

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



**Lucas de Paula Chaves Espírito
Santo Góes**

**Estudo da redução de atrito por adição de polímeros em
escoamentos monofásicos e bifásicos.**

Projeto de Graduação

2021.2

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Luís Fernando Azevedo

Rio de Janeiro
Dezembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas muitas bênçãos que tem me dado durante toda a minha vida, iluminando o caminho e protegendo de todo o perigo. Agradeço a minha família, principalmente meus pais Teresa e Reinaldo, pela paciência acima de tudo, pelo carinho, respeito às minhas decisões e apoio em toda etapa complicada.

Não posso deixar de agradecer aos amigos da PUC-Rio que me acompanharam na descoberta do fascínio pelo curso de engenharia, e todos os dias me mostram novas perspectivas sobre o futuro no mercado.

Por fim, mas ainda assim muito importante. Agradeço a toda equipe do Laboratório de Engenharia de Fluidos, que passaram e ainda estão presentes, pela oportunidade de trabalhar nesse projeto. Principalmente ao Pedro Panisset, cujo trabalho cuidadoso permitiu que todo procedimento experimental fosse possível; e ao meu professor orientador, Luís Fernando Azevedo, que além de me sugerir o projeto, me acompanhou com paciência durante esse processo, sempre se mostrando acessível para discussões e dúvidas.

RESUMO

Estudo da redução de atrito por adição de polímeros em escoamentos monofásicos e bifásicos.

O fenômeno de arraste em escoamentos turbulentos causa uma significativa perda de carga para o transporte de qualquer fluido, o que aumenta a energia necessária para promover o escoamento. Por isso originaram-se os estudos sobre o fenômeno de redução de arraste (DR), que pode ocorrer pela adição de surfactantes, fibras, ou polímeros ao fluido solvente. Sua utilização possui registros que ultrapassam de sessenta anos e já são aplicados no combate a incêndios [24], transporte de fluidos diversos [25] e até mesmo no aumento de velocidade de embarcações [26]. Este trabalho tem o objetivo de verificar e quantificar a eficácia da adição de materiais poliméricos na redução de arraste e na transição de regimes no escoamento bifásico gás-líquido em regime turbulento, através de tubos horizontais. O trabalho tem sua motivação na possível redução de atrito em dutos de transporte de óleo e gás no regime bifásico. Para tal, o experimento utilizou de medidas de queda de pressão, vazão e fração de vazio para caracterizar os efeitos da adição de redutor de atrito no escoamento de ar e água em regime de golfada. Os testes foram conduzidos para uma faixa de número de Reynolds de 20.000 a 103.000, em uma matriz experimental combinada por três vazões de água e ar determinadas. O polímero utilizado foi a Goma Guar, nas concentrações de 400ppm e 600ppm, dissolvido em água destilada. O escoamento com este aditivo apresentou uma redução de arraste máxima por volta de 35%, para o regime monofásico, e 20% para o regime bifásico. A adição do polímero não apresentou grande influência na transição de regimes de escoamento, pois não houve mudanças significativas para os valores médios de frequência, velocidade e comprimento de pistões de líquido.

Palavras-chave: Redução de Arraste. Polímero. Transporte de Fluidos. Escoamento Turbulento Bifásico. Escoamento em Golfadas

ABSTRACT

Study of drag reduction by addition of polymeric material in single-phase and two-phase flows.

The phenomenon of drag in turbulent flows causes a significant pressure drop for the transportation of any fluid, which increases the energy required to promote the flow. This is why studies on Drag Reduction (DR) were originated, which can occur by adding surfactants, fibers, or polymers to the solvent fluid. Its use has records that exceed sixty years and are already applied in firefighting [24], transportation of various fluids [25] and even to increase the speed of vessels [26]. This work aims to verify and quantify the effectiveness of the addition of polymeric materials on drag reduction and on the transition of regimes in two-phase gas-liquid flow in turbulent regime, through horizontal pipes. The motivation for the work is the possible reduction of friction in oil and gas pipelines in the two-phase regime. To this end, the experiments employed measurements of pressure drop, flow rate and void fraction to characterize the effects of adding a friction reducer to the flow of air and water in the slug regime. The tests were conducted for a Reynolds number range of 20,000 to 103,000, in a combined experimental array for three given water and air flow rates. The polymer used was Guar Gum, at concentrations of 400ppm and 600ppm, dissolved in distilled water. The flow with this additive showed a maximum drag reduction around 35% for the single-phase regime and 20% for the two-phase regime. The addition of the polymer did not show much influence on the transition of flow regimes, as there were no significant changes for the average values of frequency, velocity, and liquid piston length.

Keywords: Drag Reduction. Polymer. Fluid Transportation. Turbulent Two-Phase Flow. Slug Flow.

SUMÁRIO

1	Introdução	8
1.1	Motivação	8
1.2	Objetivo	9
2	Apresentação Teórica	10
2.1	Definição do Escoamento em Estudo	10
2.1.1	Escoamento Bifásico	10
2.1.2	Padrões de Escoamento	11
2.1.3	Conceitos Básicos do Escoamento Intermitente	14
2.2	O Fenômeno da Redução de Arraste	19
2.3	A Goma Guar	21
3	Metodologia Experimental	23
3.1	Montagem da Bancada Experimental	23
3.2	Instrumentação Utilizada e Aquisição de Dados	25
3.3	Procedimento Experimental	26
3.4	Processamento de dados	29
4	Resultados	32
4.1	Validação da Seção de Testes	32
4.2	Influência na redução de arraste	33
4.3	Influência no comportamento do regime	35
5	Conclusão	37
6	Referências Bibliográficas	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Padrões mais comuns para o escoamento gás-líquido. Adaptado de Fonseca Junior (2010).	12
Figura 2: Mapa de Baker. Adaptado de Leonardo Fernandes (2017).	13
Figura 3: Mapa ilustrando a região de transição para diferentes diâmetros. Adaptado de Brennen [11].	14
Figura 4: Célula Unitária de golfada. Adaptado de Carpintero-Rogero [19].	16
Figura 5: Resultados obtidos por Fossa [14] para comparação adimensional de frequência.	18
Figura 6: Resultados de comprimento de pistão obtido por Fossa [14].	18
Figura 7: Resultados de velocidade média de pistão obtidos por Fossa [14].	19
Figura 8: Esticamento e relaxação do polímero durante o escoamento. Extraído de White e Mungal [20].	21
Figura 9: Amostra de Goma Guar como obtida pelo fornecedor.	22
Figura 10: Desenho simplificado da bancada experimental.	24
Figura 11: Foto da pré-seção de PVC e da tubulação do escoamento bifásico(esquerda); foto do ponto de mistura ar-água(direita).	24
Figura 12: Transdutores de pressão(esquerda) e sensor de fração de vazio(direita).	26
Figura 13: Mapa de padrões de escoamento com os pares de vazões avaliados nesse trabalho.	27
Figura 14: Imagem representativa dos sinais processados, obtidos pelo sensor de fração de vazio.	30
Figura 15: Validação da calibração do transdutor de pressão monofásico e bifásico.	32
Figura 16: Comparação do gradiente de pressão experimental com o modelo de Lockhart-Martinelli.	33
Figura 17: Resultado da redução de atrito obtida com a Goma Guar no escoamento monofásico e bifásico.	34
Figura 18: Comparação dos valores médios das estatísticas sem e com o polímero para os pontos experimentais.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Pares de vazões de gás (JG) e líquido (JL) indicados nos pontos da Figura 13.....	28
--	----

1 Introdução

1.1 Motivação

No transporte de fluidos em dutos longos, principalmente em escoamentos com elevado nível de turbulência, a queda de pressão é causada pela ação da tensão cisalhante na parede. A queda de pressão está diretamente relacionada à energia necessária para promover o escoamento. A utilização de redutores de arraste é uma solução cada vez mais aplicada para a diminuição da queda de pressão com o objetivo de aumentar a vazão transportada ou diminuir o consumo de energia da instalação.

Polímeros de cadeias moleculares longas são utilizados há alguns anos para a redução do atrito em escoamentos em oleodutos [27]. Além da aplicação no transporte dutoviário, estes polímeros encontram também aplicações nos sistemas de combate a incêndios permitindo maior vazão e alcance nos esguichos [25]. Outras aplicações são ainda encontradas no aumento da velocidade de embarcações, em sistemas de transporte de água e esgotos e na prevenção de cavitação e diminuição de ruídos em turbo bombas [28].

Um problema relevante que limita a aplicação de polímeros redutores de atrito está relacionado com a perda de efetividade dos polímeros devido à quebra das macromoléculas. Esta degradação pode se dar tanto pela ação continuada das tensões cisalhantes e turbulentas sobre o polímero no escoamento desenvolvido, quanto pela passagem em acidentes da instalação, como curvas e válvulas. A degradação acontece também de forma acentuada pela passagem do fluido através dos rotores das bombas. Portanto a busca por soluções poliméricas economicamente viáveis que mantenham eficácia, por mais tempo, mesmo com sua degradação é de interesse da comunidade acadêmica e da indústria.

