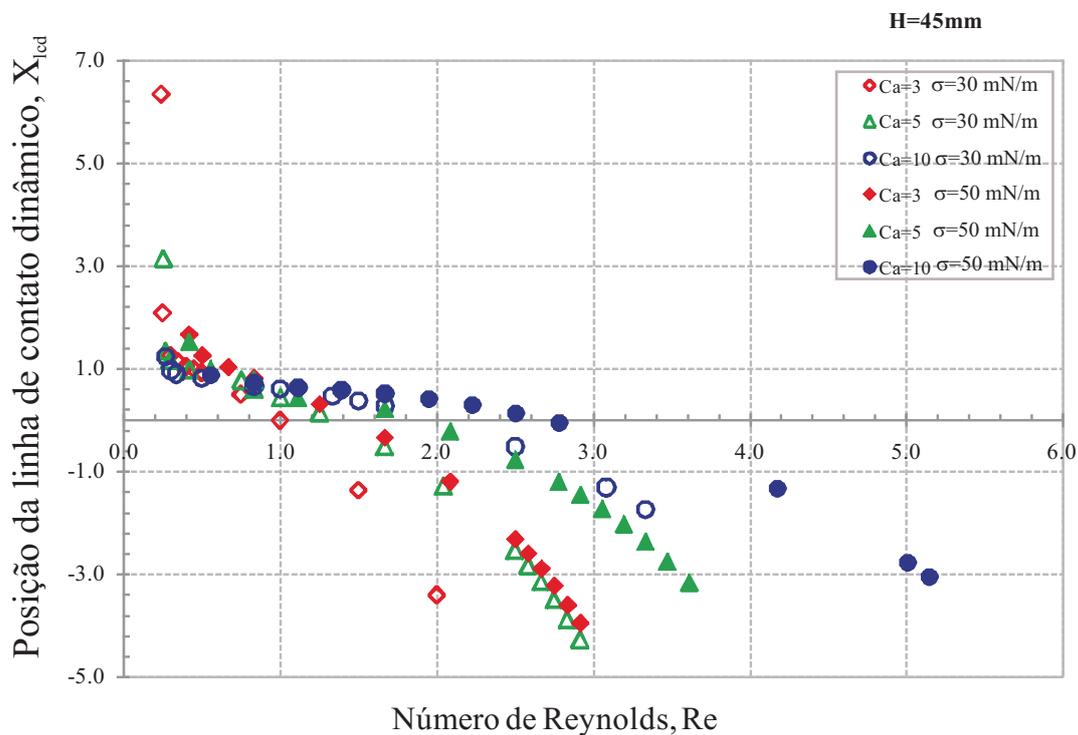


Figura 3.11: Influência da tensão superficial.

Esta diferença na posição, tanto pela variação da tensão superficial quanto pela variação na altura, tendo mantido constante os números de Reynolds e capilaridade, implica na modificação de um outro parâmetro importante no processo, a relação de velocidades  $U/V$ . Lembrando que  $Ca = \mu U/\sigma$ ,  $Re = \rho q/\mu$ ,  $U$  é a velocidade do substrato e  $V$  é a velocidade da cortina na zona de impacto (esta velocidade depende da altura).

### 3.4.5 Janela de Operação

Os resultados obtidos da simulação numérica são mapeados em função dos parâmetros do processo nos gráficos das Fig. (3.12) e Fig. (3.13). Estes gráficos representam as janelas de operação do processo, nelas podemos observar as condições necessárias para poder operar no processo de revestimento por cortina.

