

4

Visualização do Escoamento na Zona de Impacto

O estudo experimental de um processo é uma etapa fundamental para o melhor entendimento do mesmo. O estudo numérico do escoamento na zona de impacto foi complementado pela visualização do escoamento, na qual foi feita a observação do comportamento do escoamento durante o processo de revestimento.

A análise experimental de escoamentos que ocorrem em diferentes processos de revestimento apresenta várias dificuldades devido à presença da superfície livre, altas velocidades e pequena escala dos escoamentos.

O trabalho experimental, mostrado neste capítulo, foi realizado no Laboratório de Processos de Revestimento (*Coating Process Fundamentals Program*) do Departamento de Engenharia Química e Ciência dos Materiais da Universidade de Minnesota, Minneapolis, Minnesota, MN, USA, pelo convênio mantido entre os Professores Marcio Carvalho da PUC-Rio e L.E. Scriven da Universidade de Minnesota.

Com a variação de alguns parâmetros como: vazão, velocidade do substrato e propriedades do fluido pode-se observar o comportamento do escoamento para complementar os resultados obtidos na simulação numérica do capítulo anterior, garantindo um amplo conhecimento do comportamento da cortina de líquido no processo de revestimento.

4.1

Bancada Experimental

A análise experimental realizada tem como base a visualização do escoamento no processo. A visualização de escoamentos é uma ferramenta primordial nas pesquisas de mecânica dos fluidos.

A bancada experimental foi proporcionada pelo Laboratório de Processos de Revestimento da Universidade de Minnesota. Esta bancada foi construída para estudos anteriores do processo, como por exemplo para o trabalho feito por Yamamura[36], com ajuda do Wieslaw Suszynsky, Engenheiro Pesquisador, coordenador do Laboratório de Processos de Revestimento. A Fig. (4.1), apresenta uma configuração esquemática, indicando os componentes mais relevantes da bancada experimental.

Uma fotografia da bancada experimental é mostrada na Fig. (4.2). A bancada experimental é dividida em diferentes seções: seção de alimentação, seção de teste e seção de visualização. Cada uma destas seções cumpre objetivos

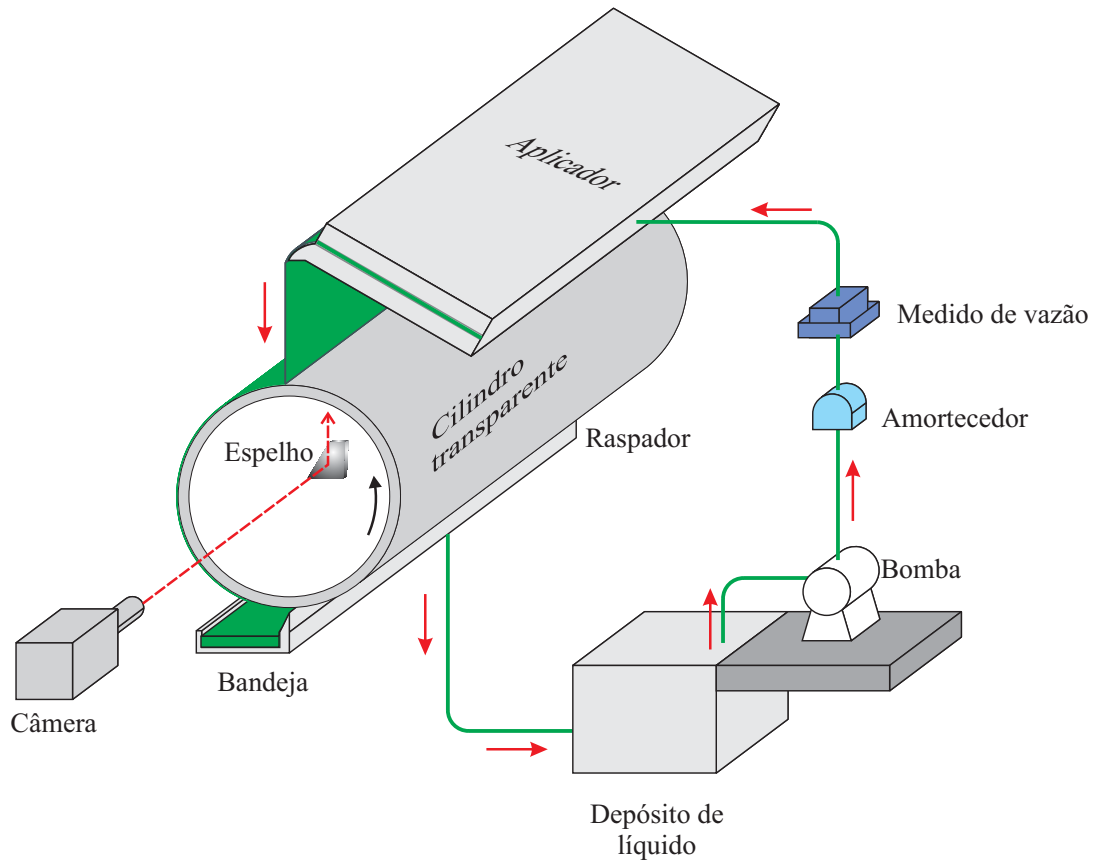


Figura 4.1: Esquema tridimensional simplificado da bancada experimental.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510827/CA

