3
Análise experimental do escoamento sobre uma placa plana com duas portas de injeção: interação entre gotas

Neste capítulo, a interação entre duas gotas de líquido escoando sobre um plano inclinado é estudada através de uma análise experimental, e será feita uma comparação com resultados obtidos com o modelo teórico apresentado no capítulo anterior. É feita uma descrição dos componentes da bancada e o procedimento experimental utilizado para observar a interação entre duas gotas de líquido originadas a partir de duas portas de injeção localizadas num plano inclinado. As imagens do escoamento servem para, mediante comparação, validar o modelo teórico.

3.1
Dispositivo experimental

Deve-se destacar que a parte experimental desta pesquisa foi desenvolvida com a ajuda de Wieslaw Suszynski, engenheiro pesquisador chefe do Laboratório de Processos de Revestimento (*Coating Process Fundamentals Program*[a]), e de Jackie Pesch, estudante de graduação, do Departamento de Engenharia Química e Ciência dos Materiais da Universidade de Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA, durante os estágios feitos neste laboratório. As visitas foram possíveis graças ao convênio de cooperação internacional mantido pelo Professor Márcio Carvalho da PUC-Rio e o programa CPFP da Universidade de Minnesota.[b]

A bancada experimental, mostrada na figura 3.1, é composta pelas seguintes partes principais: (i) sistema de injeção de líquido, formado pela bomba de seringa e as portas de injeção, (ii) sistema de visualização do escoamento composto por uma câmera e um gravador de vídeo e finalmente (iii) o sistema de medição da posição de frente de avanço.

Tal como é representado na Fig.(3.1), o líquido é bombeado do reservatório até a porta de injeção por meio de uma bomba seringa (KD Scientific). O mecanismo de deslocamento da bomba consiste de um motor de passo con-

[a] http://www.cems.umn.edu/research/cpfp/
[b] Duas visitas foram feitas: em 2006 e 2007(4 meses cada)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

trolado por um microprocessador (micro-passo) que movimenta um parafuso sem fim através de um mecanismo de correia e roldana. Desta forma, o pistão da bomba movimenta-se ao longo de uma linha reta com velocidade constante, o que permite assim manter fixa a taxa volumétrica de injeção do líquido. A vazão pode ser ajustada pelo diâmetro interno da seringa e pela velocidade do pistão. A parte externa da seringa é conectada aos orifícios (aonde ficam as portas de injeção) da placa de acrílico, através de uma conexão semi-flexível que permite uma fácil junção entre a seringa e a placa. As portas de injeção foram feitas por uma perfuração através da placa de acrílico transparente. É nesta superfície onde o escoamento será analisado, mediante a visualização da parte lateral e superior do líquido injetado.

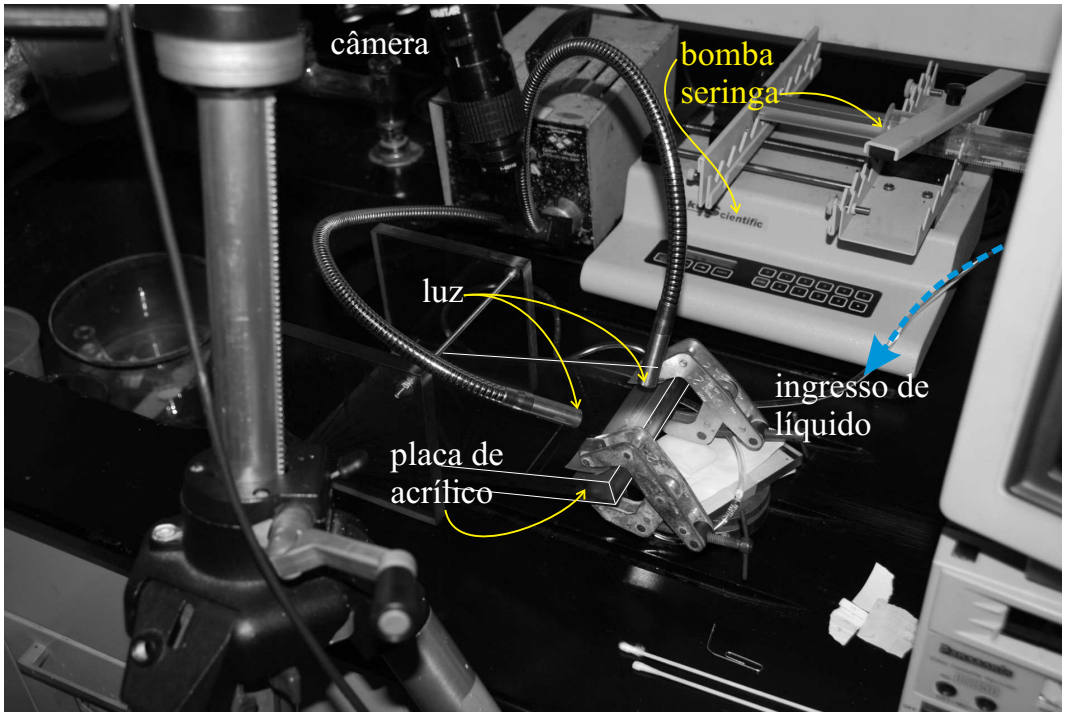

Figura 3.1: Fotografia do dispositivo experimental utilizado.

