

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**PABLO JESUS ALVES DE PAULA**

**DETERMINAÇÃO DO PADRÃO DE ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES PARA  
APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**

**GUARAPUAVA  
2022**

**PABLO JESUS ALVES DE PAULA**

**DETERMINAÇÃO DO PADRÃO DE ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES PARA  
APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**

**Flow pattern identification in tubes for cooling systems**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Coordenação de Engenharia Mecânica, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dra. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva

GUARAPUAVA  
2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

# DETERMINAÇÃO DO PADRÃO DE ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de curso apresentado  
à Coordenação de Engenharia Mecânica,  
como requisito parcial à obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica, da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dra. Raquel da Cunha Ribeiro  
da Silva

14/dezembro/2022

---

Raquel da Cunha da Silva Ribeiro  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Denise Alves Ramalho  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Paul Adrian Delgado Maldonado  
Mestrado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**GUARAPUAVA**  
**2022**

## RESUMO

O presente estudo mostra os mapas de padrões de fluxo para uma tubulação vertical, na faixa de velocidade superficial do líquido de 0,05-15m/s e para gás de 0,01-100 m/s. Para investigar o fluxo vertical, a transição dos padrões de escoamento é modelada em uma seção de teste circular com diâmetro interno de 0,3mm, 1,0mm, 5,0mm, 12,7mm e 25,4mm. O escoamento multifásico, é encontrado em diversos lugares, como na indústria petrolífera, química, nuclear, espacial e outras. Tornando assim, o tema importante para estudo por estar presente na realidade das engenharias e no sistema de produção de grandes indústrias. Em sistemas de refrigeração o escoamento interno que ocorre em grande parte do ciclo é um escoamento bifásico, líquido e vapor. Estudar o padrão de escoamento do fluido no evaporador ajuda a entender a formação do gelo poroso na parede externa do tubo e contribui para melhorar a eficiência da refrigeração. As transições dos padrões de escoamento em tubo vertical estão baseadas nos princípios de interação das forças, e verificadas de forma experimental. O objetivo deste estudo é usar ferramentas de análise numérica para determinar os regimes de escoamento em tubos para aplicação na refrigeração. Os resultados foram comparados com o mapa do regime de fluxo de Taitel e Dukler obtendo uma boa concordância.

**Palavras-chave:** escoamento bifásico; evaporador; mapa de arranjo de fases.

## **ABSTRACT**

The present study shows flow pattern maps for a vertical pipe, in the surface velocity range of liquid from 0.05-15 and for gas from 0.01-100 m/s. To investigate vertical flow, the transition of flow patterns is modeled on a circular test section with an inner diameter of 0,3mm, 1,0mm, 5,0mm, 12,7mm and 25,4mm. Multiphase flow is found in many places, such as in the oil, chemical, nuclear, space and other industries. Thus making it an important topic for study because it is present in the reality of engineering and in the production system of large industries. In flow systems the internal flow that occurs for most of the cycle is a two-phase flow, liquid and steam. Studying the fluid flow pattern in the evaporator helps to understand the formation of porous ice on the outer wall of the tube and contributes to improving the efficiency of the automobile. Transitions of flow patterns in a vertical pipe are tested in force interaction experiments and verified experimentally. The objective of this study is to use numerical analysis tools to determine flow regimes in pipes for transit application. The results were compared with the Taitel and Dukler flow regime map obtaining good agreement.

Keywords: bifasic flow; evaporator; flow patter map

## LISTA DE FIGURAS

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Figura 1</b>  | – Variação da Transferência de Calor com misturas de Flúidos .....            | 9  |
| <b>Figura 2</b>  | – Representação esquemática de um Refrigerador doméstico. ....                | 13 |
| <b>Figura 3</b>  | – Representação dos componentes de um sistema de refrigeração.....            | 14 |
| <b>Figura 4</b>  | – Estágios de formação do gelo poroso. ....                                   | 15 |
| <b>Figura 5</b>  | – Padrões de escoamento de fluído em mudança de fase.....                     | 17 |
| <b>Figura 6</b>  | – Quadro de descrição dos Padrões de escoamento.....                          | 17 |
| <b>Figura 7</b>  | – Padrões de escoamento em tubos horizontais.....                             | 18 |
| <b>Figura 8</b>  | – Alguns estudos sobre escoamentos multifásicos .....                         | 19 |
| <b>Figura 9</b>  | – Padrões de Escoamento vertical propostos por Taitel e Dukler (1980)...      | 20 |
| <b>Figura 10</b> | – Mapa de Arranjo de Fases de Taitel e Dukler .....                           | 23 |
| <b>Figura 11</b> | – Esquemática da instabilidade de Kelvin-Helmholtz. ....                      | 24 |
| <b>Figura 12</b> | – Padrão de golfadas de Taitel e Dukler .....                                 | 26 |
| <b>Figura 13</b> | – Mapa de Taitel e Dukler para escoamentos verticais com $d=25,4\text{mm}$ .. | 28 |
| <b>Figura 14</b> | – Algoritmo proposto Lima.....  | 29 |
| <b>Figura 15</b> | – Pontos e MAF para diâmetro de $25,4\text{mm}$ .....                         | 32 |
| <b>Figura 16</b> | – Pontos e MAF para diâmetro de $12,7\text{mm}$ .....                         | 33 |
| <b>Figura 17</b> | - Pontos e MAF para diâmetro de $5,0\text{mm}$ .....                          | 34 |
| <b>Figura 18</b> | - Pontos e MAF para diâmetro de $1,0\text{mm}$ .....                          | 35 |
| <b>Figura 19</b> | - Pontos e MAF para diâmetro de $0,3\text{mm}$ .....                          | 36 |
| <b>Figura 20</b> | – Frequência de Cada Fase .....   | 37 |
| <b>Figura 21</b> | - Padrões de Escoamento e Transferência de Calor.....                         | 37 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|     |   |
|-----|---|
| CFD | Fluidodinâmica Computacional (do inglês - <i>computational fluid dynamics</i> ) |
| MAF | Mapa de Arranjo de Fases  |
| VOF | Volume de Fluido (do inglês – Volume of fluid)                                  |

## SUMÁRIO

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>8</b>  |
| 1.1       | JUSTIFICATIVA .....   | 11        |
| 1.2       | OBJETIVOS.....  | 11        |
| 1.2.1     | Objetivo Geral .....  | 11        |
| 1.2.2     | Objetivos Específicos.....  | 12        |
| <b>2.</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | <b>13</b> |
| 2.1       | SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO .....   | 13        |
| 2.2       | GELO POROSO .....   | 14        |
| 2.3       | ESCOAMENTO BIFÁSICO .....   | 16        |
| 2.3.1     | Parâmetro de escoamentos bifásicos.....   | 20        |
| 2.3.2     | Mapas de Arranjos de Fases.....   | 21        |
| 2.3.3     | Mecanismos de Transição para Estado de Fluxo Constante de Taitel e Dukler (1976) em escoamentos horizontais.....      | 24        |
| 2.3.4     | Mecanismos de Transição para Estado de Fluxo Constante de Taitel e Dukler (1976) em escoamentos verticais .....       | 25        |
| <b>3.</b> | <b>ASPECTOS METODOLÓGICOS</b> .....   | <b>28</b> |
| <b>4.</b> | <b>RESULTADOS</b> .....   | <b>32</b> |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b> .....  | <b>40</b> |
|           | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | <b>41</b> |
|           | <b>APÊNDICE A - A FLOW PATTERN STUDY IN SMALL DIAMETER TUBES FOR COOLING</b> .....                                    | <b>43</b> |
|           | <b>APÊNDICE B - IDENTIFICAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO EM TUBOS HORIZONTAIS PARA APLICAÇÃO EM REFRIGERAÇÃO</b> ..... | <b>54</b> |



## 1. INTRODUÇÃO

A refrigeração está presente em várias aplicações como medicamentos, vacinas, alimentação, criogenia, refrigeradores em casas, ambientes comerciais, veículos entre outros. Tendo em vista a alta aplicação da refrigeração na vida cotidiana e o alto consumo de energia faz-se necessário compreender os fenômenos envolvidos com a finalidade de aumentar a eficiência desses sistemas.

Segundo dados da *United States Energy Information Administration* a refrigeração residencial é responsável por 16% do consumo de uma residência e 6% do consumo total do país. Enquanto no setor comercial os valores são 12% e 4%, respectivamente. (US IEA, 2021) Assim sendo, procurar por maneiras de otimizar o consumo de energia para refrigeração é um dos caminhos de se diminuir os custos e otimizar o processo. Como os ambientes refrigerados atingem temperaturas próximas de  $-10^{\circ}\text{C}$  há condições propícias para a formação de gelo poroso. (Silva 2014). O gelo poroso se forma na superfície do ambiente refrigerado devido a transferência de calor. Inicialmente atua como uma aleta, mas forma uma camada isolante com o passar do tempo.

O fluxo de tubo bifásico é uma ocorrência comum em muitas aplicações industriais, principalmente em sistemas de refrigeração. O objetivo dessa pesquisa é um estudo numérico implementado em ferramenta matemática para determinar o padrão de escoamento em tubos com a mistura água-ar a partir das velocidades de cada fase. A escolha da mistura água-ar serve para ter o entendimento do comportamento da transição fluidos em tubos para trabalhos futuros possa-se simular com outros fluidos refrigerantes, bem como implementar em outras linguagens e softwares de simulação fluidodinâmica.

O estudo do comportamento dos padrões de escoamento foi realizado por diversos autores, tais como Taitel e Dukler, 1976 e Mandhane, 1973. O método tradicional de identificação dos padrões de escoamento é a observação do comportamento do escoamento através de um tubo transparente, com a variação da velocidade dos fluidos envolventes. Mandhane, 1973 observou diferentes estudos de mapas de padrões de escoamento horizontal multifásico proposto por diferentes autores, no qual baseou para a elaboração do seu próprio mapa, após verificar que

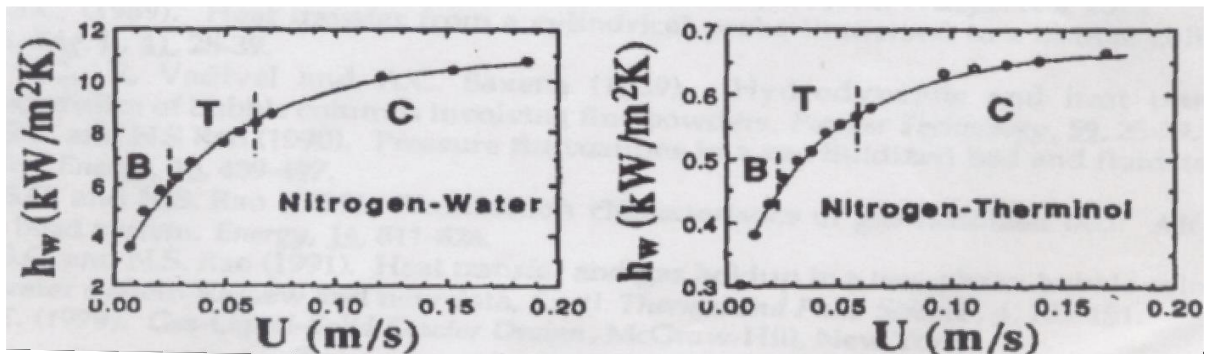
certas melhorias poderiam ser realizadas propôs o seu próprio modelo para o estudo do escoamento multifásico e apresentou um mapa de padrão de escoamento. Taitel e Dukler, 1976, propuseram uma modelagem matemática para a transição dos padrões de escoamento, além disso, com base na sua modelagem também foi proposto um mapa de padrão de escoamento. ROCHA (2022)

Taitel e Dukler (1976) apresentaram um modelo baseado em propriedades mecânicas que prevê a transições de fases em tubos horizontais ou levemente inclinados. Essas transições são representadas a partir de um grupo de adimensionais. Já Barnea (1987) revisou diversos trabalhos de Mapas de Arranjos de Fases e fez a validação experimental dos mesmos em tubulações horizontais, inclinadas e verticais. É possível estabelecer um Mapa de Arranjos de Fases tubos horizontais, inclinados e verticais.

Desta maneira conhecer o padrão de escoamento do sistema de refrigeração, pode aumentar a eficiência do sistema de refrigeração, já que pode evitar problemas como a de formação de gelo poroso nas superfícies do evaporador, já que a camada de gelo que se forma em ambientes refrigerados têm como característica de longo prazo atuar como um isolante térmico. (SILVA, 2014)

A formação do gelo poroso está relacionada com o escoamento interno devido a relação intrínseca de mistura das fases, pois a transferência de calor é mais intensa em padrões de escoamento mais agitados. Para entender melhor a formação de gelo e a troca de calor no evaporador é necessário saber como o refrigerante flui nos tubos do evaporador. Shaikh e Al-Dahhan (2007) *apud* Thimmapuram et al. (1992) mostraram que o coeficiente de transferência de calor melhora rapidamente com a velocidade superficial do gás no regime de bolhas (*bubbles*) (B) e menos rapidamente em regime turbulento (*turbulent*) (T) ou turbulento instável(*churn*) (C), como podemos ver na figura 1.

O fluido encontra-se em mudança de fase à medida que retira calor do ambiente refrigerado. Devido as diferentes propriedades das fases a transferência de calor não é uniforme e depende da distribuição das fases e do padrão de escoamento formado dentro do tubo do evaporador.



Fonte: Shaikh e Al-Dahhan (2007) *apud* Thimmapuram et al. (1992)

Por fim, entender o padrão de escoamento do fluido no evaporador ajuda a entender a formação do gelo poroso e contribui para melhorar a eficiência da refrigeração. (SILVA, 2014)

Foi utilizada a implementação em GNU Octave para determinar, numericamente, o padrão do escoamento de fluxo. Esses dados serão úteis para compreender melhor como se dá a transferência de calor de cada um dos fluidos estudados e, conseqüentemente, como cada fluido, influência na formação do gelo poroso. A modelagem matemática proposta por Taitel e Dukler (1976) e o mapa de padrão de escoamento horizontal proposto por Mandhane, 1973 são citados nesse estudo como ponto de partida. Enquanto o trabalho de Taitel e Dukler (1980) é implementado e analisado.

Já foram promovidos estudos prévios do padrão de escoamento da mistura água-ar em um tubo horizontal por simulação numérica e utilizando um mapa de padrões de fluxo criado por Taitel e Dukler em 1976. Esse trabalho foi desenvolvido em caráter de iniciação científica e apresentado no XXV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, sob o título de 'Estudo dos padrões de escoamento bifásicos em tubulações horizontais para aplicação em refrigeração'. Para esse trabalho será utilizada a implementação de um modelo vertical de escoamento.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Como a refrigeração consome parte da produção de energia mundial e é fundamental para a conservação de produtos faz-se necessário que se encontrem maneiras de otimizar e aumentar a eficiência do processo. Reduzindo, dessa maneira, os impactos e o consumo. Uma vez que parte da otimização do processo se passa pela formação de gelo poroso e essa formação está ligada a transferência de calor entre o fluido e o ambiente refrigerado, entender como o padrão de escoamento do fluido atua na transferência de calor pode ajudar a otimizar o processo.

Para tanto, como descreve BUENO (2014) o processo de ebulição se dá início a partir da formação de bolhas, seguido dos padrões pistonado, golfadas, agitado, e anular, até haja apenas gás. E, juntamente com a mudança de padrão de escoamento, há a mudança do mecanismo de ebulição, sendo inicialmente nucleada, passando por ebulição na interface líquido-gás até que esse mecanismo se torne dominante. BUENO (2014) continua que desse modo a transferência de calor é mais eficiente ao final da ebulição, quando o filme líquido se torna menos espesso, aumentando o coeficiente de transferência de calor e a eficiência do processo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem por objetivo geral realizar um trabalho teórico acerca do escoamento bifásico e vertical, assim como da transição dos padrões de escoamento nesta característica, visando conhecer com mais especificidade a influência da velocidade superficial de cada fluido nas características dos padrões de escoamento e comparar com o Mapa de Arranjos de fases obtido por Taitel & Dukler.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Determinar os padrões de escoamento de fluídos com base na velocidade superficial a partir do Mapa de Arranjo de Fases de Taitel e Dukler para três diâmetros diferentes.

Estudar a influência do diâmetro na simulação.

Determinar o padrão de escoamento de diferentes fluídos que podem ser aplicados na refrigeração a partir do Mapa de Arranjo de Fases proposto por Taitel e Dukler utilizando a velocidade das fases em tubos capilares ou quase capilares.

Determinar para quais condições o código e o modelo podem ser aplicados, bem como definir algumas limitações com a perspectiva de encontrar soluções futuras.

Compreender como o padrão de escoamento e a alteração do fluído afeta a transferência de calor no evaporador.