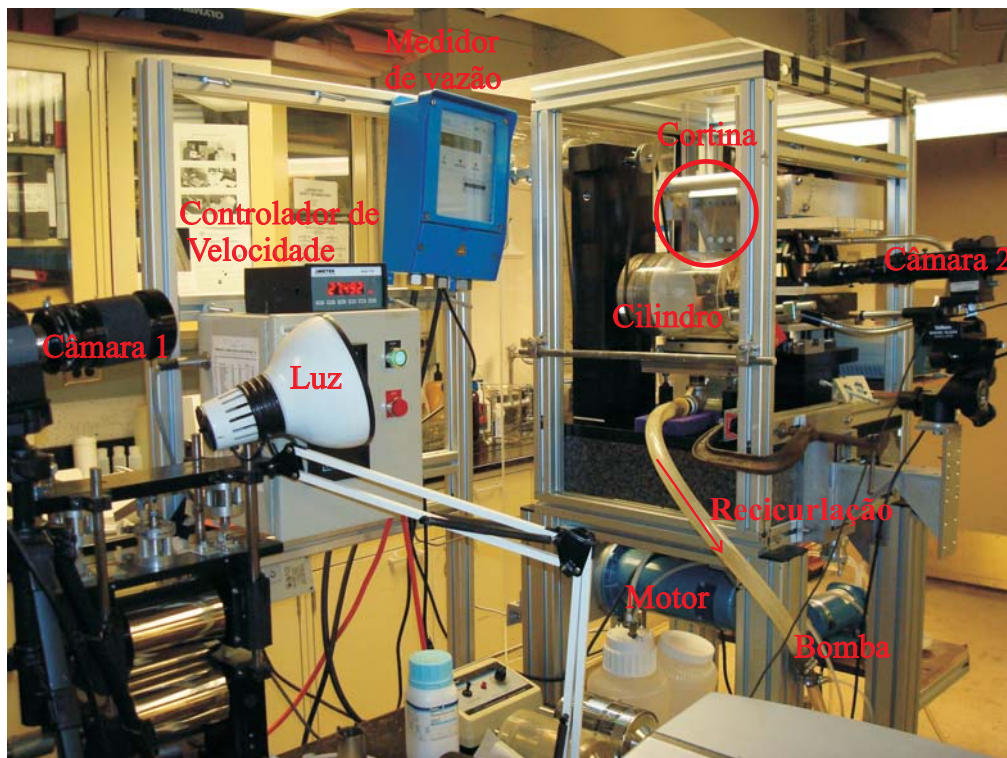


Figura 4.2: Fotografia do bancada experimental.

seqüenciais para a realização de cada experimento. A coordenação conjunta destas seções é dada por controle manual e requer supervisão constante. Na Fig. (4.3) é mostrado um esquema da bancada experimental onde pode-se observar a seção de alimentação e a seção de teste.

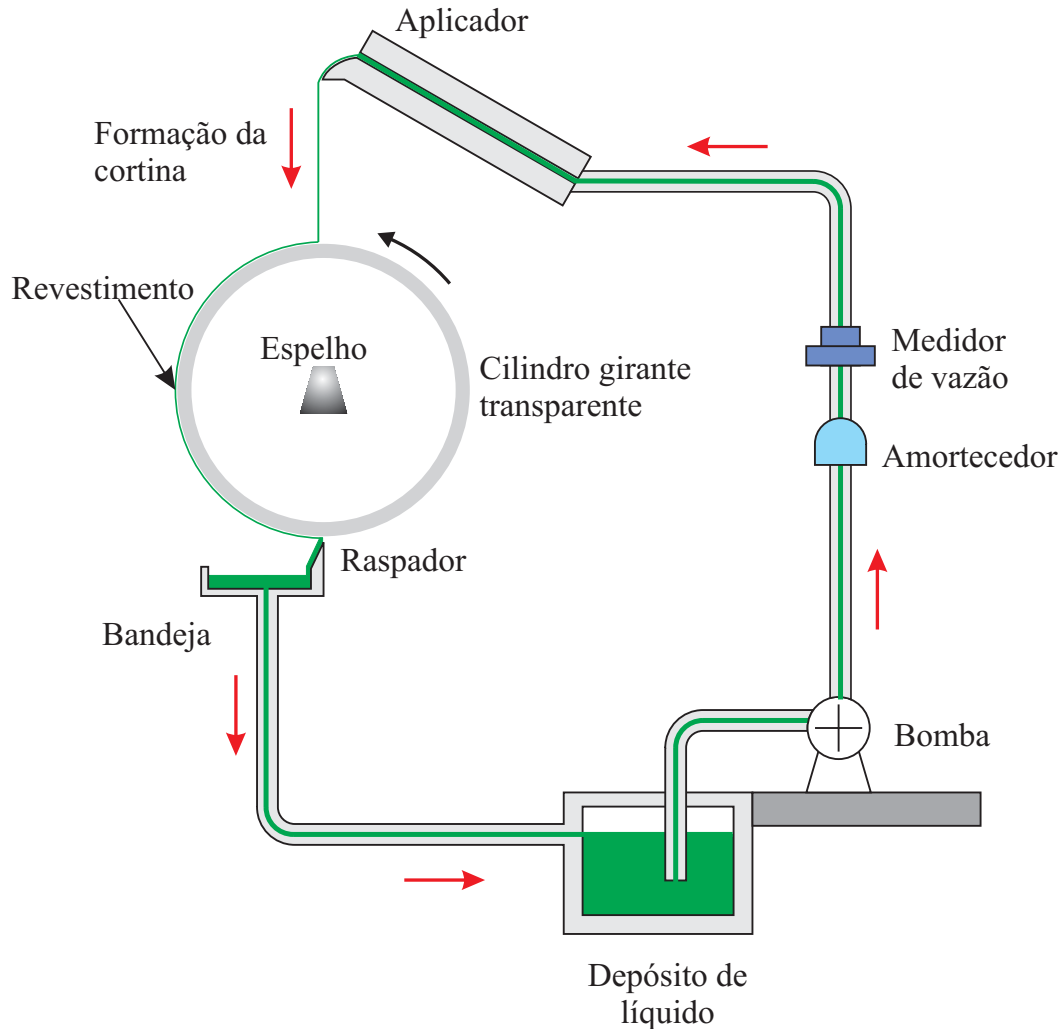


Figura 4.3: Esquema da bancada experimental.

4.1.1 Seção de alimentação

O líquido encontra-se armazenado num reservatório fechado, como prevenção contra a contaminação. Uma bomba de engrenagens de deslocamento positivo COLE-PALMER INSTRUMENTS, modelo 7553-20, é utilizado para deslocar o líquido com uma vazão constante e transportar o mesmo até o aplicador. Para reduzir a pulsação originada pela bomba e diminuir a presença de bolhas no líquido é utilizado um acumulador que amortece oscilações de pressão. A vazão é mantida constante por um controlador de velocidade de

rotação da bomba, da marca MASTERFLEX MFG por BARMANT COMPANY. A medição da vazão e da densidade são determinadas por um medidor de vazão tipo coriolis da marca KRONHE Americ Inc. (modelo MFC100) instalado entre a bomba e o aplicador. O máximo erro deste medidor é do 0,1% do valor medido.

O líquido enviado pela bomba é distribuído uniformemente ao longo da largura do aplicador, para logo ser depositado na superfície do cilindro. O líquido depositado sobre o cilindro é removido por um raspador de borracha e é logo acumulado numa pequena bandeja de aço inoxidável com saída de retorno para o depósito de armazenamento.