Como já mencionado, o uso de polímeros redutores de atrito em oleodutos não é novidade, apesar de não ser uma solução amplamente difundida. No caso de escoamentos bifásicos gás-líquido em dutos, no entanto, polímeros redutores de atrito têm aplicação ainda limitada na indústria.

Na produção de petróleo nos campos do pré-sal no Brasil as vazões muito elevadas de alguns poços estão sendo limitadas pela queda de pressão nos dutos disponíveis para o transporte dos fluidos produzidos. Como a instalação de dutos

em paralelo ou de maior diâmetro são soluções de viabilidade econômica questionável, a utilização de polímeros redutores de atrito surge como uma possível solução a ser investigada. Na produção de petróleo o escoamento se dá no regime bifásico com óleo e gás escoando, na maioria das vezes, no regime estratificado ou de golfadas. Assim, o estudo da utilização de polímeros redutores de atrito nestes padrões de escoamento bifásico torna-se fundamental para tomada de decisão sobre alternativas para aumento da vazão de produção.

1.2 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é conduzir experimentos de caráter fundamental para contribuir para o entendimento do efeito de polímeros redutores de atrito sobre escoamentos bifásicos gás-líquido. Os estudos em escala de laboratório utilizaram uma bancada experimental disponível onde escoamento turbulento de ar e água em regime de golfadas foi produzido de forma controlada permitindo o estudo da influência de substância redutora de atrito dissolvida na fase líquida. O foco do trabalho foi direcionado para a investigação dos efeitos de polímeros redutores de atrito sobre a queda de pressão e transição de regimes de escoamento, utilizando um produto comercialmente disponível para uso em fluidos de base aquosa.

2 Apresentação Teórica

2.1 Definição do Escoamento em Estudo

Nesta seção serão discutidas as características básicas do escoamento bifásico pertinentes ao trabalho, bem como os conceitos básicos dos padrões de escoamento e escoamento intermitente. Este texto foi adaptado do trabalho de dissertação de Mestrado de Leonardo Fernandes [7].

2.1.1 Escoamento Bifásico

O escoamento multifásico é o escoamento no qual há mais de uma fase presente, podendo ser líquida, sólida ou gasosa e com um nível de separação superior ao nível molecular. Podem ocorrer na natureza, como em chuvas, deslizamentos e poluição de rios e mares e em processos industriais, como condensadores, estações de tratamento de água, transporte de petróleo, entre outros. Nesse contexto, estão incluídos os escoamentos bifásicos, sendo o gás-líquido o mais comum e um dos mais complexos, pois possui uma interface deformável e uma fase compressível, como descrito por Hetsroni [8]. Este regime de escoamento ocorre com frequência no transporte do petróleo, na coluna de produção dos poços ou nas linhas que ligam à plataforma. Durante a produção, o fluido presente no reservatório sofre despressurização, o que muitas vezes é suficiente para levar à produção de gás, caracterizando, assim, escoamento bifásico. Em geral, a presença de uma segunda fase aumenta a perda de carga se comparada com aquela resultante de apenas uma fase com a mesma vazão mássica, segundo Coates e Pressburg [9].

As misturas de líquido-gás não se movem em conjunto, ao invés disso, uma fase escoar em relação à outra, com a fase mais densa tendendo a escoar com menor velocidade.

As razões para uma maior perda de carga no escoamento bifásico podem ser entendidas com o auxílio de conceitos básicos de mecânica dos fluidos. A presença de uma segunda fase reduz a área transversal de escoamento disponível para o primeiro fluido. Então, sua velocidade e resistência ao escoamento aumentam devido à redução da área disponível.

Numerosas pesquisas sobre o escoamento bifásico líquido-gás revelaram a existência de padrões ou regimes de escoamento bem diferenciados, cuja ocorrência depende, dentre outras variáveis, das vazões relativas e absolutas das duas fases. Existem mapas que procuram relacionar propriedades dos fluidos, características do escoamento (como a velocidade de cada fase) e aspectos geométricos da tubulação com os padrões existentes. Não há um consenso na literatura sobre quantos e quais são os regimes existentes, o que tende a dificultar a comparação de dados de diferentes laboratórios.

2.1.2 Padrões de Escoamento

A classificação das diferentes configurações geométricas das fases gás e líquido em padrões de escoamento surge como uma ferramenta para facilitar o estudo de escoamentos multifásicos. Embora não exista um consenso sobre a identificação e quantificação total de padrões e os limites entre eles, tenta-se minimizar o número de classificações. A seguir, será feita uma breve descrição dos principais padrões de escoamento encontrados na literatura. Mais detalhes podem ser encontrados em trabalhos como Wallis [10] ou, mais recentemente, Brennen [11] e Kolev [12].

A Figura 1 ilustra os principais padrões no escoamento horizontal. Esses padrões são:

Escoamento Estratificado (*Stratified Flow*)

No escoamento estratificado há separação gravitacional entre as fases, com a fase líquida, mais densa, escoando abaixo da fase gasosa. Ocorre para vazões (ou velocidades superficiais) das fases relativamente baixas, em comparação aos outros padrões de escoamento.

Escoamento Ondulado (*Wavy Flow*)

Quando a vazão de gás aumenta, no escoamento estratificado, aumenta também a taxa de cisalhamento na interface gás-líquido. Surgem assim, ondulações que caracterizam o escoamento.

Escoamento em Golfada (*Slug Flow*)

Com o aumento da vazão de líquido no escoamento ondulado, as ondas podem alcançar a parte superior da tubulação, formando regiões líquidas que ocupam toda a tubulação e gerando um regime intermitente, no qual os fluxos de gás e líquido são alternados. Esse escoamento se caracteriza pela alternância entre um escoamento semelhante ao estratificado (com gás escoando a velocidades maiores que a velocidade média da mistura, sobre um filme líquido) e o escoamento de um pistão líquido, altamente aerado em algumas regiões.

Escoamento Pistonado (*Plug Flow*)

Também chamado de bolha alongada (*elongated bubble*), ocorre para vazões de gás mais baixas que no escoamento em golfada. Também é um escoamento intermitente, porém, nesse caso, o pistão líquido não é aerado, encontrando-se praticamente livre de gás.

Escoamento Anular (*Annular Flow*)

Ocorre para vazões de gás muito altas. A fase líquida se encontra na região mais próxima da parede da tubulação, em formato de anel. É comum existirem gotículas de líquido dispersas na fase gasosa.

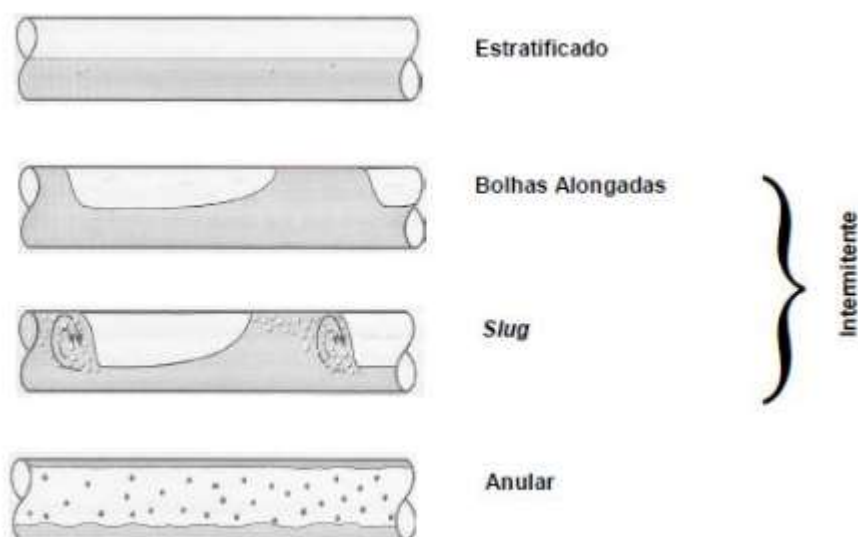


Figura 1: Padrões mais comuns para o escoamento gás-líquido. Adaptado de Fonseca Junior (2010).

A identificação dos padrões de escoamento e de suas transições a partir de parâmetros do escoamento é realizada através de mapas de padrões. Para escoamento bifásico líquido-gás em tubulações horizontais, a previsão do padrão de escoamento pode ser feita através do chamado “mapa de Baker” [13], ilustrado na Figura 2.