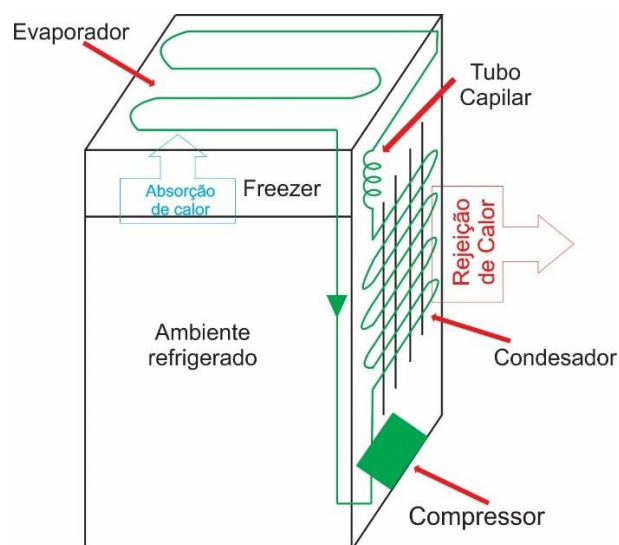
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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. Sabe-se que em algumas etapas do processo o escoamento é caracterizado como bifásico e que o padrão apresentado nesse tipo de escoamento influencia na transferência de calor e formação de gelo poroso na superfície do ambiente refrigerado.

### 2.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Um sistema de refrigeração simples deve passar por quatro processos. Contudo, antes disso é preciso definir a função desse. Primeiramente deve-se haver um compartimento com uma temperatura mais baixa que a exterior com a finalidade de conservar os produtos. Sabe-se que o calor flui do ambiente mais quente para o mais frio, dessa forma o compartimento a ser refrigerado deve ser termicamente isolado da vizinhança mais quente. (*HISTORY OF REFRIGERATION*, c2021)

**Figura 2** – Representação esquemática de um Refrigerador doméstico.

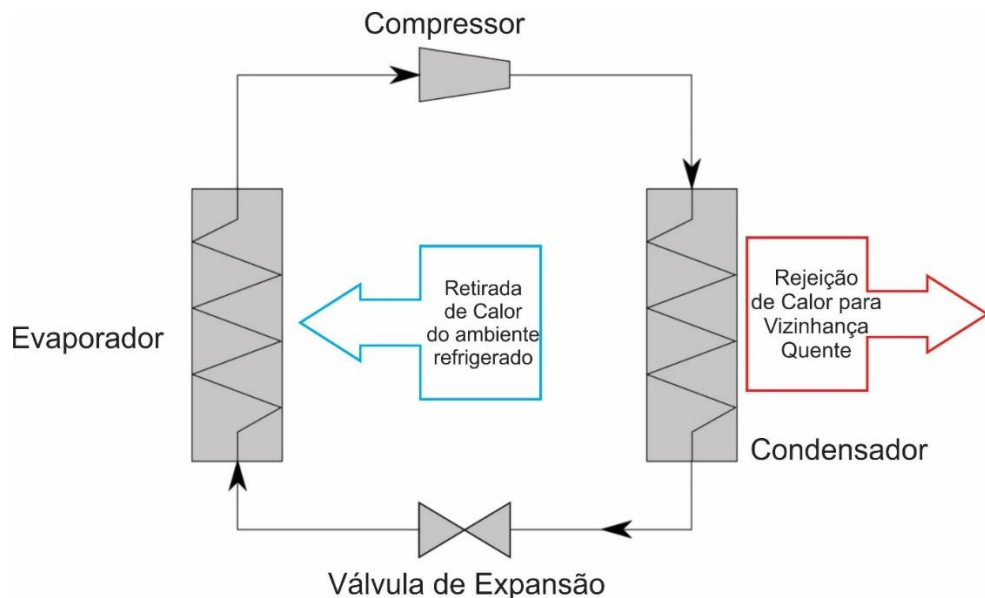


**Fonte:** Autoria Própria (2021)

Ainda que não haja 100% de isolamento térmico o máximo deve ser buscado. Como o sistema está o mais isolado possível é necessária uma maneira de extrair calor do ambiente refrigerado. Desse modo faz-se necessário que haja um sistema para tirar calor do ambiente resfriado e rejeitá-lo para a vizinhança. A fim de que haja máximo isolamento toda a troca de calor deve ocorrer nesse sistema. (ÇENGEL e BOLES, 2013)

Para tal a retirada de calor no ambiente refrigerado é feita pela transferência de energia térmica para um fluido refrigerante que percorre um ciclo fechado, esquematizado na Figura 3 e exemplificado na Figura 2. Esse mesmo fluido também entra em contato com a vizinhança para rejeitar o calor que retirou. Desse modo o fluido deve passar por alterações de estado para que possa absorver e rejeitar energia térmica. (ÇENGEL e BOLES, 2013) .

**Figura 3** – Representação dos componentes de um sistema de refrigeração



**Fonte:** Adaptado de MakiZen (2021)

## 2.2 GELO POROSO

Primeiramente parte-se do princípio de que gelo é a fase sólida da água, que se forma a partir da solidificação de água líquida. Diferentemente de gelo, o gelo poroso se forma a partir do processo de ressublimação, dessa forma há a formação

de espaços não preenchidos por sólido de água. Isso causa a diminuição da densidade e da condutividade térmica (Silva,2014) conforme podemos notar na Tabela 1.

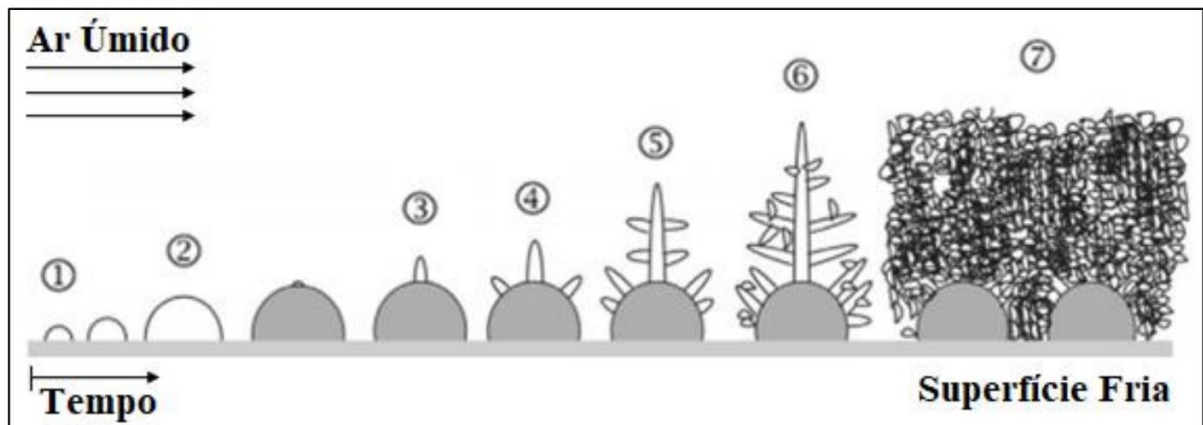
**Tabela 1** – Propriedades do Gelo e do Gelo poroso

| Grandeza                       | Gelo | Gelo Poroso |
|--------------------------------|------|-------------|
| $\kappa$ [ W / m . K ]         | 2,1  | 0,2         |
| $\rho$ [ kg / m <sup>3</sup> ] | 917  | 211         |

**Fonte:** Silva (2014)

Pode-se notar que o gelo poroso irá, então, ocupar uma área muito maior no ambiente refrigerado à medida que conduzirá muito menos calor para fora do sistema refrigerado (BIGLIA, 2018). Contudo, inicialmente o gelo poroso formará aletas, essas aletas aumentaram a superfície de contato para a transferência de calor em um momento que ainda não há bolsões de ar que atuarão como isolante térmico, então, momentaneamente haverá um aumento da transferência de calor entre o ambiente refrigerado e o fluido.(LEE; RO, 2001). A Figura 4 exemplifica as etapas de formação do gelo poroso.

**Figura 4** – Estágios de formação do gelo poroso.



**Fonte:** Silva (2014) apud Wang et al. (2018)

A formação do gelo poroso se dá, de maneira simplificada, pela nucleação por aglutinação de gotículas de vapor (representado de 1 a 3 na Figura 4), seguida da formação de aletas (de 4 a 6) e posteriormente pela deposição de novas nucleações e a formação de uma camada porosa de gelo (7). (Silva 2014)



## 2.3 ESCOAMENTO BIFÁSICO

O escoamento bifásico está presente em diversas aplicações de engenharia, sendo, portanto, um fenômeno bem comum quando há fluxo de fluídos em mudança de fase. Esse fenômeno ocorre quando há adição ou retirada de calor em um fluído, ou ainda alteração da pressão do mesmo. Ainda é possível encontrar fluídos escoando em mais de uma fase na indústria química e petroleira. Porém, ele é bem mais comum em sistemas de geração de energia e sistemas de transferência de calor. (BUENO, 2004)

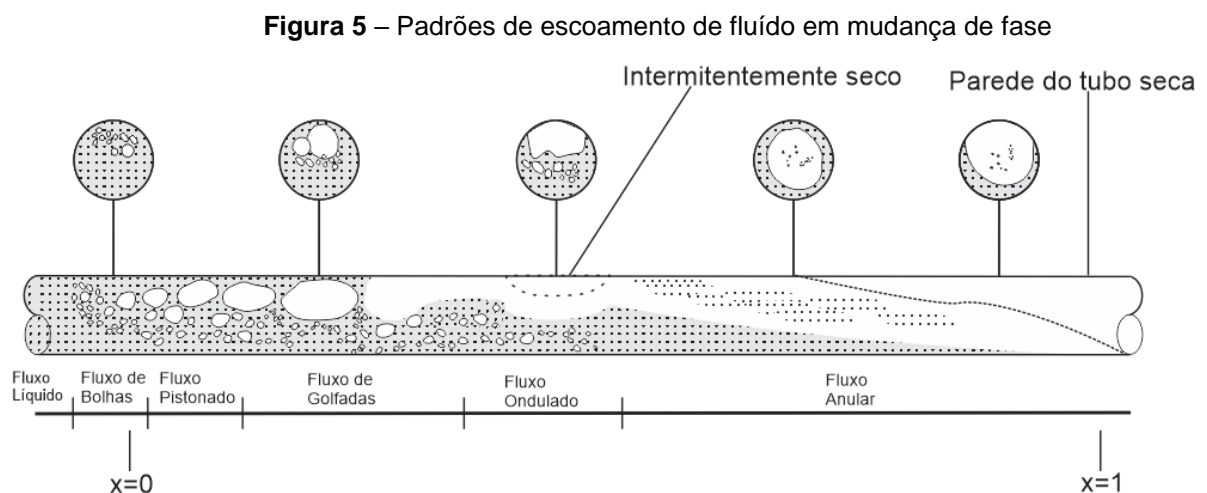
Em sistemas de refrigeração, por exemplo, há mudança de fase no condensado e no evaporador. No evaporador o fluído está recebendo calor que foi retirado do ambiente refrigerado. Durante esse momento ele muda da fase líquida para a fase gasosa. Como a mudança não é instantânea há diversos padrões formados entre as fases. (BUENO, 2004) O equacionamento do escoamento multifásico é caracterizado por muitas variáveis, esse grande número de variáveis leva a muitos grupos adimensionais quando a análise dimensional é aplicada. Segundo Rocha (2020) a natureza complexa se origina de motivos variados, sendo eles:

- A presença de mais de uma fase no escoamento, exigindo um número adicional de equações para o fechamento dos modelos matemáticos que expressam o fenômeno físico;
- No escoamento multifásico geralmente há uma distribuição espacial das fases, tornando-se um fenômeno de difícil quantificação. Em muitos casos a interface gás-líquido que separa as fases tem forma complicada, além de apresentar movimento aleatório;
- Há mudanças de padrões de escoamento, que dependem de características físicas e operacionais do sistema;
- Há grande influência uma das fases do escoamento na outra, devido a superfície de contato entre elas, o que mostra que as variáveis locais de cada fase, como a velocidade, a pressão etc., podem flutuar no tempo com amplitude considerável. As soluções podem ter abordagens empíricas, soluções exatas e simulações numéricas.

A modelagem do escoamento de duas ou mais fases é uma aproximação dos resultados de experimentos e soluções exatas das equações de conservação com as

condições de fronteira apropriadas. Podendo assim obter mais de um modelo, ou seja, quanto mais próximo o modelo físico estiver do fenômeno real, melhor é o modelo matemático e suas previsões (Shohan, 2005).

Em regimes horizontais a fase gasosa tende a migrar para a parte superior do tubo. (BUENO, 2004). Alguns padrões encontrados durante a mudança de fase em um tubo horizontal que recebe calor de forma constante estão na Figura 5. (QUIBÉN, 2005)



**Fonte:** Autoria Própria, 2020. Adaptado de Quibém, 2005.

Vale salientar que escoamentos bifásicos são fenômenos complexos afetados por inércia, viscosidade, pressão, tensão interfacial, molhamento de líquido na parede do tubo, transferência de massa e quantidade de movimento e calor entre as fases. Desse modo, para a situação específica de escoamento em tubos horizontais temos a seguinte descrição para as fases na Figura 6.

Essas descrições foram dadas por Aniceto (2008) tendo como base o trabalho inicial de Taitel & Dukler (1976). Essas descrições são complementadas na Figura 7, com a representação esquemática de cada uma das fases da maneira que foram propostas por Lima (2011). O modelo desenvolvido por Taitel & Dukler (1976) é especialmente para escoamento com presença de fluidos newtonianos.

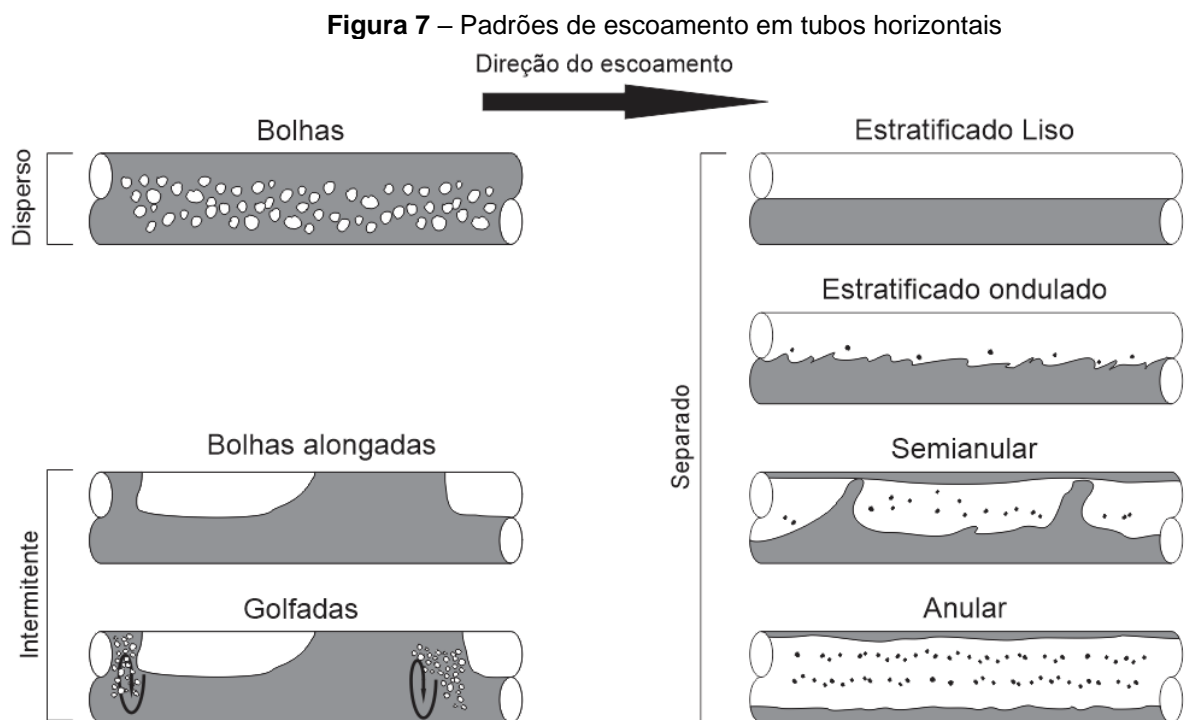
**Figura 6 – Quadro de descrição dos Padrões de escoamento**

| 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                         |

Fonte: Autoria própria, 2020

O modelo foi testado com sucesso principalmente em dados coletados em tubos de pequeno diâmetro sob condições de baixa pressão. (Shohan, 2005). O ponto de partida do modelo é o fluxo estratificado em equilíbrio. Supondo que ocorra um fluxo estratificado em equilíbrio, o nível de cada fase é determinável, através de análise de estabilidade para determinar se o fluxo é estável ou não.