4.1.2 Seção de teste

Esta seção é a reprodução, em escala de laboratório, do processo de revestimento por cortina. As partes mais importantes da seção de teste são: o aplicador, as guias e o cilindro de vidro. Uma visão detalhada desta seção é observada na fotografia mostrada na Fig. (4.4). Uma breve descrição das partes que integram esta seção é apresentada a seguir:

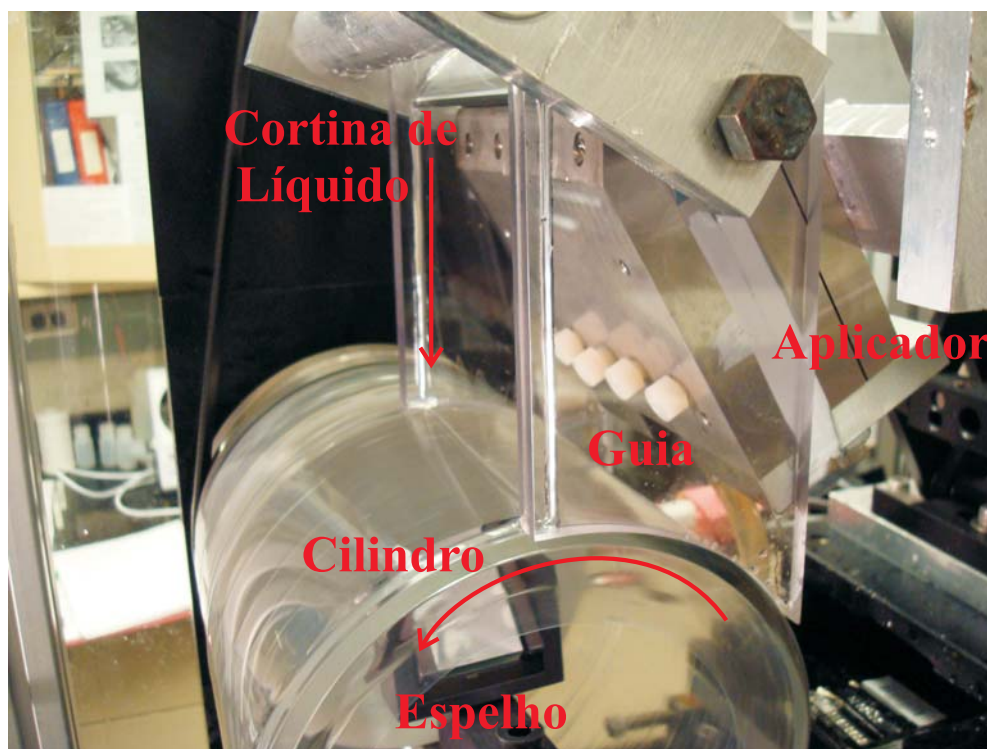


Figura 4.4: Fotografia da bancada experimental: Seção de teste.

O aplicador. O aplicador (tipo cascata) utilizado no experimento, feito de aço inoxidável, tem uma largura de 102 mm. Na Fig. (4.5) mostra-se um

desenho simples do aplicador usado. O lábio externo do aplicador tem um comprimento de 28,6 mm, nesta parte do aplicador o líquido adquire uma superfície livre e começa a escoar. Este aplicador é formado por duas partes, separadas por uma lâmina de espessura igual a $100\mu\text{m}$, e fixadas por parafusos. A espessura da fenda de alimentação é definida pela espessura desta lâmina. A posição do aplicador é mantida a uma altura $H_o = 95.8$ mm relativo ao cilindro de vidro.

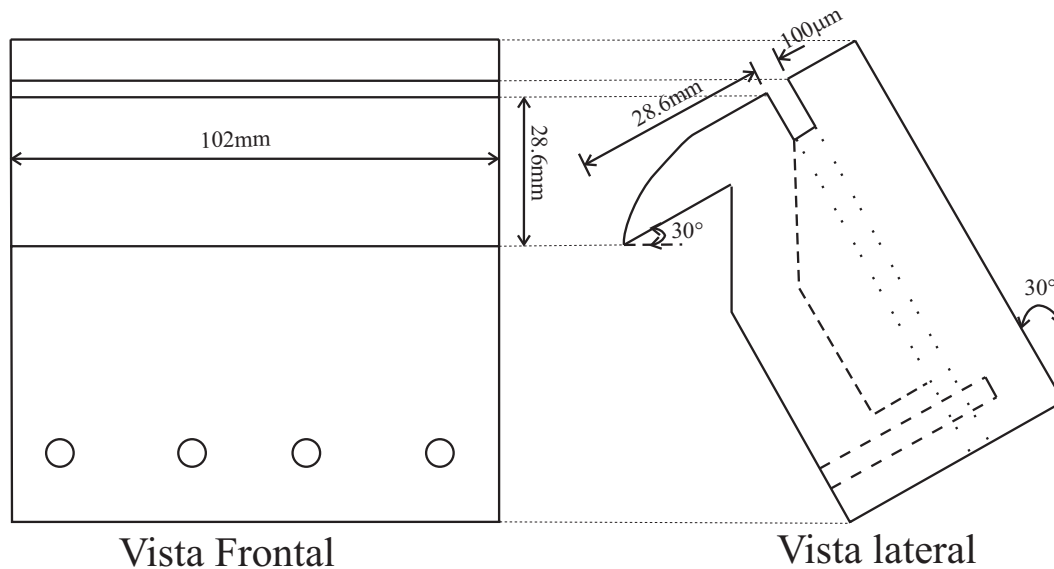


Figura 4.5: Aplicador de revestimento usado no experimento.

As guias. Para formar a cortina de líquido é preciso o uso de guias nas extremidades desta. Observou-se que uma das causas de quebra da cortina de líquido foi a influência das guias usadas, a quebra sempre aconteceu perto da extremidade da cortina junto a guia.

Para evitar este tipo de quebra foram testadas três tipos de guias: as primeiras guias foram feitas de pequenas astes de madeira, com a extremidade inferior embrulhados de algodão para não causar dano ao cilindro, este tipo de guias faziam difícil a observação lateral da região de encontro da cortina e o cilindro; as segundas guias testadas foram duas placas planas de acrílico de 4 mm de espessura, com estas guias a observação melhorou mas ainda obteve-se a quebra desde a esquina da cortina; as terceiras e definitivas foram as duas placas planas de acrílico, anteriormente mencionadas, com algumas modificações. Foi feita uma ranhura de $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ao longo do comprimento da guia, para dirigir o líquido por até o cilindro e modificou-se a extremidade inferior em forma de um arco de circunferência para não interferir no escoamento do líquido nessa região. Na montagem destas guias foi preciso colocar uma

lamina extremadamente fina ($100 \mu\text{m}$) entre o cilindro e as guias para garantir uma mínima separação entre eles e assim evitar produzir danos na superfície deste.

O cilindro. O líquido de revestimento é aplicado num cilindro transparente de vidro com 148 mm de diâmetro e 152,4 mm de comprimento. O referido tem uma tolerância de fabricação de $1 \mu\text{m}$ e é montado num eixo especial. A rotação do cilindro é gerado por um motor, que encontra-se conectado ao cilindro mediante o uso de uma polia. Foram utilizados controladores de velocidade no motor (FENNER Follower, modelo M-drive) e no cilindro (AMETEK, Mansfield and green division, modelo 1736) para garantir que a velocidade do cilindro, selecionada para cada experimento, seja constante.

