

IDENTIFICAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO EM TUBOS HORIZONTAIS PARA APLICAÇÃO EM REFRIGERAÇÃO

Pablo Jesus Alves de Paula, pablop@alunos.utfpr.edu.br¹
Raquel da Cunha Ribeiro da Silva, raqueld@utfpr.edu.br¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Profa. Laura Pacheco Bastos, 800 - Industrial, Guarapuava - PR

Resumo. O uso de refrigeradores comerciais certamente mudou a maneira como a humanidade estoca produtos. Contudo, a temperatura média na região refrigerada, cerca de -10°C , propicia a formação de camadas de gelo poroso na superfície do evaporador. A formação de gelo poroso pode acabar, em longo prazo, com espessas camadas, diminuindo a eficiência do sistema de refrigeração. Desse modo, é necessário entender como ele se forma afim de que se possa controlar melhor esse fenômeno, melhorando a eficiência energética de refrigeradores. A formação de gelo poroso é consequência da transferência de calor no evaporador, esta sofre influência do padrão de escoamento do fluido enquanto muda de fase. Uma vez que a mudança de fase de líquido para gasoso do fluido enquanto recebe calor não se dá de maneira instantânea há diversos padrões de escoamento durante a transição de fase. A partir de um Mapa de Arranjo de Fases proposto por Taitel e Dukler e da implementação de um modelo matemático foi possível identificar o padrão de escoamento para ajudar na compreensão da formação do gelo poroso.

Palavras chave: Escoamento multifásico. Transferência de Calor. Evaporadores.

Abstract. The commercial refrigeration has change the way that humanity stocks products. However, the average temperature on the cooling area, about -10°C , favours frost formation on the evaporator's surface. The frost can decrease the efficiency of the cooling system in long term with a large thickness. Therefore, it's necessary to understand frost formantion to set a better control on the phenomenon and, then, improve the cooling's efficiency. The frost formation it's consequence of heat transfer, and that one can be change by the flow patter on the tubes of the evaporator when there is a phase transition. The refrigerante goes along multiple patterns when it changes his fase from liquid to gas, considering that the phase transition isn't instataneous. From the implemetation of the Taitel and Dukler model it became possible to indentify the flow patter to help to understand the frost formation on evaporators.

Keywords: Multiphase flow. Heat transfer. Evaporator.

1. INTRODUÇÃO

À medida que se melhoram os estudos em eficiência energética e a implementação destes em equipamentos de refrigeração de uso cotidiano há, também, o incentivo para o uso mais racional na energia e maior comercialização de produtos de alto desempenho. A refrigeração comercial é responsável por uma parcela do consumo energético e os equipamentos atingem temperaturas próximas aos -10°C . Essa temperatura favorece o acúmulo de gelo poroso na superfície do evaporador.

A formação do gelo poroso se dá pelo contato do ar úmido com uma superfície abaixo de 0°C , o ar então se condensa e solidifica. Esse fenômeno pode ser observado, além de refrigeradores comerciais, em asas de aviões, sistemas de purificação de ar. Quando uma camada de gelo poroso se forma, pode-se observar uma queda na transferência de calor entre o meio refrigerado e o fluido refrigerante.

Segundo Lee & Ro (2001), inicialmente a camada de gelo poroso atua como uma aleta e melhora a transferência de calor. Contudo, após um tempo a estrutura da camada de gelo se altera e ela passa a atuar semelhantemente a um isolante térmico. Exigindo, desse modo, o degelo da área refrigerada. O degelo deve ser evitado a todo custo, pois, se não executado adequadamente, pode resultar em danos aos produtos refrigerados.

Compreender como os parâmetros ambientais e as condições do fluido influenciam na formação da camada de gelo poroso pode levar a uma melhor compreensão desse fenômeno, e, conseqüentemente, um aumento da eficiência de ambientes refrigerados.

