

3

Análise experimental

Este capítulo apresenta uma descrição da bancada experimental, seus componentes, os procedimentos de medição e os resultados obtidos no estudo experimental. Os experimentos consideram a medição da relação vazão-queda de pressão no escoamento entre duas placas paralelas para diferentes configurações das paredes do canal, lisa e com ranhuras.

3.1

Dispositivo experimental

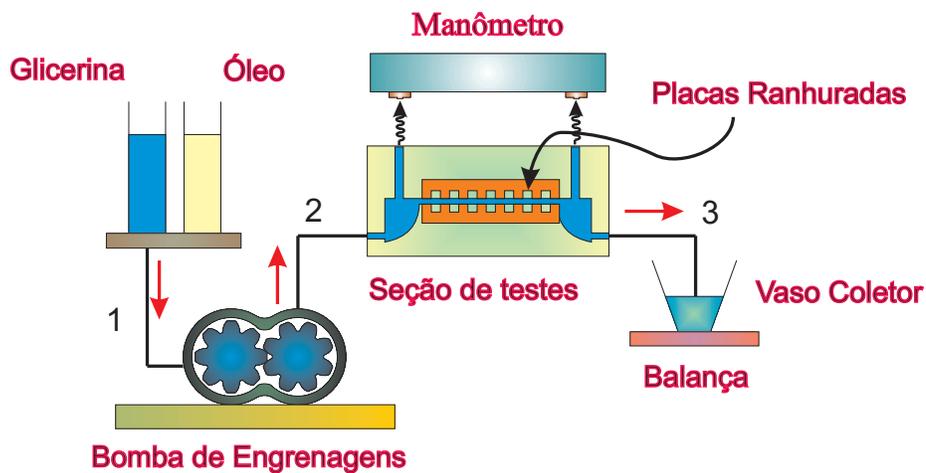


Figura 3.1: Representação gráfica da bancada experimental

A bancada experimental, mostrada na figura 3.1 foi montada durante o desenvolvimento da pesquisa, ela encontra-se no laboratório de Termociências do Departamento de Engenharia Mecânica e consta dos seguintes componentes:

- 1. **Bomba de engrenagens (Cole Parmer EW-07553-70)**. Esta Bomba tem uma potência de 0,1 Hp, gira numa faixa de 6 até 600 rpm, que proporciona vazões de 0,36 ate 3400 ml/min. O controle de velocidades permite girar as engrenagens da bomba nos dois sentidos, podendo assim variar o sentido do fluxo. A incerteza da vazão fornecida é de +/- 2%, a bomba trabalha com um tensão de 110-220 V e com

um corrente de 1,5 A. Cabe ressaltar que esta bomba de deslocamento positivo.

- 2. **Manômetro Digital (Dwyer-Series 490 wet/wet)**. Este aparelho tem uma incerteza de $\pm 0,5\%$ do fundo de escala a uma temperatura de $25,6^{\circ}\text{C}$ e de $\pm 1,5\%$ do fundo de escala a 40°C , tem uma resolução de até 4 dígitos. Nas medidas feitas neste trabalho, a incerteza foi de ± 100 Pa.
- 3. **Balança Eletrônica (AG-200)**. Esta balança possui fundo de escala de 210g, tem protetores de vidro e sua sensibilidade é de até 0,1mg.
- 4. **Canal entre placas paralelas**, Dispositivo construído em acrílico para obter um escoamento entre duas placas paralelas. A figura 3.2 apresenta um desenho esquemático do dispositivo. A altura do canal é definida pela espessura de uma placa de metal montada entre as duas partes do dispositivo. As paredes do canal podem ser substituídas. Três placas removíveis foram construídas mediante um processo de fresagem, uma lisa, uma com ranhuras de 1 mm x 1 mm e a outra com ranhuras de 0,3 mm x 1 mm, conforme mostrado nas figuras 3.3, 3.4 e 3.5. As dimensões das placas removíveis, e conseqüentemente do canal, são de 100 mm de comprimento por 60 mm de largura. A montante e a jusante do canal entre as placas foi construído uma cavidade para garantir a distribuição do líquido e assim garantir uma vazão uniforme ao longo da direção transversal. Uma tomada de pressão foi usinada em cada cavidade para medir a diferença de pressão do escoamento.