Para realizar os experimentos é necessário manter a superfície do líquido limpa e com a menor quantidade de líquido possível na hora de reencontrar a cortina. Impurezas podem causar dano à superfície do cilindro e alterar o escoamento, além de impedir uma boa visualização através deste.

4.1.3

Seção de visualização

A seção de visualização para este experimento é formada por uma câmara, da marca WATEC modelo WAT-502A, acoplada a um microscópio (Magnazoom NAVITAR 6000, lente de 20X com 3 mm foco fino, catalogo N 60192) mediante um adaptador C-Mount (catalogo N 60110). O microscópio é conectado a uma lente de 0,5X, NAVITAR (catalogo N 60110). O conjunto é montado na direção do comprimento do cilindro e focado no espelho, de 25,4 mm \times 50,8 mm, colocado dentro do cilindro de vidro para transmitir a imagem da linha de contato dinâmico, como é mostrado na Fig. (4.4).

Duas fontes de luz foram utilizadas para obter uma adequada iluminação da zona de visualização, uma lâmpada de 75 W de potência a que gera uma iluminação geral de toda a bancada experimental e uma fonte de luz de alta intensidade (Fiber Lite A200) que ilumina a área de interesse.

As experiências feitas foram gravadas em um *DVD-Recorder* e monitoradas num monitor de vídeo por inspeção visual. O limite de tempo para cada experiência foi dado pela capacidade de armazenamento do *DVD*, aproximadamente duas horas.

4.2 Líquidos de Revestimento

O líquido Newtoniano utilizado para a realização dos experimentos, é uma solução de Glicerina diluída ao 80% e surfactante com uma concentração em massa na solução de 0,0995.

Se teve o cuidado em manter a concentração de surfactante da solução acima do valor crítico da concentração miscelar. Foi construído um gráfico, como mostra a Fig. (4.6), da concentração do surfactante na solução versus a tensão superficial da solução utilizada. Como podemos observar o valor da concentração miscelar crítica é aproximadamente 0,012.

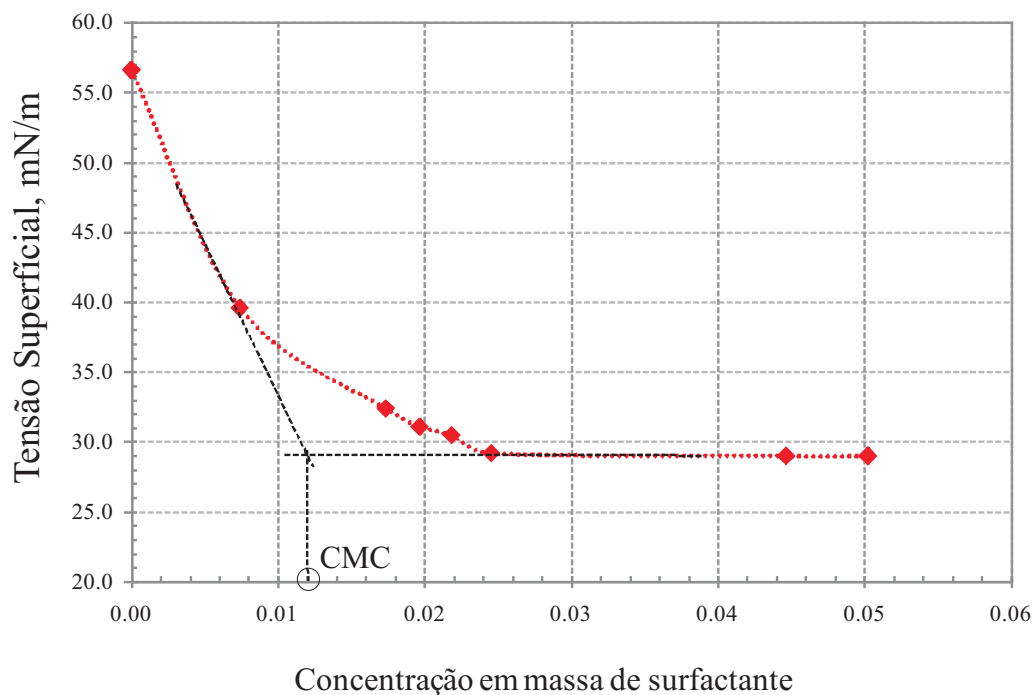


Figura 4.6: Concentração miscelar crítica.

A tensão superficial da solução é $\sigma = 36,1 \text{ mNm}^{-1} \pm 0,1 \text{ mNm}^{-1}$. Esta propriedade foi medida utilizando um tensiometro digital da marca KRÜSS (modelo K10ST), que baseia-se no método de Wilhelmy (medida da força gerada pelo puxamento de uma placa plana imersa na solução).

A viscosidade da solução foi obtida num viscosímetro de marca Brookfield (modelo DV-II+). Este viscosímetro utiliza o método de *Spindles* (relaciona a resistência à rotação do *spindle* com a viscosidade do líquido envolta do *spindle*) para a medição da viscosidade. O valor da viscosidade é $\mu = 37,5 \text{ mPa.s} \pm 0,1 \text{ mPa.s}$.

A densidade é igual a $\rho = 1190 \text{ Kg}/\text{m}^3 \pm 0,1\%$, esta propriedade é medida pelo medidor de vazão tipo coriolis que além de medir vazão massica fornece o valor da densidade do líquido durante o experimento.

Todas as propriedades do líquido usado foram medidas a uma temperatura de $23 \text{ }^\circ\text{C}$, mesma temperatura à qual foram realizados todos os experimentos.

4.3

Procedimento Experimental

Os experimentos foram realizados seguindo o procedimento que será descrito a seguir:

- Preparação do líquido de revestimento.
- Limpeza completa da bancada experimental. É preciso de cuidado especial na limpeza da superfície do cilindro e do aplicador para não sofrer dano algum.
- Focalizar a câmara na área de visualização. Esta área de visualização é exatamente no centro do pé da cortina.
- Definir escala da imagem. Para cada experimento foi feito um pequeno filme da imagem projetada de uma régua flexível. Esta régua que foi colocada na superfície do cilindro, exatamente, na área de visualização.
- Acionar a bomba de alimentação do líquido, fixando a velocidade de rotação dela.
- Ligar o motor para iniciar a rotação do cilindro de vidro. Fixar a velocidade de rotação.
- Deixar circular o líquido pelo circuito por aproximadamente 30 min para estabilizar o escoamento no experimento.
- Nesse tempo de 30 min, verificar ausência de bolhas no escoamento e correntes de ar forte perto da bancada experimental.
- São feitos dois tipos de experimentos, no primeiro, mantemos fixa a velocidade de rotação do cilindro e variamos a vazão de alimentação do líquido no sistema diminuindo-a gradativamente. Para o segundo tipo de experimento manteve-se a vazão de alimentação do líquido num valor fixo e variamos a velocidade do cilindro.
- Para cada variação seja de vazão de alimentação como de velocidade de rotação do cilindro é necessário um tempo de espera de estabilização do escoamento, esse tempo foi de aproximadamente 5 min.