Shaikh e Al-Dahhan (2007) descobriram que o coeficiente de transferência de calor aumenta rapidamente com velocidade do gás no fluxo borbulhante, enquanto essa variação é menos rápida no regime de fluxo turbulento da agitação. Além disso, eles demonstraram a identificação da transição do regime de fluxo com base na curva do coeficiente de transferência de calor.

Desse modo, esse trabalho propõe similar a partir de modelagem matemática o padrão de escoamento do fluido dentro dos tubos do evaporador, uma vez que o padrão do escoamento influencia o coeficiente de transferência de calor na superfície do evaporador e, conseqüentemente, a formação de gelo poroso. Entender o comportamento do escoamento facilitará compreender a formação de camadas de gelo poroso na superfície do evaporador.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O escoamento bifásico se caracteriza pela presença de duas fases em um mesmo fluxo, pode ser facilmente notado quando se despeja uma garrafa de água gaseificada em um copo. Ainda é possível encontrar sistemas bifásicos em dutos petrolíferos, usinas de energia geotérmica e nuclear, indústria espacial, química e de processamento. Neste caso, em caldeiras, evaporadores, condensadores e outros trocadores de calor.

Em sistemas de refrigeração, o evaporador retira calor do ambiente refrigerado a medida que o transfere para o fluido refrigerante. Nesse processo, após absorver o calor, o fluido em escoamento pelos dutos do evaporador muda de fase, de líquida para gasosa. Abaixo, na Fig. 1, há uma representação esquemática de Quibém (2005) na qual um tubo é aquecido de forma uniforme por um fluxo de calor, com um líquido próximo a temperatura de saturação.

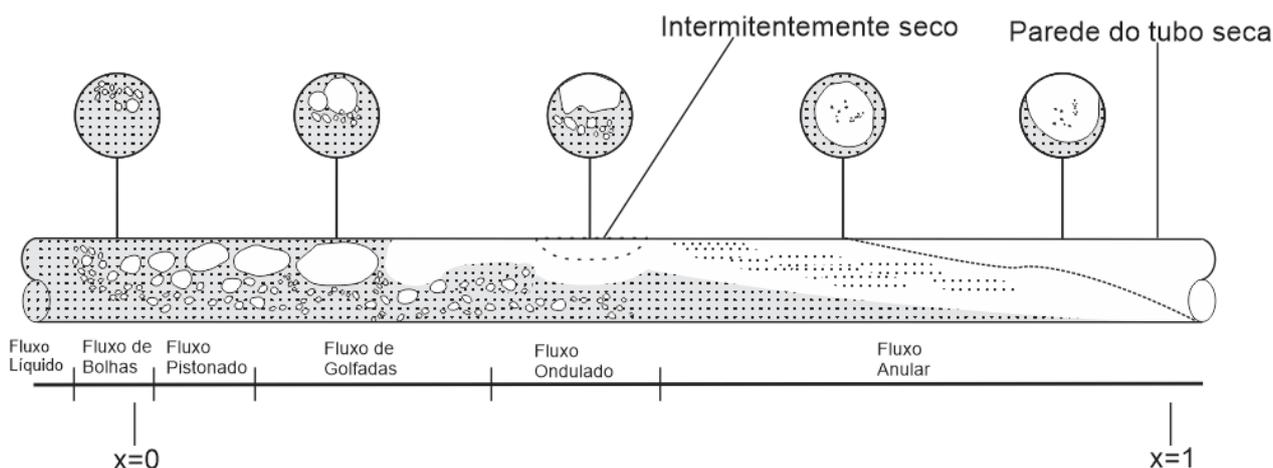


Figura 1. Padrões de escoamento de fluido em mudança de fase (Autoria Própria, 2021. Adaptado de Quibém, 2005)

Nessa figura ainda é possível notar que o fluido apresenta diversos padrões durante a mudança de fase. Inicialmente há a formação de bolhas, passando por padrões de golfadas, partículas de líquido suspensas, e, por fim, gás. Esses padrões de escoamento são brevemente descritos no Tab. 1 e foram apresentados por Aniceto (2008) *apud* Taital e Dukler (1976). As descrições do Quadro 1 são referentes ao um escoamento horizontal.