O objetivo é quantificar a posição da frente de avanço, X_f antes e depois da coalescência, de duas gotas de líquido para diferentes configurações, i.e. diferentes viscosidades, ângulos de inclinação e taxas de injeção. Os resultados experimentais são comparados com os resultados numéricos.

O sistema de visualização do escoamento foi montado como mostrado na figura 3.2. Ele é composto por uma câmera (Modelo DXC-750, *Sony Inc*, Tokyo, Japan) acoplada a uma lente de aumento. O conjunto é focado perpendicularmente ao acrílico. Duas fontes de luz foram utilizadas para iluminar a região de interesse. Esta disposição permite observar a parte superior da placa onde acontece o escoamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

A medição da frente de avanço, X_f, foi determinada pelo uso do software *Scion Image*[c]. Repetidas medidas do experimento foram feitas e os valores reportados nesta seção são as médias destes.

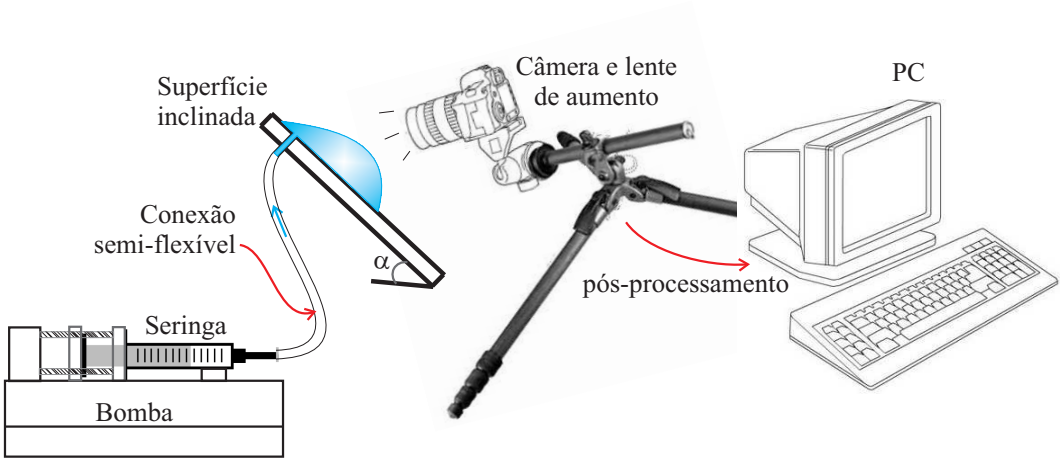

Figura 3.2: Esquema ilustrativo da bancada experimental.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

3.2
Preparação das soluções

Os experimentos foram feitos com três líquidos com diferentes viscosidades. Foi utilizado glicerina com diferentes concentrações: glicerina pura (100%), e duas soluções diluídas com água (97% e 80%) como mostrado na tabela 3.1. O critério da escolha das soluções foi com o objetivo de cobrir uma grande faixa de viscosidade para verificar a precisão do modelo. Como discutido no segundo capítulo, uma das hipóteses para aplicar a teoria de lubrificação é que as forças viscosas sejam bem maiores que as forças inerciais.

Tabela 3.1: Propriedades dos fluidos

	Viscocidade cP	Tensão superficial mN/m	Densidade g/cm^3
Glicerina Pura	1150	63,82	1,2595
97%Glicerina	600	64,25	1,252
80%Glicerina	50	65,53	1,207

A temperatura do ambiente do laboratório onde foi realizado o teste foi mantida em torno de 25 ± 0,5°C. A placa acrílica foi mantida fixa por meio de um suporte metálico como mostrado na Fig. 3.1. Foram utilizadas quatro vazões diferentes: 0,5 ml/min; 1,0 ml/min; 2,0 ml/min; 3,0 ml/min.

[c]http://www.scioncorp.com

O critério da escolha dos valores da vazão de injeção foi de acordo com duas considerações. Primeiro, o valor máximo esteve restrito de modo que o escoamento do líquido não apresentasse características de jato saindo da porta de injeção. Segundo, o mínimo valor esteve restrito ao mínimo valor da vazão fornecida pela bomba de seringa.

Deve-se mencionar que ocorreram alguns problemas de sincronização no processo de injeção dando origem a defasadas frentes de avanço para cada gota produzida e consequentemente influenciava na interação deles como mostrado na Fig. 3.3a. Este problema acontecia no início do processo de injeção quando as portas de injeção não estavam totalmente preenchidas de líquido. Este problema foi resolvido pelas injeções contínuas prévias obtendo-se uma coalescência simétrica como mostrado na Fig. 3.3b.