4.4 Resultados Experimentais

Na Fig. (4.7) é mostrado as vistas frontal e lateral da área de visualização. As dimensões da área de visualização são 25,0 mm × 20,4 mm.

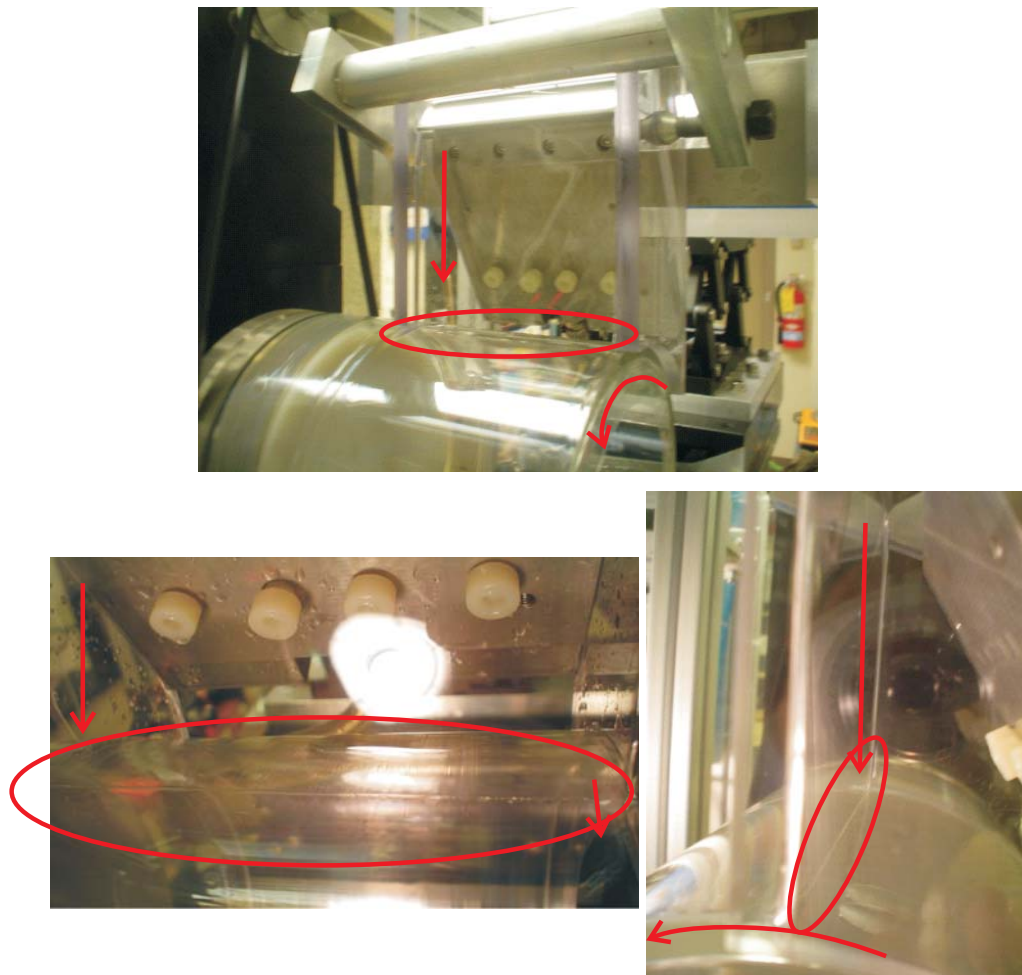


Figura 4.7: Zona de visualização.

Conforme mencionado na seção do procedimento experimental, foram feitos 2 tipos de experimentos: 1) A velocidade do cilindro é fixada num valor constante e varia-se a vazão de alimentação, 2) A vazão de alimentação é fixada num valor constante e varia-se a velocidade do cilindro. Os resultados destes tipos de experimentos são apresentados nas subseções seguintes.

Para cada parâmetro fixo foram gravados videos onde registrou-se o movimento da linha de contato dinâmico. Cada experimento foi realizado duas vezes para garantir a repetibilidade das medidas experimentais, com um erro aproximado de repetibilidade em torno de 0,05%.

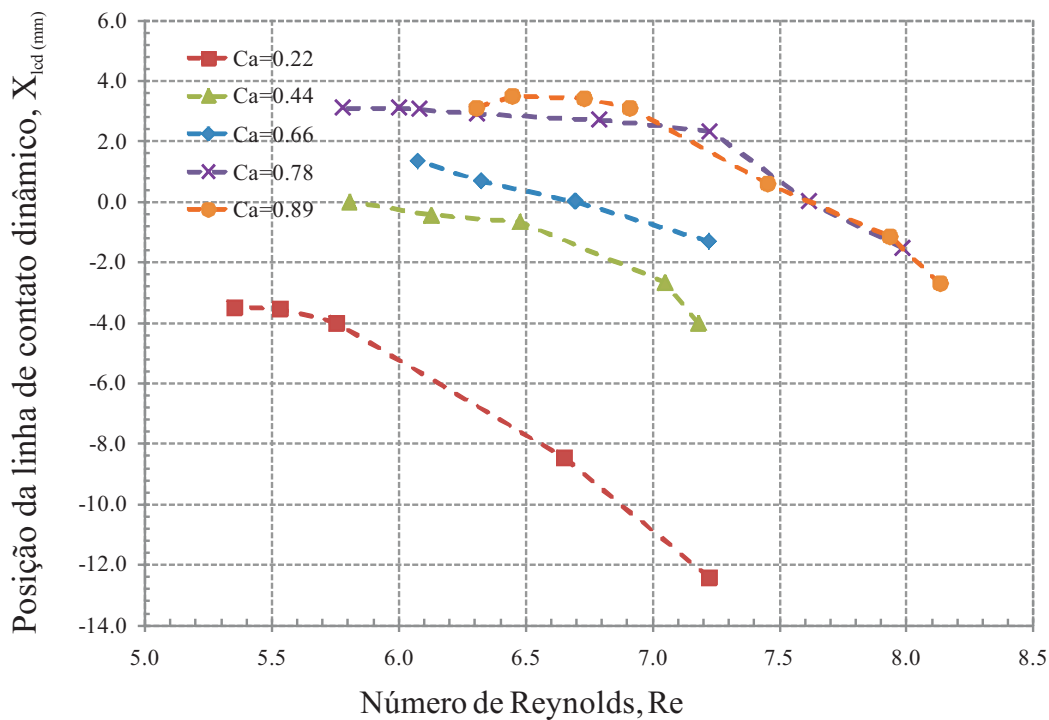


Figura 4.9: Comportamento da linha de contato dinâmico, X_{lcd} versus Número de Reynolds.