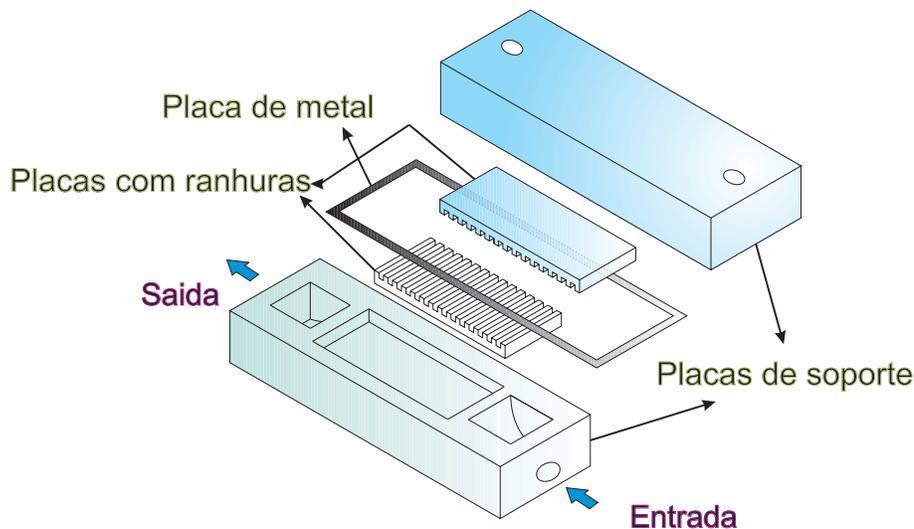


Figura 3.2: Dispositivo de acrílico construído para obter um escoamento entre duas placas paralelas