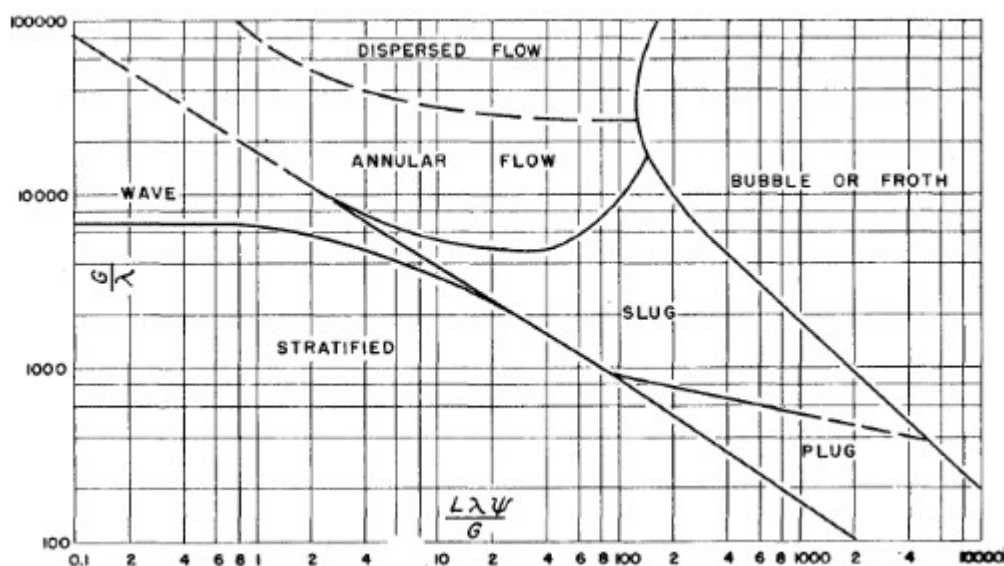


Figura 2: Mapa de Baker. Adaptado de Fernandes (2017).

No mapa os termos ψ e λ são fatores de correção utilizados para a utilização do mesmo mapa para diferentes fluidos (o experimento foi executado com ar e água) e os termos G e L são os fluxos de massa da fase gás e líquido, respectivamente.

Existem diversos tipos de mapas propostos na literatura, que podem usar variáveis dimensionais, adimensionais ou ambas, para definir os valores nos eixos. Apesar de muitos dependerem apenas de parâmetros adimensionais (como o número de Reynolds, ou relações entre vazões), não existem mapas universais que possam ser aplicados para qualquer situação. De fato, mesmo para geometrias simples, pequenas diferenças no experimento podem inutilizar um mapa, como diâmetro de tubulação e pares de fluidos, que causam configurações diferentes da esperada, como propôs Brennen [11]. A Figura 3 mostra como diferentes diâmetros da tubulação podem levar a diferentes regiões de transição; linha pontilhada (12,5mm), linha sólida (25mm), linha pontilhada e tracejada (50mm) e linha trace-

jada (300 mm). Neste mapa, as coordenadas são expressas pela velocidade superficial de cada fase.

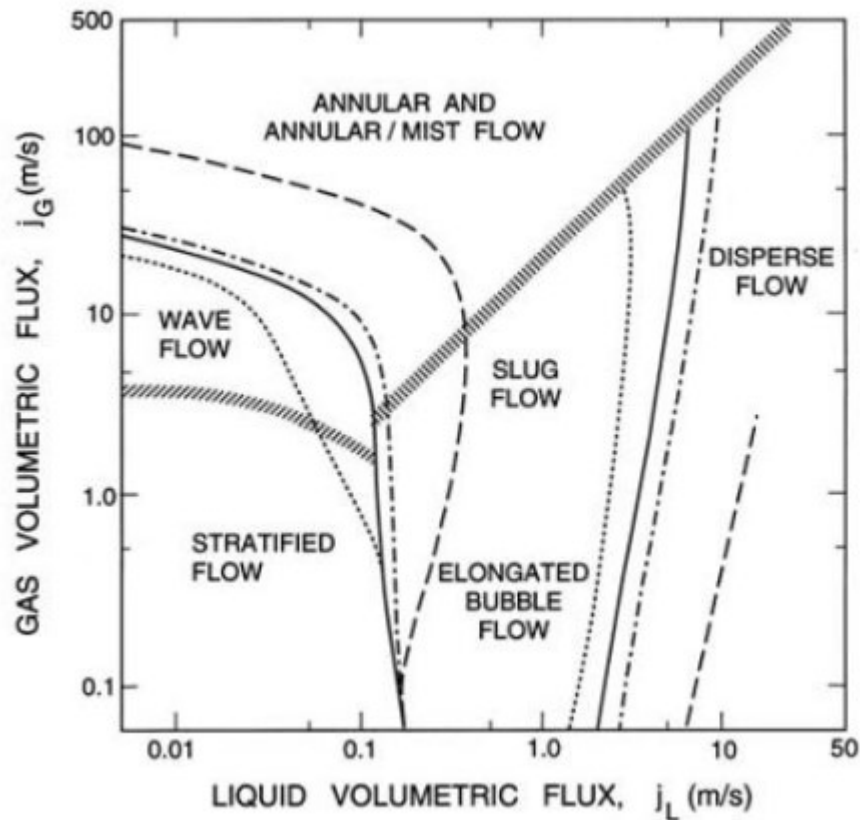


Figura 3: Mapa ilustrando a região de transição para diferentes diâmetros. Adaptado de Brennen [11].

2.1.3 Conceitos Básicos do Escoamento Intermitente

No escoamento bifásico, é comum a utilização do subscrito G para se referir a fase gás e L para a fase líquida. O conceito mais simples é o de velocidade média de cada fase, u , definida nas Equações ((1) e ((2).

$$u_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (1)$$

$$u_L = \frac{Q_L}{A_L} \quad (2)$$

Onde Q é a vazão volumétrica e A é a área da seção transversal ocupada pelo líquido ou gás.

A relação entre o volume ocupado pela fase gás e o volume total é denominado de fração de vazio e o símbolo utilizado é α_G . Quando o volume referido é o da fase líquida, é comum a utilização do termo *hold-up* e do símbolo α_L . Para pequenos volumes de controle, é possível fazer a aproximação que a relação entre os volumes é a relação entre as áreas. Assim a fração de vazio e o *hold-up* podem ser definidos conforme a seguir.

$$\alpha_G = \frac{A_G}{A} \quad (3)$$

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A} \quad (4)$$

Outra definição utilizada é a velocidade superficial, j , que é a velocidade de cada fase, caso escoasse sozinha na tubulação. Assim:

$$j_L = \frac{Q_L}{A} \quad (5)$$

$$j_G = \frac{Q_G}{A} \quad (6)$$

E então a velocidade da mistura, j_m , é definida pela Equação ((7):

$$j_m = \frac{Q}{A} = \frac{Q_L + Q_G}{A} = j_G + j_L \quad (7)$$

Outro importante conceito no estudo do escoamento intermitente é o conceito da célula unitária, região compreendida entre o começo de uma bolha alongada e a extremidade oposta de um pistão líquido, como proposto por Wallis [10]. Como pode ser observado na Figura 4.

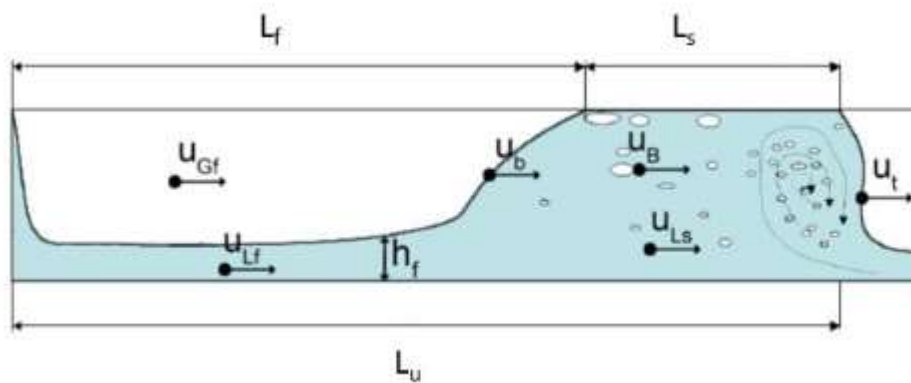


Figura 4: Célula Unitária de golfada. Adaptado de Carpintero-Rogero [19].

Algumas grandezas de interesse (ilustradas acima) no estudo do escoamento intermitente são:

L_f – Comprimento da região de filme líquido, ou comprimento da bolha.

L_s – Comprimento da região do pistão líquido.

L_u – Comprimento da célula unitária, igual a soma de L_f e L_s .

h_f – Altura do filme líquido.

u_{LS} – Velocidade média da fase líquida na região do pistão líquido.

Outros parâmetros muito usados para avaliação do escoamento intermitente são a frequência de passagem, a velocidade média e o comprimento dos pistões. Neste trabalho utiliza-se o número de Strouhal, S_t , e comprimento, L , adimensionais, propostos por Fossa [14]. Como podem ser expressos a seguir:

$$S_t = \frac{f * D}{j_G} \quad (8)$$

$$L = \frac{L_s}{D} \quad (9)$$

Onde f é a frequência de passagem do pistão, D é o diâmetro interno da tubulação e L_s é o comprimento médio do pistão.