No gráfico da Fig. (4.9) a velocidade do substrato é representada pelo número de Capilaridade, $Ca = \mu U / \sigma$ e a vazão de alimentação pelo número de Reynolds, $Re = \rho q / \mu$.

Mantendo o número de capilaridade constante observa-se que o comportamento da linha de contato dinâmico concorda qualitativamente com os resultados numéricos a comparação é apresentada nas Fig. (4.10) e Fig. (4.11). As diferenças apresentadas entre os resultados numéricos e experimentais encontram-se basicamente na altura da cortina e no tipo de aplicador usado. Experimentalmente a altura da cortina é de 95,8 mm e o aplicador usado é tipo *slide* (isto é, o líquido sai do aplicado e escoar no lábio externo deste antes de começar a cair). Numericamente apresenta-se resultados para duas alturas diferentes, 25,0 mm e 45,0 mm, e aplicador utilizado é do tipo *Slot* (o líquido sai diretamente de uma fenda ao ambiente). A medida que vamos aumentando a altura da cortina encontrou-se problemas de convergência na simulação, o que tornou impossível obter resultados numéricos para altura de 100 mm (altura usada no experimento).

Uma outra diferença que deve influenciar nos resultados é o ângulo de contato dinâmico. Nos casos numéricos foi mantido constante e igual a 10° .

Nos experimentos não foi possível a medida deste. A comparação dos resultados mostra que a concordância melhora com o aumento do número de Capilaridade.

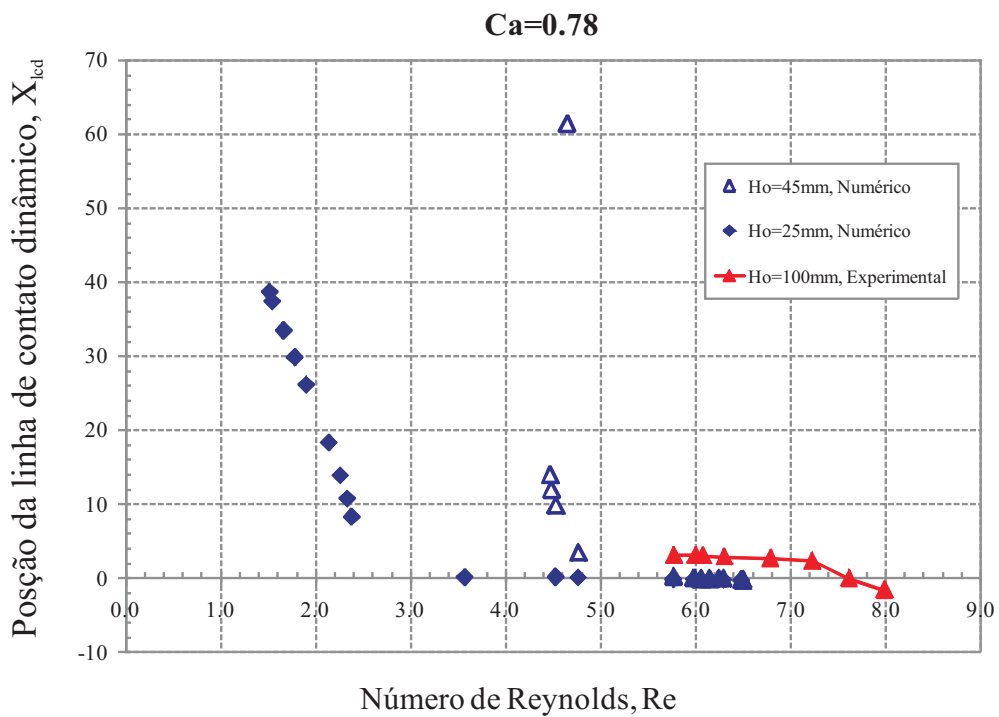
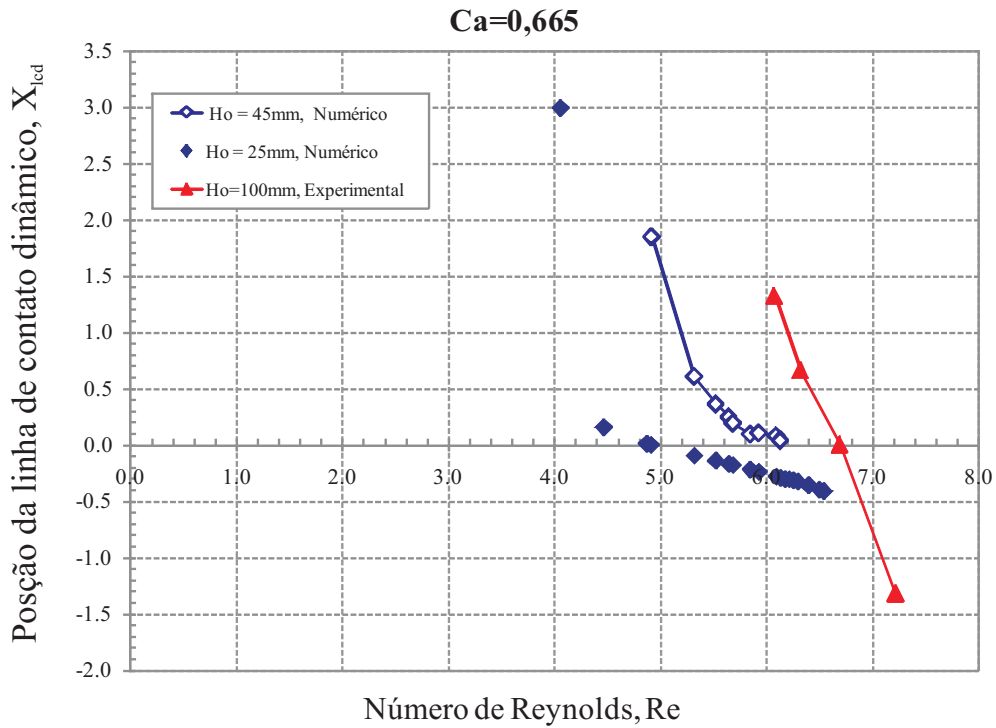


Figura 4.10: Comparação qualitativa dos resultados numéricos com os resultados experimentais.