Se o fluxo for estável, ocorre o fluxo estratificado. Se o fluxo não for estável, ocorrerá uma alteração no fluxo estratificado e o fluxo resultante o padrão é determinado (Shohan, 2005). Para esse modelo o mapa de padrão de escoamento proposto por Taitel e Dukler, 1976, são os dispostos na Figura 7.

Na literatura existe estudos diversos referente a mapas de padrões de escoamento multifásico, esses mapas são elaborados a partir de dados experimentais

obtidos pela análise do próprio autor ou baseados em dados e estudos de outros autores.

**Figura 8** – Alguns estudos sobre escoamentos multifásicos

| <b>Autor</b>              | <b>Diâmetro da tubulação (cm)</b> | <b>Fluidos utilizados</b>   | <b>Coordenadas do mapa</b>  |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---|
| Kosterin, 1949            | 2,54 - 5,1 - 7,62 - 10,62         | ar-água                     | Velocidade superficial do gás e velocidade média do gás e do líquido  |
| Bergelin e Gazley, 1949   | 2,54                              | ar-água                     | Vazão mássica do gás e do líquido                                     |
| Abou Sabe e Johnson, 1952 | 2,21                              | ar-água                     | Vazão mássica do gás e do líquido                                     |
| Alves, 1954               | 2,54                              | ar-água/óleo                | Velocidade Superficial do gás e do líquido                            |
| Baker, 1954               | dados de outros autores           | óleo-gás                    | Vazão volumétrica do gás  |
| White e Huntington, 1955  | 2,54 - 3,8 - 5,1                  | ar/ gás natural - água/óleo | Vazão volumétrica do gás e do líquido                                 |
| Hoogendorn, 1959          | 2,54 - 9,1 - 14                   | ar-água/óleo                | Velocidade superficial do gás e velocidade média do gás e do líquido  |
| Govier e Omer, 1962       | 2,54                              | ar-água                     | Vazão volumétrica do gás e do líquido                                 |
| Eaton et al., 1967        | 5,1 - 10,16 - 43,2                | gás natural - água/óleo cru | Diferentes coordenadas  |
| Al-Sheikh et al., 1970    | banco de dados                    | variação de gás - líquido   | Diferentes coordenadas  |
| Govier e Aziz, 1972       | dados de outros autores           | ar-água/óleo                | X/velocidade superficial do líquido e Y/velocidade superficial do gás |
| Simpson, 19977            | 12,7 - 21,6                       | ar-água                     | Velocidade Superficial do gás e do líquido                            |
| Weisman, 1979             | 1,2 - 2,54 - 5,1                  | variação de gás - líquido   | Velocidade Superficial do gás e do líquido                            |

Fonte: Rocha (2020)

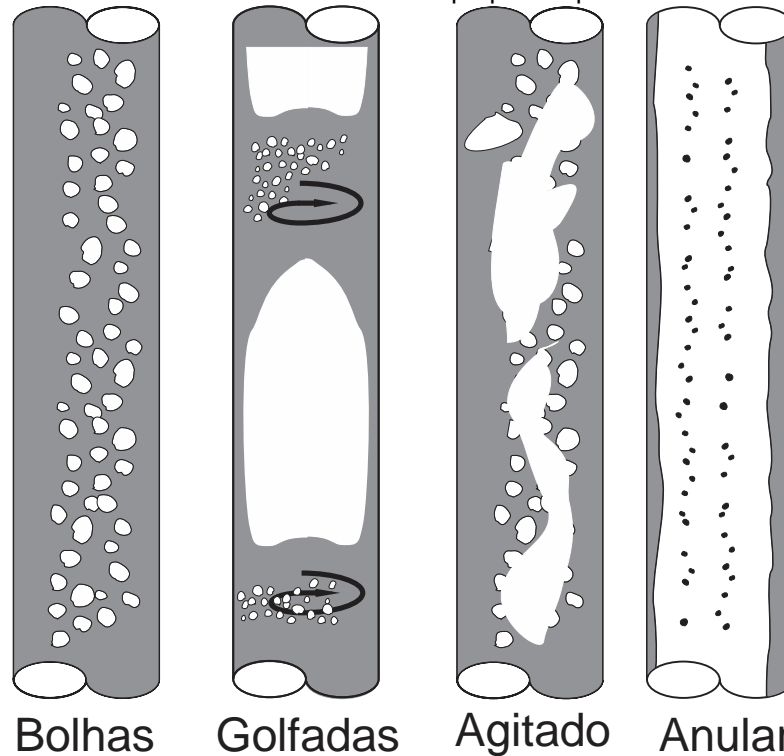
Os mapas propostos geralmente são compostos por linhas de transição, que representam fronteiras nas quais a ocorrência de um padrão de escoamento específico é observada. Rocha (2020) fez um estudo dos principais autores que se aprofundaram nesse tema.

Segundo Rocha (2020) existe um grau de incerteza nos Mapas de Arranjo de Fases. Desse modo, conhecer e utilizar outros mapas pode contribuir para diminuir o grau de incerteza com relação a modelagem um padrão de escoamento. Uma vez que

cada mapa possui algum tipo de limitação podemos citar, também, para conhecimento sobre o mapa proposto pode Mandhane et al.

Os estudos de Taitel e Dukler de 1980 ainda descrevem os padrões de escoamentos mostrados na figura 9.

**Figura 9** – Padrões de Escoamento vertical propostos por Taitel e Dukler (1980)



Fonte: Autoria própria 2022 adaptado de Taitel e Dukler (1980)

Taitel e Dukler (1980) descrevem o padrão de Bolhas como bolhas em um líquido contínuo. O padrão de golfadas como uma bolha de gás grande, devido a aglutinação, com diâmetro próximo do diâmetro do tubo. Já o padrão agitado é descrito como similar ao padrão de golfadas porém de maneira distorcida, com proporções não uniformes de líquido e gás. Por fim, o fluxo anular é caracterizado por uma fase contínua de gás com um filme líquido na parede do tubo.

### 2.3.1 Parâmetro de Escoamentos bifásicos

Considerando que um escoamento bifásico horizontal se dá com a presença de uma fase líquida e uma fase gasosa temos que a massa de fluido em fluxo será a soma das massas de cada fase:

$$\dot{m} = \dot{m}_v + \dot{m}_l \quad (1)$$

A razão  $x$  entre a massa de vapor e a massa total será:

$$x = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}} \quad (2)$$

Se um tubo possui área de seção transversal  $A$ , o Fluxo de Massa  $G$  será:

$$G = \frac{\dot{m}}{A} \quad (3)$$

A partir disso podemos definir as velocidades superficiais da fase líquida e a velocidade superficial da fase gasosa:

$$j_l = \frac{G*(1-x)}{\rho_l} \quad (4)$$

$$j_v = \frac{G*x}{\rho_v} \quad (5)$$

Onde  $\rho_l$  e  $\rho_v$  são as densidades da fase líquida e da fase gasosa, respectivamente.

Por fim, podemos definir a fração de vazio  $\alpha$  como sendo a razão de área de fase gasosa pela área total:

$$\alpha = \frac{A_v}{A} \quad (6)$$

Por se tratar de fluídos ainda podemos definir alguns outros parâmetros como o Número de Reynolds para a fase líquida e para a gasosa:

$$Re_l = \frac{G*D}{\mu_l} \frac{1-x}{1-\alpha} \quad (7)$$

$$Re_g = \frac{G*D}{\mu_g} \frac{x}{\alpha} \quad (8)$$

Onde  $D$  é o diâmetro do tubo.

### 2.3.2 Mapas de Arranjos de Fases

Com a finalidade de compreender melhor como um fluído escoava em um tubo em 1954 Baker propôs o primeiro Mapa de Arranjos de Fases - MAP a partir de um estudo das dependências dos padrões de escoamento com o fluxo volumétrico e das propriedades dos fluídos foi um pioneiro na área. Mandhane et al em 1974 propunha um mapa elaborado a partir da mistura água-ar, sendo esse o primeiro trabalho que levava em consideração a velocidade das fases. (QUIBÉN, 2005)

O Rocha (2020) diz que Mapa proposto por Mandhane et al (1974) levou em consideração outros trabalhos anteriores e procurou aplicar correções a esses mapas.

Contudo, ele procurou focar a correção a partir de fatores físicos, sendo o principal o diâmetro do tubo. Após a análise ele chegou aos seguintes fatores de correção:

$$X = \left( \frac{\rho_G}{0.0808} \right)^{0.2} \left( \frac{\rho_L}{62.4} * \frac{72.4}{\sigma} \right)^{0.25} \left( \frac{\mu_G}{0.018} \right)^{0.2} \quad (8)$$

$$Y = \left( \frac{\mu_L}{1.0} \right)^{0.2} \left( \frac{\rho_L}{62.4} * \frac{72.4}{\sigma} \right)^{0.25} \quad (9)$$

Em 1976, Taitel e Dukler se basearam em uma seleção empírica de dados para criarem o próprio Mapa de Arranjo de Fases, que pode ser visto na Figura 8. Para isso eles utilizaram as velocidades superficiais das fases e mecanismos de transição de fluxo. Dessa forma o mapa proposto por eles utiliza o Parâmetro de Martinelli  $X$ , o Número de Froude do gás  $Fr_G$  e os Parâmetros  $T$  e  $K$ , todos definidos abaixo:

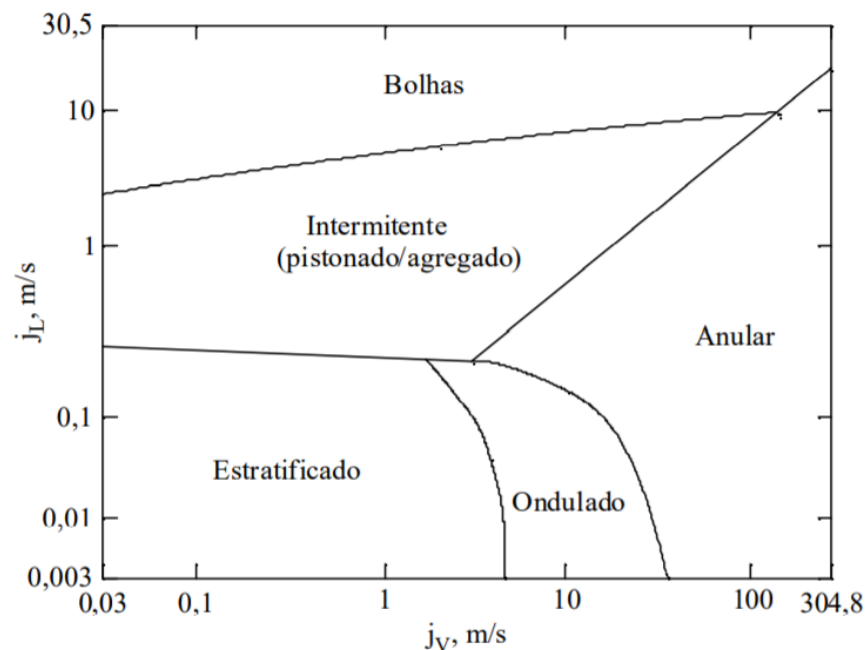
$$X = \left[ \frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G} \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$Fr_G = \frac{G_G}{[\rho_G(\rho_L - \rho_G)D_g]^{1/2}} \quad (11)$$

$$T = \left[ \frac{|(dp/dz)_L|}{g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$K = Fr_G Re_L^{1/2} \quad (13)$$

A implementação do MAF apresentado na Figura 9 se dá da seguinte maneira. Primeiramente se determina o Parâmetro de Martinelli  $X$  e o Número de Froude, utilizando esses dois parâmetros no topo do gráfico, se as coordenadas deles estiverem na região anular, o escoamento tem padrão anular. Se  $X$  e  $Fr_G$  estiverem na região esquerda baixa do topo do gráfico então deve-se calcular  $K$ . Com  $K$  e  $X$  no meio do gráfico o regime terá padrão estratificado ou estratificado com ondas. Se  $X$  e  $Fr_G$  estiverem na região direita do topo do gráfico deve-se calcular  $T$ . Com  $T$  e  $X$  na parte baixa do gráfico o regime pode ser bolhas ou intermitente. (QUIBÉN, 2005)

**Figura 10**– Mapa de Arranjo de Fases de Taitel e Dukler

**Fonte:** Bueno (2004) *apud* Taitel e Dukler (1976).

Em geral há dois tipos de MAF, sendo um baseado em coordenadas físicas, utilizando as velocidades superficiais das fases como coordenadas. E um com coordenadas adimensionais, nesse caso devem ser escolhidas as coordenadas adimensionais corretas apenas se o regime de transição depender apenas de dois grupos de adimensionais. Em ambos os casos os MAF são gerados, em sua maioria, a partir de dados experimentais. Logo, os resultados ficam limitados ao alcance dos dados obtidos. Sendo que em MAF baseados em coordenadas adimensionais há uma seleção arbitrária dos parâmetros, tornando-os menos confiáveis. (TAITEL ET AL, 1978)

O Mapa de Arranjos de Fases de Taitel & Dukler foi proposto a partir da modelagem física de cada transição e cada linha foi obtida matematicamente sem a necessidade de nenhum dado, a partir de um par de parâmetro adimensionais. Como o mecanismo de cada transição era diferente, não há pares comuns de parâmetros adimensionais. Contudo, o Parâmetro X é comum a todas as transições, possibilitando que o mapa seja construído em um único diagrama. (TAITEL ET AL, 1978)

Os estudos desse MAF se limitaram a um estado em que as proporções gás e líquido eram inicialmente constantes, ou seja, condições de equilíbrio de fluxo. Se



há uma pequena variação nessa proporção as transições de fase se darão a uma condição de quase-equilíbrio. (TAITEL ET AL, 1978)

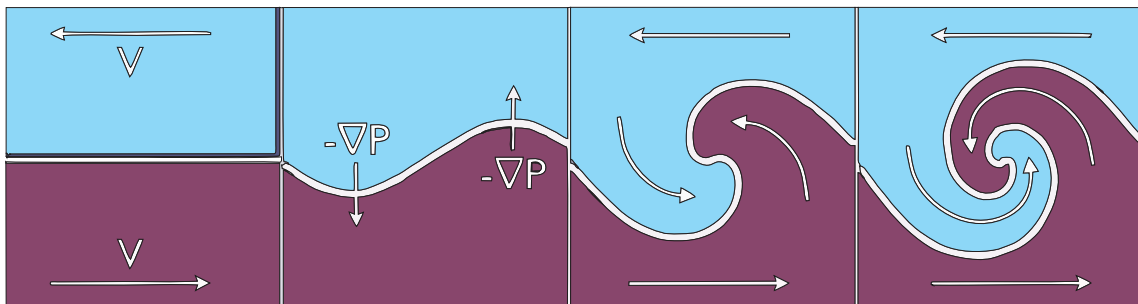
### 2.3.3 Mecanismos de Transição para Estado de Fluxo Constante de Taitel

#### e Dukler (1976) em escoamentos horizontais

Para esse caso tem se quatro possibilidades de transição:

**Transição entre estratificado e intermitente ou anular:** Nesse caso a transição se dará devido à instabilidade de Kelvin-Helmholtz. (TAITEL ET AL, 1978) Essa instabilidade é um fenômeno que se dá devido à queda de pressão causada por um distúrbio infinitesimal na interface dos fluídos, conforme a figura 9.

**Figura 11** – Esquemática da instabilidade de Kelvin-Helmholtz.



Fonte: Adaptado de Gilbert (2017)

Essa queda de pressão causa o aumento da velocidade da fase naquele ponto, de acordo com o princípio de Bernoulli. Uma vez que não há diferença de potencial de altura e a densidade do líquido permanece constante. Essa instabilidade pode levar a uma descontinuidade do escoamento. (GILBERT, 2017)

**Transição entre intermitente e anular:** nessa transição há um bloqueio de gás entre as passagens das ondas, que causam uma ponte, levando a formação de pistões ou golfadas. Com o aumento da velocidade do gás, o líquido tenta não conseguir manter a ponte e se move para as paredes do tubo. (TAITEL ET AL, 1978)

**Transição entre estratificado e estratificado ondulado:** Essa transição está relacionada com o fenômeno de formação de ondas em superfícies de líquidos, sendo um fenômeno complexo. (TAITEL ET AL, 1978)

**Transição entre intermitente e bolhas dispersas:** ocorre quando a velocidade do líquido é tão alta que a turbulência do escoamento tende a dispersar bolhas no fluido. (TAITEL ET AL, 1978)

Ainda no trabalho de Taitel et al (1978) é definido as equações que podem ajudar a prever o padrão de escoamento, de modo que seguem, respectivamente, as transições citadas:

Transição A:

$$u_G = \left(1 - \frac{h}{D}\right) \left\{ \frac{(\rho_L - \rho_G)gA_G}{\rho_G A_{L'}} \right\}^{1/2} \quad (14)$$

Transição B:

Equação (14) satisfeita e:

$$\frac{h}{D} < 0.5, \text{ anular}$$

$$\frac{h}{D} \geq 0.5, \text{ intermitente}$$

Transição C:

$$u_G \geq \left\{ \frac{400v_L(\rho_L - \rho_G)g}{\rho_G u_L} \right\}^{1/2} \quad (15)$$

Transição D:

$$u_G \geq \left\{ \left( \frac{4A_G}{S_i} \right) \left( \frac{g}{f_L} \right) \frac{(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right\}^{1/2} \quad (16)$$

Essas equações resultarão nas linhas de transição, e uma vez que as condições iniciais sejam definidas serão dependentes apenas das proporções de fluxo e do nível de líquido  $h$ . (TAITEL ET AL, 1978).