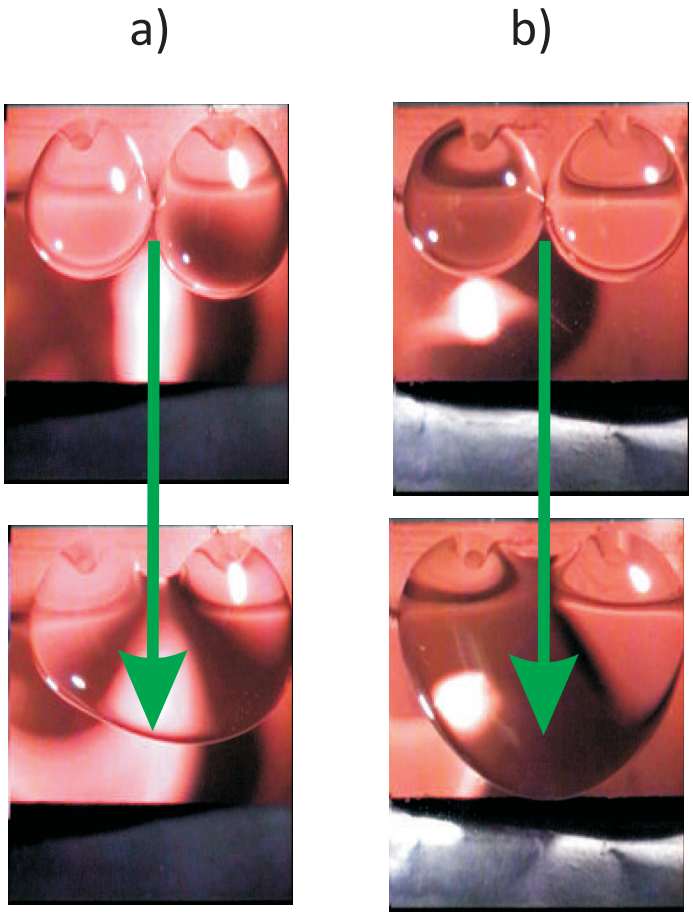

Figura 3.3: Sequência de imagens mostrando a interação de duas gotas numa placa de acrílico inclinada a $\alpha = 15^o$. a) injeção não sincronizada. b) injeção bem sincronizada, onde a coalescência simétrica é observada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

3.3 Resultados

O detalhe da área coberta pelo líquido injetado, obtido mediante visualização do topo e que identifica os parâmetros característicos do experimento, é mostrado na Fig.3.4. Pode-se observar as duas portas de injeção na placa inclinada por onde o líquido é alimentado, as superfícies livres de cada gota formada, a linha de contato dinâmica e a direção do escoamento. O diâmetro das portas de injeção foi de $2R_f = 1{,}0$ mm, a longitude de separação entre elas foi de $\lambda = 8$ mm e a posição da frente de avanço x_f.

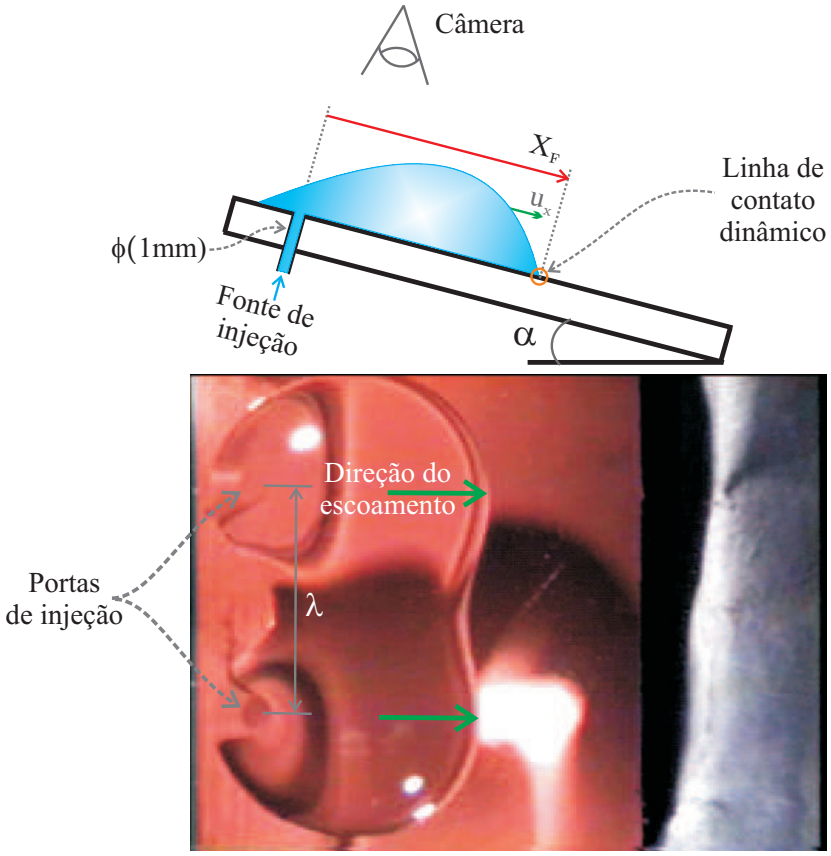

Figura 3.4: Imagem da área de injeção de líquido numa placa inclinada, onde as portas de injeção são visíveis; $\alpha = 15^o$; $\Gamma = 0{,}5$ ml/min; porta de injeção $2R_f = 1{,}0$ mm

