

# ESTUDO HIDRODINÂMICO DE UMA PELÍCULA LÍQUIDA DESCENDENTE EM PLACA PLANA

*Padilha, A.; Scalon, V.L. e Scaloppe, J.H<sup>1</sup>*  
*Depto. de Engenharia Mecânica, FE-UNESP/Bauru*  
*Caixa Postal 473, CEP: 17.033-360, Bauru (SP)*

## Resumo

Este trabalho estuda o comportamento hidrodinâmico de uma película líquida descendente na região de entrada de uma placa plana para várias inclinações em relação à horizontal. Para a formação da película líquida foi desenvolvido e otimizado um distribuidor de líquido para uma placa plana. Os ensaios com tal equipamento permitiram a obtenção de dados experimentais, sobre o comprimento de entrada hidrodinâmico do filme de líquido, e a comparação destes resultados com resultados teóricos, obtidos a partir de equações empíricas disponíveis na literatura. Com a placa posicionada em várias inclinações em relação à horizontal e o escoamento plenamente desenvolvido, foi inserido, na saída do distribuidor, uma gota de óleo com corante que não se difunde em água. A posição da gota, em relação ao tempo, foi registrada por uma câmara fotográfica na razão de 5 fotos por segundo. Assim, através das fotos, obteve-se as posições da gota em uma escala fixada ao longo do canal e a velocidade média para cada inclinação da placa e, conseqüentemente, determinado o comprimento de entrada hidrodinâmico experimental. Para cada vazão, com os parâmetros geométricos medidos diretamente na placa, obteve-se o número de Reynolds e o comprimento de entrada teórico.

**Palavras-chave:** comprimento de entrada, distribuidor de líquido, filme descendente.

## 1. INTRODUÇÃO

O escoamento de película líquida descendente é freqüentemente empregado em equipamentos industriais tais como paredes úmidas de colunas de destilação, absorvedores de gás, vários tipos de refrigeradores, condensadores e umidificadores, encontrando sua principal aplicação em trocadores de calor e massa. A vantagem desse tipo de dispositivo é a grande superfície de contato do filme de líquido em circulação, que possibilita altas taxas de transferência de calor e massa, para uma pequena vazão de líquido. Devido a esta grande utilização tem-se realizado um considerável número de estudos sobre o escoamento de películas líquidas nos últimos anos, todos com aplicações, praticamente diretas, em diferentes tipos de dispositivos, incluindo estudos sobre distintas geometrias e regimes de escoamento.

Desta série de trabalhos publicados destaca-se o trabalho desenvolvido por Bandelier (1997), onde são apresentados recentes desenvolvimentos sobre trocadores de calor compactos, principalmente aqueles utilizando película descendente. Uma série de trabalhos envolvendo película descendente, em geometria cilíndrica, pode ser encontrado tanto na área de simulação numérica (He *et. al.*, 1998), como na área experimental (Alhousseini *et. al.*,

---

<sup>1</sup> *Email dos Autores:* padilha@bauru.unesp.br e scalon@bauru.unesp.br

1998). Outra geometria, com significativo número de estudos e objeto deste trabalho, é a película descendente em placas planas. Esta geometria tem aplicação em uma série de dispositivos, inclusive trocadores de calor para coletor solar, como o desenvolvido por Song *et. al.*, (1999).

Este trabalho, por sua vez, visa o estudo do comportamento hidrodinâmico de uma película líquida descendente na região de entrada de uma placa plana para várias inclinações em relação à horizontal. Para a formação da película líquida foi desenvolvido e otimizado um distribuidor de líquido para uma placa plana. Os resultados experimentais obtidos da região de entrada hidrodinâmica, tais como velocidade limite e espessura da película de líquido serão comparados com os resultados teóricos das equações empíricas.