### 2.3.4 Mecanismos de Transição para Estado de Fluxo Constante de Taitel

#### e Dukler (1976) em escoamentos verticais

**Transição Bolhas-Golfadas:** Taitel e Dukler (1980) descrevem que as golfadas requerem um processo de aglomeração. Apenas esse processo poderia formar bolhas maiores, preenchendo o diâmetro do tubo. À medida que a proporção de gás aumenta, a densidade das bolhas também aumenta. Isso causa a aglomeração das bolhas. Se a bolha ascende no tubo em uma velocidade  $U_g$  essa velocidade se relaciona a velocidade superficial do gás como segue:

$$U_G = \frac{U_{GS}}{\alpha} \quad (17)$$

Em que  $\alpha$  é a proporção de vazio formado. Analogamente:

$$U_L = \frac{U_{LS}}{1-\alpha} \quad (18)$$

Sendo  $U_0$  a velocidade média relativa das bolhas em relação a fase líquida teremos:

$$U_{LS} = U_{GS} \frac{1-\alpha}{\alpha} - 1(1-\alpha)U_0 \quad (19)$$

Em 1960 Harmaty definiu uma relação de  $U_0$  para bolhas grandes:

$$U_0 = 1,53 \left[ \frac{g(\rho_G - \rho_L)\sigma}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \quad (20)$$

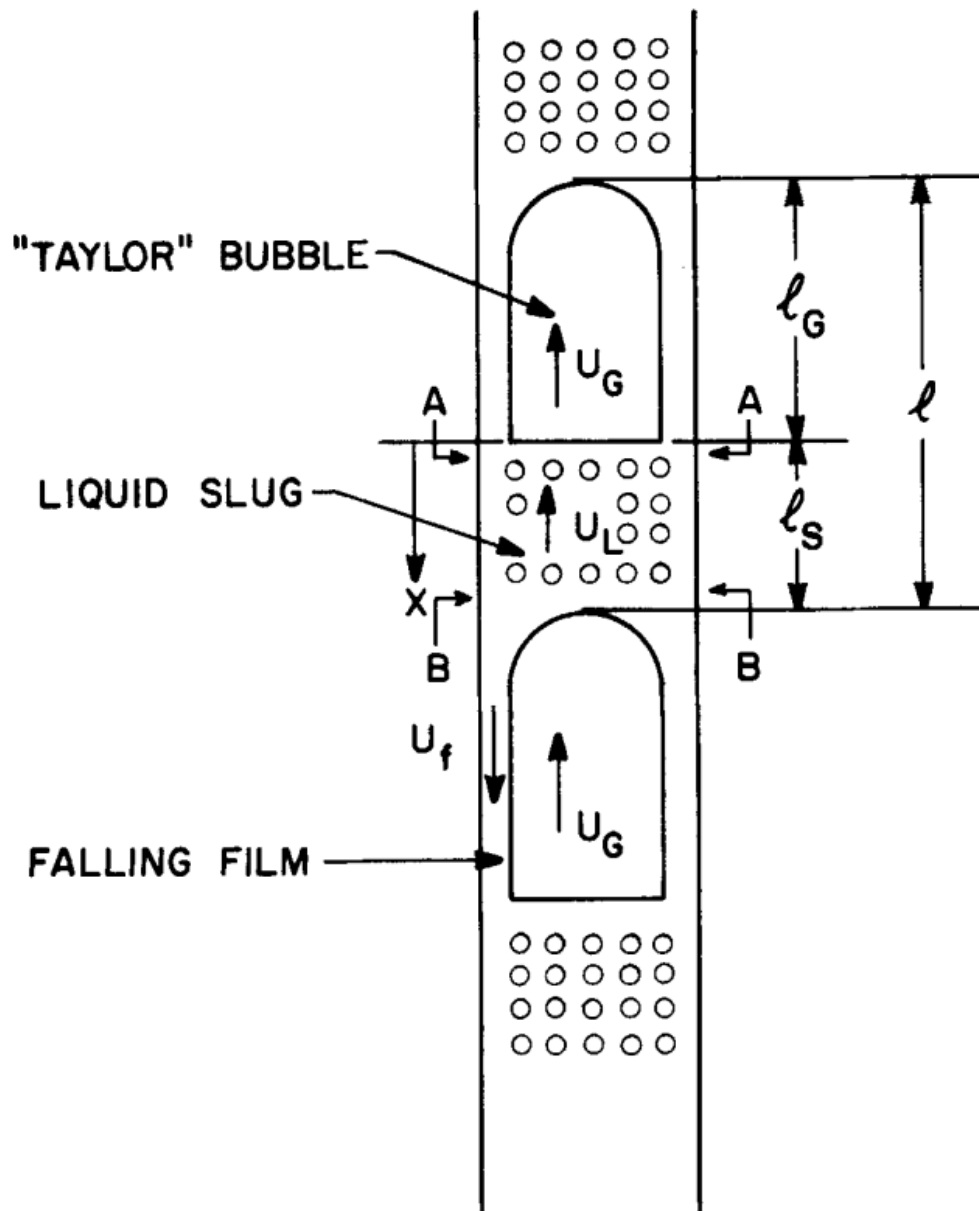
Definindo que a transição ocorre quando o valor de  $\alpha = 0,25$  teremos:

$$U_{LS} = 3U_{GS} - 1,15 \left[ \frac{g(\rho_G - \rho_L)\sigma}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \quad (21)$$

Desse modo, quanto maior a velocidade da fase gasosa e a velocidade da fase líquida se torna negligenciável, a curva teórica se aproxima de uma linear. Por outro lado, quando a velocidade da fase líquida aumenta há uma tendência de quebra das bolhas.

**Mecanismos de transição de golfadas para golfadas instáveis:** Taitel e Dukler (1980) dizem que essa é uma transição de difícil identificação uma vez que elas se confundem. Contudo, uma separação proposta diz que as golfadas são caracterizadas por uma ascendência constante das bolhas. Enquanto as golfadas instáveis podem apresentar verdadeiras pontes formadas em intervalos não-constantemente. Um exemplo de padrão de golfadas pode ser notado na Figura 10.

**Figura 12** – Padrão de golfadas de Taitel e Dukler



Fonte: Taitel e Dukler (1980)

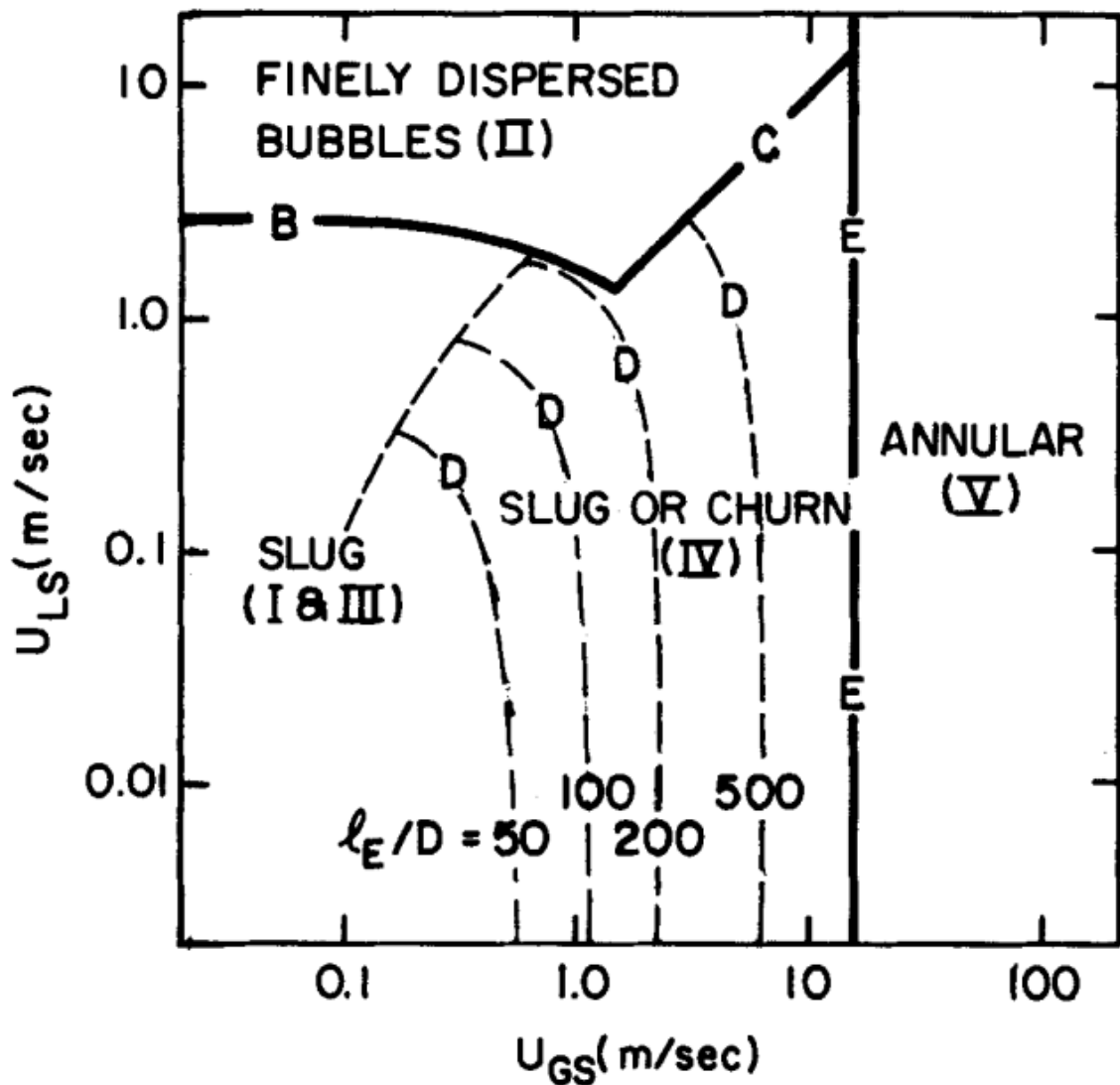
A velocidade da bolha de Taylor é definida pela relação:

$$U_G = 1,2U_L + 0,35[gD]^{1/2} \quad (22)$$

**Mecanismos de transição para anular:** para Taitel e Dukler (1980) quanto maior a proporção de gás, mais o fluxo se torna anular. Com a maior velocidade e proporção de gás o líquido tende a se depositar nas paredes do tubo. Se essa velocidade ou proporção diminuem há uma volta aos padrões de golfadas ou golfadas instáveis. Desse modo há uma velocidade mínima para o padrão anular definida por:

$$U_G = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ \frac{g(\rho_G - \rho_L)d}{\rho_G C_D} \right]^{1/2} \quad (23)$$

O mapa obtido por Taitel e Dukler (1980) pode ser visto na Figura 11.

Figura 13 – Mapa de Taitel e Dukler para escoamentos verticais com  $d=25,4\text{mm}$ 

A partir da modelagem proposta por Shoham (2005) e do modelo de Taitel e Dukler é possível fazer uma modelagem numérica do escoamento que retorna o possível padrão de escoamento. Posteriormente esses dados serão comparados com os mapas propostos por Taitel e Dukler.

### 3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Foi implementado em software um código para a predição numérica do possível padrão de escoamento com base nas transições de Taitel e Dukler a partir das curvas de transição e da interpretação do Mapa de Arranjo de Fases. As condições iniciais são descritas no Quadro 1.

**Quadro 1** - Valores iniciais

| Parâmetro               | Valor considerado       |
|-------------------------|-------------------------|
| Diâmetro interno        | 0,3mm-25,4mm            |
| Densidade do Líquido    | 998,2 kg/m <sup>3</sup> |
| Densidade do Gás        | 1,204 kg/m <sup>3</sup> |
| Viscosidade do Líquido  | 1,002 centipoise        |
| Viscosidade do Gás      | 0,00181 centipoise      |
| Tensão superficial      | 0,072 N/m               |
| Aceleração da Gravidade | 9,8m/s <sup>2</sup>     |
| Comprimento do Tubo     | 4m                      |

Fonte: Autoria Própria (2022)

Inicialmente foram definidas nove velocidades iniciais para a superfície da fase líquida e nove velocidades para a superfície da fase sólida. As velocidades adotadas para cada fase estão Quadro 2. O diâmetro de 25,4mm foi o primeiro a ser implementado, o mesmo diâmetro utilizado nos experimentos iniciais de Taitel & Dukler. Usará-se água como fase líquida e ar como fase gasosa.

**Quadro 2** – Quadro de Velocidades iniciais das fases (m/s).

| $J_L$ | $J_G$ |
|-------|-------|
| 0,01  | 0,01  |
| 0,05  | 0,05  |
| 0,1   | 0,1   |
| 0,5   | 0,5   |
| 1     | 1     |
| 1,25  | 2,5   |
| 2,5   | 5     |
| 5     | 10    |
| 10    | 50    |
| 15    | 100   |

Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 14** – Algoritmo proposto Lima

- inserir**  $J_G, J_L, J, \rho_G, \rho_L, \mu_G, \mu_L, \sigma, D, L, S, A, \theta$  e  $\varepsilon$
1. **se**  $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$  (TAITEL; DUKLER, 1976 apud SHOHAM, 2006) **então**
  2. atribuir  $E_D = 0, R_D = 0, \rho_C = \rho_G, \rho_F = \rho_L, \mu_C = \mu_G$  e  $\mu_F = \mu_L$
  3. determinar  $H_F, R_F$  e  $S_I$  utilizando o Algoritmo 4.2 e calcular  $\delta = H_F/D$
  4. **se**  $J_G < (1 - \delta)[(1 - R_F)^3 A \Delta \rho g \cos(\theta) / (\rho_G S_I)]^{1/2}$  **então**
  5.     **se**  $J_G < 2(1 - R_F)[R_F \mu_L \Delta \rho g \cos(\theta) / (0,01 \rho_G \rho_L J_L)]^{1/2}$  **então**
  6.         escoamento estratificado liso (separado)!
  7.     **senão,**
  8.         escoamento estratificado ondulado (separado)!
  9.     **finaliza se**
  10. **senão, se**  $\delta \leq 0,35$  **então**
  11.     escoamento anular (separado)!
  12. **senão,**
  13.     determinar  $C_{0,B}, V_{\infty,B}$  e  $R_S$  utilizando o Algoritmo 4.1
  14.     atribuir  $C_0 = C_{0,B}$  e  $(V_{G,J})_\alpha = V_{\infty,B}$ , para determinar  $\alpha$  utilizando a Equação 5.7 ou  $\alpha = 1 - R_S$
  15.     determinar  $\rho_S$  e  $\mu_S$  utilizando as Equações 4.4 e 4.5
  16.     determinar  $Re_S$  utilizando a Equação 5.31 e determinar  $C_{f,S}$  utilizando a Equação 5.30
  17.     **se**  $J_L \geq 2 R_S[(1 - R_S)A \Delta \rho g \cos(\theta) / (\rho_L S_I C_{f,S})]^{1/2}$  **então**
  18.         escoamento de bolhas (disperso)!
  19.     **senão,**
  20.         escoamento de golfadas (intermitente)!
  21.     **finaliza se**
  22. **finaliza se**
  23. **senão, se**  $10^\circ < \theta \leq 90^\circ$  (BARNEA et al., 1985 apud SHOHAM, 2006) **então**
  24.     determinar iterativamente o valor de  $J_{L,crit.}$  pela solução da equação implícita  $f(J_{L,crit.})$ , sendo:
    - $f(J_{L,crit.}) = J_G/J - (0,402 Fr^{6/5} Eo^{0,1} C_f^{2/5} - 0,175)^2 = 0$
    - $J = J_G + J_{L,crit.}, Fr = J/(\Delta \rho g D / \rho_L)^{1/2}$  e  $Eo = \Delta \rho g D^2 / \sigma$
    - $C_f$  é determinado utilizando a Equação 5.30 em função do  $Re = \rho_L J D / \mu_L$
  25.     **se**  $J_G \geq 3,1 [\Delta \rho \sigma g \sin(\theta)]^{1/4} / \rho_G^{1/2}$  **então**
  26.         escoamento anular (separado)!
  27.     **senão, se**  $J_G/J > 0,52$  e  $J_L \geq 0,48 J_G/0,52$  **então**
  28.         escoamento de bolhas uniformes (disperso)!
  29.     **senão, se**  $J_G/J \leq 0,52$  e  $J_L \geq J_{L,crit.}$  **então**
  30.         escoamento de bolhas uniformes (disperso)!
  31.     **senão, se**  $\theta > 60^\circ$  e  $J_L \geq 3 J_G - 1,15 (\Delta \rho \sigma g / \rho_L^2)^{1/4} \sin(\theta)$  **então**
  32.         escoamento de bolhas distorcidas (disperso)!
  33.     **senão, se**  $J_{L,crit.} < J_L < 0,48 J_G/0,52$  **então**
  34.         escoamento semianular (separado)!
  35.     **senão, se**  $\theta > 70^\circ$  e  $J_L \geq \sqrt{g D} [(L/D)/40,6 - 0,22] - J_G$  **então**
  36.         escoamento de golfadas instáveis (intermitente)!
  37.     **senão,**
  38.         escoamento de golfadas (intermitente)!
  39.     **finaliza se**
  40. **finaliza se**
  41. **retorna** padrão de escoamento

Fonte: Lima (2011)

Em seguida os diâmetro foram reduzidos para 12,7mm, 5,0mm, 1,0mm e 0,03mm. Desse modo foi possível notar em quais casos o modelo se aplica e qual a

consequência de se extrapolar o modelo. Foi realizado um levantamento estatístico da quantidade de fases em cada um dos 81 pontos gerados para cada diâmetro.