A figura 3.5 apresenta os diferentes estágios que caracterizam o escoamento e a interação das duas gotas de líquido, obtidos pela análise numérica e experimental. No primeiro estágio, as duas gotas não interagem e portanto a evolução da frente de avanço apresenta um comportamento quase linear, como analisado no capítulo anterior. No segundo estágio, se inicia a coalescência das duas gotas e a formação de uma ponte com dois meniscos que cresce ao longo do tempo na direção y. A coalescência propriamente dita apresenta

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

dois sub-estágios, como mencionado por Ristenpart et al.[40]: uma vez feito o contato entre as gotas, mostra-se um rápido crescimento inicial da ponte[d] e após um determinado tempo visualiza-se um lento rearranjo da configuração, i.e. transição topológica em 3D da superfície livre, pela combinação contínua das duas gotas ao longo do tempo até formar uma única frente de avanço.

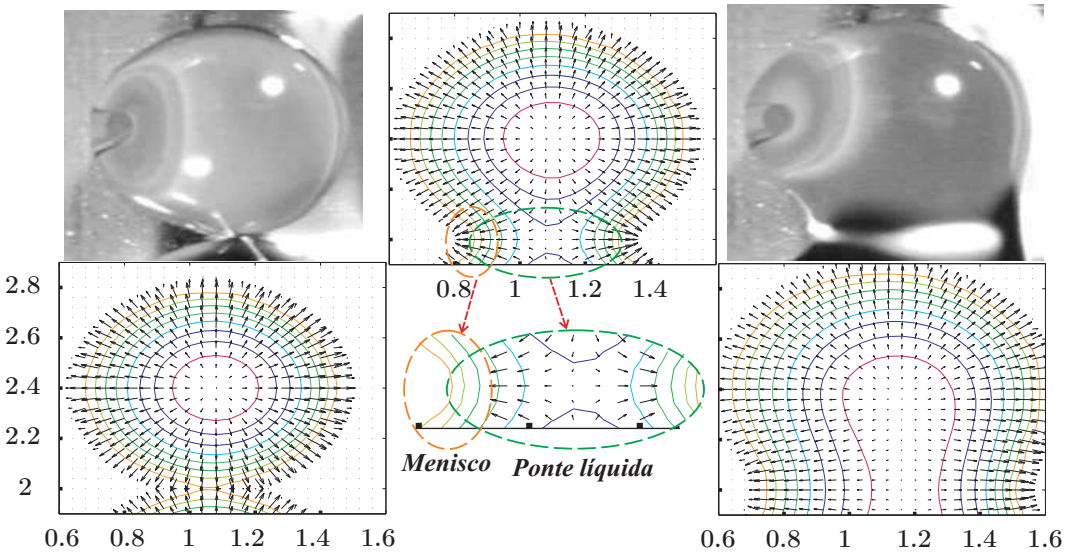

Figura 3.5: Visualização do topo do experimento e a comparação com os resultados obtidos numericamente: caso glicerina 100%; $\alpha = 15^o$; $\Gamma = 0,5$ml/min. a) final do primeiro estágio e b) durante o segundo estágio.

No último estágio (ver Fig.3.6), nota-se um aumento da velocidade da frente de avanço em duas vezes o valor da velocidade do primeiro estágio, pelo fato da junção das duas gotas de líquido injetado. Trabalhos experimentais de Bradley&Stow[41] sobre coalescência de gotas de água comentam sobre a dificuldade de visualizar o fenômeno devido a baixa viscosidade da água.

3.3.1
Resultado com injeção de glicerina pura

A cinética de espalhamento de glicerina pura sobre uma superfície molhante é apresentada nesta seção. O processo de espalhamento foi causado pela injeção contínua de líquido através das portas de injeção, pelos efeitos gravitacionais e pelo espalhamento espontâneo. A variação da frente de avanço com o tempo é mostrada na figura 3.7, com uma vazão de injeção de $\Gamma = 0,5$ml/min e $\alpha = 15^o$. Dados experimentais foram comparados com predições numéricas. Os resultados numéricos são consistentemente maiores do que os resultados obtidos nos experimentos. Porém, pode-se observar que a velocidade de avanço me-

[d]Evidentemente a área formada pelo menisco ao redor da ponte líquida apresentará uma forte curvatura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