Como resultado ao valor médio da frequência de passagem, Fossa [14] propõe uma curva característica dada pela equação a seguir:

$$S_t = \frac{0.044X_L}{1-1.71X_L+0.7X_L^2}, \quad \text{onde } X_L = \frac{j_L}{j_m} \quad (10)$$

Essa curva foi utilizada para comparação com os resultados experimentais. Os resultados referentes a comprimento foram comparados com os obtidos por Fossa e os de velocidade com os obtidos por Gregory e Scott [15] e Bendiksen [16], caracterizados por Fossa como as Equações ((11) e ((12). As Figura 5, 6 e 7 apresentam as curvas obtidas na literatura, para o número de Strouhal, comprimento e velocidade de pistão, respectivamente, que serão usados de parâmetros de comparação nesse trabalho.

$$V_{slug} = 1.35(j_m) \quad (Gregory \& Scott) \quad (11)$$

$$V_{slug} = 1.13(j_m) + 0.542\sqrt{gD} \quad (Bendiksen) \quad (12)$$

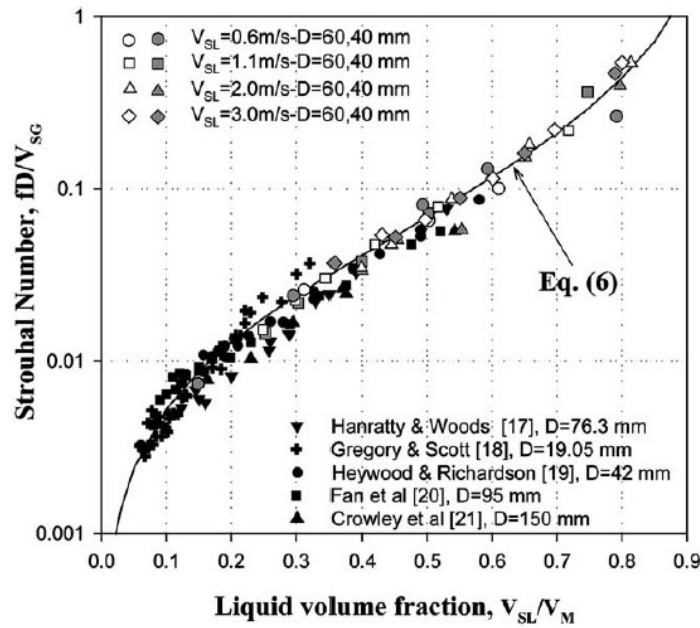


Figura 5: Resultados obtidos por Fossa [14] para comparação adimensional de frequência.

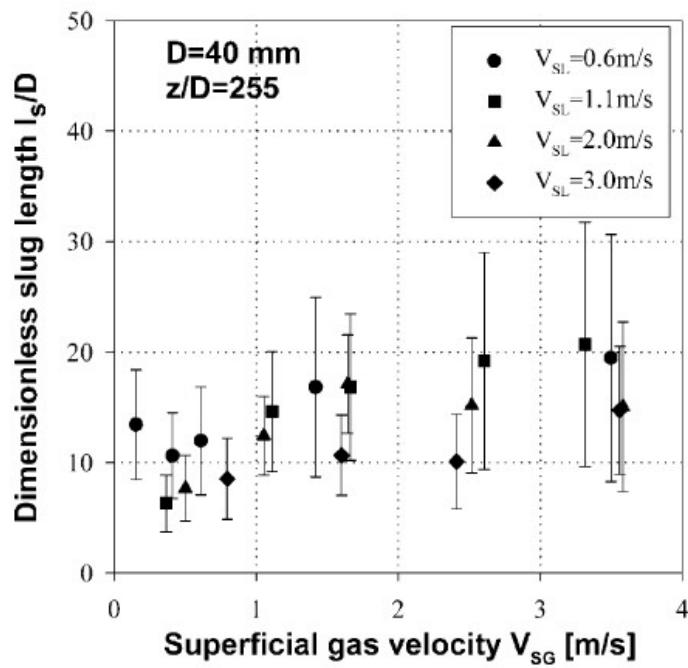


Figura 6: Resultados de comprimento de pistão obtido por Fossa [14].

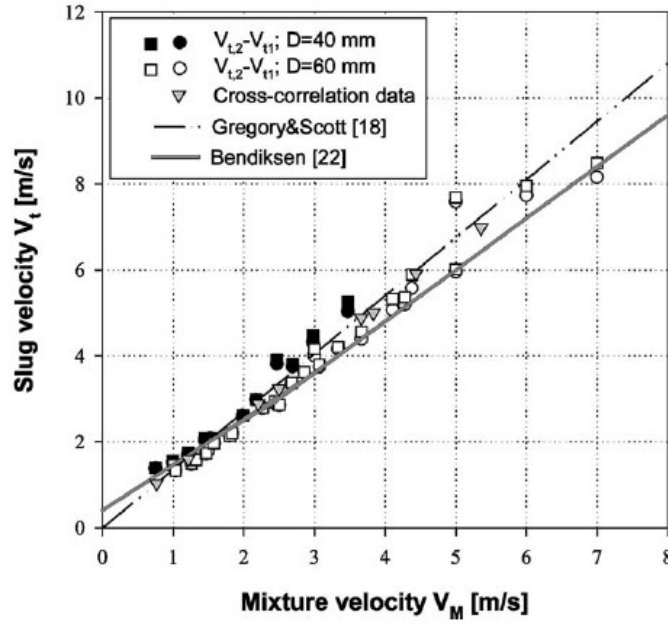


Figura 7: Resultados de velocidade média de pistão obtidos por Fossa [14].

2.2 O Fenômeno da Redução de Arraste

O primeiro trabalho registrado a abordar o fenômeno de redução de arraste foi feito por Toms [29] em 1948, neste constatou-se que a adição de polímeros com alto peso molecular contribuía com uma considerável diminuição do fator de atrito de escoamentos turbulentos. Porém Savins [1] foi um dos pioneiros a propor uma definição para o fenômeno, propondo a razão entre a quedas de pressão do escoamento com e sem adição de polímero para avaliar a efetividade do polímero. Assim, para uma mesma vazão e mesmo diâmetro de tubo, como mostra a Equação ((13), a razão de redução de atrito é dada pela queda de pressão da solução (Δp) sobre a queda de pressão do solvente (Δp_o). Para o caso em que há redução de atrito teremos um valor de $DR < 1$.

$$D_R = \frac{\Delta p}{\Delta p_o} \quad (13)$$

A definição de redução percentual do atrito é dada conforme a Equação((14).

$$D_R(\%) = (1 - D_R) \times 100 \quad (14)$$

Nos estudos de Virk [2, 3, 4] constatou-se que a redução do fator de atrito é proporcional a concentração do polímero, seu peso molecular e ao incremento do número de Reynolds. Sua eficiência está especialmente ligada à qualidade do solvente, e os bons solventes são os que permitem que as moléculas dos polímeros fiquem menos “enoveladas”.

As pesquisas de Virk mostraram que o efeito da DR não é ilimitado, cresce até diferentes pontos para cada configuração. Quando esse ponto era atingido o valor de DR estagnava ou começava a diminuir, que era o mais comum para a maioria dos casos. Estes pontos formavam uma curva que Virk propôs como a assíntota de máxima redução de arraste (MDR), que independe do diâmetro da tubulação e do tipo de polímero.

Ainda que existam muitos estudos sobre o tema, até então não há um consenso sobre o mecanismo físico desse fenômeno. As hipóteses se dividem em duas linhas, uma baseada nos efeitos elásticos e outra baseada nos efeitos viscosos.

A teoria elástica sugerida por Tabor e De Gennes [17] propõe que os polímeros atuam como pequenas molas que absorvem a energia dos vórtices menores, transformando-a em energia elástica, devolvendo-a ao escoamento caso o tempo de relaxação do polímero seja suficientemente grande. O tempo de relaxação é o tempo necessário para que o polímero retome ao seu estado de equilíbrio. Este tempo está relacionado com a massa específica e viscosidade da solução. A Figura 8 ilustra esse mecanismo.

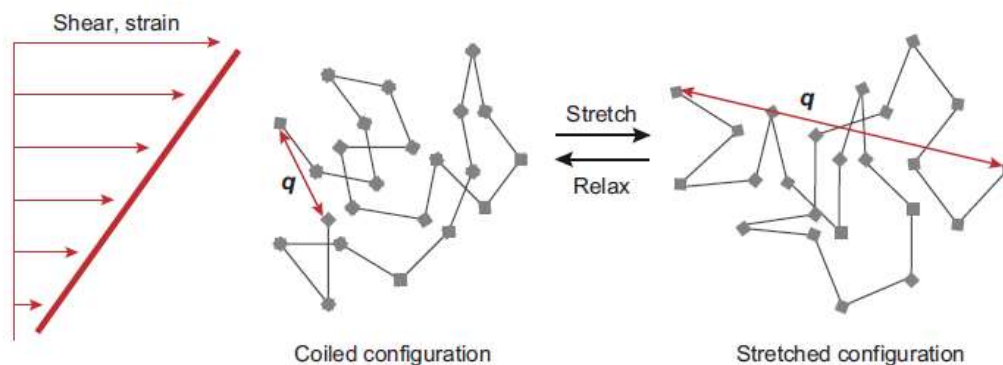


Figura 8: Esticamento e relaxação do polímero durante o escoamento. Extraído de White e Mungal [20].

Essa teoria sugere que os polímeros impedem os vórtices menores de se formar, afetando a dinâmica do transporte de energia entre as escalas da turbulência, promovendo a redução de arraste. Essa teoria considera que a viscosidade não é um parâmetro dominante, uma vez que existe a assíntota de máxima redução de arraste, caso contrário, o arraste diminuiria independentemente da concentração de polímero, segundo a proposta de Joseph D. [18].