A implementação é um modelo matemático de Shoham (2005) descrito na Figura 16 por Lima (2011) para escoamentos bifásicos em regime permanente. Como descrito anteriormente, uma vez que são definidos os parâmetros iniciais as linhas de transição fluxo são dependentes apenas do diâmetro e da proporção do fluídos.

O algoritmo de Lima (2011) aplicado para escoamentos verticais e inclinados a partir da linha 23, determina um valor crítico para a velocidade superficial da fase líquida de maneira implícita. Em seguida, aplica as condicionais para determinar a partir do par de velocidades superficiais das fases o padrão de escoamento de acordo com o descrito por Shoham (2005)

Por fim, os pontos obtidos, assim como os padrões de escoamento serão plotados sobre o MAF de Taitel e Dukler com o auxílio de um software de edição de imagens e analisados criticamente, na tentativa de identificar um possível comportamento do gás ao ser submetido a diâmetros menores. Também foram obtidos os dados de frequência relativa, caracterizada pela razão percentual que uma fase ocorreu e o total de fases.

Identificar esse comportamento pode ser útil para ajudar a entender, futuramente, qual a influência do diâmetro dos tubos dos evaporadores na transferência de calor e conseqüente formação de gelo poroso.

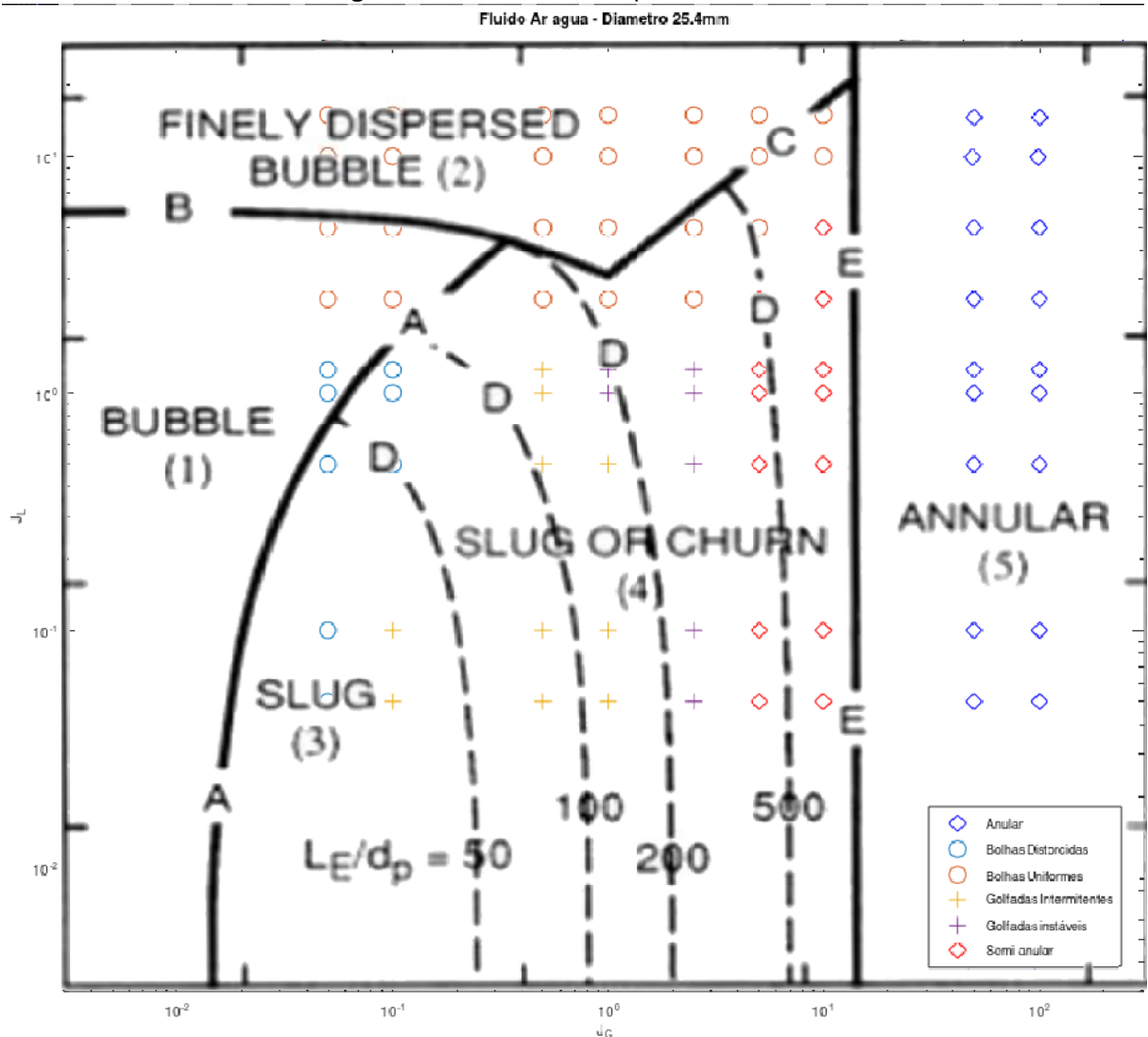


#### 4. RESULTADOS

Após as implementações foram obtidos que:

Para o diâmetro de 25,4mm o escoamento anular teve frequência de 18,18%, o escoamento de bolhas distorcidas de 15,15%, o escoamento de bolhas uniformes de 36,36%, o escoamento de golfadas de 10,10%, o escoamento de golfadas instável de 7,07% e o escoamento semianular de 13,13%. A Figura 15 mostra a disposição dos pontos.

**Figura 15** – Pontos e MAF para diâmetro de 25,4mm

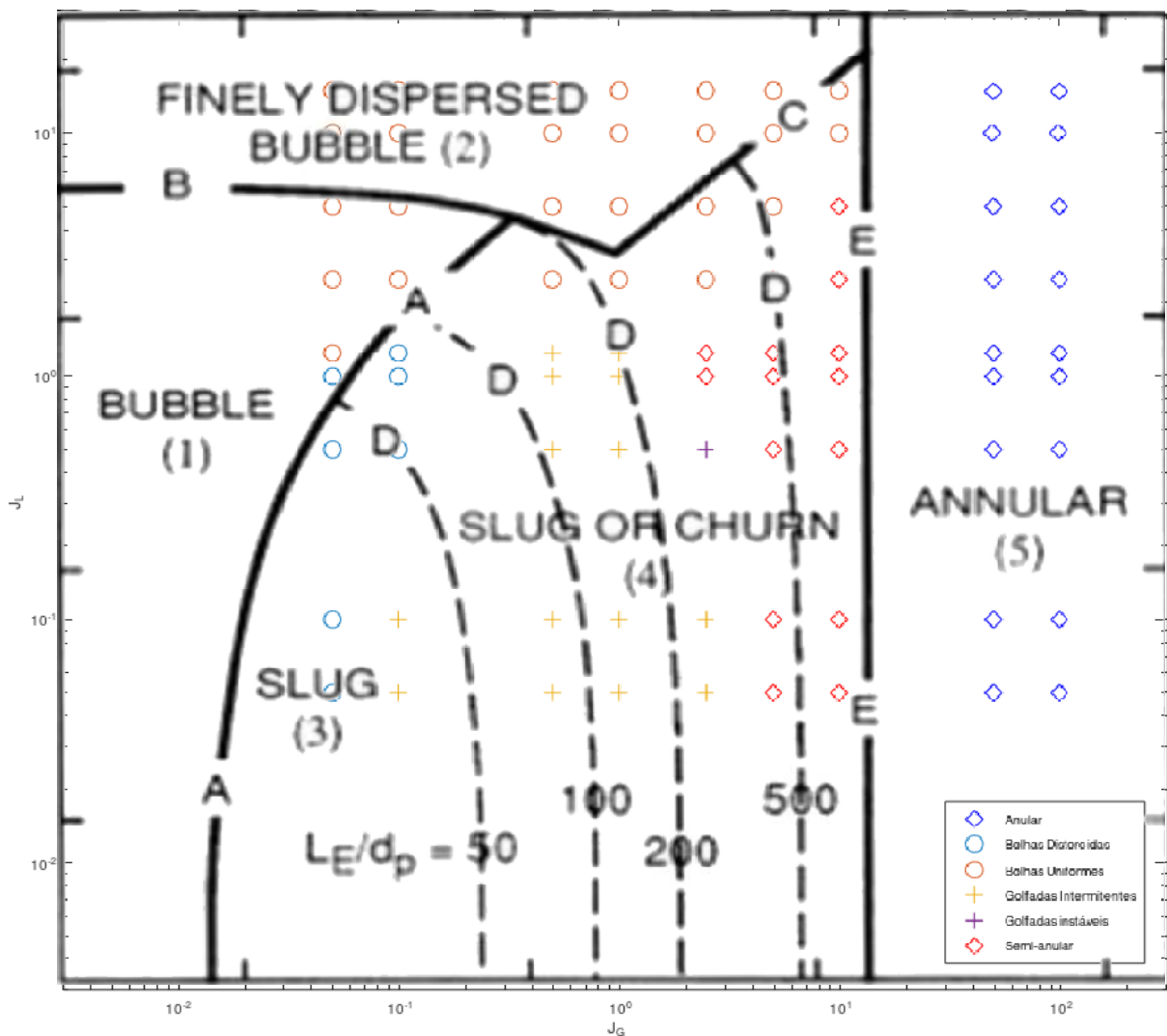


É possível notar que o estado semi-anular, um estado de transição para anular, é bem presente quando a velocidade da fase líquida é insuficiente para que o

padrão seja de bolhas. E que os demais pontos acabaram por ficar muito próximos das linhas de transição, gerando, assim, alguma incerteza sobre o padrão de escoamento. É possível notar uma fase de bolhas bem definida quando a velocidade superficial da fase gasosa ainda é pequena. A presença das fases de golfadas e golfadas instáveis (pistonado) fica muito próxima de várias linhas de transição.

Para o diâmetro de 12,7mm o escoamento anular teve frequência de 22,22%, o escoamento de bolhas distorcidas de 8,64%, o escoamento de bolhas uniformes de 32,10%, o escoamento de golfadas de 17,28%, o escoamento de golfadas instável de 1,23% e o escoamento semianular de 18,52%. A Figura 16 mostra a disposição dos pontos.

**Figura 16 – Pontos e MAF para diâmetro de 12,7mm**  
Fluido Ar água - Diâmetro 12,7mm

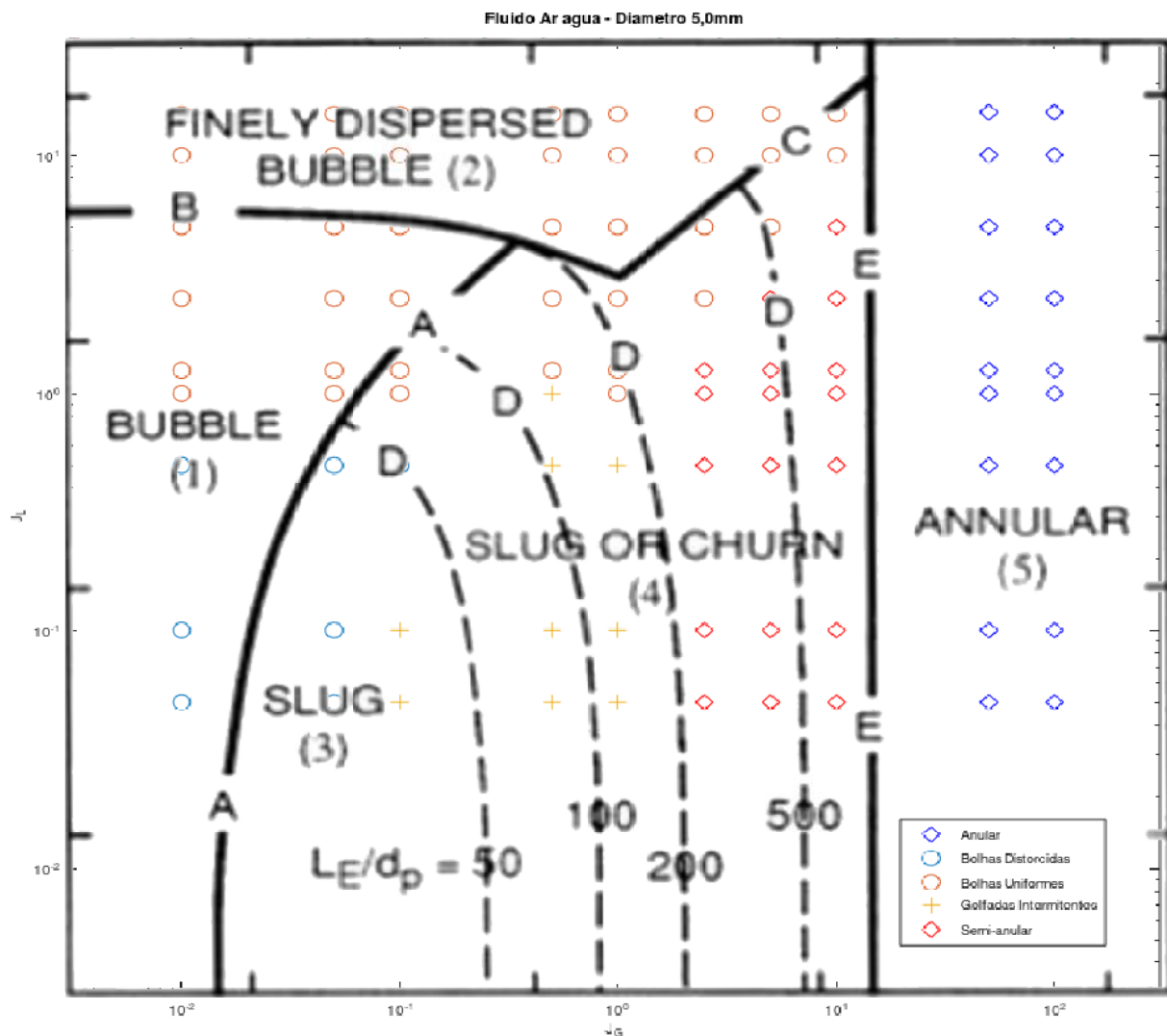


Fonte: Autoria Própria (2022)

Nota-se um pequeno aumento da fase anular com a diminuição do diâmetro, contudo, a grande diferença encontra-se no avanço das fases de golfadas e semi-anular. Isso pode indicar que as linhas de transição estão se movendo para a esquerda do mapa, diminuindo a área de escoamento intermitente, de modo que as fase ainda estão presentes, mas seriam necessários mais intermediários para avaliar.

Para o diâmetro de 5,0 mm o escoamento anular teve frequência de 20%, o escoamento de bolhas distorcidas de 7,78%, o escoamento de bolhas uniformes de 42,22%, o escoamento de golfadas de 10%, e o escoamento semianular de 20%. A Figura 17 mostra a disposição dos pontos.