Tabela 1 – Descrição dos Padrões de escoamento (Autoria própria, 2020).

PADRÃO DE ESCOAMENTO	DESCRIÇÃO
Estratificado	Separação total das fases líquidas e gasosa pela ação da gravidade com escoamento contínuo das fases
Ondulado	Ondas na superfície da fase líquida causadas pelo aumento da velocidade da fase gasosa em escoamento estratificado
Golfadas	Com mais velocidade as ondas passam a ocupar toda a seção transversal do tubo, com algumas bolhas
Bolhas Alongadas	Ocorre a separação definida das golfadas em bolsas de gás, e as bolhas se deslocam, geralmente, no topo do tubo
Bolhas	A fase gasosa se encontra dispersa no líquido
Anular	Ocorre com alto fluxo de gás, faz com que o líquido se desloque para as paredes do tubo

Ainda é possível notar na Figura 2 uma representação esquemática de Lima (2011) dos padrões propostos por Taital e Dukler (1976) e subdivididos por Shoham (2006).

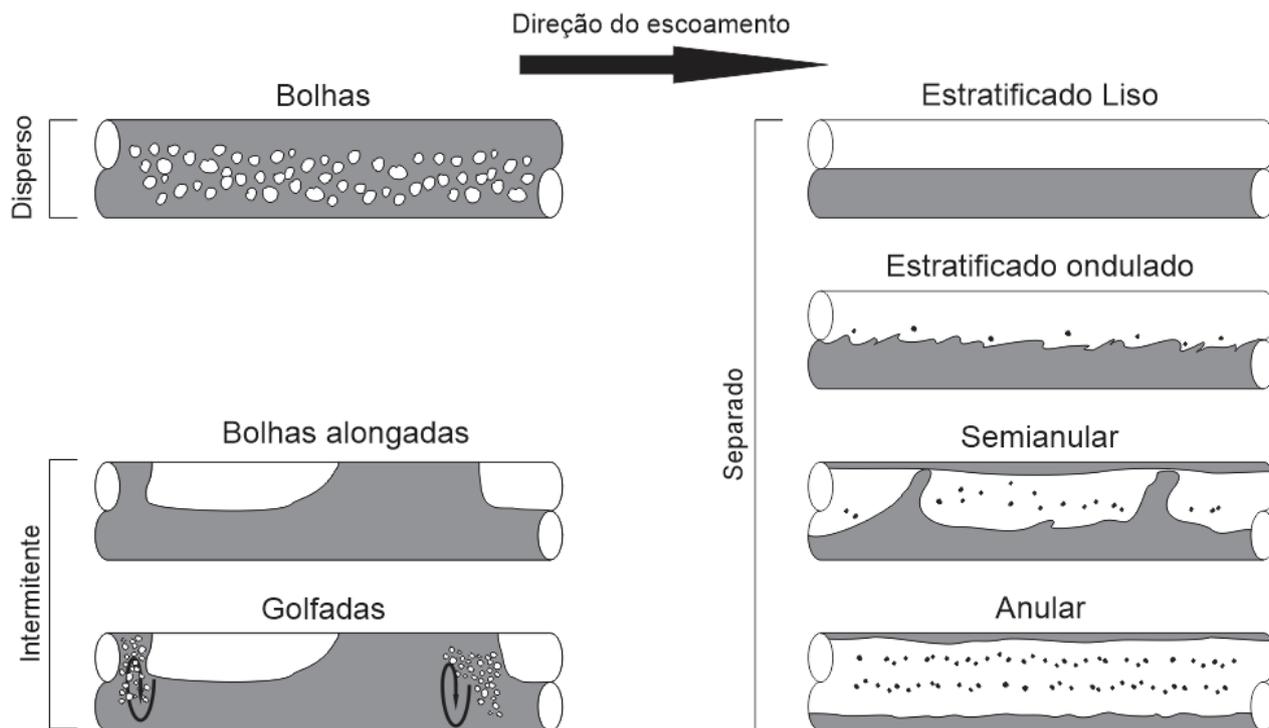


Figura 2 – Padrões de escoamento em tubos horizontais (Autoria própria, 2021. Adaptado de Lima, 2011)