É importante ressaltar que a teoria elástica propõe uma nova explicação para o mecanismo de DR, o que não descredita a teoria viscosa. Por exemplo, para polímeros rígidos a teoria elástica não se aplica, pois, as moléculas não possuem a mesma maleabilidade de polímeros flexíveis.

A teoria viscosa se baseia no fato de que ao se adicionar um polímero de alto peso molecular a uma solução escoando em regime turbulento, este atua aumentando a sua viscosidade, que por consequência aumenta a dissipação de energia dos vórtices dentro do escoamento, como pode ser visto no trabalho de L'vov [21].

2.3 A Goma Guar

A Goma guar é um polímero natural hidrossolúvel, mais comumente utilizado na indústria alimentícia como espessante, estabilizante, emulsificante e agente de corpo. É frequentemente adicionado em certas marcas de iogurtes e no espessamento de sorvetes, congelados, molhos e temperos. Porém, seu uso no processo de fraturamento hidráulico de reservatórios de petróleo e redução de arraste tem sido mais estudado recentemente.

Escolheu-se trabalhar com a Goma Guar como agente redutor de atrito pois esta substância apresenta como vantagem o fácil manuseio e a baixa degradação quando comparado com outros polímeros, como a poliacrilamida. Sua eficácia foi testada nesse projeto em concentrações de 400ppm e 600ppm. Em nossos testes verificou-se que a Goma Guar não apresentou degradação, mesmo para ensaios longos (10 horas), o que é uma excelente característica que facilita os testes, bem como seu uso no campo. O polímero foi testado em ensaios monofásicos e bifásicos, e seus resultados de queda de pressão, bem como os resultados para as grandezas estatísticas que caracterizam o escoamento, serão apresentados na seção de Resultados, Seção 4.



Figura 9: Amostra de Goma Guar como obtida do fornecedor.

3 Metodologia Experimental

3.1 Montagem da Bancada Experimental

Os testes para a avaliação dos efeitos de polímeros foram realizados em uma seção de testes que foi construída no Laboratório de Engenharia de Fluidos da PUC-Rio. Esta seção de testes é apresentada de forma esquemática na Figura 10. A seção de testes é formada por tubos de PVC de 21 mm de diâmetro e 6 metros de comprimento, conectados a um duto de acrílico de 40 mm de diâmetro interno e 12 metros de comprimento. Água é bombeada de um reservatório passando pelo tubo de PVC, pelo de acrílico e retornando ao reservatório. Uma bomba de cavidades progressivas com rotação controlada por um inversor de frequência é responsável pelo bombeio da água com vazão volumétrica constante. Após uma curva de 180° de raio longo, há uma conexão em Y onde ar comprimido da rede do laboratório é injetado no duto formando o escoamento bifásico. A vazão de ar é medida por um rotâmetro calibrado. A mistura bifásica é separada no tanque de água, sendo o ar descartado para o espaço do laboratório. A Figura 11 apresenta as fotos das duas seções e sua conexão no ambiente laboratorial.

Esta montagem permitiu uma observação diferenciada do experimento, se comparada a outras seções de teste descritas na literatura. Embora o foco desse trabalho seja a observação do regime bifásico, a linha de injeção de líquido pelo tubo de PVC, descrito anteriormente, atuou como uma pré-seção de testes onde pode-se fazer o monitoramento em tempo real da degradação do polímero no trecho de escoamento monofásico, através de sensores de queda de pressão.

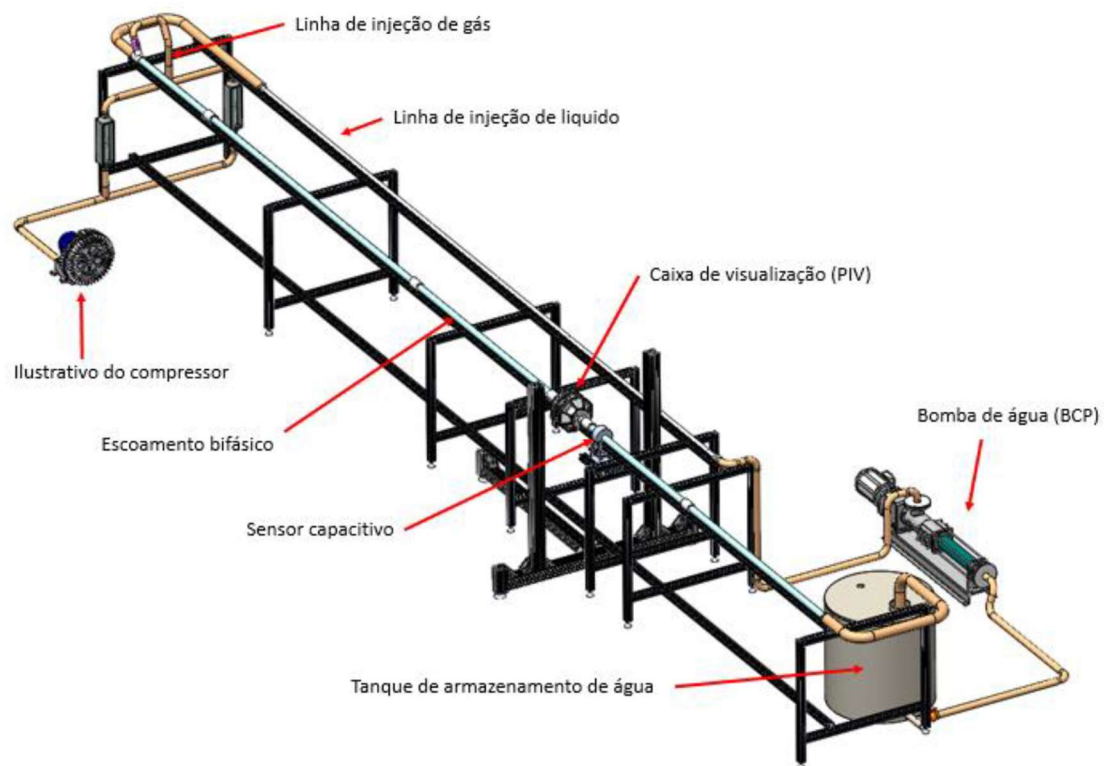


Figura 10: Desenho simplificado da bancada experimental.



Figura 11: Foto da pré-seção de PVC e da tubulação do escoamento bifásico(esquerda); foto do ponto de mistura ar-água(direita).

3.2 Instrumentação Utilizada e Aquisição de Dados

Na região de escoamento monofásico, 6 tomadas de pressão com 1mm de diâmetro foram instaladas ao longo da tubulação de PVC, igualmente espaçadas em 945 mm. As medidas de queda de pressão ao longo do tubo são obtidas por um transdutor do tipo membrana da empresa Valydine Engeneering, calibrado contra um manômetro de mercúrio. A incerteza na medição da queda de pressão era de $\pm 6\%$.

Para a região de escoamento bifásico, devido às elevadas variações de pressão causadas pelo escoamento em golfada, dois sensores foram utilizados: um transdutor do tipo membrana Valydine para regimes de alta vazão e um diferencial de pressão úmido/úmido bidirecional Omega, para médias e baixas vazões, resultando em uma incerteza de 6%, para 95% de confiabilidade. Os sensores foram instalados na seção para realizar medidas de 3 tomadas de pressão, igualmente espaçadas de aproximadamente 3m, embora devido à sua pequena faixa de operação, o sensor Omega só possa ser utilizado em comprimentos menores de aquisição de queda de pressão.

A saída de ambos os sensores, em Volts, é lida por uma placa NI USB-6009. Desta forma, uma rotina em *Labview* foi usada para a aquisição dos dados instantâneos, conversão para Pascal e cálculo do valor médio.

Para a caracterização do regime bifásico utilizou-se o sensor capacitivo de fração de vazio Nexus (R200), da empresa Specrux, que permite a obtenção de dados estatísticos do escoamento, como velocidade, comprimento e frequência de passagem de golfadas. Os medidores de pressão e o sensor capacitivo podem ser vistos na Figura 12.



Figura 12: Transdutores de pressão(esquerda) e sensor de fração de vazão(direita).

3.3 Procedimento Experimental

Com a bancada montada e os sensores testados, passou-se para as primeiras rotinas de testes. O primeiro passo teve como objetivo validar o aparato experimental. Essa validação foi feita através da comparação dos resultados de queda de pressão (para ambos os regimes) e os resultados estatísticos (bifásico) do escoamento sem polímero com os resultados previstos na literatura.

Para assegurar o funcionamento dos equipamentos, os primeiros testes foram realizados apenas com água escoando nas tubulações. Os dados de pressão foram adquiridos com 20hz de frequência em rotinas de programação desenvolvidas em *Labview*. Também foram realizados testes com o sensor de fração de vazão, visando identificar a qualidade da água necessária para o funcionamento correto do equipamento. Concluiu-se que a água destilada seria a mais apropriada devido à sua melhor capacidade de solubilizar o polímero e melhores resultados em testes de repetibilidade anteriores.