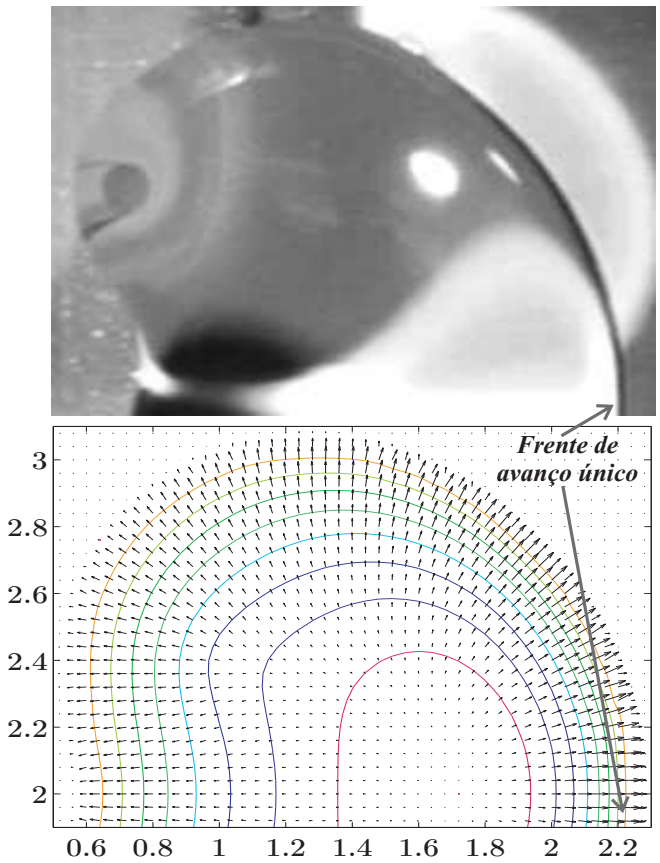

Figura 3.6: Visualização do topo do experimento e a comparação com os resultados obtidos numericamente: caso glicerina 100%; $\alpha = 15^o$; $\Gamma = 0,5$ml/min. c) durante o terceiro estágio.

dida experimentalmente e obtida numericamente são praticamente as mesmas, ao longo de todo o processo, descontando os instantes iniciais. A discrepância acontece principalmente no primeiro estágio do processo, como esperado, por limitação da teoria de lubrificação nesta fase do processo.

No estágio inicial do processo, a velocidade paralela ao plano é muito baixa, menor que a velocidade normal ao plano, que ocorre sobre a porta de injeção. A teoria de lubrificação não é apropriada para este tipo de situação. Esta imprecisão do modelo leva a uma velocidade de propagação da frente de avanço muito alta no início do escoamento, o que explica os valores maiores de x_f previstos numericamente. Outro fator que contribui para a previsão de uma alta velocidade da frente é o uso do modelo com filme precursor. Após a fase inicial, o avanço da frente medido numericamente e obtido experimentalmente apresenta excelente concordância inclusive na posição de x_f onde a coalescência das gotas ocorre.

A mesma discrepância com relação à frente de avanço com o tempo entre os resultados numéricos e experimentais foi observada nos casos de $\Gamma = 0{,}1$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

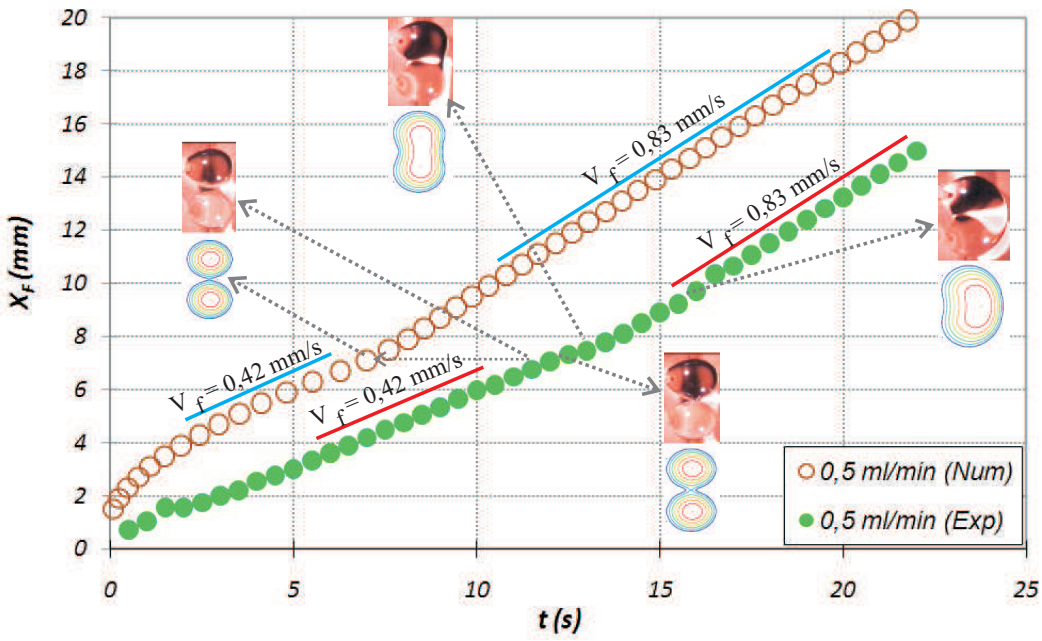

Figura 3.7: Comparação dos resultados numéricos e experimentais da evolução da frente de avanço X_f, com $alpha = 15^o$ e $\Gamma = 0{,}5$ ml/min.

ml/min; $\Gamma = 1{,}0$ ml/min e $\Gamma = 3{,}0$ ml/min mantendo o mesmo parâmetro $\alpha = 15^o$. Se corrigirmos o tempo computacional inicial em $\Delta t^* = 5$s para todos estes casos, pode-se obter uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, como mostrado na figura 3.8. Pode-se notar que o modelo computacional consegue prever melhor as velocidades de avanço $V_f = DX_f/Dt$ nos estágios antes, durante e depois da coalescência para menores vazões de injeção. Isto é pelo uso da teoria de lubrificação que prevê melhor a posição da frente de avanço quando o escoamento é mais lento e que acontece justamente para baixas vazões de injeção.