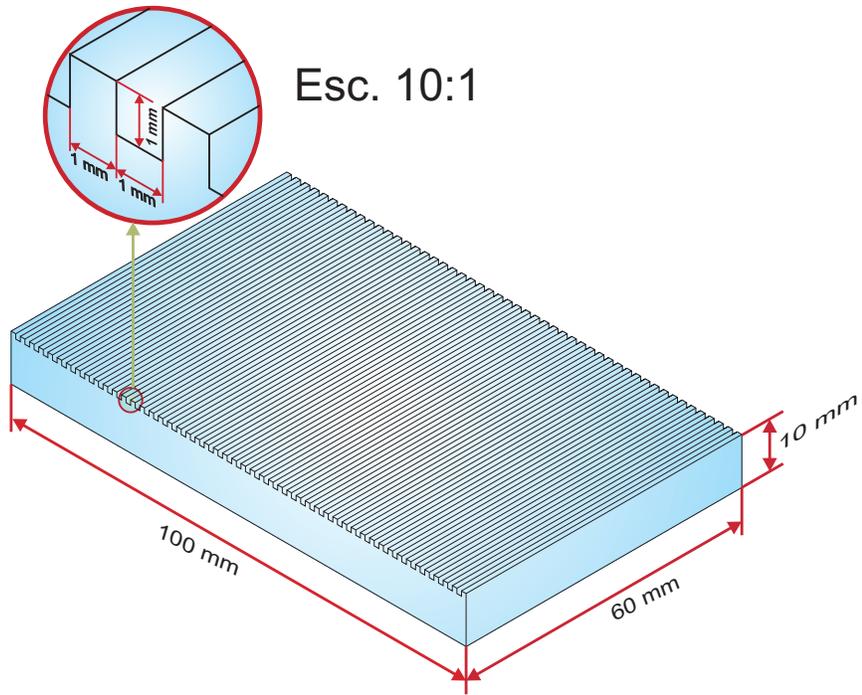


Figura 3.3: Placas ranhuras de 1 mm x 1 mm

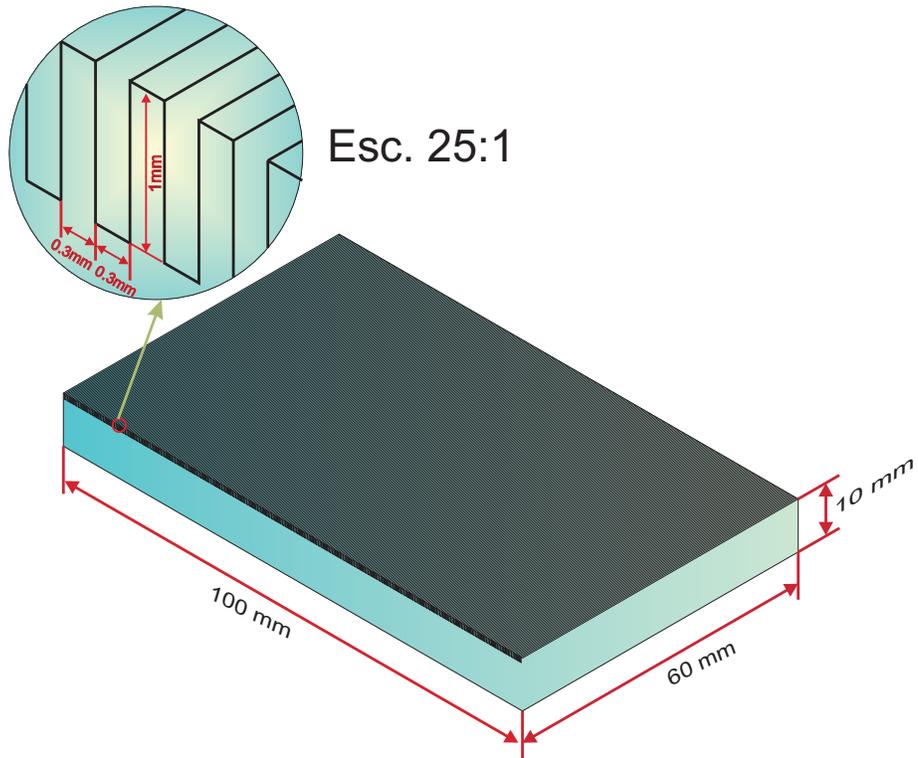


Figura 3.4: Placas ranhuras de 0,3 mm x 1 mm

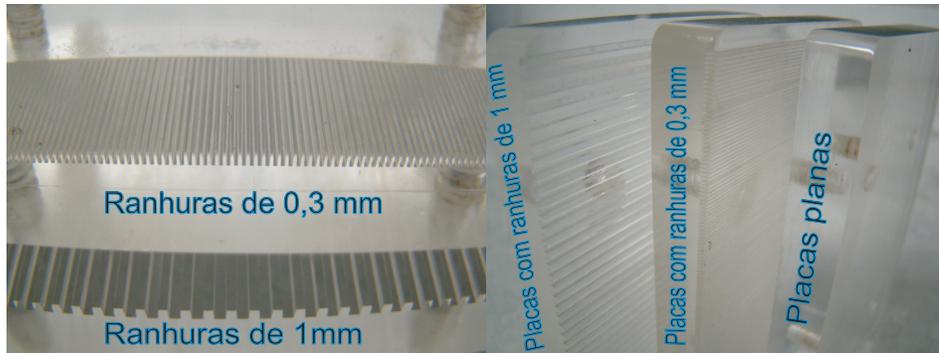


Figura 3.5: Placas Testadas no Experimento

Conforme discutido no capítulo anterior, dois líquidos são necessários para os experimentos, um de alta viscosidade e outro de baixa viscosidade, que serve de fluido lubrificante. O fluido lubrificante deve ficar nas ranhuras durante todo o escoamento.

Em uma primeira tentativa, utiliza-se óleo de alta viscosidade e água como fluido lubrificante. Estes experimentos não deram certo, pois como o óleo é o fluido molhante em relação ao acrílico, ele deslocava a água de dentro das ranhuras, comprometendo a eficiência da lubrificação.

Chegou-se à conclusão que o líquido lubrificante deve molhar a superfície das placas preferencialmente. Desta forma, os seguintes líquidos foram utilizados:

- 1. **Glicerina.** Foi escolhida pelos parâmetros de viscosidade e densidade, assim temos valor de densidade de 1,25 g/ml e um valor de viscosidade de 0,838 $Pa \cdot s$ a uma temperatura de 20°C. Estes valores são comuns em óleos pesados. A glicerina foi usada como o líquido de alta viscosidade.
- 2. **Óleo vegetal,** Este óleo vegetal foi utilizado pelas boas características que eles tem de molhabilidade com o acrílico e pelos baixos valores de viscosidade e densidade. Estes valores a 20°C são de 0,919 g/ml para a densidade e de 0,05 $Pa \cdot s$ para a viscosidade. O óleo foi utilizado como o líquido lubrificante.

3.2

Preparação da bancada

A figura 3.6 apresenta uma foto do dispositivo experimental montado. Para facilitar a visualização da interface entre o líquido mais viscoso e o líquido menos viscoso, adicionou-se corante de cor azul à glicerina.



Figura 3.6: Bancada experimental

Após cada experimento com as placas com ranhuras, as mesmas foram limpas cuidadosamente. Inicialmente o líquido preso nas ranhuras foi removido com um jato de ar a alta pressão. Após esta limpeza inicial, as placas foram colocadas de molho em água com sabão. Após o enxágüe e remoção do sabão, as placas foram secadas com um jato de ar

3.3 Procedimento experimental

Conforme mencionado anteriormente, o óleo foi utilizado como o fluido lubrificante. A principal razão foi o fato da superfície de acrílico ser molhada mais facilmente pelo óleo. O líquido lubrificante foi primeiramente bombeado através do canal entre as placas com ranhuras. Este procedimento foi feito a uma baixa velocidade de bombeio para assim assegurar um correto enchimento das ranhuras e evitar bolhas de ar.

Depois do óleo ter enchido completamente, inicia-se o bombeamento da glicerina. Este procedimento foi feito a baixa vazão para evitar que a glicerina deslocasse o óleo das ranhuras. O experimento propriamente dito era iniciado após a frente de glicerina atingir a cavidade à jusante do dispositivo.

