

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE UMA PELÍCULA LÍQUIDA DESCENDENTE EM UM TUBO VERTICAL COM ALETA EXTERNA EM ESPIRAL

Alcides Padilha

Henrique G. Argentieri

Vicente L. Scalon

Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Campus de Bauru, Departamento de Engenharia Mecânica, Caixa Postal 473 - CEP 17033-360 - Bauru, SP, Brasil.

RESUMO. *O trabalho consiste na otimização da distribuição de uma película de líquido, descendente escoando ao longo de uma superfície aletada. O dispositivo, cuja hidrodinâmica é modelada, consiste de uma aleta em espiral fixada externamente a um tubo vertical. Trata-se portanto, da simulação do comportamento do líquido em escoamento externo a esse dispositivo, determinando-se as condições ótimas para que não ocorra nenhum ponto seco, nas superfícies superior e inferior da aleta espiral, bem como na parede vertical do tubo. Obtém-se com esta simulação a maximização da relação superfície molhada-vazão, a partir da análise dos parâmetros de projeto, o que fornece subsídios para otimizar tanto a transferência de massa como a transferência de calor, a serem processados no escoamento.*

Palavras-chaves: *Filme descendente, Hidrodinâmica, Simulação numérica, Transferência de massa, Aleta externa em espiral.*

1 - INTRODUÇÃO

O fluxo descendente de filme de líquido com superfície livre encontra sua principal aplicação no projeto de trocadores com transferência de calor e massa. A vantagem principal desse tipo de dispositivo é a grande superfície de contato da fina camada de líquido em circulação, o que possibilita altas taxas de transferência de calor e massa, necessitando de um pequeno fluxo de líquido.

Existem duas configurações básicas que apresentam aplicações específicas. Na primeira, o líquido pressurizado circula pelo lado externo do tubo, enquanto a película de líquido à pressão atmosférica pelo interior do tubo, cujas aplicações principais são: condensadores de vapor, de vapores orgânicos e de refrigerantes, resfriadores de líquido mediante camisas, evaporadores de misturas (vaporização a baixas temperaturas). Na segunda configuração, a película de líquido circula pelo exterior do tubo e o líquido pressurizado pelo interior do mesmo, com as seguintes aplicações principais: congeladores para a produção contínua de gelo, resfriadores de absorção, normalmente absorção de gases pela película de líquido em circulação, colunas de umidificação.

Nos últimos anos um número considerável de estudos de fluxo de filme descendente foram realizados, com aplicação direta em diferentes tipos de dispositivos.

As condições de entrada do líquido no tubo são essenciais para se conseguir uma boa distribuição de líquido, na parede vertical do tubo que constitui o trocador. Segundo Fulford (1964), uma película de água descendente na parede externa de um tubo vertical, sem nenhum tipo de aleta, atinge uma velocidade limite da ordem de 0,8 a 1,4 m/s, com 0,5 mm de espessura, em poucos segundos.

Um dos projetos mais relacionado ao problema proposto neste artigo, é o estudo experimental apresentado por Schwarzer (1993), que estuda um filme de líquido descendente ao longo de uma aleta espiral interna em degraus, no entanto apresenta somente resultados gerais de transferência de calor, sem otimizar a superfície aletada. A conclusão principal deste estudo experimental é que a eficiência na transferência de calor neste dispositivo, é maior que em um trocador de calor convencional.

Tsai (1998), apresenta um estudo teórico, sobre as condições limites de absorção de vapor d'água por um filme de solução aquosa de LiBr, cuja concentração diminui, a medida que desce externamente ao longo de um tubo liso vertical. Neste caso é possível a inserção de aleta ao tubo, mantendo o seu comprimento e aumentando a taxa de absorção de massa de vapor d'água. O estudo experimental apresentado por Armbruster (1998), sobre resfriamento de tubos, utilizando ar em contra-corrente, a uma película de água em escoamento descendente, sobre um banco de tubos horizontais, distribuídos verticalmente, apresenta boa eficiência na dissipação de calor, mas restrito quanto ao aumento da superfície de troca.

Descrição do dispositivo simulado

O referido dispositivo possui hélice à direita e, a fim de compensar o efeito da força centrífuga que faz com que o líquido escoe em sentido à extremidade da aleta, possui um ângulo de elevação (β) e um ângulo de hélice (ϕ), conforme Fig. 1.

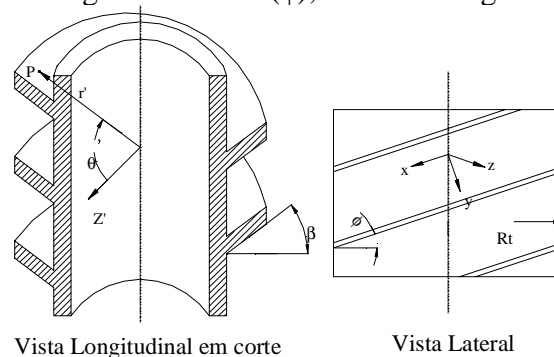


Figura 1 - Representação esquemática do dispositivo e os respectivos sistemas de eixos.