A velocidade V_f no último estágio para $\Gamma = 0{,}5$ ml/min com duas portas de injeção é igual à velocidade obtida com $\Gamma = 1{,}0$ ml/min com uma porta de injeção (como já visto no capítulo anterior), ambas com $\alpha = 15^o$, como mostrado na figura 3.9. Após a coalescência das duas gotas, a frente de avanço se comporta como uma única gota, porém a vazão de injeção é igual a soma das vazões das portas injetoras.

3.3.2
Resultado com injeção de solução com 97% de glicerina

Gráficos comparativos dos resultados experimentais e numéricos, exibindo a frente de avanço em função do tempo de um fluido menos viscoso (glicerina à 97%) sendo injetado, são mostrados na figura 3.10. Neste caso, considera-se

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

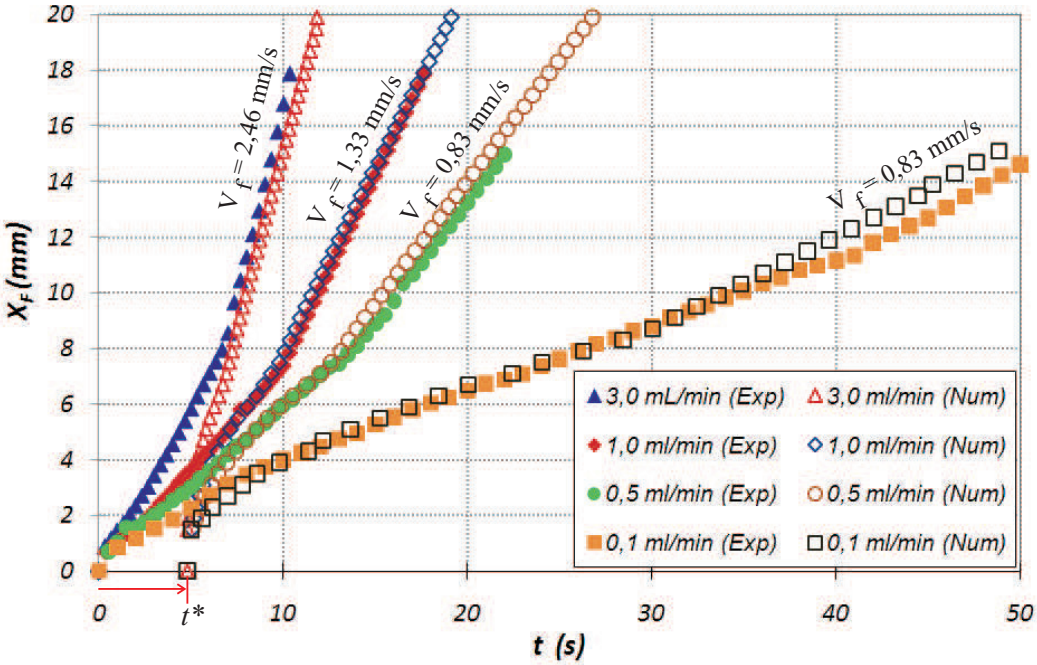

Figura 3.8: Frente de avanço X_f para diferentes taxas de injeção volumétrica: Caso Glicerina pura; $\alpha = 15^o$.