A uma vazão constante, medições de pressão foram feitas após um intervalo de 5 min. A razão para isto foi para assegurar que o sistema tinha alcançado um regime permanente. Medições de pressão foram tomadas em intervalos de 1 min. Neste mesmo intervalo de tempo o volume de líquido bombeado era coletado e pesado para verificar se a vazão obtida era igual à vazão imposta pela bomba. A figura 3.7 apresenta uma fotografia das placas

com ranhuras montadas no dispositivo e o sentido do escoamento. Para uma melhor visualização das ranhuras, elas foram delineadas.

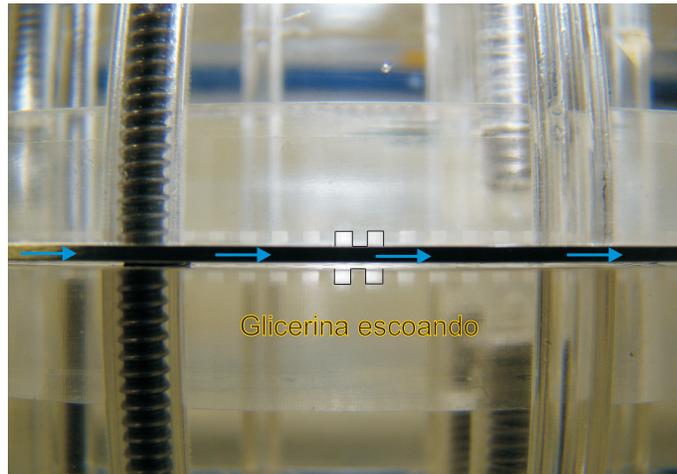


Figura 3.7: Vista das Placas com ranhuras montadas

3.4 Resultados Experimentais

A primeira serie de experimentos foi realizada com o conjunto de placas lisas. Foi medida a queda de pressão em função da vazão para o escoamento de glicerina ($\mu=832$ cp). Os dados obtidos são apresentados na figura 3.8. A figura também apresenta a relação teórica assumindo escoamento laminar desenvolvido entre duas placas paralelas (escoamento Poiseuille). Em cada medida experimental, a incerteza foi de +/- 100 Pa.

As medições feitas concordam muito bem com o escoamento em duas dimensões tipo Poiseuille. A figura 3.8 mostra claramente uma boa aproximação dos cálculos teóricos com as medições experimentais. A concordância dos resultados é excelente

$$\frac{Q_0}{W} = \frac{1}{12\mu} (2H)^3 \frac{\Delta P}{L} \quad . \quad (3-1)$$

A próxima serie de experimentos foi realizada com o conjunto de placas com ranhuras de 1 mm x 1 mm. A diferença de pressão medida em função da vazão imposta é apresentada na figura 3.9. Pode-se observar que o resultado obtido é bem próximo do resultado obtido com as placas lisas, sendo a diferença de pressão um pouco menor a baixas vazões. A lubrificação da parede com o líquido de menor viscosidade não foi efetiva. Devido ao tamanho da ranhura, o líquido de baixa viscosidade que originalmente estava dentro das ranhuras foi varrido das mesmas. A vista lateral do escoamento é apresentada na figura 3.10.

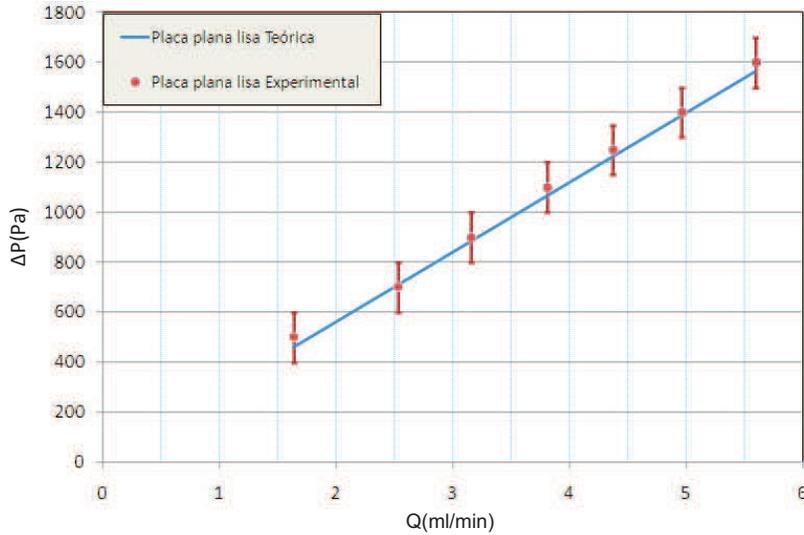


Figura 3.8: Queda de pressão para uma placa plana lisa, teórico e experimental.

Pode-se observar claramente que as ranhuras inferiores foram completamente invadidas pela glicerina, e as ranhuras superiores foram parcialmente invadidas pelo líquido de maior viscosidade.