## 2. SOLUÇÃO ANALÍTICA DO PROBLEMA

Como já foi discutido, problemas deste tipo envolvem uma elevada complexidade e a sua caracterização depende de uma série de propriedades físicas e relações expressas através de adimensionais. As propriedades do filme podem depender dos números de Reynolds, Weber e Froude, um adimensional da tensão de cisalhamento na interface e várias relações geométricas. A caracterização do regime de escoamento é melhor representada pelo número de Reynolds que é definido como:

$$Re = \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu}, \quad (1)$$

sendo a vazão mássica por unidade de largura do canal ( $\Gamma$ ) dada por:

$$\Gamma = \frac{Q \cdot \rho}{w} \quad (2)$$

Alguns autores admitem a definição de  $\frac{1}{4}$  do segundo membro da equação (1). Em geral, como afirmou Fulford (1964), “um fluxo laminar liso ocorre apenas depois da zona de aceleração para pequenos valores de Re, da ordem de 10”. O comprimento de entrada desta região, entretanto, é da ordem de poucos centímetros. Para valores de Re, no intervalo de 25 a 1000, pequenas ondas de forma senoidal regular aparecem na superfície livre. A onda senoidal regular é destruída no interior das ondas maiores, que distorcem a frente da onda, e gradualmente passa para região de ondas turbulentas. Na região de ondas turbulentas distúrbios superficiais (tipo gravidade) predominam, mas o filme base é ainda laminar. Há uma tendência da superfície de ondas emergirem e formar uma grande onda secundária chamada de ressalto hidráulico. Dessa maneira, de acordo com o tipo de distribuidor usado, a vazão e o comprimento da placa empregada, podem aparecer diferentes regimes de escoamento. A hidrodinâmica desses diferentes regimes de fluxo tem uma influência marcante na taxa de transferência de calor e massa. Outro tema muito estudado é o fluxo de filme na região de entrada e, principalmente, os diferentes distribuidores de líquidos, tais como: abertura horizontal, por transbordamento, tipo cone com abertura anular, transbordamento livre, abertura de prato paralelo e outros citados anteriormente. Em geral, as duas equações dimensionais para a camada limite são estabelecidas com as condições limite apropriadas. Fulford (1964), apresentou uma equação para o cálculo do comprimento de entrada adimensional  $Xe^*$ , para um fluxo laminar, dada por:

$$Xe^* = Xe \cdot \left( \frac{g \cdot \text{sen} \beta}{3 \cdot \gamma} \right)^{1/3} = 0,67 \cdot \left( \frac{\Gamma}{\mu} \right)^{4/3} \quad (3)$$

O aparecimento de ondas após o comprimento de entrada, ou seja, após atingir o escoamento laminar plenamente desenvolvido, implica no cálculo de um segundo comprimento de entrada ( $\mathbf{Xe}_w^*$ ), que pode ser definido como o comprimento acima do qual ocorre a formação das referidas ondas e  $\mathbf{Xe}^* < \mathbf{Xe}_w^*$ . Além disso esses autores mostraram que, em geral, para  $Re$  iguais, os comprimentos de entrada são maiores para líquidos menos viscosos devido ao aumento proporcional da taxa de vazão. Entretanto para mesma vazão o comprimento de entrada é menor para líquidos mais viscosos. De uma forma geral, o comprimento de entrada aumenta com o aumento de  $Re$ . Para a determinação dos resultados teóricos do comprimento de entrada  $\mathbf{Xe}$  obtidos neste trabalho, será utilizada a equação (3) rearranjada da seguinte forma:

$$Xe = \frac{0,67 \cdot \left(\frac{\Gamma}{\mu}\right)^{\frac{4}{3}}}{\left(\frac{g \cdot \cos \beta}{3 \cdot \gamma^2}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

Determinado o comprimento de entrada é realizado um balanço de forças sobre um elemento diferencial do filme para a determinação de alguns parâmetros importantes, tais como, a velocidade local no interior do filme, que pode ser obtida admitindo-se um perfil parabólico, em função das condições de contorno e é dada por:

$$V = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2}{2 \cdot \mu} \cdot \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)^2 \quad (5)$$

e a velocidade média do filme, que pode ser obtida a partir da integração da equação (5) resultando em:

$$V_m = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2 \cdot \cos \beta}{3 \cdot \mu} \quad (6)$$

Dessa maneira pode-se calcular a vazão volumétrica, como sendo:

$$Q = V_m \cdot A = \frac{\rho \cdot g \cdot \delta^2 \cdot \cos \beta}{3 \cdot \mu} \cdot w \cdot \delta \quad (7)$$

Explicitando a espessura do filme ( $\delta$ ), na equação (7), tem-se:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot Q \cdot \mu}{\rho \cdot g \cdot w \cdot \cos \beta}} \quad (8)$$