**Figura 17 - Pontos e MAF para diâmetro de 5,0mm**

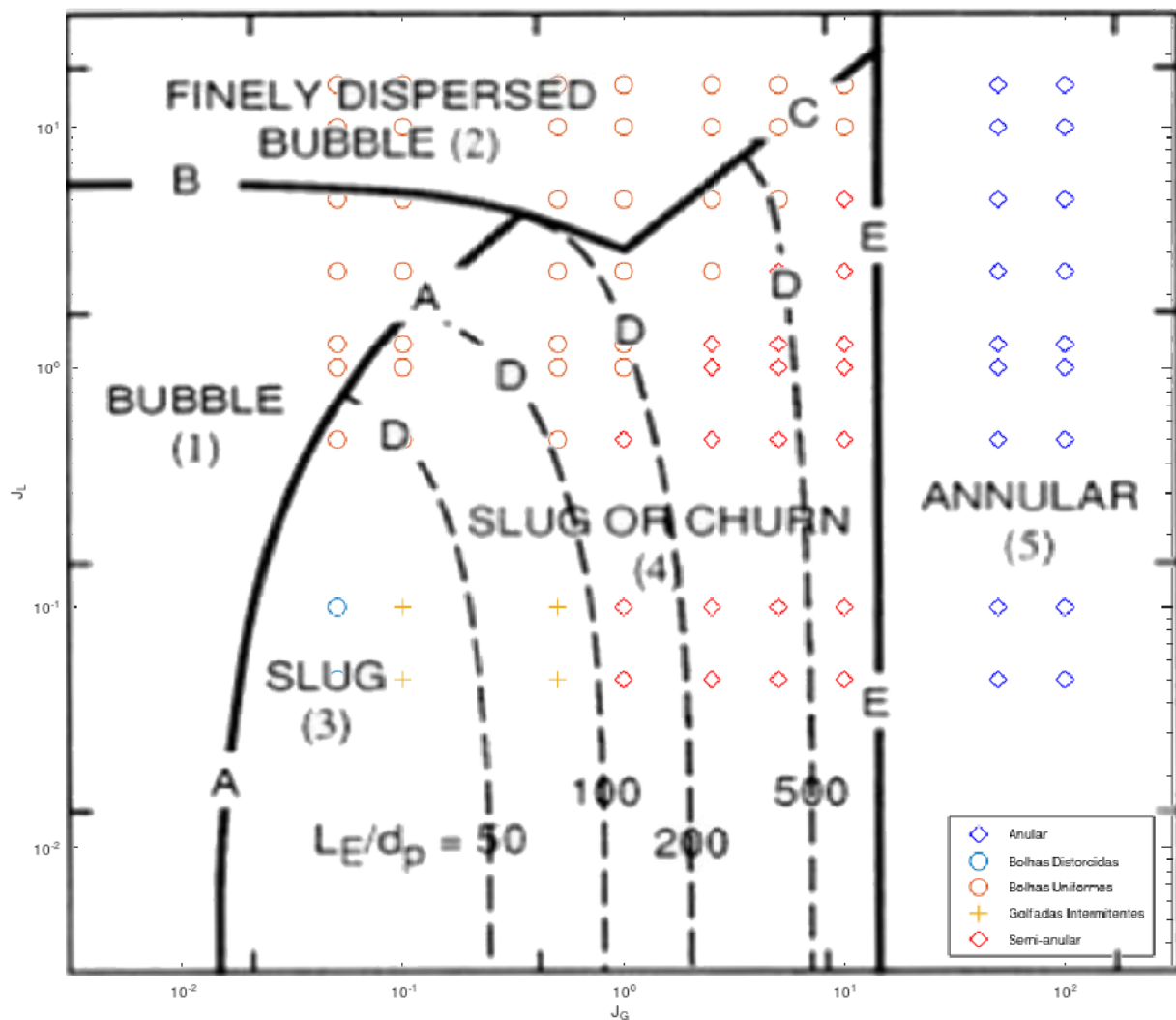


Não há identificação do padrão de golfadas instáveis, porém, vale lembrar que ele ainda ocorre. Há um aumento nos padrões de bolhas, bem como no escoamento

semi-anular. Mais uma vez há diminuição do padrão de golfadas, o que sugere, novamente a diminuição dessa área do gráfico.

Para o diâmetro de 1,0 mm o escoamento anular teve frequência de 22,22%, o escoamento de bolhas distorcidas de 2,47%, o escoamento de bolhas uniformes de 44,44%, o escoamento de golfadas de 4,94%, e o escoamento semianular de 25,93%. A Figura 18 mostra a disposição dos pontos.

**Figura 18** - Pontos e MAF para diâmetro de 1,0mm  
Fluido Ar água - Diâmetro 1,0mm



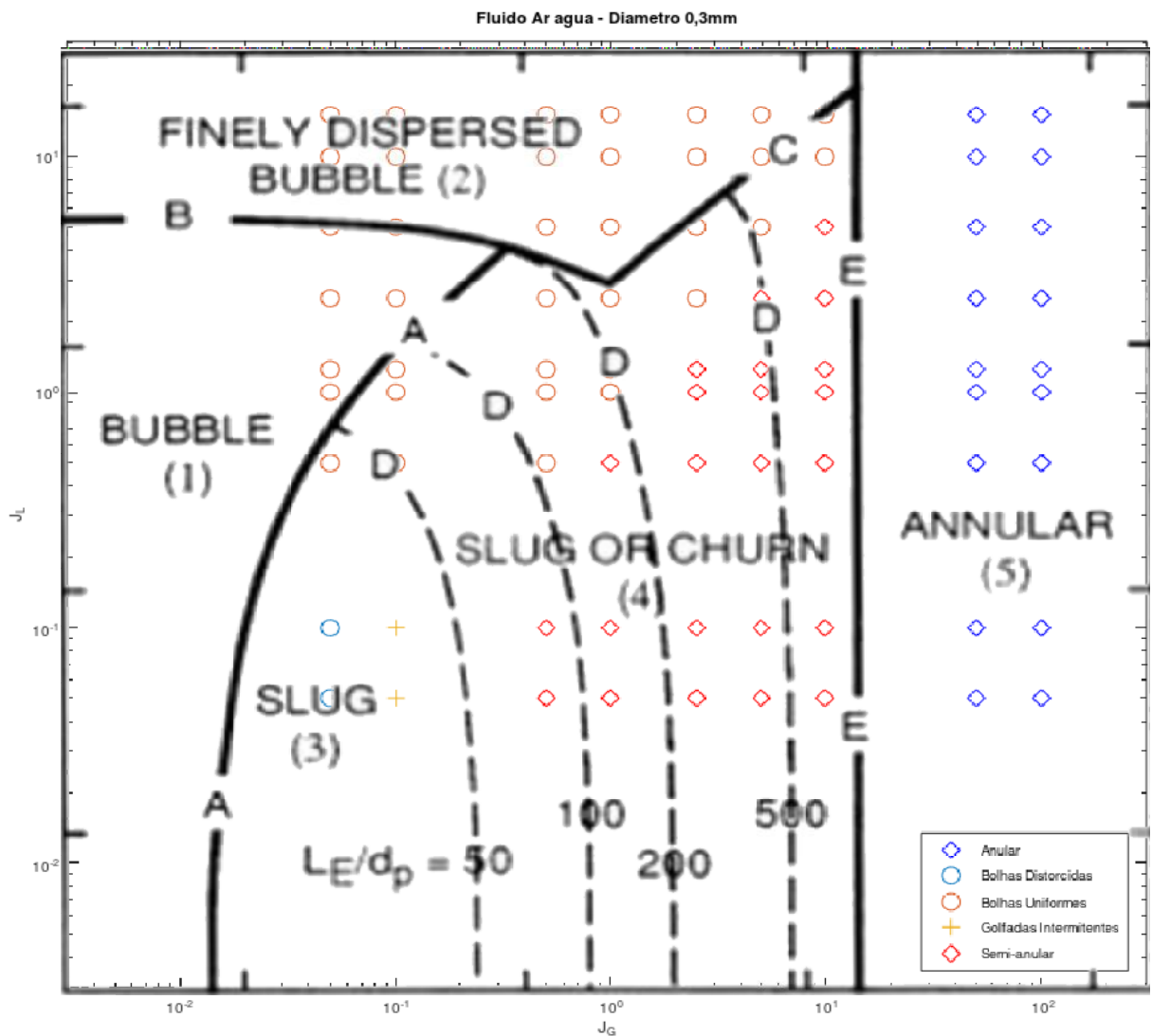
Fonte: Autoria Própria (2022)

Pode-se notar que as bolhas possuem uma tendência de aumento da uniformidade, isso pode indicar que a linha de transição se moveu para a esquerda também. O padrão de Golfadas agora ocupa uma área menor, sendo que o padrão

de bolhas uniformes se moveu para a parte inferior do gráfico, antes ocupado pelo padrão de golfadas.

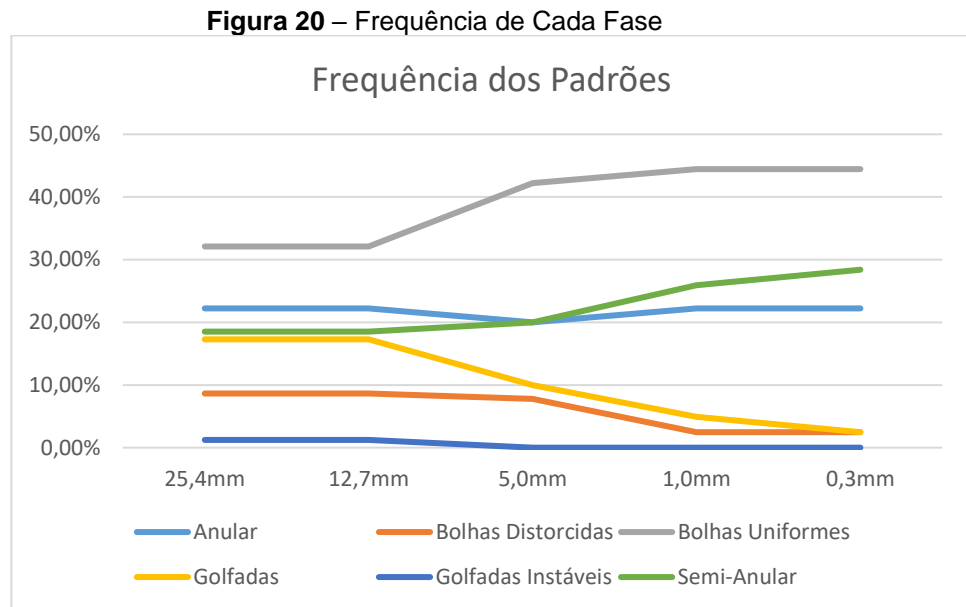
Por fim, para o diâmetro de 0,03 mm o escoamento anular teve frequência de 22,22%, o escoamento de bolhas distorcidas de 2,47%, o escoamento de bolhas uniformes de 44,44%, o escoamento de golfadas de 2,47%, e o escoamento semianular de 28,4%. A Figura 19 mostra a disposição dos pontos.

**Figura 19** - Pontos e MAF para diâmetro de 0,3mm



Com o menor diâmetro aplicado a frequência de dois padrões de escoamento se reduziram a apenas dois pontos cada, um gráfico com a frequência percentual de cada fase é apresentado na Figura 20 localizadas na parte inferior esquerda do gráfico, e um padrão de escoamento deixou de ser identificado. Desse modo é como

se as linhas de golfadas estivessem se aproximando da região inferior esquerda do mapa. Chenov e Kabov (2006) também identificaram uma variação na linha de transição, com o aumento da frequência do padrão anular.

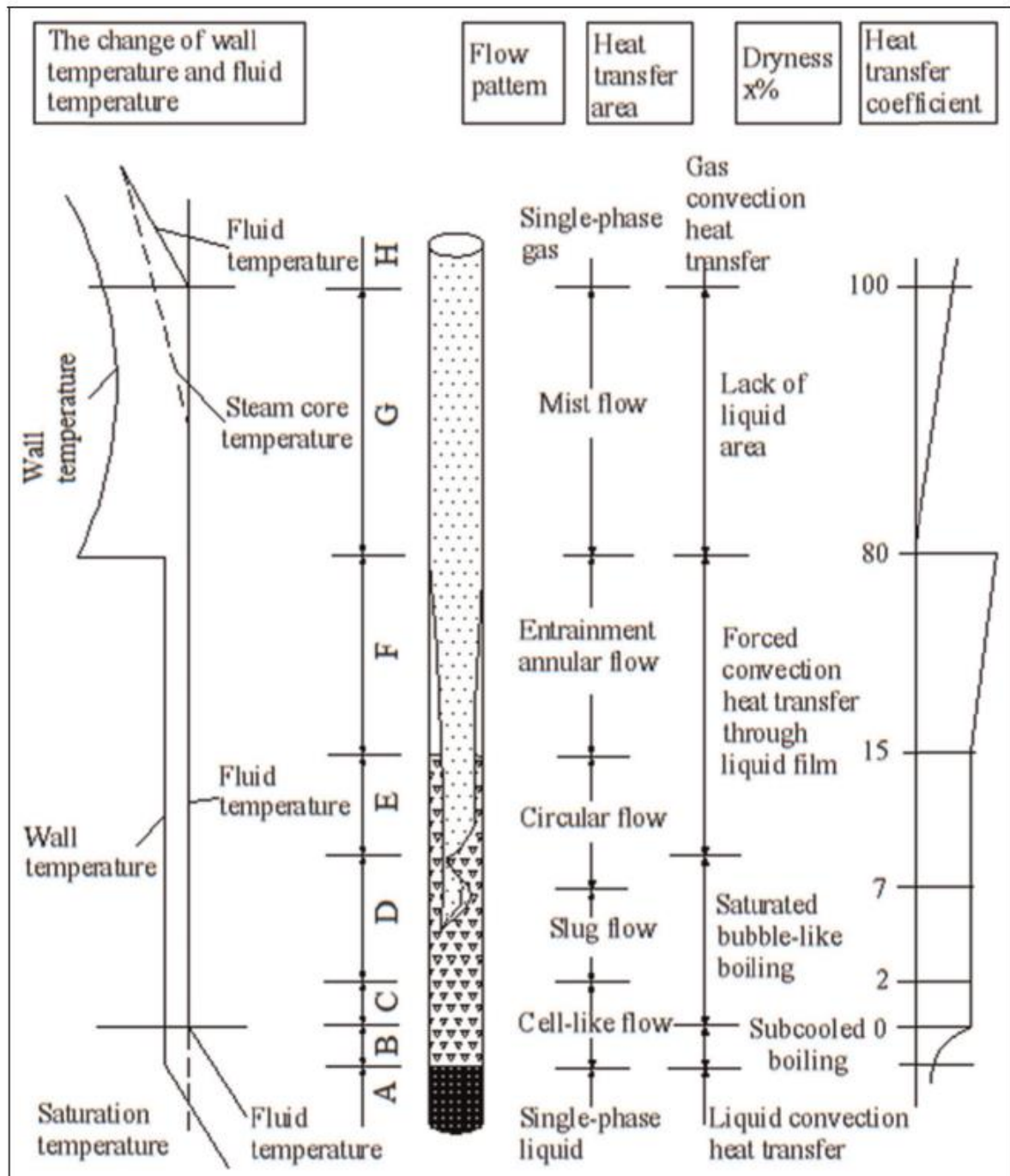


Nele é possível notar, explicitamente, o avanço das fases semi-anular e de bolhas uniformes. À medida que as fases de golfadas diminuem enquanto a fase anular permanece quase constante devido a condições mínimas de velocidade do fluxo de gás.

Dessa maneira a região do mapa dedicada para padrões intermediários estariam mais reduzidas à medida que se diminui o diâmetro do tubo. Apesar da existência delas, não foi possível identificá-las a partir das velocidades das fases adotadas. A falta de presença de fluxo separados também foi identificada por Fukano e Kariyasaki (1993) quando se trabalha com a interface água-ar em tubos capilares.

Isso pode indicar que elas ocorrem com velocidades superficiais muito específicas e são uma transição mais rápida em tubos de menores diâmetro. Se voltarmos nossa atenção para a influência disso no coeficiente de transferência de calor.

**Figura 21 - Padrões de Escoamento e Transferência de Calor**



Fonte: Ma et al (2017).

Podemos notar que o uso de diâmetros menor possibilita um maior valor para o Coeficiente de Transferência de Calor, uma vez que o padrão semi-anular se estabelece em uma porção maior de área MAF. Bueno (2004) estabelece que o processo de evaporação com o aumento da porção de gás se torna mais dependente da interface líquido-gás, e a troca de calor é mais eficiente na medida que o filme diminui de espessura.

Contudo, à medida que a porção de vapor se torna completamente presente e o título aumente há uma diminuição brusca na transferência de calor. A Figura 21 apresenta uma relação do coeficiente de calor de um líquido criogênico proposto por Ma et al (2017). Nele é possível notar que as transferências de calor se dão, inicialmente por convecção no líquido, convecção no filme, quando atinge o maior valor e, por fim, convecção no gás, quando cresce linearmente.