Em 1954, Baker realizou alguns estudos iniciais e criou o primeiro Mapa de Arranjo de Fases a partir do estudo das dependências dos padrões de escoamento com o fluxo volumétrico e as propriedades dos fluidos. Em 1974, Mandhane *et al* propôs um mapa elaborado a partir da mistura água-ar, sendo esse o primeiro trabalho que levava em consideração a velocidade superficial das fases. Desse modo, em 1976, Taitel e Dukler, baseados em uma seleção empírica de dados, como velocidade superficial das fases, e mecanismos de transição de fluxo, propuseram um mapa utilizando o Parâmetro de Martinelli X , o Número de Froude do gás Fr_G e os Parâmetros T e K , todos definidos abaixo:

$$X = \left[\frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$Fr_G = \frac{G_G}{[\rho_G(\rho_L - \rho_G)D_g]^{1/2}} \quad (2)$$

$$T = \left[\frac{|(dp/dz)_L|}{g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$K = Fr_G Re_L^{1/2} \quad (4)$$

Pode-se entender melhor o implemento do mapa a partir da explicação abaixo:

Para implementar o mapa, primeiramente se determina o parâmetro de Martinelli X e Fr_G . Usando esses dois parâmetros no topo do gráfico, se as coordenadas deles estiverem em regime anular, então o escoamento tem padrão anular. Se as coordenadas de X e Fr_G estiverem na região esquerda baixa do topo do gráfico, então K é calculado. Usando K e X no meio do gráfico, o regime é identificado como sendo estratificado com ondas ou completamente estratificado. Se as coordenadas de X e Fr_G estiverem na região direita do topo do gráfico, então T é calculado. Usando T e X na parte baixa do gráfico o regime pode ser de bolhas ou intermitente (Golfadas e Pistonado). (Quibén, 2005, p.41, adaptado)

A partir dos Mapas de Arranjo e das Equações é possível fazer a modelagem matemática e a implementação em um software matemático para identificar os possíveis padrões de escoamento. Na Fig. 3 podemos ver o Mapa de Arranjo de Fases proposto por Taitel e Dukler (1976).