Na Fig. 1 observa-se uma vista longitudinal em corte e uma vista lateral do dispositivo simulado, bem como os sistemas de eixos para definir a posição de uma partícula nas superfícies da aleta (r' , θ' , Z') e na parede vertical do tubo (x , y , z). O sistema de eixo (r' , θ' , Z'), para as superfícies da aleta, é composto pelo eixo Z' , perpendicular à superfície da aleta; pelo eixo r' , paralelo ao plano que forma a superfície da aleta e pela coordenada que define o ângulo (θ'). O sistema de eixo (x , y , z), para a parede vertical do tubo, é composto pelo eixo x , paralelo ao plano da superfície da aleta, pelo eixo y , perpendicular à superfície da aleta e pelo eixo z , perpendicular à superfície da parede vertical do tubo.

O modelo matemático do fenômeno em estudo será explicitado, para as superfícies da aleta: em coordenadas cilíndricas com as equações formuladas em relação ao eixo ortogonal perpendicular à superfície da aleta (r' , θ' , Z'), para a parede vertical do tubo: em coordenadas cartesianas com as equações formuladas em relação ao sistema de eixo ortogonal (x , y , z).

Hidrodinâmica do trocador proposto.

A Fig. 2 apresenta, de forma esquemática, os três diferentes tipos de regimes de escoamento. Observa-se a existência de um primeiro regime (A) no qual o líquido, pela influência da gravidade, não chega à extremidade exterior da aleta, de maneira que a superfície inferior permanece seca e portanto se aquecerá ou resfriará excessivamente.

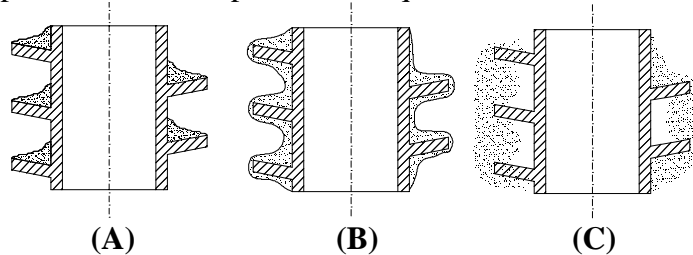


Figura 2 - Diferentes tipos de regimes de líquido em escoamento.

A medida que a vazão de entrada aumenta e/ou diminui-se o ângulo de hélice, pode-se chegar a uma condição em que o líquido escoar para a extremidade externa da aleta, com a maior parte do fluxo atingindo a superfície inferior da mesma. Neste caso em que a película de líquido não se desprende, devido a ação da tensão superficial, superar a ação da gravidade, tem-se a simulação do segundo caso (B) da Fig. 2, que constitui o principal objetivo deste estudo, por várias razões de eficiência energética.

Finalmente, o caso (C), ocorre quando a ação da tensão superficial não é suficiente para anular a ação da gravidade, devido ao aumento excessivo da vazão de líquido, provocando o desprendimento da película, em consequência da velocidade excessiva e/ou do excesso de peso do líquido ao atingir a superfície inferior da aleta.

O aparecimento destes fenômenos podem ser controlados, mediante ajustes envolvendo correlações obtidas através do número de Reynolds, características físicas do fluido e geométricas do dispositivo.

É muito importante deixar claro que neste estudo procura-se simular as condições em que o líquido molha completamente a aleta e a parede do tubo vertical. Cada etapa da simulação finaliza quando, como consequência da ação de qualquer uma das forças existentes, o líquido deixa de molhar as superfícies da aleta ou da parede vertical do tubo, ou seja, ocorre o aparecimento de um ponto seco.

2 - FORMAÇÃO DA MALHA NO DISPOSITIVO SIMULADO

A Fig. 3 esquematiza a malha adotada para as superfícies da aleta e da parede vertical do tubo respectivamente. Ressalta-se, como pode-se observar através da Fig. 3, que a superfície superior da aleta possui sua discretização no sentido positivo na direção radial, ou seja, o índice "I" varia de 1 até NR no sentido de crescimento do raio da aleta, enquanto que para a superfície inferior o índice "I" varia de 1 até NR no sentido do decréscimo do raio da aleta, salientando que os índices nodais para um volume de controle são mantidos em ambas superfícies.

3 - MODELO MATEMÁTICO

Neste trabalho, as equações básicas da continuidade e da quantidade de movimento linear, são explicitadas, inicialmente para um caso geral, e posteriormente segundo cada volume de controle, conforme a superfície do trocador estudada, associadas com as seguintes hipóteses simplificadoras: regime permanente, propriedades físicas do líquido constantes, fluido newtoniano, regime laminar e pressão estática desprezível.