A variável  $\Gamma$ , por sua vez, pode ser calculada a partir da equação (6) e é expressa por:

$$\Gamma = \rho \cdot \delta \cdot V_m = \frac{\delta^3 \cdot \rho^2 \cdot g}{3 \cdot \mu} \quad (9)$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O aparato experimental utilizado nos ensaios, como mostrado na figura (1), constitui-se basicamente por uma placa de vidro de 1,80 m de comprimento, com 2 abas laterais de 3 cm de altura, sobre as quais são fixadas escalas graduadas em milímetros, de maneira a formar o canal central de largura de 15 cm, por onde escoa a película de água em regime laminar. O canal é apoiado em uma estrutura de madeira, articulado na base através de um eixo de aço, de maneira a variar o seu ângulo de inclinação. Um reservatório de 2 litros de capacidade é fixado na extremidade superior da placa, com uma abertura paralela à extremidade superior da placa, para vazão do filme de água. Uma válvula manual controla a vazão d'água desejada no escoamento.

A válvula é aberta para uma determinada vazão e por transbordamento a água escoar pelo canal formando uma película de água na superfície da placa plana. Dessa maneira o nível do reservatório permanece constante e o escoamento entra em regime laminar, com um número de Reynolds variando entre 100 e 1000.

A placa é então colocada na inclinação desejada e uma gota de corante, que não se difunde na água, é injetada na extremidade superior da placa, ao mesmo tempo em que uma câmara fotográfica registrou a posição da gota ao longo da placa, a uma razão de 5 fotos por segundo. A espessura da película de água foi obtida, tomando-se a medida diretamente no escoamento utilizando a haste de profundidade de um paquímetro. Os possíveis erros de paralaxe foram desprezados já que a película de líquido estava em contato direto com a escala. A perturbação no escoamento laminar, devido às pequenas dimensões da haste do paquímetro foi praticamente imperceptível. O ensaio foi repetido para várias vazões e diferentes ângulos de inclinações.



**Figura 1.** Aparato experimental.

A posição da gota em cada instante foi lida diretamente na escala em cada foto. A câmara fotográfica utilizada, disparou automaticamente 5 fotos por segundo e assim, o intervalo de tempo entre uma foto e outra é de 0,2 segundos. Dessa maneira determinou-se a velocidade média da gota em cada intervalo percorrido, ou seja:

$$V_{gota} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (10)$$

O comprimento de entrada é o espaço percorrido pelo escoamento até que este atinja um perfil de velocidade constante, ou seja, a velocidade limite. A análise das velocidades do escoamento, obtidas a cada intervalo de tempo, permite determinar o referido comprimento de entrada experimental e sua precisão dependeu da velocidade da câmara fotográfica.

#### 4. RESULTADOS

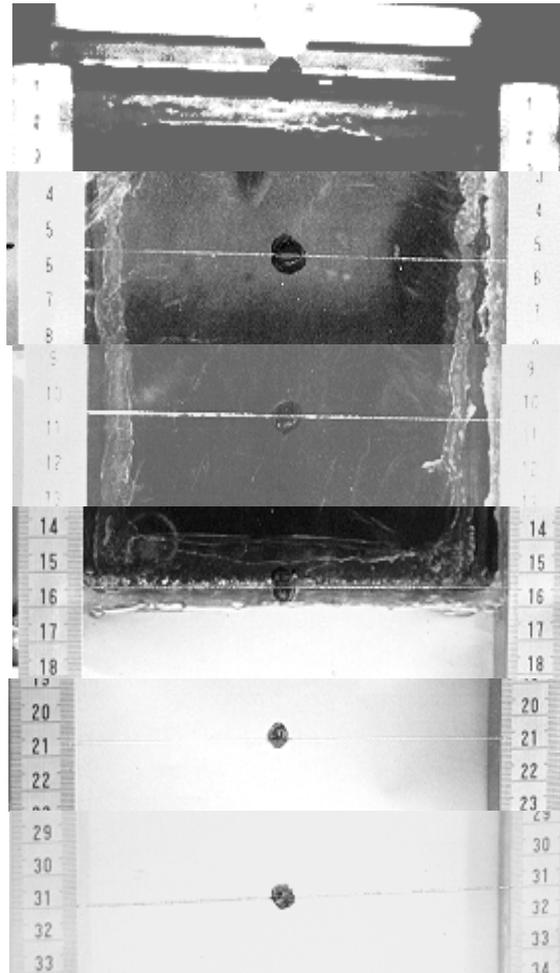
Utilizando-se do referido procedimento foram realizados diversos ensaios em diferentes condições de inclinação da placa e fluxo de massa (vazão). O procedimento experimental, como já foi descrito anteriormente, dependeu da sequência de fotos obtidas, as quais permitiram avaliar a evolução da velocidade de uma gotícula de corante ao longo da placa. Uma sequência de fotos obtidas, mostrando escalas métricas fixadas nas abas laterais da placa, é apresentada na figura (2), como um exemplo para as condições do ensaio 1.