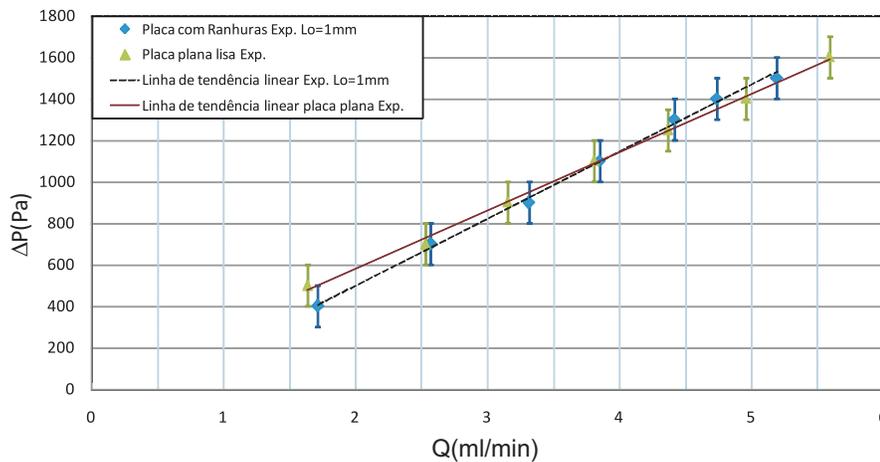


Figura 3.9: Queda de pressão em função da vazão entre duas placas planas com ranhuras de 1 mm de largura, enchidas com um fluido lubrificante.

O terceiro conjunto de experimentos foi feito com o conjunto de placas com ranhuras de 0,3 x 1 mm. Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.11. Pode-se observar que para toda faixa de vazão explorada, a diferença de pressão foi bem menor do que no escoamento entre placas lisas. A lubrificação obtida pelo líquido de menor viscosidade ocupando as ranhuras é bastante efetiva.

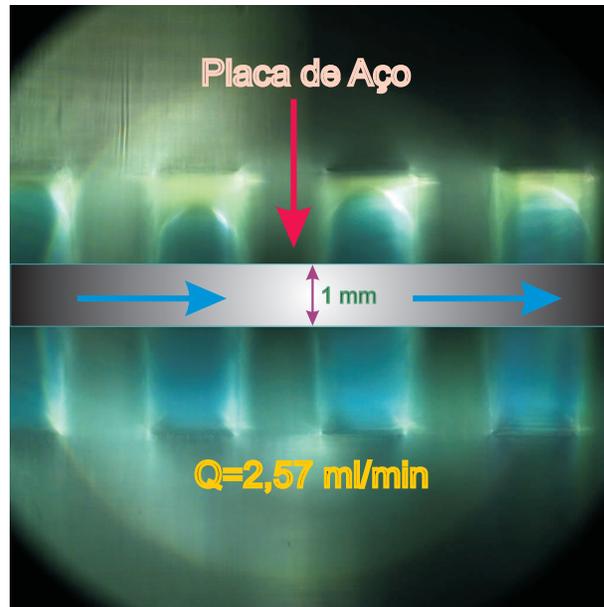


Figura 3.10: Interface entre um fluido altamente viscoso e o fluido lubrificante com ranhuras de 1 mm.

Com a menor dimensão das ranhuras, a tensão interfacial é suficientemente alta para manter a interface entre os líquidos na superfície das ranhuras e impedir a invasão das ranhuras pelo líquido de maior viscosidade, conforme mostrado na figura 3.12. Pode-se observar que a glicerina não invadiu as ranhuras.

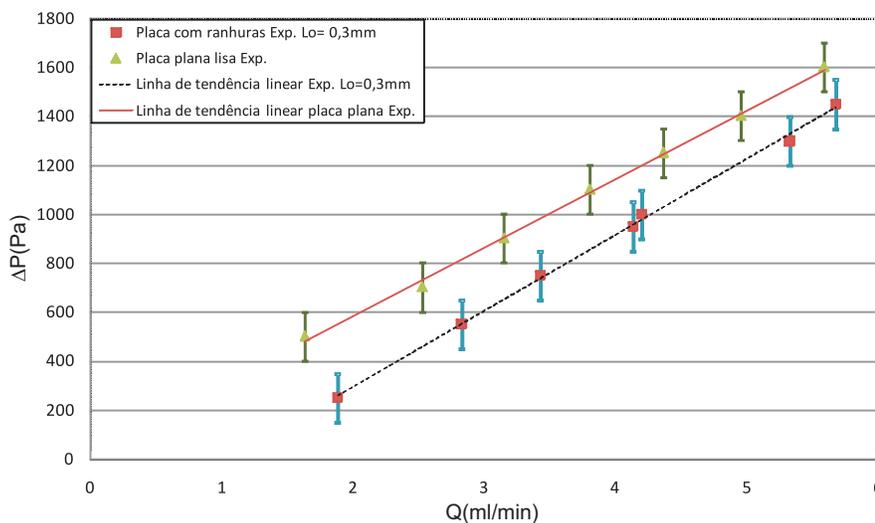


Figura 3.11: Queda de pressão em função da vazão imposta, para glicerina escoando entre duas placas planas e placas com ranhuras de 0,3 mm preenchidas com um fluido lubrificante