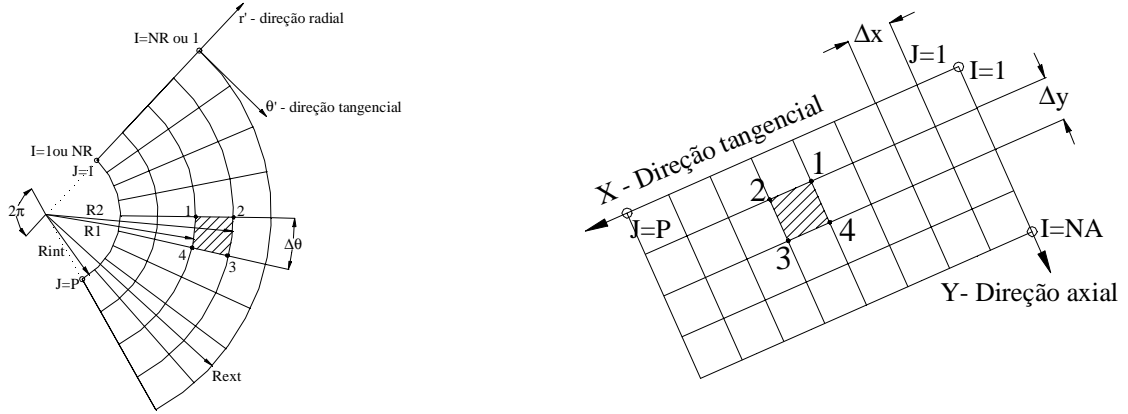


Figura 3 – Formação da malha nas superfícies da aleta e da parede vertical do tubo.

3.1 - Equação da Continuidade

A partir da equação básica do balanço de massa, em sua forma integral e, inserindo as hipóteses simplificadoras, obtém-se:

$$\oiint_{SC} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1)$$

Superfícies superior e inferior da aleta

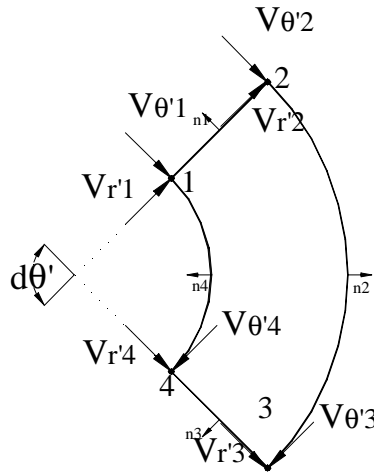


Figura 4 – Representação dos vetores velocidade em um V. C. da superfície da aleta.

$$\oiint_{sc} \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \frac{\int_{R_i}^{R_{i+1}} \int_0^{\delta_1} V_{\theta'1} \cdot dz' \cdot dr' + \int_{R_i}^{R_{i+1}} \int_0^{\delta_2} V_{\theta'2} \cdot dz' \cdot dr'}{2} + \frac{\int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_2} V_{r'2} \cdot dz' \cdot R_{i+1} \cdot d\theta' + \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_3} V_{r'3} \cdot dz' \cdot R_{i+1} \cdot d\theta'}{2} \quad (2)$$

$$+ \frac{\int_{R_i}^{R_{i+1}} \int_0^{\delta_3} V_{\theta'3} \cdot dz' \cdot dr' + \int_{R_i}^{R_{i+1}} \int_0^{\delta_4} V_{\theta'4} \cdot dz' \cdot dr'}{2} - \frac{\int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_1} V_{r'1} \cdot dz' \cdot R_i \cdot d\theta' + \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_4} V_{r'4} \cdot dz' \cdot R_i \cdot d\theta'}{2} = 0$$

Parede vertical do tubo

$$\oiint_{sc} \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \frac{1}{2} \left[\int_0^{\Delta x \delta_1} \int_0^{\Delta y \delta_2} V_{y1} \cdot dz \cdot dx + \int_0^{\Delta x \delta_2} \int_0^{\Delta y \delta_3} V_{y2} \cdot dz \cdot dx \right] + \frac{1}{2} \left[\int_0^{\Delta y \delta_2} \int_0^{\Delta x \delta_3} V_{x2} \cdot dz \cdot dy + \int_0^{\Delta y \delta_3} \int_0^{\Delta x \delta_4} V_{x3} \cdot dz \cdot dy \right] \quad (3)$$

$$+ \frac{1}{2} \left[\int_0^{\Delta x \delta_3} \int_0^{\Delta y \delta_4} V_{y3} \cdot dz \cdot dx + \int_0^{\Delta x \delta_4} \int_0^{\Delta y \delta_1} V_{y4} \cdot dz \cdot dx \right] - \frac{1}{2} \left[\int_0^{\Delta y \delta_1} \int_0^{\Delta x \delta_2} V_{x1} \cdot dz \cdot dy + \int_0^{\Delta y \delta_4} \int_0^{\Delta x \delta_3} V_{x4} \cdot dz \cdot dy \right] = 0$$

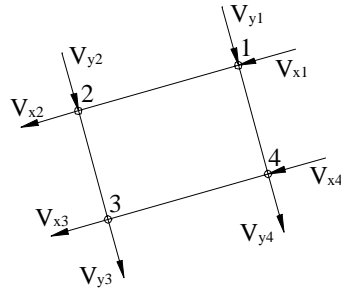


Figura 5 – Vetores velocidade em um V. C. da parede vertical do tubo.