Após conferir o funcionamento dos sensores, a matriz de testes bifásicos foi planejada levando-se em consideração os limites de operação dos equipamentos e o mapa de padrões do escoamento da literatura. Com isso foram escolhidas 3 vazões de ar e 3 vazões de água de forma que fossem medidos 9 pontos de combinações de vazões baixas, médias e altas em cada fase. Buscou-se construir uma matriz quadrada (escala logarítmica) de testes. A Figura 13 apresenta o mapa de padrões de escoamento bem como os 9 pontos experimentais. Na Tabela 1 é pos-

sível ver os valores das velocidades superficiais de ar e água, o número de Reynolds (Re) da seção monofásica, o número de Reynolds da fase líquida do regime bifásico (Re_L) e o número de Reynolds da mistura água e polímero do escoamento bifásico (Re_{Lm}). Esses cálculos foram feitos através das Equações ((15) e ((16) à seguir.

$$Re_L = \frac{\rho_L V_L D}{\nu_L}, \text{ onde } V_L = \frac{j_L}{\alpha_L} \quad (15)$$

$$Re_{Lm} = \frac{\rho_L V_L D}{\nu_m}, \text{ onde } V_L = \frac{j_L}{\alpha_m} \quad (16)$$

Onde ρ_L é a densidade da fase líquida, ν_L é a viscosidade da fase líquida, ν_m é a viscosidade da mistura água-polímero, D é o diâmetro do tubo, j_L é a velocidade superficial de líquido, α_L é o *holdup* de líquido médio e α_m é o *holdup* de mistura água-polímero médio.

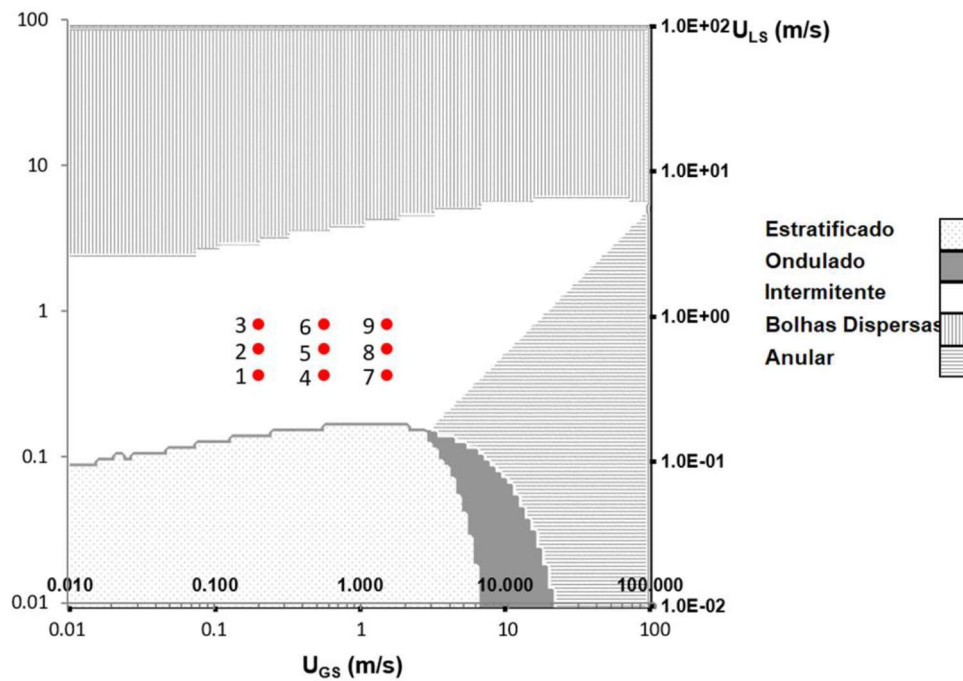


Figura 13: Mapa de padrões de escoamento com os pares de vazões avaliados nesse trabalho.

Ponto	JG(m/s)	JL(m/s)	Re(monofásico)	ReL(bifásico)
1	0.2	0.36	29000	23500
2	0.56	0.36	29000	33100
3	1.5	0.36	29000	45733
4	0.2	0.55	44000	30856
5	0.56	0.55	44000	43937
6	1.5	0.55	44000	59652
7	0.2	0.81	65000	48009
8	0.56	0.81	65000	71701
9	1.5	0.81	65000	102779

Tabela 1: Pares de vazões de gás (JG) e líquido (JL) indicados nos pontos da Figura 13.

Para a realização das medidas de queda de pressão a distância entre as tomadas na seção monofásica foi ajustada para 3.95m, pois o sinal obtido possui uma média mais alta e, portanto, é associado com menor nível de incerteza experimental. Para as medidas no regime bifásico foi necessário utilizar distâncias diferentes (2.77m e 5.31m) devido à pequena faixa de operação do sensor Omega. As medidas de pressão foram realizadas três vezes, em eventos diferentes, com o intuito de verificar a repetibilidade das medições. O resultado referente à seção monofásica foi comparado com aquele previsto pelo diagrama de Moody [22] para tubos lisos, enquanto o gradiente de pressão obtido no regime bifásico foi comparado com as previsões do modelo de Lockhart-Martinelli [23].

Em paralelo às medidas de pressão, foram aquisitados os dados do sensor de fração de vazio. O sensor foi posicionado a 9.07m da entrada da tubulação de acrílico, a fim de tentar garantir o desenvolvimento completo das golfadas. Os dados do sensor capacitivo foram aquisitados a 2000Hz durante 30 minutos, e as estatísticas obtidas foram comparadas com os dados da literatura.

Com os resultados obtidos na etapa de validação com a água destilada e o parâmetro de comparação estabelecido, passou-se para os testes com a solução de polímero. No tanque da bancada, cheio com água destilada, foram dissolvidas as concentrações estipuladas do polímero (400ppm e 600ppm) e a bomba de água foi acionada. Passado algum tempo do fluido em circulação, permitiu-se a entrada de

ar no sistema já com a vazão estabelecida pelo rotâmetro. O sistema então era mantido em circulação por alguns minutos até a estabilização do escoamento. Com o sistema estável e o regime bifásico desenvolvido, iniciava-se a aquisição de dados dos sensores, que como dito anteriormente foi realizada por 30 minutos. Esse procedimento foi repetido até que todos os dados fossem aqusitados para os 9 pontos experimentais determinados anteriormente para as combinações de vazões de solução e ar, e para cada um dos três testes de repetibilidade.

3.4 Processamento de dados

Com os testes concluídos, os dados de queda de pressão aqusitados pelo Software *Labview* foram processados em rotinas de MATLAB com o intuito de comparar os resultados dos testes de repetibilidade. Com os resultados qualificados calculou-se os valores médios de queda de pressão para cada um dos pontos experimentais da matriz de testes. Estes valores, em conjunto com os dados obtidos pelo padrão de água sem polímero, foram utilizados para o cálculo da redução de arraste (DR) através da Equação ((17)).

$$D_R(\%) = \left(1 - \frac{\Delta p}{\Delta p_o}\right) \times 100 \quad (17)$$

Onde Δp e Δp_o , equivalem às médias de queda de pressão obtidas para a solução polimérica e o padrão de água pura, respectivamente.

Os dados estatísticos, obtidos pelo programa Nexus (oferecido pelo fabricante do sensor), também foram processados por rotinas em MATLAB. Os dados obtidos pelo sensor de vazio se apresentam em dois canais provenientes dos dois fios sensores presentes no sensor. Após serem filtrados, estes dados eram processados por meio de um procedimento de correlação cruzada dos dois sinais. A rotina começa com o registro dos picos de onda que demarcam o começo dos pistões do escoamento em golfada. A distância entre os picos é então medida como o tempo entre os pistões Δt_1 . Com o inverso desse valor obtém-se a frequência f de

passagem do pistão para então calcular o número de Strouhal St , através da Equação (19). O valor para a velocidade é obtido através da razão entre a distância já conhecida entre fios do sensor ΔSt e o tempo medido entre os dois sinais medidos Δt_2 . Essa é a velocidade média de passagem do pistão V_{slug} , e é utilizada para o cálculo comparativo do comprimento adimensional médio do pistão L/D . O processamento dos sinais aquisitados pode ser observado de forma representativa na Figura 14 e conforme o equacionamento a seguir.