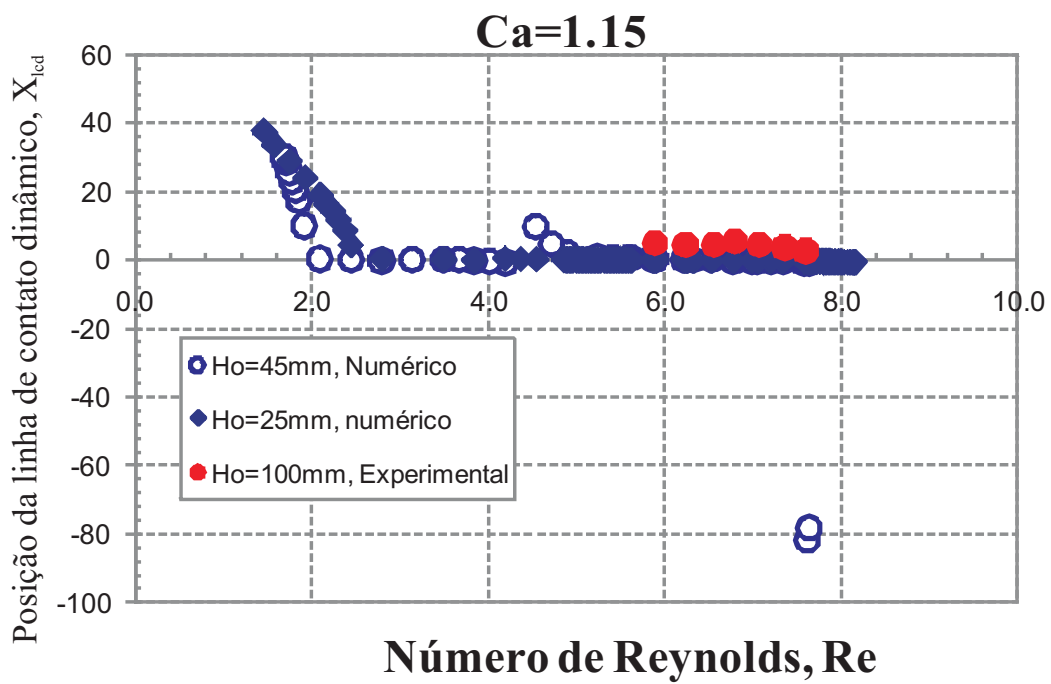
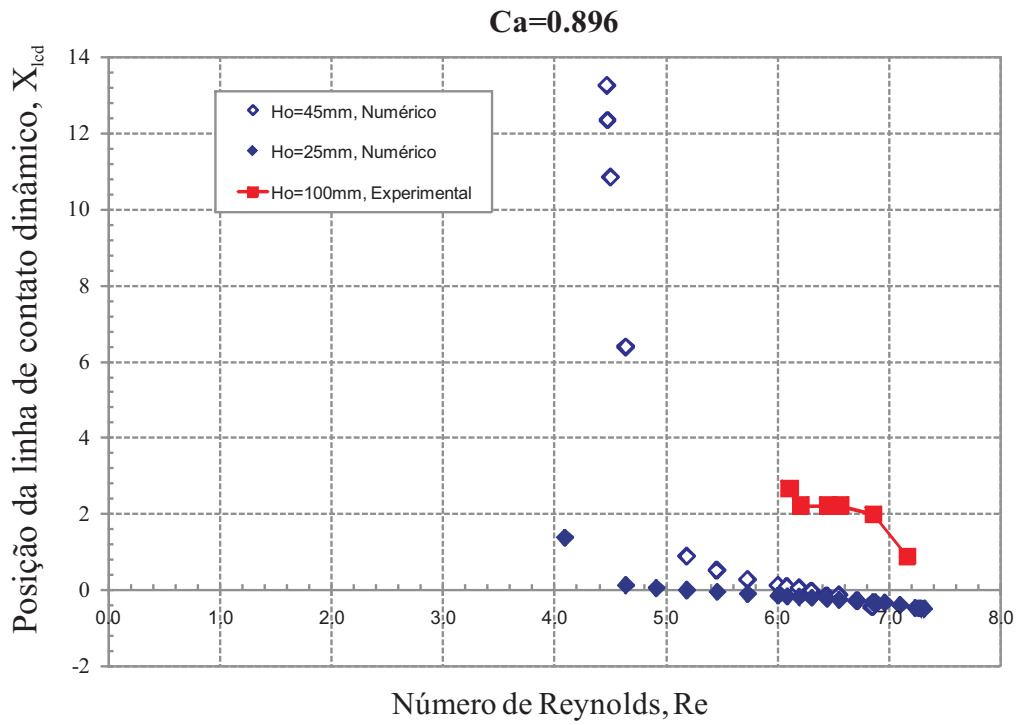


Figura 4.11: Comparação qualitativa dos resultados numéricos com os resultados experimentais.

4.4.2 Vazão de alimentação constante

O segundo tipo de experimento foi o estudo do comportamento da linha de contato dinâmico, para uma vazão fixa variando a velocidade do substrato. Na Fig. (4.12) apresenta-se uma sequência de imagens obtidas da visualização do escoamento para uma vazão $Q = 19,3 \times 10^{-3} kg/s$.

Esta sequência de imagens mostra como a medida que vamos aumentando a velocidade do cilindro que se movimenta de direita para esquerda, o pequeno calcanhar desaparece e a cortina começa ser puxada pelo substrato. Pode-se também observar o início de entrada de ar no escoamento, Fig. (4.12), e a modificação total do escoamento causado pela forma da entrada de ar, presença de “Vs”.