3.2 - Equação da Quantidade de Movimento

A partir da equação básica do balanço de quantidade de movimento, em sua forma integral e, inserindo as hipóteses simplificadoras, obtém-se:

$$\vec{F}_S + \vec{F}_B - \rho \iiint_{VC} [2 \vec{w} \times \vec{V} + \vec{w} \times (\vec{w} \times \vec{R}_{int})] dv = \rho \oint_{SC} \vec{V} (\vec{V} \cdot d\vec{A}) \quad (4)$$

sendo F_S : Somatório das forças de superfície, F_B : Somatório das forças de campo, w : Velocidade angular, R_{int} : Raio interno do tubo.

Somatório das forças de superfície - Superfícies superior e inferior da aleta

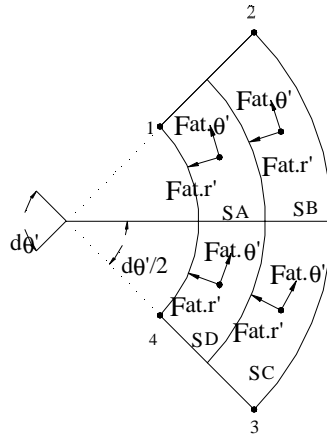


Figura 6 – Forças de superfície em um V. C. da superfície da aleta.

$$F_{at.r'} = -\mu \cdot b_{r'1} \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} r' \cdot dr' \cdot d\theta' - \mu \cdot b_{r'2} \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} r' \cdot dr' \cdot d\theta' - \quad (5)$$

$$\mu \cdot b_{r'3} \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} r' \cdot dr' \cdot d\theta' - \mu \cdot b_{r'4} \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} r' \cdot dr' \cdot d\theta'$$

$$F_{at.\theta'} = -\mu \cdot b_{\theta'1} \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} r' \cdot dr' \cdot d\theta' - \mu \cdot b_{\theta'2} \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} r' \cdot dr' \cdot d\theta' - \quad (6)$$

$$\mu \cdot b_{\theta'3} \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} r' \cdot dr' \cdot d\theta' - \mu \cdot b_{\theta'4} \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} r' \cdot dr' \cdot d\theta'$$

Somatório das forças de superfície – Parede vertical do tubo.

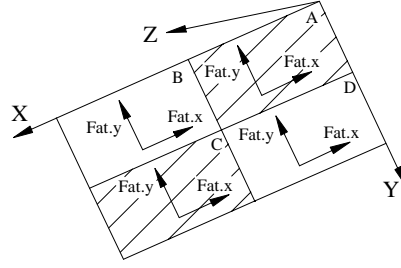


Figura 7 – Forças de superfície em um V. C. da parede vertical do tubo.

$$F_{at.x} = -\mu \cdot b_{x1} \int_0^{\frac{\Delta y}{2}} \int_0^{\frac{\Delta x}{2}} dx \cdot dy - \mu \cdot b_{x2} \int_0^{\frac{\Delta y}{2}} \int_{\frac{\Delta x}{2}}^{\Delta x} dx \cdot dy -$$

$$\mu \cdot b_{x3} \int_{\frac{\Delta y}{2}}^{\Delta y} \int_0^{\frac{\Delta x}{2}} dx \cdot dy - \mu \cdot b_{x4} \int_{\frac{\Delta y}{2}}^{\Delta y} \int_{\frac{\Delta x}{2}}^{\Delta x} dx \cdot dy$$

$$F_{at.y} = -\mu \cdot b_{y1} \int_0^{\frac{\Delta y}{2}} \int_0^{\frac{\Delta x}{2}} dx \cdot dy - \mu \cdot b_{y2} \int_0^{\frac{\Delta y}{2}} \int_{\frac{\Delta x}{2}}^{\Delta x} dx \cdot dy -$$

$$\mu \cdot b_{y3} \int_{\frac{\Delta y}{2}}^{\Delta y} \int_0^{\frac{\Delta x}{2}} dx \cdot dy - \mu \cdot b_{y4} \int_{\frac{\Delta y}{2}}^{\Delta y} \int_{\frac{\Delta x}{2}}^{\Delta x} dx \cdot dy$$

Somatório das forças de campo – Superfícies superior e inferior da aleta.

$$\vec{F}_p = \rho \vec{g} \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_1} r' \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' + \rho \vec{g} \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_2} r' \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' +$$

$$\rho \vec{g} \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_3} r' \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' + \rho \vec{g} \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_4} r' \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr'$$

Somatório das forças de campo – Parede vertical do tubo.