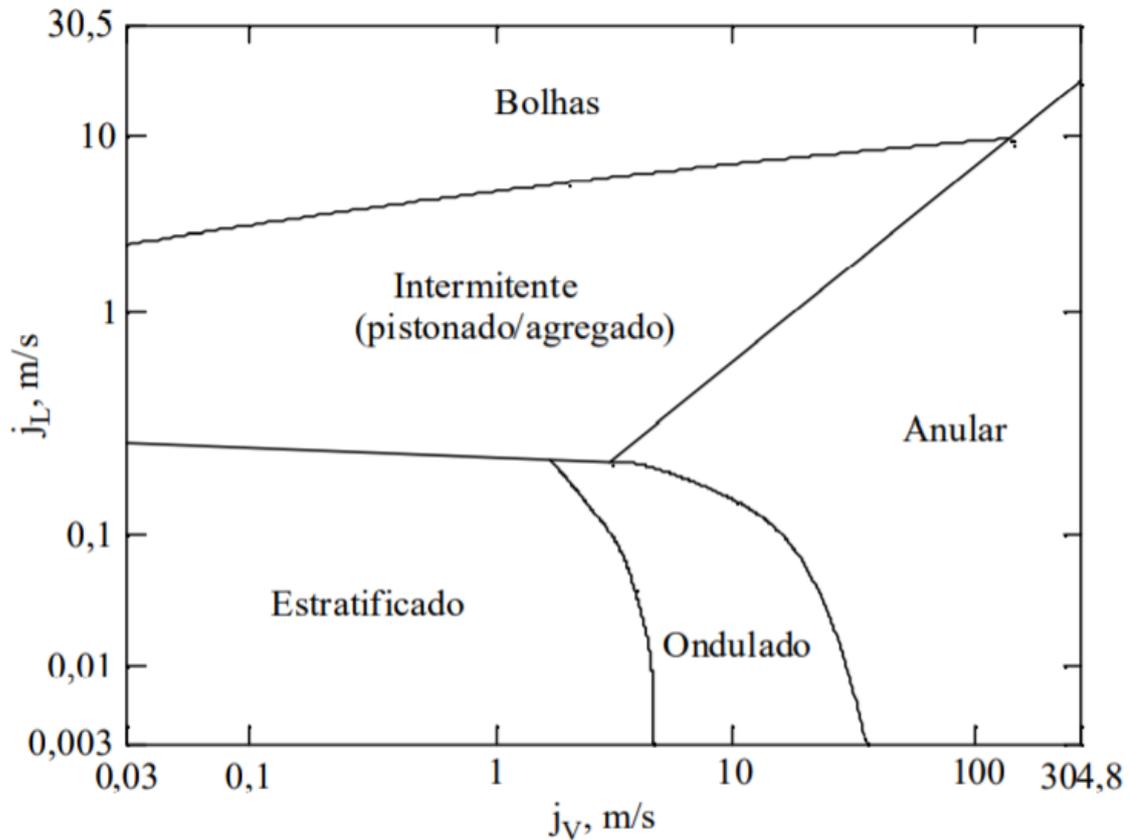


Figura 3 – Mapa de Arranjo de Fases de Taitel e Dukler (Bueno, 2004) *apud* (Taitel e Dukler, 1976).

Uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem em sistemas bifásicos, bem como a evolução da matemática computacional, facilitaram a identificação dos padrões de escoamento, ainda que haja muito trabalho para ser desenvolvido devido a complexidade desses fluxos. Os dados de entrada da implementação são as velocidades superficiais de cada fase do fluido.

3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a modelagem matemática a partir do Parâmetro de Martineli X, do Número de Froude do gás FrG e dos Parâmetros T e K por meio de software livre, sendo as velocidades superficiais das fases os dados de entrada. E, implementação do Mapa de Taitel e Dukler foram obtidas várias tabelas, das quais, algumas estão apresentadas abaixo:

Tabela 2 d=0,3mm						
JL \ JG	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	
0,50	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR	
0,75	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR	
1,00	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	
1,25	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	
1,50	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	

Tabela 3 d=1,0mm						
JL \ JG	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	
0,50	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR	
0,75	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	SEMIANULAR	
1,00	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	
1,25	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	
1,50	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	

Tabela 4 d=5,0mm						
JL \ JG	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	
0,50	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	
0,75	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	
1,00	GOLFADAS	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	SEMIANULAR	
1,25	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	SEMIANULAR	
1,50	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	

Tabela 5 d=10,0mm						
JL \ JG	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	
0,50	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	
0,75	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	
1,00	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	
1,25	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	BOLHAS	SEMIANULAR	
1,50	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	BOLHAS	

Tabela 6 d=15,0mm						
JL \ JG	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	
0,50	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	
0,75	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	
1,00	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	
1,25	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	
1,50	BOLHAS ALONGADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	

A medida que se estrangula o fluido, ou seja, se admite diâmetros menores do tubo em que esse escoar, o mapa se comporta diferente, uma vez que os dados passam a ser extrapolados. Essa observação é confirmada por Stuckenbruck (2020):

Os autores mostraram que esses parâmetros têm efeitos consideráveis sobre os resultados. [...] coordenadas universais para os mapas de regime de escoamento talvez nunca sejam conseguidas uma vez que, para cada transição, parâmetros relevantes tendem a ser distintos uns dos outros. (Stuckenbruck, 2020).

Contudo, o comportamento do mapa se torna muito próximo ao proposto por Taitel e Dukler (1976) quando se utiliza o diâmetro que eles utilizaram nos experimentos originais de 1976 e varia-se as velocidades superficiais das fases, validando, dessa forma, o modelo e a implementação, como pode ser visto nas Tab. 7 e Tab. 8.