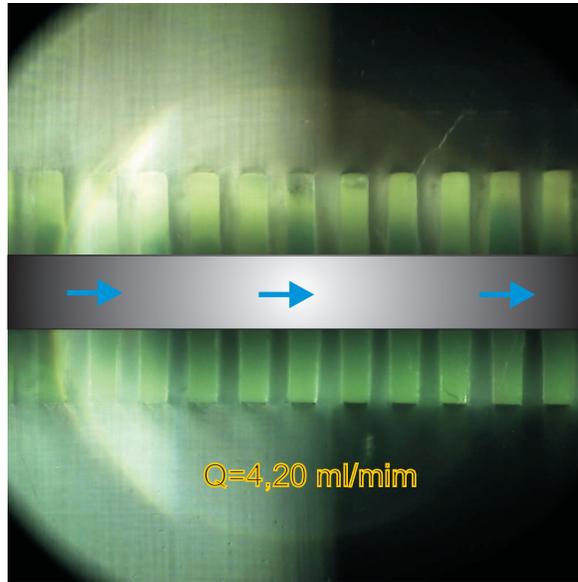


Figura 3.12: Linha de interface entre um líquido de alta viscosidade e o líquido lubrificante

3.5

Fator de atrito em placas planas e com ranhuras.

Os resultados apresentados na seção anterior podem ser apresentados em forma adimensional, na forma do produto do fator de atrito pelo número de Reynolds do escoamento. Deve-se lembrar que o fator de atrito do escoamento entre placas planas é igual a $f \times Re = 96$. O número de Reynolds é definido por:

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D_h}{\mu} \quad , \quad (3-2)$$

e o fator de atrito por:

$$f = \frac{\Delta P}{L} \frac{2D_h}{\rho \bar{v}^2} \quad (3-3)$$

A tabela 3.1 apresenta os valores calculados para toda a faixa de vazão explorada no escoamento entre placas lisas. O valor de $f \times Re$ varia de 95,3 a 103, bem próximo do valor teórico de 96.

Os valores de $f \times Re$ para as placas com ranhuras de $0,3 \times 1$ mm são mostrados na tabela 3.2. A figura 3.14 apresenta uma comparação do fator de atrito entre uma placa plana lisa e os valores experimentais de uma placa com ranhuras. Para toda faixa de vazão, o produto de $f \times Re$ é mais baixo que o valor de placa lisa de 96. Com estes valores baixos se comprova a efetividade que tem as placas com ranhuras de $Lo=0,3$ mm, Como se mencionou anteriormente o efeito de deslizamento neste tipo de placas demonstrou ser efetivo para as faixas de vazões impostas.

A incerteza no cálculo do valor de $f \times Re$ é calculada a seguir:

$$\delta(fRe) = \sqrt{\left(\frac{\delta f Re}{\delta \Delta P}\right)^2 \delta P^2 + \left(\frac{\delta f Re}{\delta \dot{m}}\right)^2 \delta \dot{m}^2 + \left(\frac{\delta f Re}{\delta H}\right)^2 \delta H^2}, \quad (3-4)$$

$$\left(\frac{\delta f Re}{\delta \Delta P}\right)^2 \delta P^2 = \left(\frac{64(H/2)^3 W \Delta P}{\mu Q L}\right)^2 \delta P^2, \quad (3-5)$$

$$\left(\frac{\delta f Re}{\delta \dot{m}}\right)^2 \delta \dot{m}^2 = \left(\frac{64(H/2)^3 W \Delta P}{\mu Q^2 L}\right)^2 \delta \dot{m}^2, \quad (3-6)$$

$$\left(\frac{\delta f Re}{\delta H}\right)^2 \delta H^2 = \left(\frac{96(H/2)^2 W \Delta P}{\mu Q L}\right)^2 \delta H^2 \quad (3-7)$$

Tabela 3.1: comparação de $f \times Re$ para uma placa plana experimental e teórica

$Re \times 10^{-5}$	$f \times Re$ (Experimental)	$f \times Re$ (Teórico placa plana)
4.07	103.09 ± 20.80	96
6.307	93.34 ± 13.62	96
7.86	96.31 ± 11.87	96
9.50	97.47 ± 9.30	96
10.9	96.59 ± 8.25	96
12.4	95.29 ± 7.38	96
13.9	96.60 ± 6.69	96

Tabela 3.2: comparação de $f \times Re$ para uma placa plana e uma placa com ranhuras de $Lo=0,3$ mm