$$\vec{F}_p = \rho \vec{g} \int_0^{\frac{\Delta x}{2}} \int_0^{\frac{\Delta y}{2}} \int_0^{\delta_1} dz \cdot dy \cdot dx + \rho \vec{g} \int_0^{\frac{\Delta x}{2}} \int_{\frac{\Delta y}{2}}^{\Delta y} \int_0^{\delta_2} dz \cdot dy \cdot dx + \rho \vec{g} \int_{\frac{\Delta x}{2}}^{\Delta x} \int_0^{\frac{\Delta y}{2}} \int_0^{\delta_3} dz \cdot dy \cdot dx + \rho \vec{g} \int_{\frac{\Delta x}{2}}^{\Delta x} \int_{\frac{\Delta y}{2}}^{\Delta y} \int_0^{\delta_4} dz \cdot dy \cdot dx \quad (10)$$

Força centrífuga – Superfícies superior e inferior da aleta.

$$F_{cent.r'} = -\rho K_{r'} \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_1} V_{\theta'1}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' - \rho K_{r'} \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_2} V_{\theta'2}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr'$$

$$- \rho K_{r'} \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_3} V_{\theta'3}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' - \rho K_{r'} \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_4} V_{\theta'4}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr'$$

$$F_{cent.\theta'} = +\rho K_{\theta'} \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_1} V_{\theta_1}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' + \rho K_{\theta'} \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_2} V_{\theta_2}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' \quad (12)$$

$$+ \rho K_{\theta'} \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_3} V_{\theta_3}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' + \rho K_{\theta'} \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_4} V_{\theta_4}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr'$$

$$K_{r'} = \left(\frac{\cos^2 \phi \operatorname{sen}^2 \phi}{\cos^2 \beta} + \cos^4 \phi + \cos^3 \phi \tan \beta \operatorname{sen} \beta \right) \quad (13)$$

$$K_{\theta'} = \left(\cos^3 \phi \operatorname{sen} \phi \tan \beta - \frac{\cos^2 \phi \operatorname{sen} \phi \tan \beta}{\cos \beta} \right) \quad (14)$$

Força de Coriolis – Superfícies superior e inferior da aleta.

$$F_{cor.r'} = -2\rho \operatorname{Cos}^2 \phi \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_1} V_{\theta_1}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' - 2\rho \operatorname{Cos}^2 \phi \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_2} V_{\theta_2}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' \quad (15)$$

$$- 2\rho \operatorname{Cos}^2 \phi \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_3} V_{\theta_3}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' - 2\rho \operatorname{Cos}^2 \phi \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_4} V_{\theta_4}^2 \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr'$$

$$F_{cor.\theta'} = +2\rho \operatorname{Cos}^2 \phi \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_1} V_{\theta_1} \cdot V_{r_1} \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' + 2\rho \operatorname{Cos}^2 \phi \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_2} V_{\theta_2} \cdot V_{r_2} \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' \quad (16)$$

$$+ 2\rho \operatorname{Cos}^2 \phi \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_3} V_{\theta_3} \cdot V_{r_3} \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr' + 2\rho \operatorname{Cos}^2 \phi \int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_{\theta_{j+\frac{1}{2}}}^{\theta_{j+1}} \int_0^{\delta_4} V_{\theta_4} \cdot V_{r_4} \cdot dz' \cdot d\theta' \cdot dr'$$

Balanco da quantidade de movimento – Superfícies superior e inferior da aleta.

$$R' = -\rho \frac{\int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_1} V_{r_1} \cdot V_{\theta_1} \cdot dz' \cdot dr' + \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_0^{\delta_2} V_{r_2} \cdot V_{\theta_2} \cdot dz' \cdot dr'}{2} + \rho \frac{\int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_2} V_{r_2}^2 \cdot dz' \cdot R_{i+1} \cdot d\theta' + \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_3} V_{r_3}^2 \cdot dz' \cdot R_{i+1} \cdot d\theta'}{2} \quad (17)$$

$$+ \rho \frac{\int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_3} V_{r_3} \cdot V_{\theta_3} \cdot dz' \cdot dr' + \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_0^{\delta_4} V_{r_4} \cdot V_{\theta_4} \cdot dz' \cdot dr'}{2} - \rho \frac{\int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_1} V_{r_1}^2 \cdot dz' \cdot R_i \cdot d\theta' + \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_4} V_{r_4}^2 \cdot dz' \cdot R_i \cdot d\theta'}{2}$$

$$\theta' = -\rho \frac{\int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_1} V_{\theta_1}^2 \cdot dz' \cdot dr' + \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_0^{\delta_2} V_{\theta_2}^2 \cdot dz' \cdot dr'}{2} + \rho \frac{\int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_2} V_{\theta_2} \cdot V_{r_2} \cdot dz' \cdot R_{i+1} \cdot d\theta' + \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_3} V_{\theta_3} \cdot V_{r_3} \cdot dz' \cdot R_{i+1} \cdot d\theta'}{2} \quad (18)$$

$$+ \rho \frac{\int_{R_i}^{R_{i+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_3} V_{\theta_3}^2 \cdot dz' \cdot dr' + \int_{R_{i+\frac{1}{2}}}^{R_{i+1}} \int_0^{\delta_4} V_{\theta_4}^2 \cdot dz' \cdot dr'}{2} - \rho \frac{\int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_1} V_{\theta_1} \cdot V_{r_1} \cdot dz' \cdot R_i \cdot d\theta' + \int_{\theta_j}^{\theta_{j+\frac{1}{2}}} \int_0^{\delta_4} V_{\theta_4} \cdot V_{r_4} \cdot dz' \cdot R_i \cdot d\theta'}{2}$$