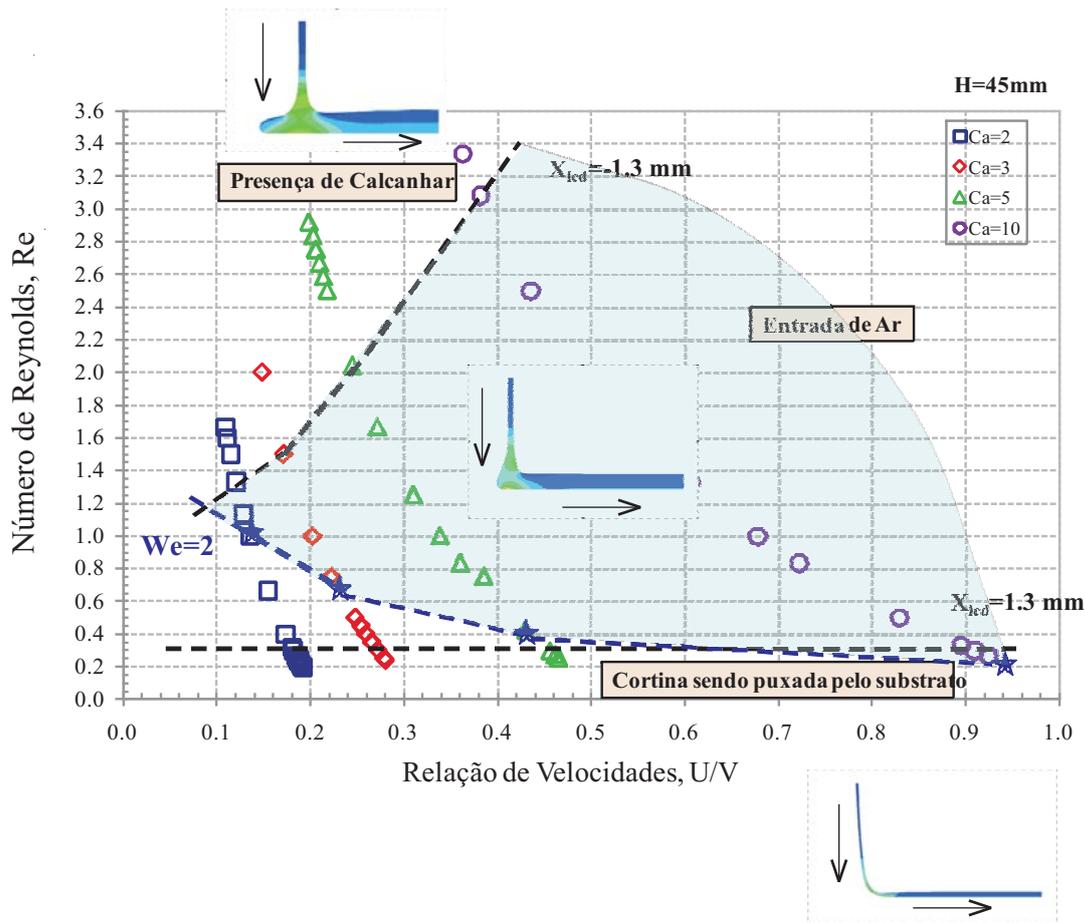


Figura 3.12: Janela de Operação para uma altura de cortina fixa,  $H_o = 45$  mm.

Na Fig. (3.12) as linhas que atravessam as curvas de número de Capilaridade constante identificam as posições, da linha de contato dinâmico, limites onde a cortina apresenta uma caída perpendicular ao substrato. Em condições de operação acima da linha que representa  $X_{lcd} = -1.3$  mm existirá a formação de calcanhar na zona de impacto. Por outro lado, pontos abaixo da linha que representa  $X_{lcd} = 1.3$  mm encontraremos que a cortina está sendo arrastada pelo substrato para jusante.

Para relações de velocidade,  $U/V$ , altas um outro problema deste processo aparece, a entrada de ar entre o substrato e o líquido de revestimento.

Como foi mencionadão no primeiro capítulo deste trabalho, na descrição da zona de escoamento da cortina, existe uma vazão crítica (mínima) onde ocorre a quebra da cortina. Como a vazão, nesta região, esta representada pelo número de Webber ( $We$ ,  $We = \rho qV/\sigma$ ) teremos um número de Webber crítico. Brown [7] concluiu que  $We_{critic} = 2$ , assim para  $We > 2$  a cortina é estável, e não ocorre quebra.

Se colocamos o número de Weber como função do  $Re$  obtemos que  $We_{critic} = Re_{critic} * Ca = 2$ , assim podemos dizer que existe um número de Reynolds crítico (mínimo) para cada curva do número de Capilaridade da Fig. (3.12). Com a curva de número de Weber critico completamos a janela de operação levando em consideração os parâmetros adimensionais da zona de impacto e da zona do escoamento da cortina.

Na janela de operação em função dos parâmetros  $Re$  e  $Ca$ , apresentada na Fig. (3.13) mostra-se a influência da altura da cortina. Enquanto maior a altura os limites de operação do processo estão mais próximos obtendo assim uma janela de operação menor.

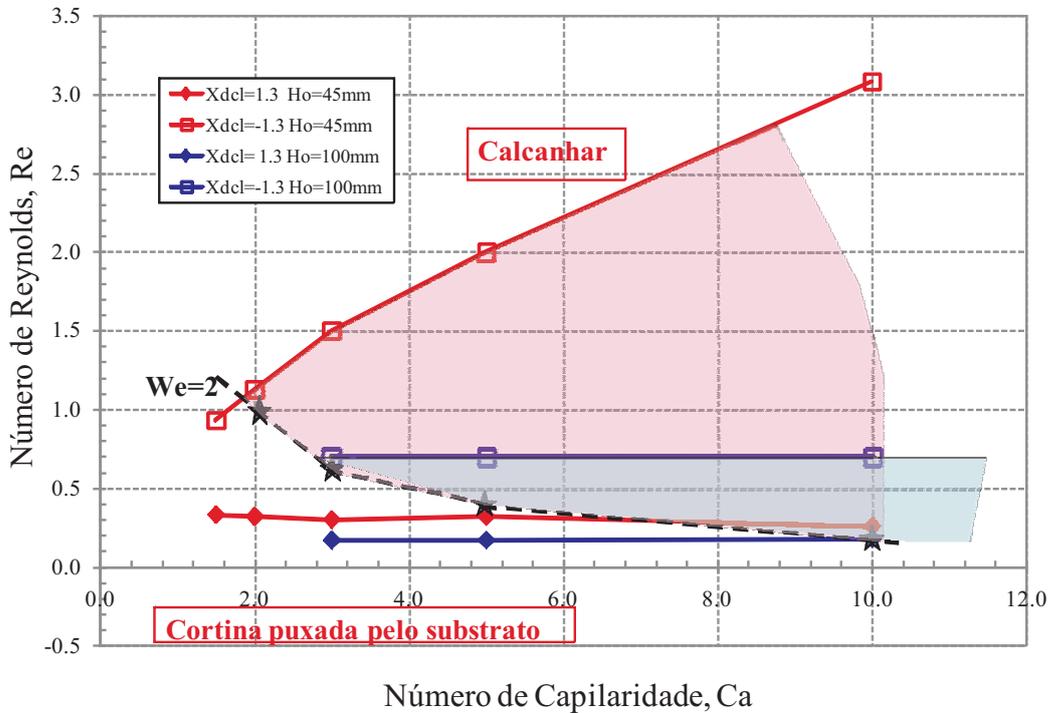


Figura 3.13: Janela de Operação.