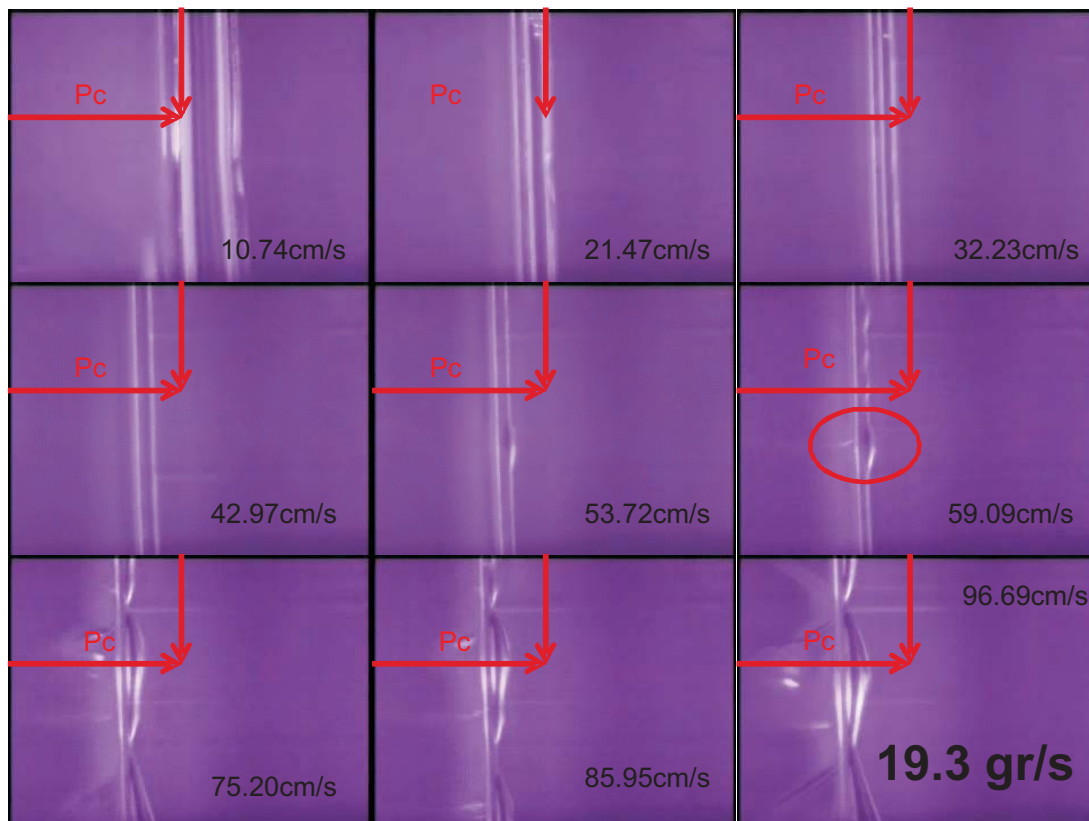


Figura 4.12: Sequência de imagens da variação da posição da linha de contato dinâmico com a variação da velocidade do cilindro. Vazão constante e igual a $Q = 19,3 gr/s$.

Na Fig. (4.13) mostra-se os resultados experimentais da posição da linha de contato dinâmica para diferentes vazões, representados pelo número de Reynolds, variando a velocidade do substrato (número de Capilaridade).

Se traçarmos uma linha perpendicular nos valores de Capilaridade igual a 0,22, 0,33, 0,55, e 0,78 no gráfico da Fig. (4.13) obtemos as posições da linha de

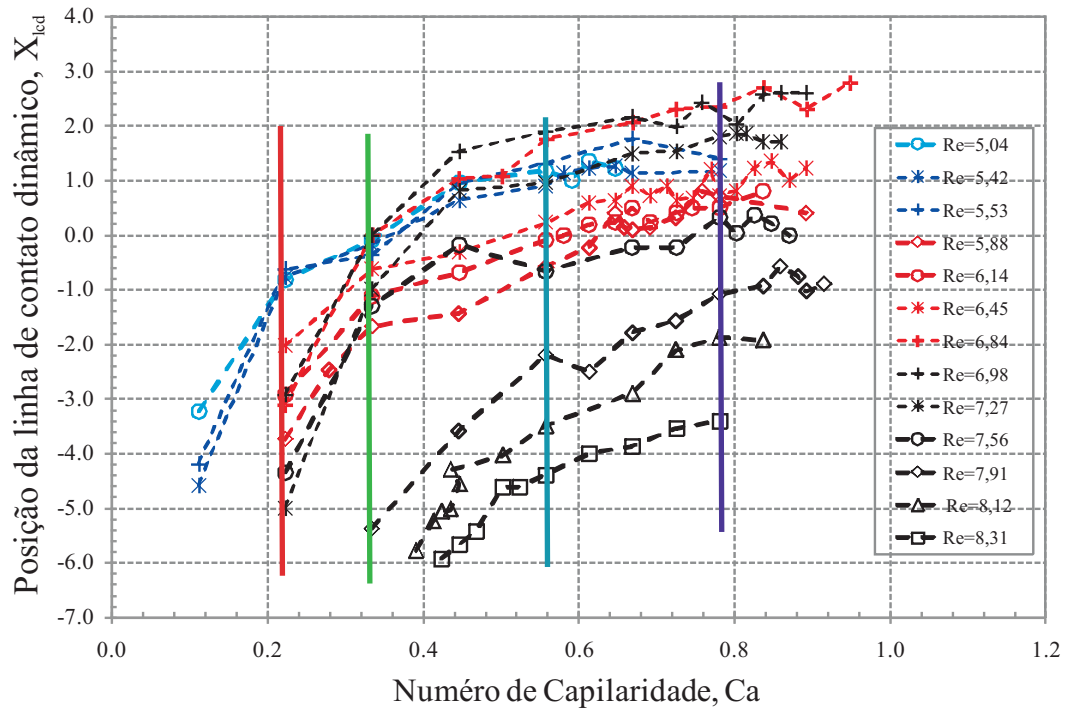


Figura 4.13: Comportamento da linha de contato dinâmico, X_{lcd} versus Número de Reynolds.

contato dinâmico para diferentes números de Reynolds. Estas posições foram comparadas com os resultados do experimento de velocidade do substrato constante e são mostradas na Fig. (4.14). Uma característica observada é a histeresis no comportamento da linha de contato dinâmico, como mostram as curvas obtidas do experimento com vazão constante.

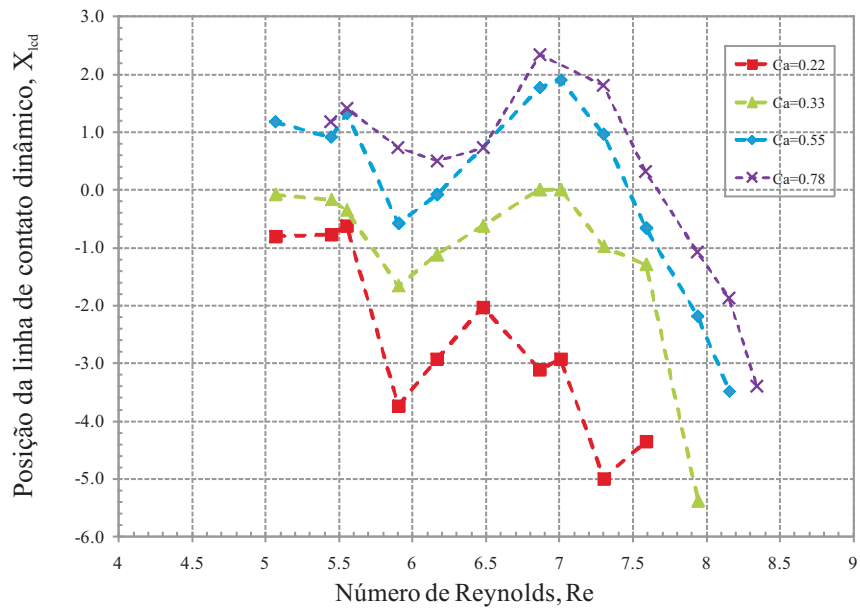


Figura 4.14: Histeresis na posição da linha de contato dinâmico.