Balanco da quantidade de movimento – Parede vertical do tubo.

$$X = -\frac{\rho \cdot \operatorname{Cos} \phi}{2} \left[\int_0^{\Delta x \delta_1} \int_0^{\Delta y \delta_1} V_{x_1} \cdot V_{y_1} \cdot dz \cdot dx + \int_0^{\Delta x \delta_2} \int_0^{\Delta y \delta_2} V_{x_2} \cdot V_{y_2} \cdot dz \cdot dx \right] + \frac{\rho \cdot \operatorname{Cos} \phi}{2} \left[\int_0^{\Delta y \delta_2} \int_0^{\Delta x \delta_2} V_{x_2}^2 \cdot dz \cdot dy + \int_0^{\Delta y \delta_3} \int_0^{\Delta x \delta_3} V_{x_3}^2 \cdot dz \cdot dy \right] \quad (19)$$

$$+ \frac{\rho \cdot \operatorname{Cos} \phi}{2} \left[\int_0^{\Delta x \delta_3} \int_0^{\Delta y \delta_3} V_{x_3} \cdot V_{y_3} \cdot dz \cdot dx + \int_0^{\Delta x \delta_4} \int_0^{\Delta y \delta_4} V_{x_4} \cdot V_{y_4} \cdot dz \cdot dx \right] - \frac{\rho \cdot \operatorname{Cos} \phi}{2} \left[\int_0^{\Delta y \delta_1} \int_0^{\Delta x \delta_1} V_{x_1}^2 \cdot dz \cdot dy + \int_0^{\Delta y \delta_4} \int_0^{\Delta x \delta_4} V_{x_4}^2 \cdot dz \cdot dy \right]$$

$$Y = -\frac{\rho \cdot \text{Cos}\phi}{2} \left[\int_0^{\Delta x \delta_1} \int_0^{\Delta y \delta_1} V_{y1}^2 \cdot dz \cdot dx + \int_0^{\Delta x \delta_2} \int_0^{\Delta y \delta_2} V_{y2}^2 \cdot dz \cdot dx \right] + \frac{\rho \cdot \text{Cos}\phi}{2} \left[\int_0^{\Delta y \delta_2} \int_0^{\Delta x \delta_2} V_{x2} \cdot dz \cdot dy + \int_0^{\Delta y \delta_3} \int_0^{\Delta x \delta_3} V_{x3} \cdot dz \cdot dy \right] \quad (20)$$

$$+ \frac{\rho \cdot \text{Cos}\phi}{2} \left[\int_0^{\Delta x \delta_3} \int_0^{\Delta y \delta_3} V_{y3}^2 \cdot dz \cdot dx + \int_0^{\Delta x \delta_4} \int_0^{\Delta y \delta_4} V_{y4}^2 \cdot dz \cdot dx \right] - \frac{\rho \cdot \text{Cos}\phi}{2} \left[\int_0^{\Delta y \delta_1} \int_0^{\Delta x \delta_1} V_{x1} \cdot dz \cdot dy + \int_0^{\Delta y \delta_4} \int_0^{\Delta x \delta_4} V_{x4} \cdot dz \cdot dy \right]$$

4 - APLICAÇÃO DO MÉTODO NUMÉRICO DE SOLUÇÃO

As equações do modelo matemático são integradas em cada direção do volume de controle, segundo a superfície em estudo, supondo um perfil de variação da componente em questão ao longo desta direção, onde é calculado as variáveis, que no presente estudo são as componentes do vetor velocidade e a espessura da película.

5 - RESULTADOS

Do que foi exposto neste trabalho, pode-se perceber que este tópico de pesquisa é bastante recente, pois apesar da sua grande aplicabilidade, não existe ainda definida uma metodologia de projeto. De uma maneira geral é um assunto aberto, necessitando para o seu completo entendimento um grande esforço teórico-experimental, para obtenção de dados experimentais, uma vez que não temos disponível na literatura resultados para validação do modelo proposto neste trabalho. A escolha, da maior parte dos resultados e conclusões apresentados sobre os fenômenos, será concentrada nos parâmetros que caracterizam o escoamento e o dispositivo analisado ou seja a largura da aleta, altura de tubo, ângulo de hélice e o número de Reynolds, correspondentes ao aparecimento de pontos secos, o mais interessante do ponto de vista técnico.

Assim, na tabela (1) é apresentado as propriedades físicas e os parâmetros de projeto dos fluidos simulados. A Fig.(8), apresenta para três diferentes tipos de fluidos, a altura crítica do tubo em função do seu raio, para que não ocorra secamento em qualquer ponto das superfícies pertencentes ao dispositivo. Neste gráfico observa-se que, para um determinado valor de raio tem-se o aumento da altura crítica do tubo respectivamente para a água, NaCl (25%) e álcool etílico (40%).