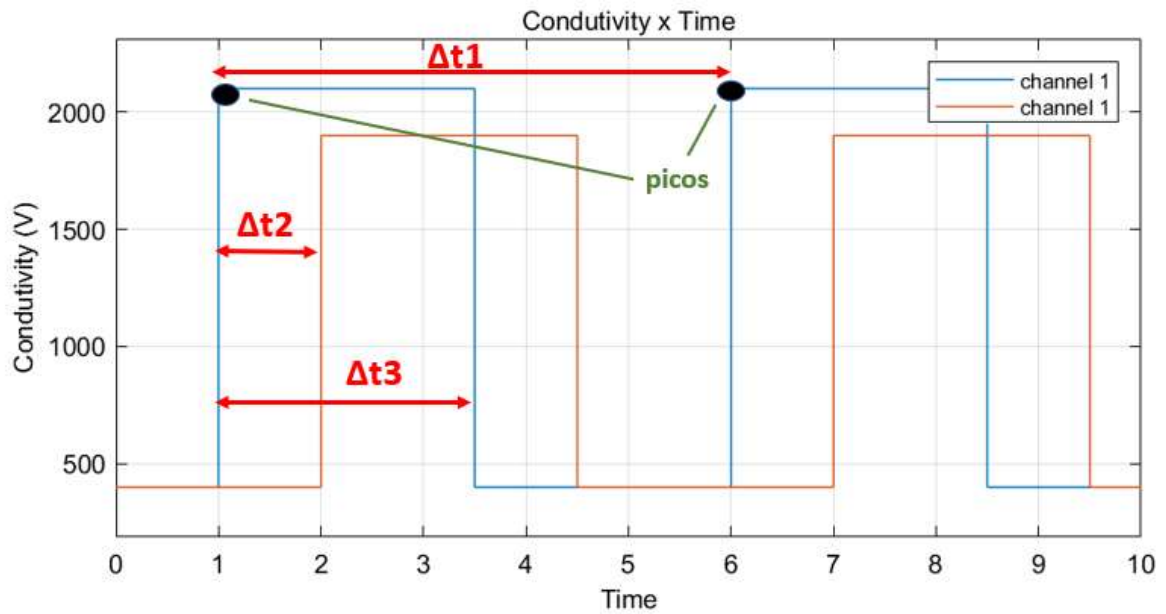


Figura 14: Imagem representativa dos sinais processados, obtidos pelo sensor de fração de vazio.

$$f = \frac{1}{\Delta t_1} \quad (18)$$

$$S_t = \frac{f * D}{j_G} \quad (19)$$

$$V_{slug} = \frac{\Delta S_t}{\Delta t_2} \quad (20)$$

$$L_s = V_{slug} * \Delta t_3$$

(21)

4 Resultados

4.1 Validação da Seção de Testes

O processo de validação da seção foi realizado utilizando as medidas de queda de pressão para o fluido sem polímero para os dois regimes, e comparando seus resultados com as previsões de modelos da literatura.

Para o regime monofásico, calculou-se o fator de atrito, para cada um dos pontos experimentais e comparou-se com os valores previstos pelo diagrama de Moody, obtidos da correlação de Colebrook [22]. Na Figura 15 são apresentados os resultados do fator de atrito para cada ponto experimental e a curva prevista pelo diagrama de Moody. Como se pode observar, os dados experimentais coincidem de forma satisfatória com aqueles previstos pela literatura, estando dentro dos limites de incerteza com 95% de confiabilidade.

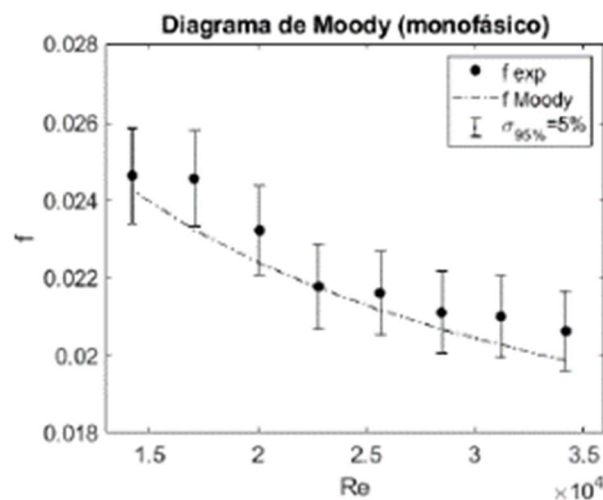


Figura 15: Comparação do fator de atrito no regime monofásico com o diagrama de Moody [22].

Para a validação do escoamento bifásico utilizou-se da comparação dos resultados da queda de pressão com os previstos pelo modelo de Lockhart-Martinelli, retirados do trabalho de Chisolm [23], que é usado com frequência na literatura. A Figura 16 apresenta os resultados experimentais e os previstos pelo modelo. Embora o modelo de Lockhart-Martinelli apresente um desvio padrão

alto, é o que melhor se ajustou aos dados experimentais, obtendo um erro experimental menor que 25% para a maioria dos pontos da matriz de testes.

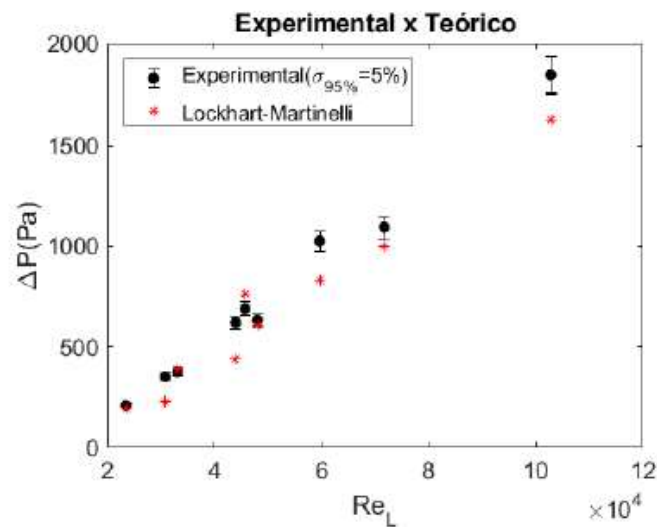


Figura 16: Comparação do gradiente de pressão experimental com o modelo de Lockhart-Martinelli [23].

4.2 Influência na redução de arraste

Após o processamento dos dados, foram investigadas as mudanças causadas pela adição do polímero. A Figura 17 apresenta os resultados da mudança da queda de pressão da seção monofásica e no regime bifásico expressos em termos do percentual de redução de atrito.

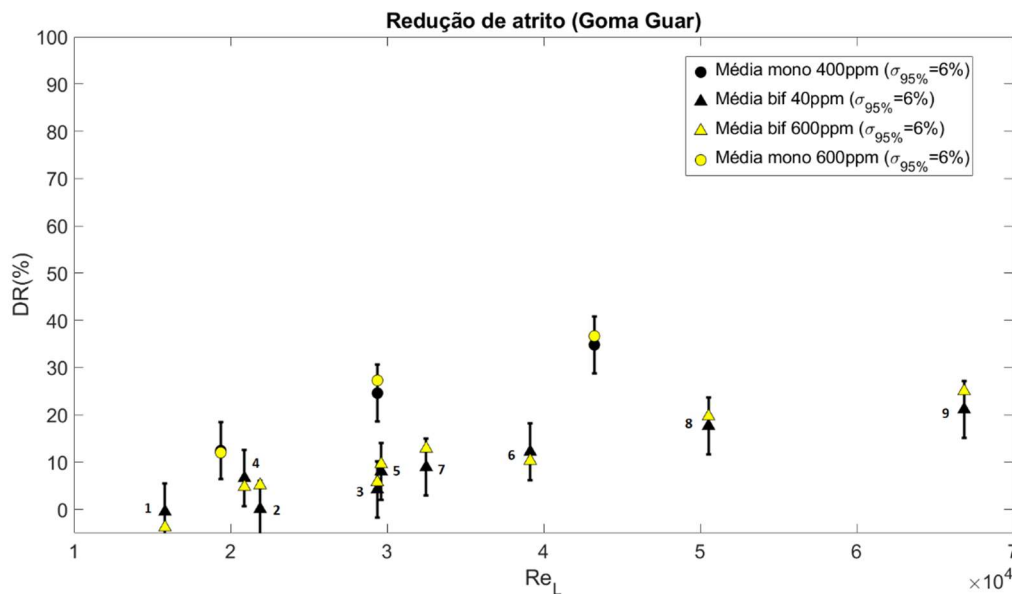


Figura 17: Resultado da redução de atrito obtida com a Goma Guar no escoamento monofásico e bifásico.

Nesta figura, os pontos enumerados correspondem àqueles da matriz de testes do mapa de padrões visto anteriormente. Os símbolos pretos representam as médias obtidas para a solução de 400ppm, enquanto os amarelos para a solução de 600ppm e a barra de erro representa a incerteza de medição com 95% de confiabilidade. Pode-se observar que a Goma Guar foi responsável pela redução satisfatória de arraste em todos os pontos medidos. Sua maior efetividade se deu no escoamento monofásico que, para as três vazões de líquido analisadas, obteve os maiores valores de DR, chegando até a 35% para os valores de número de Re próximos a 44000. Vale ressaltar que esse número de Re foi calculado com as propriedades da água destilada sem a adição do polímero ($Re = Re_L$).

Com relação à degradação, o polímero não apresentou perda de eficiência durante os testes. Considerando o volume total de solução preparada (125 litros) e a bomba de água programada para manter a maior vazão de líquido (0.81 m/s), estima-se que o volume total da solução tenha passado pela bomba pelo menos 14 vezes, em um período de 30 minutos, e 293 vezes, em um período de 10 horas. Estes valores demonstram a resistência a degradação da Goma, pois o fluido é submetido a grandes forças de cisalhamento quando passa pela bomba, que são danosos para a estrutura do polímero.

No regime bifásico observa-se que a adição do polímero começa a apresentar valores de DR representativos quando o sistema é regido por vazões mais

altas, com Re_L acima de 32000, chegando a valores próximos a 20% em Re_L em 68000. Para o regime bifásico o número de Reynolds foi calculado com base na viscosidade da mistura da água com polímero ($Re = Re_{Lm}$).