$Re \times 10^{-5}$	$f \times Re$ (Experimental)	$f \times Re$ (Teórico placa plana)
4.69	45.53 ± 17.96	96
7.04	66.78 ± 12.10	96
8.54	75.15 ± 10.10	96
10.21	78.83 ± 8.48	96
10.49	81.72 ± 8.39	96
13.31	83.78 ± 6.80	96
14.20	87.66 ± 6.48	96

O gráfico da figura 3.14 mostra claramente que para um Reynolds de $4,69 \times 10^{-5}$, o produto de $f \times Re$ vale 45. Esta é uma clara evidência do efeito de lubrificação da parede. Também pode se notar que o produto fator de atrito, numero de Reynolds para placas com ranhuras tende a aumentar com o número de Reynolds, tendendo ao 96 a medida que a vazão aumenta, a interface entre os líquidos torna-se menos plana e parte do líquido menos viscoso é varrido das ranhuras, diminuindo a capacidade de lubrificação.

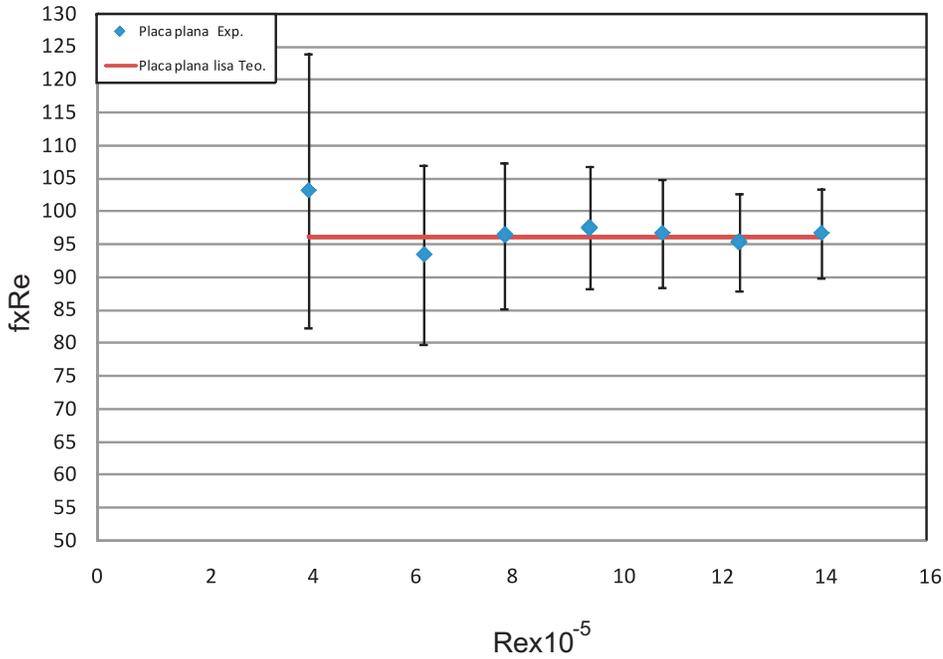


Figura 3.13: Comparação de $f \times Re$ para placas planas como o valor teórico

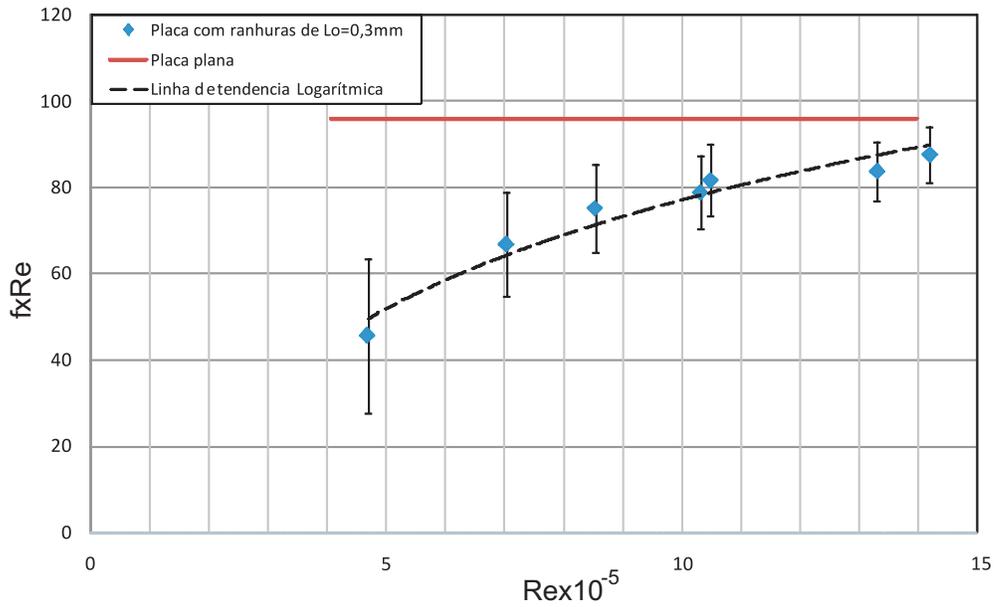


Figura 3.14: Comparação de $f \times Re$ para placas com ranhuras com o valor teórico para placa plana

3.6

Comparação da simulação numérica com dados experimentais

A metodologia utilizada no Cap.2 foi utilizada para a geometria empregada nos experimentos com placas com ranhuras de 0,3 x 1 mm.