Uma série de resultados experimentais obtidos foram comparados aos resultados teóricos. Estes resultados foram resumidos e são mostrados na tabela (1), de acordo com a inclinação da placa e o fluxo de massa.

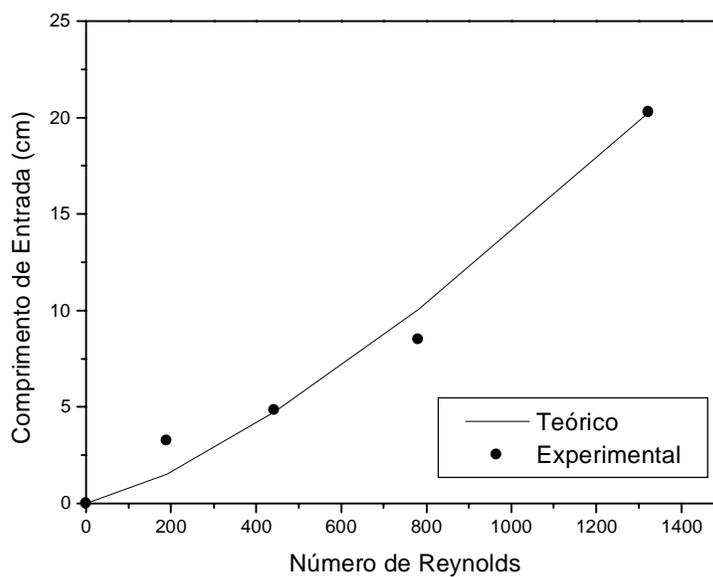
A boa concordância obtida entre os resultados teóricos e experimentais, dos ensaios (2) a (5), são também comparados graficamente como mostrados nas figuras (3) e (4). A figuras (3) apresenta os valores teóricos e experimentais para o comprimento de entrada na placa, ou seja, o comprimento percorrido pela gotícula de corante até que sua velocidade torne-se constante, ou seja, se desenvolva plenamente. É possível notar, através da análise dos gráficos pequenas discrepâncias entre os resultados e que, nada mais são, do que consequências de erros inerentes a medidas experimentais, já que considerou-se o intervalo de tempo ( $\Delta t=0,2s$ ) ainda muito grande.

**Tabela 1.** Resultados teóricos e experimentais dos 6 ensaios realizados.

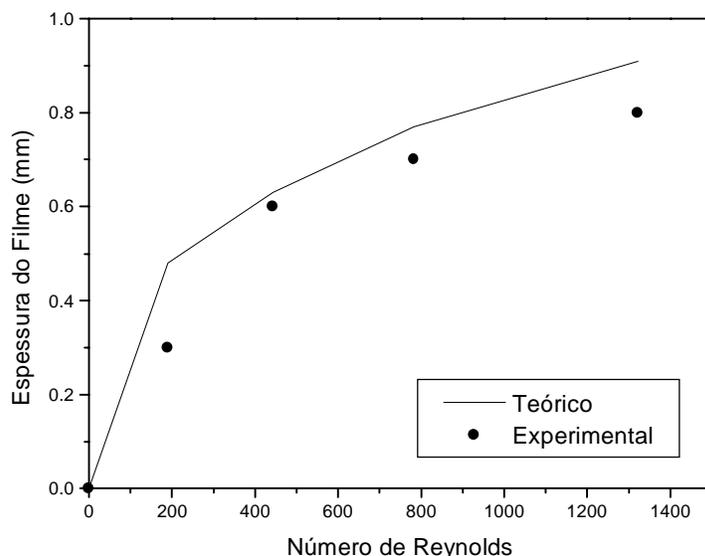
Ensaio n°	$\beta$ [°]	$Q$ [l/s]	$w$ [cm]	$\Gamma$ [kg/m.s]	Re	Experimental		Teórico	
						$Xe$	$\delta$	$Xe$	$\delta$
1	3	0,022	15	0,148	665,8	13,21	0,87	10,4	0,92
2	6	0,00212	5	0,042	190,6	3,65	0,3	1,5	0,48
3	6	0,00494	5	0,099	443,9	4,85	0,6	4,73	0,63
4	6	0,0087	5	0,174	781,6	7,2	0,7	10,1	0,77
5	6	0,0147	5	0,294	1321,9	20,2	0,8	20,2	0,91
6	10	0,00494	5	0,099	443,9	2,7	0,4	3,18	0,43