Tabela 7 d=25,0mm						
JL \ JG	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	
0,50	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS
0,75	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS
1,00	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS
1,25	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS
1,50	BOLHAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS	GOLFADAS

Tabela 8 d=25,0mm						
JL \ JG	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	
1,00	SEMIANULAR	SEMIANULAR	ANULAR	ANULAR	ANULAR	ANULAR
3,00	SEMIANULAR	SEMIANULAR	ANULAR	ANULAR	ANULAR	ANULAR
5,00	BOLHAS	SEMIANULAR	ANULAR	ANULAR	ANULAR	ANULAR
7,00	BOLHAS	SEMIANULAR	ANULAR	ANULAR	ANULAR	ANULAR
9,00	BOLHAS	SEMIANULAR	ANULAR	ANULAR	ANULAR	ANULAR

Ainda que seja possível extrapolar o Mapa de Arranjo de Fases para valores de diâmetros muito pequenos, como tubos capilares, pode-se notar que, a medida que o diâmetro fica menor, algumas áreas do mapa diminuem, e passa a haver a predominância das áreas no canto superior direito. Desse modo, o líquido passa muito rápido do padrão de bolhas para o padrão semianular.

Sabe-se também que o padrão semianular é um padrão de transição para o anular. E, por fim, o padrão de escoamento influência na transferência de calor conforme é descrito na Fig. 4.