Desse modo podemos notar que a transferência de calor é mais eficiente em um padrão semi-anular. Sendo que este se tornou mais presente a medida que se diminuiu o diâmetro do tubo.



## 5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Sendo a refrigeração uma área tão importante para a humanidade e grande consumidora de recursos, torná-la mais eficiente pode, e irá, contribuir para um mundo mais sustentável.

Os Mapas propostos por Mandhane (1973) e Taitel e Dukler (1974) possuem algumas limitações e foram obtidos de dados experimentais muito específicos. Do mesmo modo, a modelagem numérica pode não representar a realidade uma vez que, para isso, deveria conter todas as faixas de transição de fases.

A modelagem numérica aplicada nesse trabalho propiciou ver o possível comportamento de um escoamento bifásico água-ar à medida que o diâmetro do tubo reduzia. E evidenciou um comportamento com pontos próximos das linhas de transição do MAF proposto por Taitel e Dukler, dificultando a identificação de um possível erro no padrão apresentado. Isso pode evidenciar uma limitação do modelo ou da implementação para tubos de pequeno diâmetro. Não foi possível identificar todos os padrões de fluxo dadas as condições iniciais da modelagem.

Diferentemente dos trabalhos anteriores, para esse trabalho foram modelados os escoamentos verticais. Os valores iniciais das fases podem ser melhor ajustados em trabalhos futuros, com a finalidade de explorar alguma área específica do MAF ou ainda para efeito de validação da modelagem. Também podem ser empregadas outras ferramentas de simulação, com a finalidade de entender e visualizar melhor o fenômeno. Esses trabalhos podem ainda contar com aparatos experimentais para a identificação de padrões de escoamentos bifásicos e validação de modelos.

## 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.

Barnea, D. **A unified model for predicting flow-pattern transitions for the whole range of pipe inclinations**. International Journal of Multiphase Flow, Volume 13, Issue 1, 1987. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(87\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0301-9322(87)90002-4)

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.

Chinnov, E.A., Kabov, O.A. **Two-phase flows in pipes and capillary channels**. *High Temp* **44**, 773–791 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10740-006-0094-z>

Chen, L & Tian, Yongsheng & Karayiannis, Tassos. (2004). **R134A FLOW PATTERNS IN SMALL DIAMETER TUBES**. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/319141124\\_R134A\\_FLOW\\_PATTERNS\\_IN\\_SMALL\\_DIAMETER\\_TUBES/related](https://www.researchgate.net/publication/319141124_R134A_FLOW_PATTERNS_IN_SMALL_DIAMETER_TUBES/related). Acessado em: 10/04/21

Fukano, Tohru. Kariyasaki, Akira. **Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary tube**, Nuclear Engineering and Design, Volume 141, Issues 1–2, 1993, Pages 59-68, ISSN 0029-5493, [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(93\)90092-N](https://doi.org/10.1016/0029-5493(93)90092-N).

Gilbert, Chris. **“The Kelvin-Helmholtz Instability in Space.”** (2017). Disponível em: <https://gilly.space/files/KHPaper.pdf> Acessado em 08/12/22.

History of Refrigeration and Refrigerators. **History of Refrigeration**, 2021. Disponível em < <http://www.historyofrefrigeration.com/>> Acessado em: 20/11/2021.

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

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.

Ma, Guoguang. Zhang, Chen. Zhao, Licai. **Analysis on heat transfer effect of air-temperature vaporizer in LNG satellite station.** Advances in Mechanical Engineering. 2017.

MAIOLI, C. G. **Conversão Termoquímica em Leito Fixo: Características, Modelagem e Implementação do Solver biomassgasificationFoam.** PublishedVersion, Universidade Federal do Espírito Santo, 2016. <http://repositorio.ufes.br/handle/10/9738>.

MakiZen. **Ciclo de refrigeração.** CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons. Disponível em < <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CycleFrigorifique.png> > Acessado em: 20/11/2021

Pretti, Jaderson Nunes. **Estudo de benchmarking do CFD gratuito OpenFOAM : modelagem e simulação da transferência de calor em não-equilíbrio térmico local e transiente numa frente de combustão smouldering.** Dissertação. PPGEM. UFES. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/handle/10/9796>. Acessado em: 27/11/2021.

Quibén, Jesús. **Experimental and analytical study of two-phase pressure drops during evaporation in horizontal tubes.** PhD thesis, University Pierre ana 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.

ROCHA, Danyelle Bemfica da. Estudo teórico sobre escoamento horizontal bifásico. 2020. 118 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

SILVA, R. C. R. **Estudo Experimental e Numérico da Formação de Frost em torno de três Cilindros com Arranjo Triangular.** 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

Taitel, Y., Bornea, D. and Dukler, A.E. (1980) Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes. AIChE Journal, 26, 345-354.

Taitel, Yehudah, et al. "Transient Gas-liquid Flow in Horizontal Pipes: Modeling the Flow Pattern Transitions." AIChE Journal, vol. 24, no. 5, Sept. 1978, pp. 920–934.

Yunus A. Çengel; Michael A. Boles. **Termodinâmica**, Mcgraw-Hill, 7ª Edição, Porto Alegre, 2013.

## **APÊNDICE A - A FLOW PATTERN STUDY IN SMALL DIAMETER TUBES FOR COOLING**

**Pablo Jesus Alves de Paula<sup>\*1</sup>, Raquel da Cunha Ribeiro da  
Silva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 85053-525, Brazil

### **Abstract**

**Refrigeration process made possible to stock products for a longer time. However, to maintain low temperature it's requires a lot of energy. Because of this a considerable amount of research in cooling process have been made to make it more efficient. One of the problems remains in the fact that temperatures in the cooling area favors the frost formation, and reduce efficiency along the time, requiring a defrost process and demanding more energy. The frost formation it's a consequence of heat transfer process, and is affected by the way that the refrigerant flow in the evaporators tube. Therefore, simulating the flow pattern with help of mathematical implementation of the Taitel & Dukler Flow Map Pattern can bring some advantage to knowledge of frost formation phenomenon.**

---

<sup>E</sup>mail: Pablo Jesus Alves de Paula ([pablop@alunos.utfpr.edu.br](mailto:pablop@alunos.utfpr.edu.br)), Raquel da Cunha Ribeiro da Silva ([raqueld@utfpr.edu.br](mailto:raqueld@utfpr.edu.br))

**Keywords: Flow Pattern, Multiphase flow, Evaporator.**

## **Contents**

1 Introduction

2 Methods and Materials

3 Expected Results

References

## **1 Introduction**

Nowadays the search for energy consumption improvements and its applications on cooling systems are still growing. The cooling system had caused a true revolution in the way that humanity stocks foods, medicines, vaccines and other utilities. Therefore, it's necessary to study and improve the efficiency of those systems, since they are used on a large scale and the commercial refrigeration it's responsible for a great consumption of power.

The average temperature of a refrigerated area it's about  $-10^{\circ}\text{C}$ . This temperature makes an ideal condition for frost formation. The frost formation appears when the air in the cooling area reaches  $0^{\circ}\text{C}$ , and starts to solidify on the closest superficies. It's common to see frost on an airplane's wing, refrigerators, air's purifiers, etc.. Once it is formed, a layer of frost can reduce the efficiency of heat exchange.

Lee & Ro (2007) affirm that initially the frost layer works as a fin improving momentarily the heat exchange. However as the layer becomes thick it behaves like a thermal insulation and reduces heat exchange on the evaporator. Then, the efficiency of the cooling system. Manage that situation requires to make a defrost of the cooling area. The defrost process has to be done very carefully once that can result in damage for the refrigerated products.

To better understand the frost formation and the heat exchange on the evaporator it's necessary to know how the refrigerant flows in the evaporator's tubes. Shaikh e Al-Dahhan (2007) has discovered that the heat transfer coefficient improves quickly with the gas superficial velocity and less quickly in a turbulent regime.

For that, this work propose to use mathematical implementation to simulate how the refrigerant flows along a evaporators horizontal tubes using Flow Pattern Maps proposed by Taltel and Dukler (1976). Initial works had been made, therefore, this one will focus on a data expansion of the simulation on tubes with small diameters, as capillary tubes on evaporators.

## **2 Methods and Materials**

A biphasic flow system it's formed when the flow presents two phases. It's common, for example, to see a water-air flow. However, multiphase flows are encountered on oil extraction, thermal and termonuclear usines, divers heat exchanges and even on geothermics phenomenon. Even being a common

phenomena, a multiphase flow, it requires a complex analysis and it's not yet fully understood.

Over the last decades there has been a lot of progress on understanding that phenomenon and how the fluid goes along the tubes. Baker (1951) and Mandhane et al (1974) developed some work to describe the flow pattern on a tube. In 1976, Taitel & Dukler proposed a Flow Pattern Map - FPM based on an empiric selection of data: Martinelli parameter X, Froude Number and the parameters T and K. Described as:

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

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

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

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

The implementation of the FPM it's described by Quibén:

“To implement the map, one first determines the Martinelli parameter X and F rG. Using these two parameters on the top graph, if their coordinates fall in the annular flow regime, then the flow pattern is annular. If the coordinates of X and F rG fall in the lower left zone of the top of the graph, then K is calculated. Using K and X in the middle graph, the flow regime is identified as either stratified-wavy or fully stratified. If the coordinates of X and F rG fall in the right zone on the top graph, then T is calculated. Using T and X in the bottom graph, the flow regime is identified as either bubbly flow or intermittent (plug or slug) flow. (Quibén, 2005, p.41)

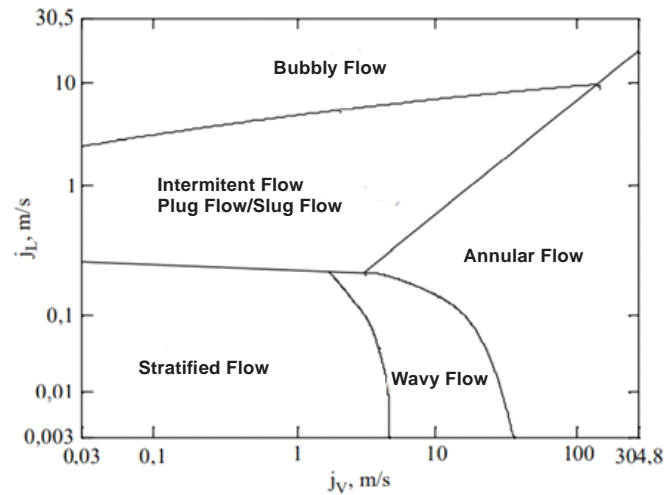


Fig. 1 Taitel & Dukler Flow Pattern Map adapted (Bueno, 2004 *apud* Taitel & Dukler, 1976)

With these parameters and the FPM it's possible to implement a code on a mathematical software and simulate which flow pattern is presented. The implementation receives as input data the superficial velocity of each phase, liquid and gas, and then analyzes where is the area of the map that satisfies those conditions. Finally, returns the possible flow pattern.

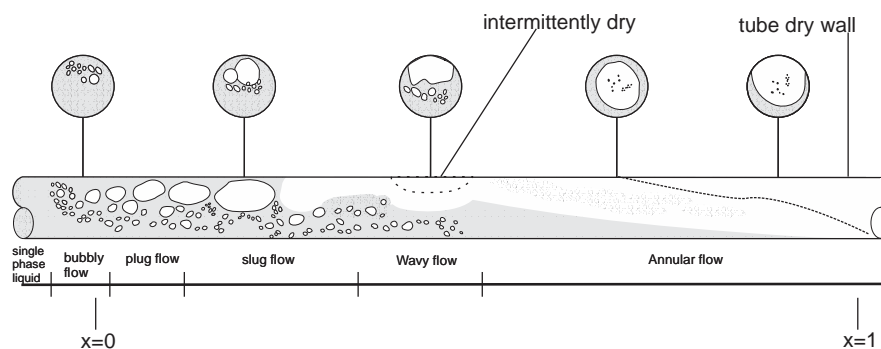


Fig 1. Flow pattern in horizontal tube during evaporation, adapted from (Quibén, 2005)



For these purposes it's necessary to define the flow pattern as Taitel & Dukler describe them and Aniceto (2008) show us.

Table 1 Flow Patterns Descriptions

| Flow Pattern    | Description   |
|-----------------|---|
| Stratified Flow | Total separation of the liquid and gas phases for gravity action with continuous flow                   |
| Wavy Flow       | Waves on the liquid phase's surface, because the increase of superficial velocity of the gas phase.     |
| Slug Flow       | The waves fills the entire cross section, with some bubbles.  |
| Plug Flow       | There is the separation of the slug in some elongated bubbles, that, normally, moves on top of the tube |
| Bubbly Flow     | The gas phase it's dispersed on liquid phase.   |
| Annular Flow    | A high gas flow that makes the liquid flow go on the tube's wall.                                       |

Finally, we must consider a Newtonian fluid. The first two tables we're implemented as the water-air mix, and, the two last ones with R-134a. The fluid properties at 20°C are shown on table 2:

| Fluid        | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Dynamic viscosity $\mu$ (kg/m · s) |
|--------------|------------------------------|------------------------------------|
| Air          | 1,204                        | $1.825 \cdot 10^{-5}$              |
| Water        | 998                          | $1.002 \cdot 10^{-3}$              |
| R134a Liquid | 1226                         | $2.012 \cdot 10^{-4}$              |
| R134a Gas    | 27,77                        | $1.160 \cdot 10^{-5}$              |

Table 2 Fluid Properties



Table 5 Flow pattern simulations with R134a and d=0,3mm

|    |       | Table 5 - d=0,3mm |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|----|-------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
|    |       | JG                |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|    |       | 0,50              | 0,75 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 2,50 | 3,75 | 5,00 | 7,50 | 10,00 | 15,00 | 25,00 |
| JL | 0,50  | B                 | SA   | SA   | SA   | SA   | SA   | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 0,75  | B                 | B    | SA   | SA   | SA   | SA   | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 1,00  | B                 | B    | B    | SA   | SA   | SA   | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 1,25  | B                 | B    | B    | B    | SA   | SA   | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 1,50  | B                 | B    | B    | B    | B    | SA   | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 2,50  | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 3,75  | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 5,00  | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 7,50  | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 10,00 | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 15,00 | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 25,00 | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |

Table 5 Flow pattern simulations with R134a and d=1,0mm

|    |       | Table 6 - d=1,0mm |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|----|-------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
|    |       | JG                |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|    |       | 0,50              | 0,75 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 2,50 | 3,75 | 5,00 | 7,50 | 10,00 | 15,00 | 25,00 |
| JL | 0,50  | B                 | SA   | SA   | SA   | SA   | SA   | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 0,75  | B                 | B    | SA   | SA   | SA   | SA   | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 1,00  | B                 | B    | B    | SA   | SA   | SA   | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 1,25  | B                 | B    | B    | B    | SA   | SA   | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 1,50  | B                 | B    | B    | B    | B    | SA   | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 2,50  | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 3,75  | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 5,00  | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 7,50  | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 10,00 | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 15,00 | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |
|    | 25,00 | B                 | B    | B    | B    | B    | B    | A    | A    | A    | A     | A     | A     |

|   |         |    |              |   |         |
|---|---------|----|--------------|---|---------|
| B | Bubbles | SA | Semi-Annular | A | Annular |
|---|---------|----|--------------|---|---------|

With the Table 3 and Table 4 of previous works expanded with new values for the superficial speed of the both phases. The diameters are almost capillary. It's possible to see, as in previous works, that the extrapolation of the FPM makes the results concentrate on top-right area. Even knowing that the other phases are presented, they weren't showed, not even in a small frequency. For that reason the expansion a the table must be made using even smaller incrementations.

This could produce bigger tables, and could became impracticable. Although this show us that the phase transitions in capillary tubes happens so fast that the intermediate patterns only occurs in very specific phases velocities. The phase transition occurs even faster with R134a, as we can see in Tables 5 and 6. Although the refrigerant has a similar behavior.

This fluid behavior is confirmed by Chen et al experimentations:

The boundaries of slug-churn and churn-annular moved to higher vapour velocity when the diameter change from 4.26 to 2.01 mm; the dispersed bubble-bubbly boundary moved to higher liquid velocity.  
(Chen et al, 2004, p.8)

Therefore, there is a very small interval when the heat transfer is optimized. As we can see the Heat Transfer Coefficient - HTC has better values when the flow isn't completely annular yet. For future works there are plans to make an experimental device to investigate horizontal flow patterns in small diameter tubes. This device can improve or verify the simulation.