Significado físico	Nomenclatura	Valor
Nº de nós radiais	Nr	3
Nº de nós axiais	Na	3
Nº de nós tangenciais	P	25
Raio do tubo	R _t [m]	ver gráfico
Ângulo de elevação	β [graus]	0,5
Ângulo de hélice	φ [graus]	5
Largura da aleta	Aleta [m]	0,005
Altura do tubo	Alt [m]	ver gráfico
Número de Reynolds	Rey	1000
Viscosidade dinâmica	μ [Kg / m s]	ver tabela 1
Massa específica	ρ [Kg / m ³]	ver tabela 1

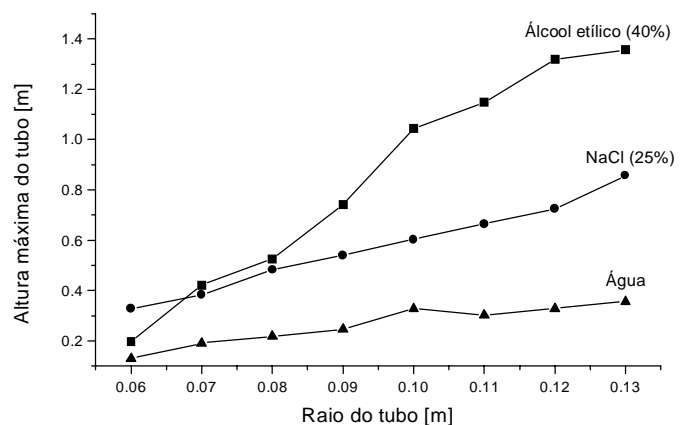


Figura 8 – Altura máxima do tubo em função do raio para os fluidos: água, NaCl(25%) e álcool etílico(40%).

O comportamento do aumento do ângulo de hélice máximo em função do número de Reynolds na entrada, para três tipos de fluidos e duas larguras de aletas, são apresentados na Fig. (9).

Tabela 1 – Propriedades físicas dos fluidos simulados

Fluido	Temperatura [°C]	Viscosidade Dinâmica [Kg / m s]	Massa específica [Kg / m ³]
Água	50	0.00089	1000
Álcool etílico (40%)	50	0.00120	940
NaCl (25%)	50	0.00131	1190

Significado físico	Nomenclatura	Valor
Nº de nós radiais	Nr	3
Nº de nós axiais	Na	3
Nº de nós tangenciais	P	25
Raio do tubo	R _t [m]	0,12
Ângulo de elevação	β [graus]	0,5
Ângulo de hélice	φ [graus]	ver gráfico
Largura da aleta	Aleta [m]	ver gráfico
Altura do tubo	Alt [m]	0,3
Número de Reynolds	Rey	ver gráfico
Viscosidade dinâmica	μ [Kg / m s]	ver tabela 1
Massa específica	ρ [Kg / m ³]	ver tabela 1

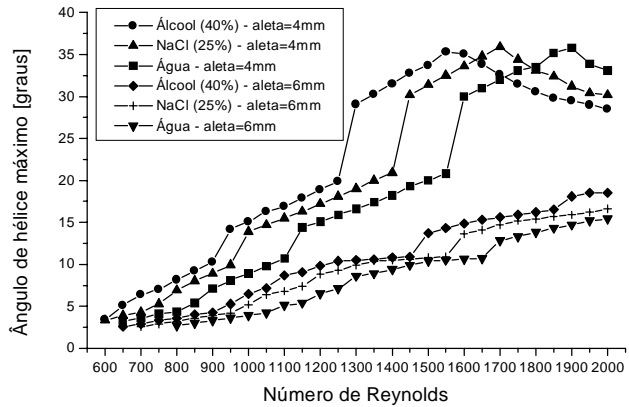


Figura 9 – Ângulo de hélice máximo em função do número de Reynolds (vazão total de entrada) para três tipos de fluidos e duas larguras de aleta.

A Fig.(10), apresenta a largura máxima da aleta em função do ângulo de hélice, para três substâncias e dois valores do número de Reynolds. Observa-se que com o aumento do ângulo de hélice tem-se a diminuição da largura máxima da aleta.

Significado físico	Nomenclatura	Valor
Nº de nós radiais	Nr	3
Nº de nós axiais	Na	3
Nº de nós tangenciais	P	25
Raio do tubo	R _t [m]	0,12
Ângulo de elevação	β [graus]	0,5
Ângulo de hélice	φ [graus]	ver gráfico
Largura da aleta	Aleta [m]	ver gráfico
Altura do tubo	Alt [m]	0,3
Número de Reynolds	Rey	ver gráfico
Viscosidade dinâmica	μ [Kg / m s]	ver tabela 1
Massa específica	ρ [Kg / m ³]	ver tabela 1