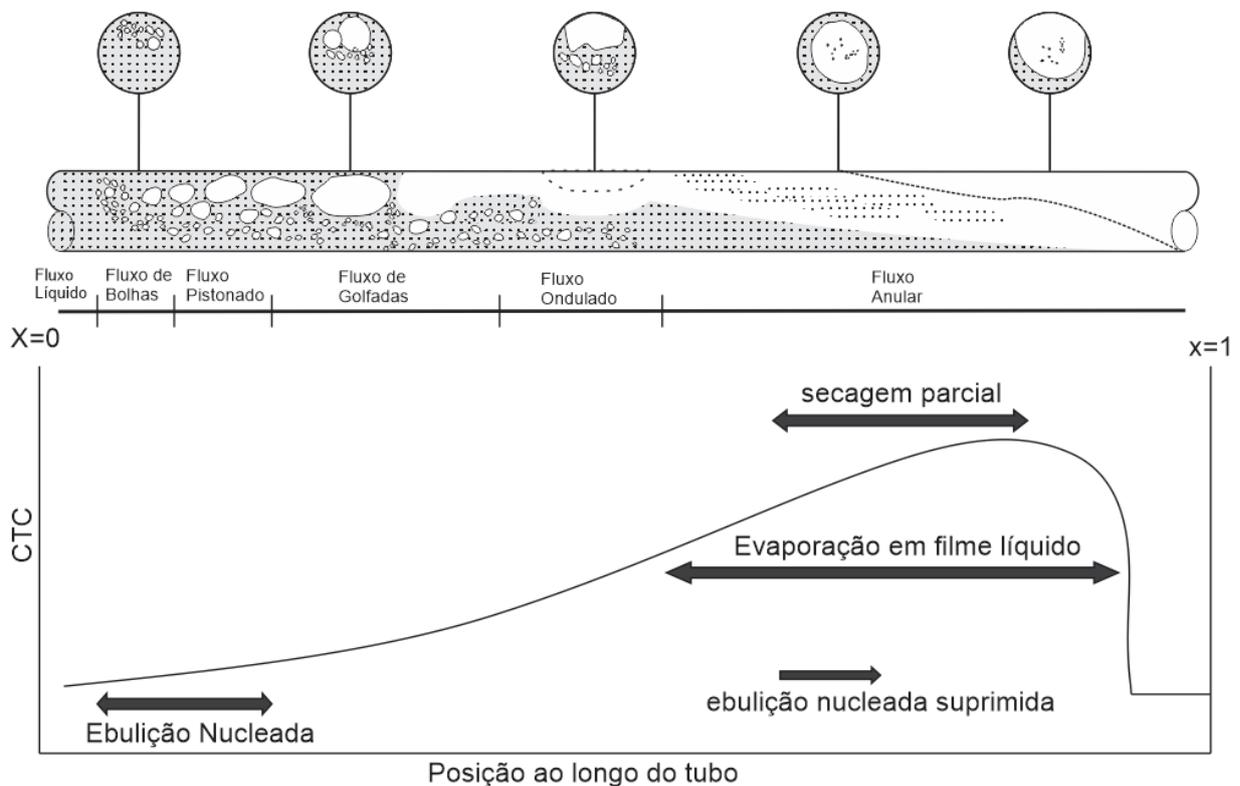


Figura 4 – Padrões de Escoamento e Transferência de Calor (Autoria própria, 2021. Adaptado de Bueno, 2004)

4. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista que a formação de gelo poroso afeta a transferência de calor entre o evaporador e o fluido refrigerante, bem como a fase do fluido, como visto na Fig. 4, a melhor compreensão de como o fluido está escoando dentro do tubo do evaporador irá ajudar, em trabalhos futuros, a compreender e minimizar a formação de gelo poroso superficial.

Ainda será possível, também, entender como o padrão de escoamento se relaciona com a formação do gelo poroso e como o Sistema de refrigeração pode se tornar mais eficiente. Uma vez que na Fig.4 é possível ver a influência de cada padrão de escoamento no Coeficiente de Transferência de Calor – CTC.

Estudos sobre o comportamento do CTC e da formação do gelo poroso superficial contribuirão para melhorar a eficiência de sistemas de refrigeração. Desse modo, a identificação do padrão de escoamento se caracteriza como um importante primeiro passo para a melhor compreensão desses fenômenos.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por tornar possível a minha pesquisa, à minha orientadora Professora Dra. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva, por toda a orientação e conhecimento passados durante a pesquisa, e ao Professor Dr. Marcelo Rafael Cosetin (in memoriam) pelos ensinamentos que facilitaram meus trabalhos de pesquisa bibliográfica e foram fundamentais.

6. REFERÊNCIAS

ANICETO, P.H.S.: **Desenvolvimento de Técnica Baseada em Fluorescência para a Medição de Escoamento Bifásico em Regime de Golfada**. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - PUC-RIO. Rio de Janeiro. 2008. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=11546@1>. Acessado em: 28/08/2020.

Ashfaq Shaikh and Muthanna H. Al-Dahhan **A Review on Flow Regime Transition in Bubble Column**. INTERNATIONAL JOURNAL OF CHEMICAL REACTOR ENGINEERING 2007.

BUENO, Sandhoerts Said. **Modelagem do escoamento ao longo de evaporadores de serpentina com tubos aletados**. 2004. 127 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/88893>. Acessado em: 01/09/2020.

LEE, Y.B. RO, S.T **An Experimental Study of Frost Formation on a Horizontal Cylinder Under Cross Flow**, Int. Journal of Refrigeration (2001) 468-474.

LIMA, Luiz Eduardo Melo. **Análise do modelo de mistura aplicado em escoamentos isotérmicos gás-líquido**. 2011. 147 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264105>. Acesso em: 28/08/2020.

Quibén, Jesús. **Experimental and analytical study of two-phase pressure drops during evaporation in horizontal tubes**. PhD thesis, University Pierre and Marie Curie, France and Spanish. 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/37421723> **Experimental and analytical study of two-phase pressure drops during evaporation in horizontal tubes** Acessado em 28/08/2020.

SHOHAM, O. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2006.

STUCKENBRUCK, Sidney. **Padrões de Escoamento. Introdução ao Escoamento Multifásico**. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - PUC-RIO Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://multifasico.usuarios.rdc.puc-rio.br/CHP07.pdf>. Acessado em: 27/08/2020.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.