**Figura 2.** Sequência de fotos mostrando em detalhes a gota de corante e sua posição ao longo do escoamento para 6 instantes de tempo.



**Figura 3.** Variação do comprimento de entrada hidrodinâmico teórico e experimental em função do número de Reynolds.



**Figura 4.** Variação da espessura do filme teórica e experimental em função do número de Reynolds.

Na figura (4) são apresentadas algumas discrepâncias entre os resultados experimentais e teóricos para a espessura do filme de líquido. Este desvio se justifica, da mesma forma que no caso anterior, pelos erros inerentes a medidas. Entretanto, é importante enfatizar que o referido desvio também é devido, em parte, ao aumento do número de Reynolds. Isto se deve ao afastamento das hipóteses originalmente adotadas, ou seja, para o regime laminar, quando da elaboração do modelo teórico.

## 5. CONCLUSÕES

Este experimento mostrou a viabilidade do procedimento adotado para a obtenção de dados a respeito do desenvolvimento hidrodinâmico de película descendente. Entretanto, a experiência mostrou também que estes resultados podem ainda melhorar, desde que alterados alguns procedimentos. A principal alteração seria, sem dúvida, obter uma maior taxa de fotos por segundo e, conseqüentemente, um menor intervalo de tempo entre uma foto e outra. Este procedimento, por si só, implicaria a uma maior precisão dos resultados obtidos. Estudos nesta direção já estão sendo realizados.

## NOMENCLATURA

<p><math>Q</math> – vazão volumétrica [<math>m^3/s</math>]  <math>Re</math> – número de Reynolds  <math>V</math> – velocidade [<math>m/s</math>]  <math>X_e</math> – comprimento de entrada [<math>m</math>]  <math>w</math> – largura do canal [<math>m</math>]</p> <p><b>Subscritos</b>  <math>m</math> – média  <math>gota</math> – relativo ao corante</p>	<p><b>Letras gregas</b></p> <p><math>\beta</math> - Inclinação da placa em relação à horizontal  <math>\delta</math> - espessura do filme de líquido [<math>m</math>].  <math>\gamma</math> - peso específico [<math>N/m^3</math>]  <math>\Gamma</math> - fluxo mássico por unidade de largura do canal [<math>kg/m</math>]  <math>\mu</math> - viscosidade dinâmica [<math>kg/m\ s</math>]  <math>\rho</math> - densidade [<math>kg/m^3</math>]</p>
--	--

## REFERÊNCIAS

- Alhousseini, A.A., Tuzla, K. e Chen, J.C., 1998, Falling film evaporation of a single component liquids, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, v. 12, p. 1623-132.
- Bandelier, P., 1997, Improvement of multifunctional heat exchangers applied in industrial processes, *Applied Thermal Engineering*, v. 17, pp. 777-788
- Bird, R. B., Stewart, W. E. e Lightfoot, E. N., 1960, *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc.
- Fulford, G. D., 1964, *Handbook of Heat and Mass Transfer, vol 2: Mass Transfer and Reactor Design*, Editor Nicholas P. Cheremisinoff..
- He, S., Na, P., Li, J. e Jackson, J.D., 1998, Combined heat and mass transfer in a uniformly heated vertical tube with water falling film, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, v. 19, p. 401-417.
- Song, B., Inaba, H., Horibe, A. e Ozaki, K., 1999, Heat, mass and momentum transfer of a water film flowing down a tilted plate exposed to solar irradiation, *Int. J. of Thermal Science*, v. 38, p. 384-397.