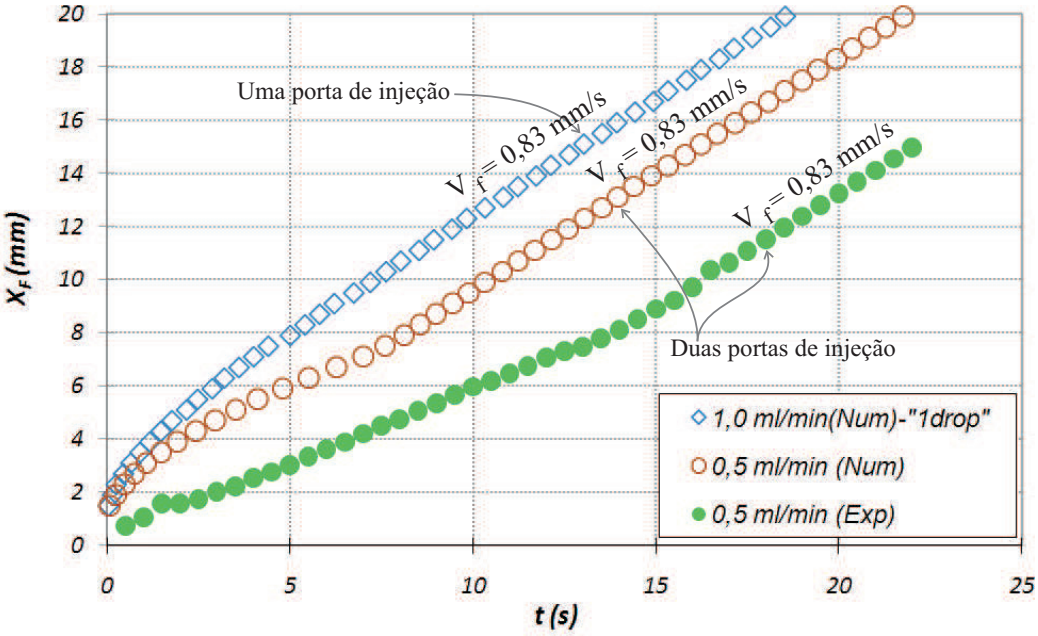

Figura 3.9: Gráfico comparativo, da evolução da frente de avanço, da injeção de líquido: desde duas portas de injeção com $\Gamma = 0,5$ml/min e uma porta de injeção com uma porta de injeção com $\Gamma = 1{,}0$ ml/min, ambas com $\alpha = 15^o$.

na comparação um atraso do tempo numérico de $\Delta t^* = 2{,}5$ s, menor que o caso anterior. As velocidades da frente de avanço nos estágios antes e depois da coalescência também apresentam uma boa concordância para $\Gamma = 0,5$ml/min,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

$\Gamma = 1,0\text{ml/min}$ e $\Gamma = 3,0\text{ml/min}$, todos com $\alpha = 15^o$.

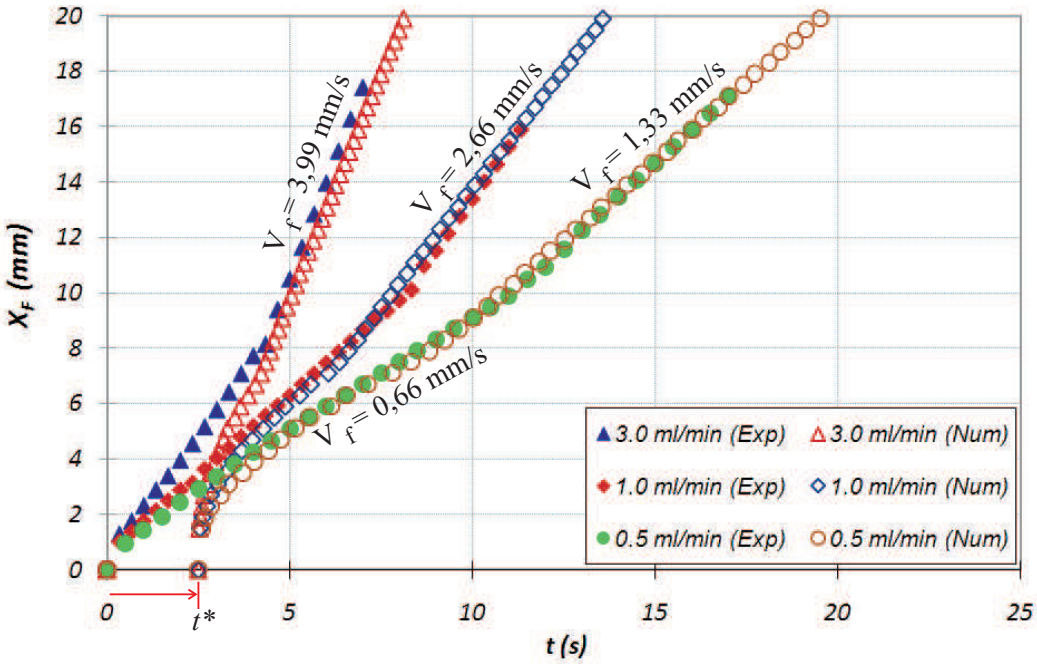

Figura 3.10: Comparação numérica e experimental da evolução da frente de avanço X_f para diferentes taxas de injeção volumétrica: Caso Glicerina 97%; $alpha = 15^o$.

3.3.3
Resultado com injeção de solução com 80% de glicerina

Intuitivamente, pode-se esperar que a velocidade da frente de avanço aumenta a medida que a viscosidade do líquido diminui. Experimentalmente, este fato é demonstrado na figura 3.11. Numericamente, o modelo apresenta diferentes discrepâncias do tempo numérico com as diferentes vazões de injeção. Por exemplo, para uma injeção com $\Gamma = 1,0\text{ml/min}$ o valor é $\Delta t^* = 2,5\text{s}$ sendo que para $\Gamma = 2,0\text{ml/min}$ obteve-se $\Delta t^* = 1,75\text{s}$ e para o maior valor experimental de $\Gamma = 3,0\text{ml/min}$, obteve-se $\Delta t^* = 1,0\text{s}$. Porém, as velocidades da frente de avanço no estágio final tiveram boa concordância, como mostrado na figura 3.11.

A figura 3.12 apresenta a frente de avanço em função do tempo com uma taxa de injeção fixa $\Gamma = 1,0\text{ml/min}$ e $\alpha = 15^o$, com diferentes viscosidades.