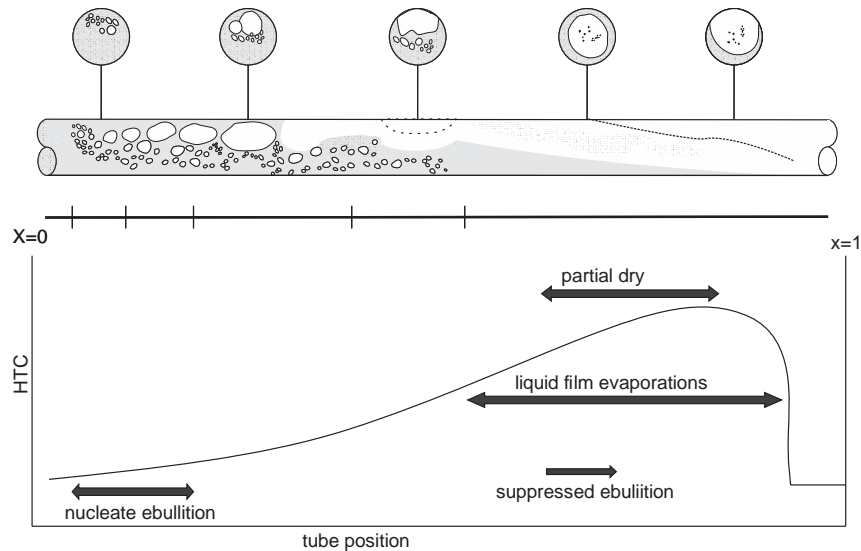


Fig 2 HTC and Flow Pattern, adapted from ( Bueno, 2004)

The knowledge of the flow pattern will provide a better understanding on heat transfer in the tubes of an evaporator and a better comprehension on frost formation in the cooling area. For future works new values of the phase velocities will be implemented for better understanding of the HTC. This way the frost formation phenomenon will take part in the research, with the intend of reduce the impact of that on cooling efficiency.

## References

- 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. Available in: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=11546@1>. Access in: 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. Available in: <http://hdl.handle.net/11449/88893>. Access in: 01/09/2020.
- LEE, Y.B. RO, S.T **An Experimental Study of Frost Formation an 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. Available in: <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 ana Marie Curic, Franceand Spanish. 2005. Available in: [https://www.researchgate.net/publication/37421723\\_Experimental\\_and\\_analytical\\_study\\_of\\_two-phase\\_pressure\\_drops\\_during\\_evaporation\\_in\\_horizontal\\_tubes](https://www.researchgate.net/publication/37421723_Experimental_and_analytical_study_of_two-phase_pressure_drops_during_evaporation_in_horizontal_tubes) Access in 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. Available in: <http://multifasico.usuarios.rdc.puc-rio.br/CHP07.pdf>. Access in: 27/08/2020.

Chen, L & Tian, Yongsheng & Karayiannis, Tassos. (2004). R134A FLOW PATTERNS IN SMALL DIAMETER TUBES. Available in: [\(3\) \(PDF\) R134A FLOW PATTERNS IN SMALL DIAMETER TUBES \(researchgate.net\)](#). Access 10/04/21

## APÊNDICE B - IDENTIFICAÇÃO DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO EM TUBOS

### HORIZONTAIS PARA APLICAÇÃO EM REFRIGERAÇÃO

Pablo Jesus Alves de Paula, pablop@alunos.utfpr.edu.br<sup>1</sup>  
Raquel da Cunha Ribeiro da Silva, raqueld@utfpr.edu.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade 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  $-10^{\circ}\text{C}$ , 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 comercial refrigeration has change the way that humanity stocks products. However, the average temperature on the cooling area, about  $-10^{\circ}\text{C}$ , 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  $-10^{\circ}\text{C}$ . 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  $0^{\circ}\text{C}$ , 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.



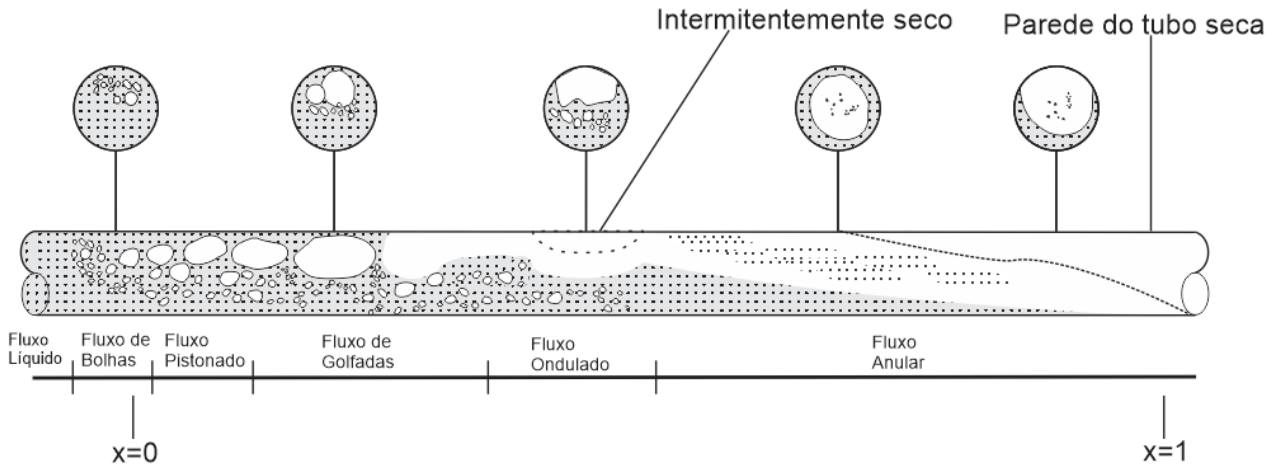


Figura 1. Padrões de escoamento de fluido em mudança de fase (Autoria Própria, 2021. Adaptado de Quibém, 2005)

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* Taitel 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 sessão 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 Taitel e Dukler (1976) e subdivididos por Shoham (2006).

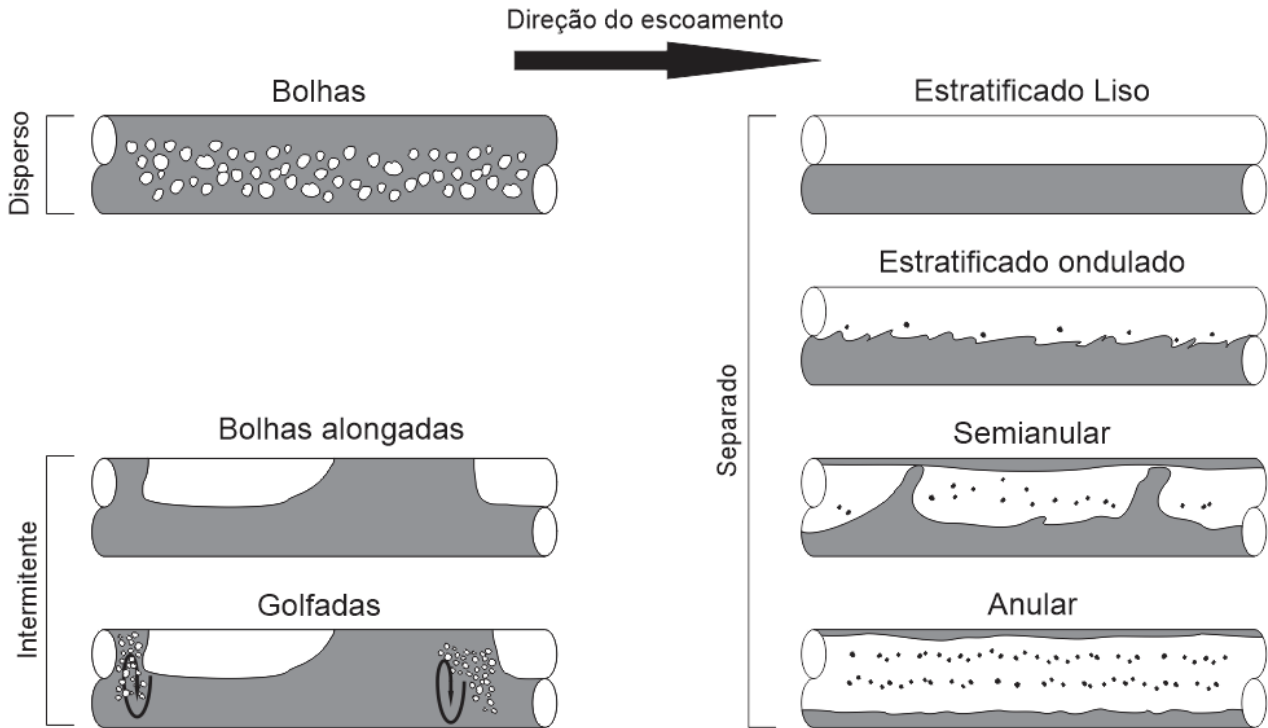


Figura 2 – Padrões de escoamento em tubos horizontais (Autoria própria, 2021. Adaptado de Lima ,2011)

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, 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).

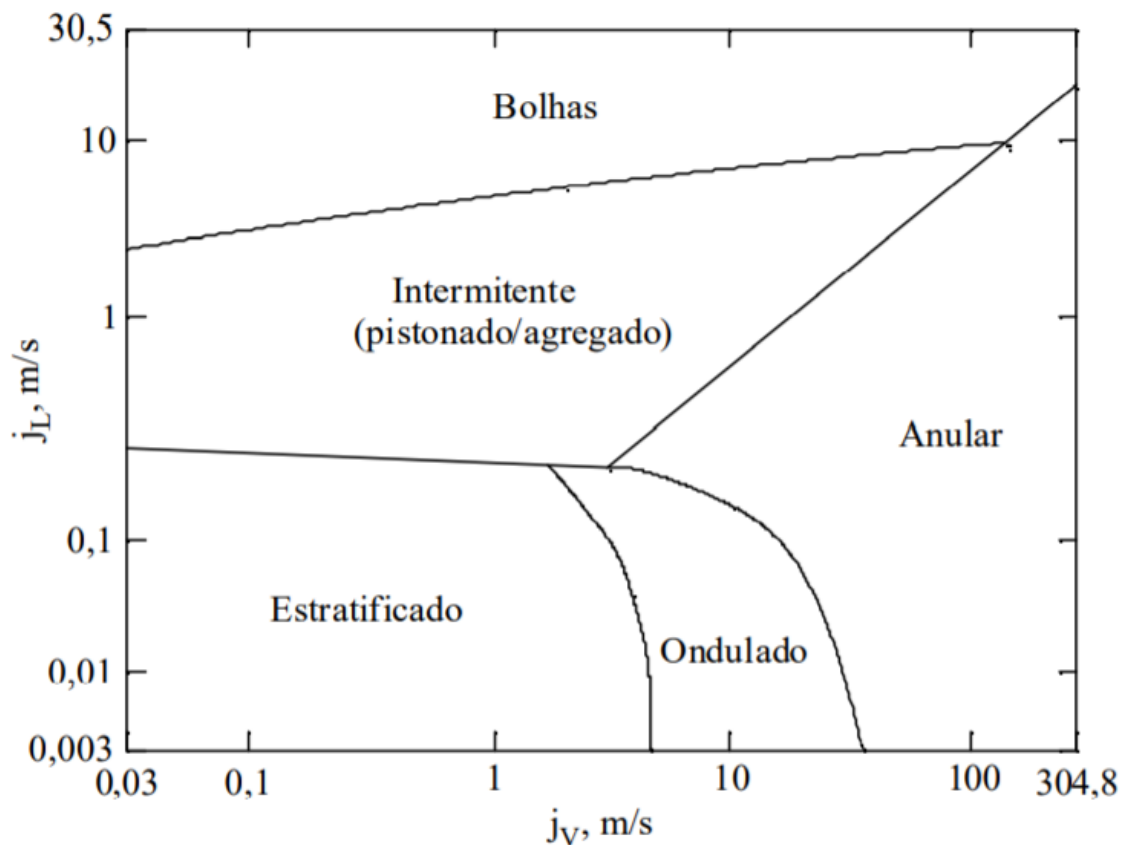


Figura 3 – Mapa de Arranjo de Fases de Taitel e Dukler (Bueno, 2004) *apud* (Taitel e Dukler, 1976).

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:

| <b>Tabela 2</b><br><b>d=0,3mm</b> |        |            |            |            |            |  |
|-----------------------------------|--------|------------|------------|------------|------------|--|
| 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     |  |

| <b>Tabela 3</b><br><b>d=1,0mm</b> |        |            |            |            |            |  |
|-----------------------------------|--------|------------|------------|------------|------------|--|
| 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     |  |

| <b>Tabela 4</b><br><b>d=5,0mm</b> |      |      |      |      |      |  |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|--|
| 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<br>ALONGADAS | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS |

A medida que se estrangula o fluido, ou seja, se admite diâmetros menores do tubo em que esse esco, 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 |
| 0,75    | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS |
| 1,00    | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS |
| 1,25    | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS | GOLFADAS |
| 1,50    | BOLHAS   | 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 |
| 3,00    | SEMIANULAR | SEMIANULAR | ANULAR | ANULAR | ANULAR |
| 5,00    | BOLHAS     | SEMIANULAR | ANULAR | ANULAR | ANULAR |
| 7,00    | BOLHAS     | SEMIANULAR | ANULAR | ANULAR | ANULAR |
| 9,00    | BOLHAS     | SEMIANULAR | 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 influencia na transferência de calor conforme é descrito na Fig. 4.

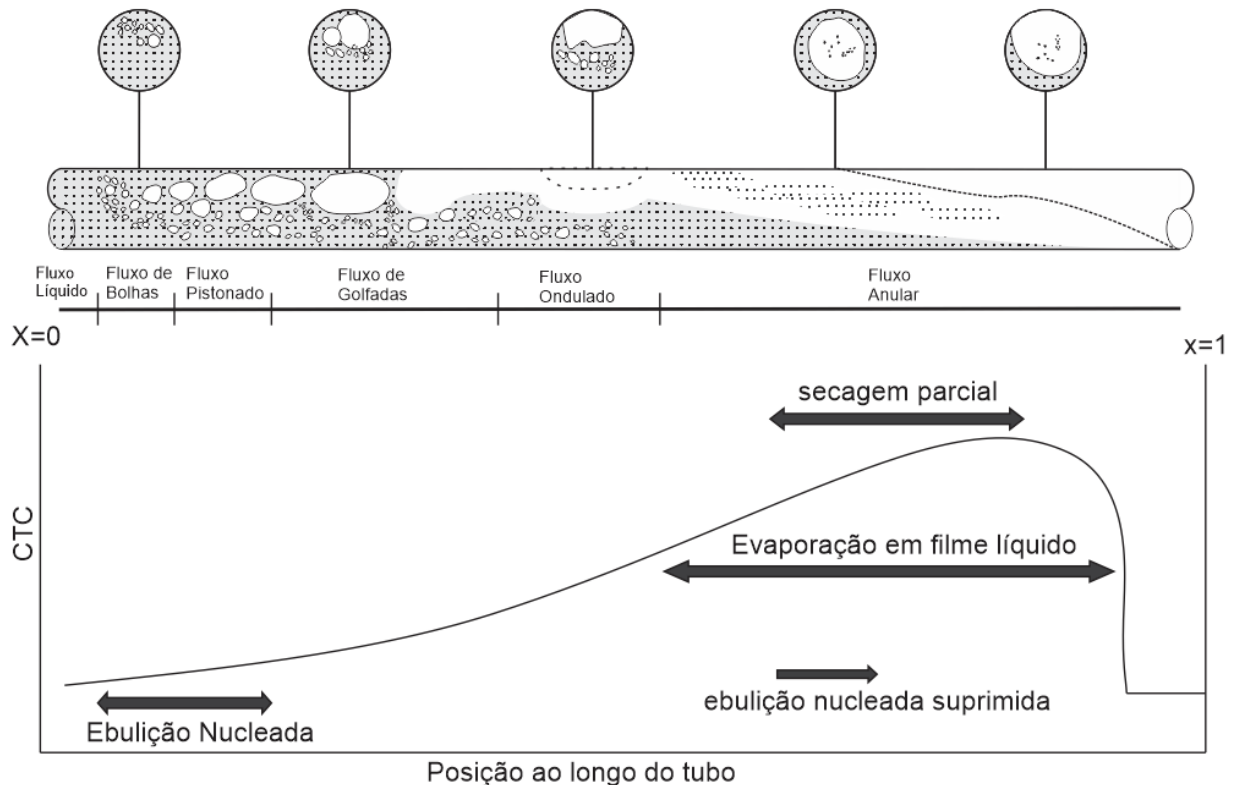


Figura 4 – Padrões de Escoamento e Transferência de Calor (Autoria própria, 2021. Adaptado de Bueno, 2004)

#### 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 an 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 ana Marie Curic, Franceand Spanish. 2005. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/37421723\\_Experimental\\_and\\_analytical\\_study\\_of\\_two-phase\\_pressure\\_drops\\_during\\_evaporation\\_in\\_horizontal\\_tubes](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.