A comparação dos valores medidos de queda de pressão com os obtidos através da simulação numérica para toda faixa de vazão explorada é apresentada na figura 3.15. Pode-se observar que a inclinação da reta que corresponde aos resultados numéricos possui menor inclinação do que a reta que aproxima os resultados experimentais. Desta forma, a perda de carga para vazões mais altas prevista pelo modelo é bem menor do que a medida experimentalmente. Supõe-se que parte do volumen do liquido lubrificante que inicialmente ocupava as ranhuras é varrido pela passagem do fluido mais viscoso o que leva a este resultado. O modelo numérico não leva em conta este fenômeno, o volume de liquido lubrificante nas ranhuras é fixo. Este efeito é mais intenso a altas vazões.

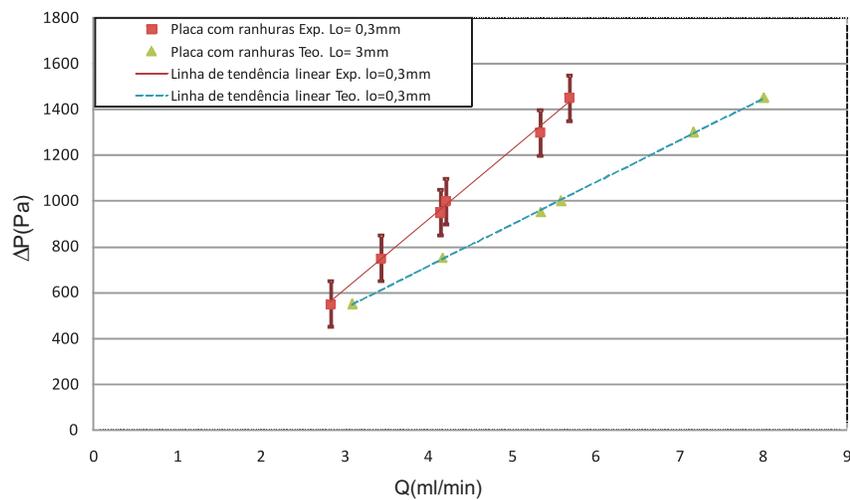


Figura 3.15: Comparação experimental e numérica para uma configuração de comprimento de ranhura de $L_o = 0,3$ mm.

3.7

Teste de longa duração

O teste com o sistema experimental operando em um período de tempo foi realizado com o objetivo de verificar a estabilidade da configuração com óleo lubrificando a glicerina. A uma vazão constante medições de pressão foram feitas após um intervalo de 10 min. A razão para isto foi para assegurar que o sistema tivesse alcançado o regime permanente. Medições de pressão foram tomadas em intervalos de 1 min. Neste mesmo intervalo de tempo o volume de liquido bombeado foi coletado e pesado. A tabela 3.3 apresenta a pressão em função do tempo.

Pode-se observar que a pressão ao longo do tempo alterou-se em valores percentuais de 10% para uma vazão de 3,3 ml/min. até 6,35 % para uma vazão

Tabela 3.3: Teste de longa duração

Q(ml/min)	ΔP (Pa.)		Variação %
	t=5 min	t=15 min	
3,3	450	500	10
4,29	750	800	6,35

de 4,29 ml/min. Estes valores mostram uma estabilidade dos fluidos na parte da interface.

3.8

Teste de reinício do escoamento após parada

Como mencionado na introdução deste trabalho um dos problemas da técnica de “*Core-Annular Flow*”, está relacionado como o re-íncio do escoamento após uma parada prolongada. Testes de reinício do escoamento foram conduzidos como a geometria ranhurada testada para verificar seu desempenho

Os experimentos foram feitos após deixar a glicerina escoar num período de tempo de 5min. Depois a bomba foi desligada por um período de tempo de 3 min. Após este tempo ligou-se a bomba de novo e após um período de tempo de 5 min viu-se os seguintes fenômenos:

No reinício do sistema viu-se que a pressão do sistema subiu, mas depois de certo tempo ele atingiu um regime permanente.

A queda de pressão do sistema foi igual após varias paradas depois de atingir o regime permanente.

O liquido lubrificante ficou dentro das ranhuras ficou nelas após reiniciar o sistema de bombeio de glicerina. Assim se viu a estabilidade da linha de interface.

Todos os efeitos descritos anteriormente foram para placas de comprimento de ranhura de $L_o=0,3$ mm.