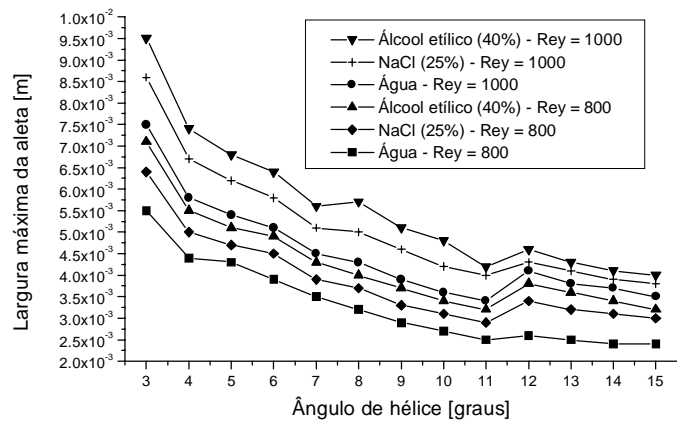


Figura 10 – Largura máxima das aleta em função do ângulo de hélice para três fluidos e dois valores para o número de Reynolds.

Na Fig.(11), é apresentado as mesmas variáveis da Fig.(10), mas mostra o comportamento da largura máxima da aleta somente para a água com número de Reynolds variando entre $800 \leq \text{Rey} \leq 2000$. Observa-se o aumento da largura máxima da aleta com o aumento do número de Reynolds e diminuição do ângulo de hélice.

AGRADECIMENTOS

Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP

Significado físico	Nomenclatura	Valor
Nº de nós radiais	Nr	3
Nº de nós axiais	Na	3
Nº de nós tangenciais	P	25
Raio do tubo	R _t [m]	0,12
Ângulo de elevação	β [graus]	0,5
Ângulo de hélice	φ [graus]	ver figura 6
Largura da aleta	Aleta [m]	ver figura 6
Altura do tubo	Alt [m]	0,3
Número de Reynolds	Rey	ver figura 6
Viscosidade dinâmica	μ [Kg / m s]	0,00089
Massa específica	ρ [Kg / m ³]	1000

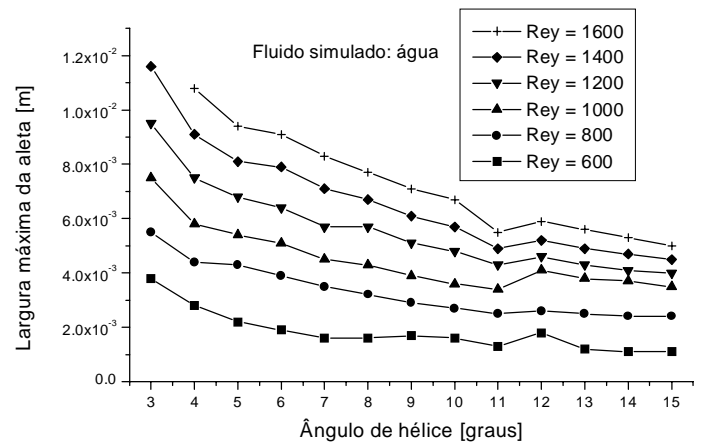


Figura 11 – Comportamento da largura máxima da aleta em função do ângulo de hélice para água com $800 \leq \text{Rey} \leq 2000$.

REFERÊNCIAS

- Armbruster, R. & Mitrovic, J., 1998, Evaporative cooling of falling water film on horizontal tubes, *Experimental thermal and fluid science* 18, pp.183-194.
- Fulford, G. D., 1964, *Handbook of heat and mass transfer*, vol. 2: Mass transfer and reactor design, Editor Nicholas P. Chermisinoff.
- Schwarzer, B. P., 1992, *Pompes a chaleur a absorption multi-etagees pour la production du chaud ou froid*, These docteur de INPL, France.
- Schwarzer, B. P., Rahbar, M. S. and Goff P. L., 1993, A spiral fin tube: A novel type of falling film heat and mass exchanger, *Eurotherm Seminar n. 33, Recent Developments in Heat Exchanger Technology*, Paris, 13-14 October.
- Tsai, B.-B. & Perez-Blanco, H., 1998, Limits of mass transfer enhancement in lithium bromide-water absorbers by active techniques, *International journal of heat and mass transfer*, vol. 41, n.15, pp. 2409-2416.

NUMERICAL SIMULATION OF THE HYDRODYNAMIC BEHAVIOR OF A FALLING FILM ON A VERTICAL TUBE WITH EXTERNAL SPIRAL FIN

Abstract. *The work consists of optimizing the distribution of a falling film liquid along a fin surface. The device, whose hydrodynamic it is modeled, consists of a spiral fin fastened externally to a vertical tube. The behavior of the liquid is studied flowing externally on this device, through a numerical simulation, being determined the better conditions so that it doesn't happen any dry point, in the surfaces superior and inferior of the spiral fin, as well as in the vertical wall of the tube. Through this simulation, it is maximized the relationship wet surface - mass flow and the project parameters, supplying subsidies to optimize the heat and mass transfer, processed in the flow.*

Key-words: *Falling film, Hydrodynamic, Numerical simulation, Mass transfer, External spiral fin.*