Para os dois maiores valores de viscosidade, pode-se observar uma boa concordância dos resultados experimentais e numéricos. Para o líquido com menor viscosidade, o modelo não apresenta uma boa precisão nos resultados do escoamento antes da coalescência das gotas. A aplicação da teoria de lubrificação nestes casos é limitada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

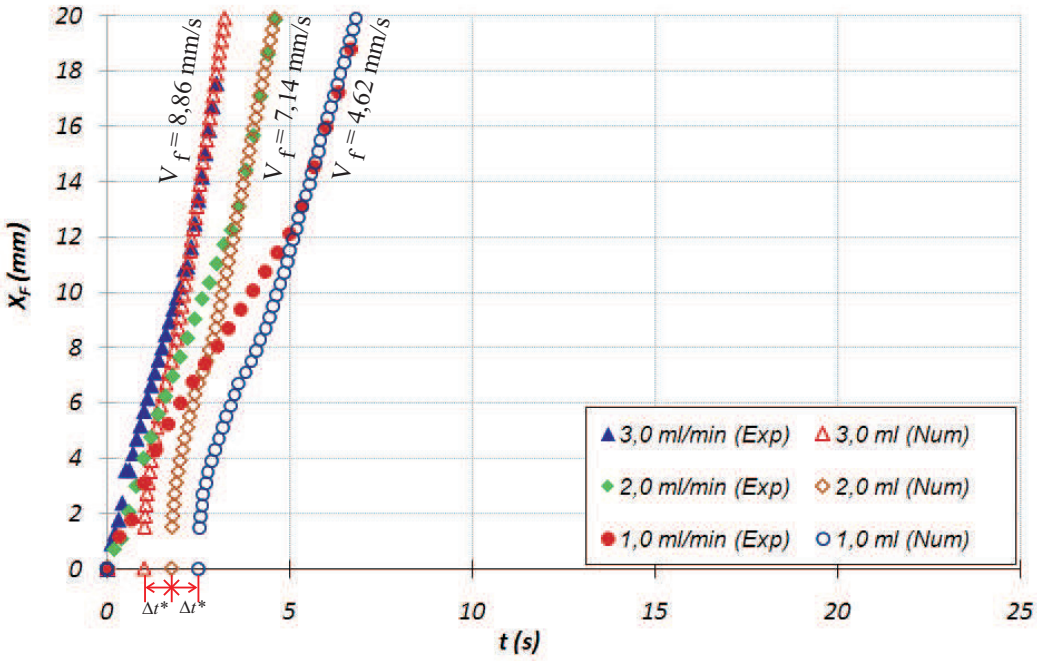

Figura 3.11: Comparação numérica e experimental da evolução da frente de avanço X_f para diferentes taxas de injeção volumétrica:Caso Glicerina 80%; $\alpha = 15^o$.

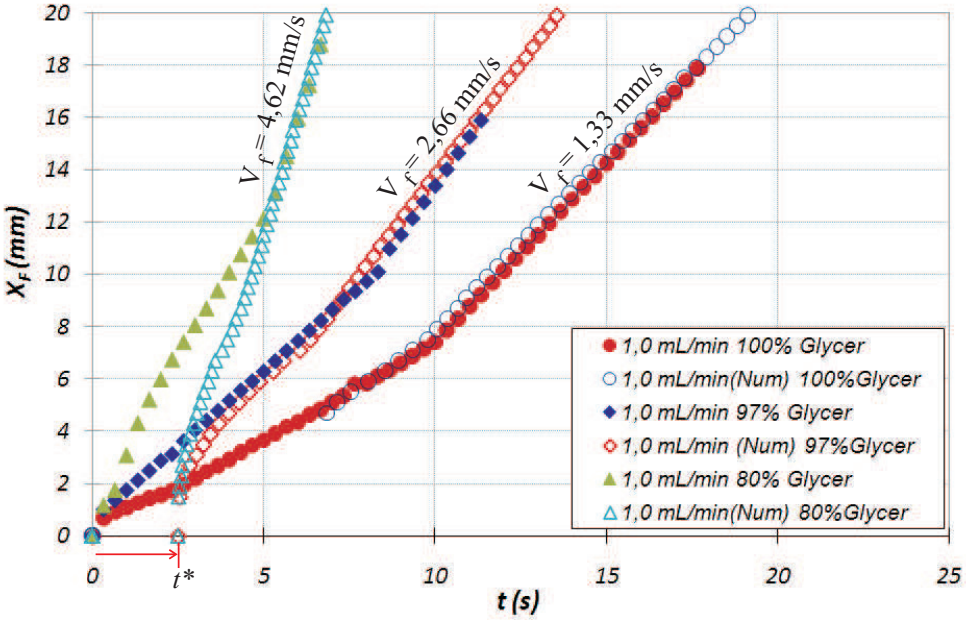

Figura 3.12: Gráfico comparativo, da evolução da frente de avanço, de líquidos com diferentes viscosidades com $\alpha = 15^o$ e $\Gamma = 1,0\text{ml/min}$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA

Os resultados apresentados neste capítulo mostram que o modelo apresentado no capítulo 2, baseado na teoria de lubrificação, é adequado para o estudo de coalescência de gotas escoando sobre uma superfície inclinada. A coalescência de gotas ou de faixas de líquido é uma parte importante do processo de revestimento de cilindros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510822/CA