4.3 Influência no comportamento do regime

Como última etapa do trabalho foram analisadas as alterações causadas pela adição do polímero nos valores médios de frequência, comprimento e velocidade dos pistões de líquido. A Figura 18 mostra o resultado comparativo do valor médio desses parâmetros sem e com o polímero. Como pode-se observar, a Goma Guar não foi capaz de causar mudanças significativas nos valores médios de frequência, comprimento e velocidade dos pistões, pelo menos para essas concentrações investigadas.

A combinação dos resultados de redução de arraste da ordem de 20% obtidos, com a inalteração das estatísticas do escoamento bifásico indicam que o efeito de redução de atrito observado deve-se, aparentemente, à redução do atrito na fase líquida que escoar em regime turbulento. Efeitos como a variação de velocidade ou comprimento das golfadas que poderiam afetar a queda de pressão total, parecem não ser relevantes para as condições estudadas no presente trabalho.

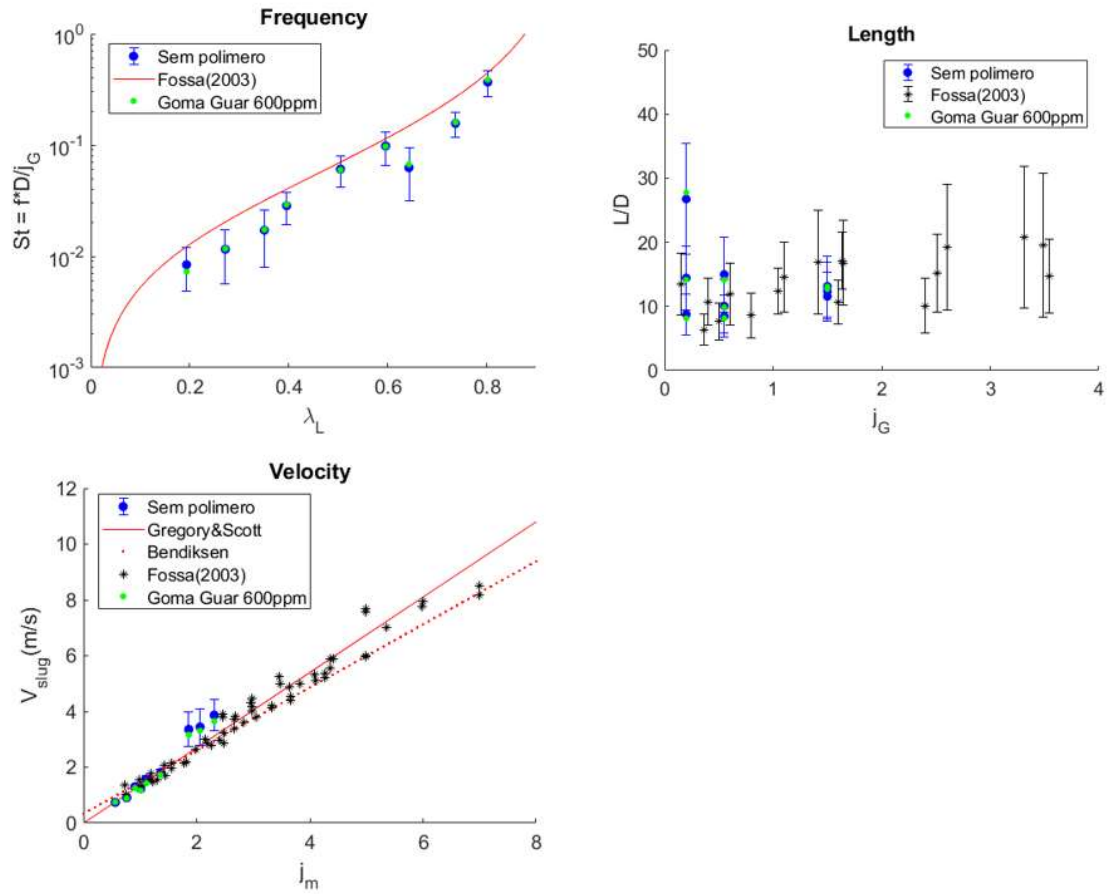


Figura 18: Comparação dos valores médios das estatísticas sem e com o polímero para os pontos experimentais.

5 Conclusão

O presente trabalho teve o objetivo de estudar a eficiência da adição de polímeros no fenômeno de redução de arraste para escoamentos turbulentos monofásicos e bifásicos. Para tanto, foram realizados ensaios experimentais em uma bancada de testes de escala laboratorial, onde os dados de queda de pressão e fração de vazão foram medidos para quantificar a eficiência da presença do polímero na redução de arraste DR e sua influência no padrão de escoamento.

O polímero testado foi a Goma Guar, que é de fácil manuseio e já é largamente utilizado na indústria alimentícia. Embora apresente valores mais baixos de DR, se comparado a outros aditivos, demonstrou baixíssima degradação, mantendo sua eficácia até para ensaios longos (10 horas). O aditivo apresentou uma redução satisfatória em todos os pontos medidos, obtendo valores de até 35% para números de Reynolds próximos a 44.000 em regime monofásico e até 20% para números de Re próximos a 68.000 em regime bifásico.

A adição da goma não causou alterações significativas no padrão de escoamento da solução, como pode ser observado pela comparação dos valores médios de frequência, velocidade e comprimento do pistão, o que indica que o efeito da redução de arraste no regime bifásico deve-se principalmente à redução de atrito da fase líquida do escoamento.

6 Referências Bibliográficas

- [1] J. G. Savins, “Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow,” Society of Petroleum Engineers Journal, vol. 4, 1964.
- [2] P. S. Virk, E. W. Merrill, H. S. Mickley, and K. A. Smith, “The toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 30, 1967.
- [3] P. S. Virk, H. S. Mickley, and K. A. Smith, “The ultimate asymptote and mean flow structure in tom’s phenomenon,” ASME-Journal of Applied Mechanics, vol. 37, pp. 488–493, 1970.
- [4] P. S. Virk, “Drag reduction fundamentals.,” AIChE Journal, vol. 21, pp. 625–650, 1975.
- [5] F. H. Bark, H. E. J, and M. T. Landahl, “Drag reduction in turbulent flow due to additives: a report on euromech,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 68, 1975.
- [6] Brandão, Lucas Zampirole. Análise experimental da redução de arraste por adição de polímeros rígidos em escoamentos turbulentos. 2021. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo Centro Tecnológico, Vitória, 2021.
- [7] Fernandes, Leonardo Soares. Medição do Campo de Velocidade do Líquido no Escoamento Bifásico, Intermitente, em Duto Horizontal, Utilizando Velocimetria Estereoscópica. 2017. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- [8] G. Hetsroni, Handbook of Multiphase Systems, Hemisphere Publishing Corporation, 1982.
- [9] J. Coates, e B. S. Pressburg, How to Analyse Two-Phase Flow, Chemical, Engineering – September 7, 1959.
- [10] G.B. Wallis, One-dimensional Two-phase Flow, McGraw-Hill, 1969.
- [11] C. E. Brennen, Fundamentals of Multiphase Flow, Cambridge University Press, 2005.
- [12] N. I. Kolev, Multiphase flow dynamics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

- [13] O. Baker, Design of Pipelines for The Simultaneous Flow of Oil and Gas, Society of Petroleum Engineers, Dallas, 1953.
- [14] M. Fossa, et al. Intermittent flow parameters from void fraction analysis. Elsevier, [S. l.], p. 161-168, 1 jan. 2003.
- [15] G.A. Gregory, D.S. Scott, Correlation of liquid slug velocity and frequency in concurrent horizontal gas-liquid slug flow, Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev 11 (1972)
- [16] P. Andreussi, K. Bendiksen, An investigation of void fraction in liquid slugs for horizontal and inclined gas-liquid pipe flow, Int.J. Multiphase Flow 15 (1989)
- [17] M. Tabor; P. G. De Gennes, A cascade theory of drag reduction. Europhysics Letter, vol. 7, p.519-522, 1986.
- [18] T. Min; J. Y. Yoo; H. Choi; D. D. Joseph. Drag reduction by polymer additives in a turbulent channel flow. Journal of Fluid Mechanics, vol. 286, p. 213-238, 2003.
- [19] Carpintero-Rogero, E., Kröss, B. e Sattelmayer, T., Simultaneous HS-PIV and shadowgraph measurement of gas-liquid flows in a horizontal pipe, Lisboa, Portugal: 13th Int Symp on Applications of Laser Techniques, 2006.
- [20] C. M. White; M. G. Mungal, Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives. Revista Anual Fluid Mechanics, vol. 40, p. 253-256, 2008.
- [21] V. S. L'vov; A. Pomyalov; I. Procaccia; V. Tiberkevich, Drag reduction by polymer in wall bounded turbulence. Physical Review Letters, vol. 92, 2004.
- [22] C.F. Colebrook, 1938–1939. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. J. Inst. Civil Eng. 11, 133.
- [23] D. Chisholm, A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 10, pp. 1767–1778, 1967.
- [24] G. Fabula, “Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction,” Trans ASME J Basic Engng, 1971.

- [25] R. G. Larson, "Analysis of polymer drag reduction on a flat plane," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 111, 2003.
- [26] J. Golda, "Hydraulic transport of coal in pipes with drag reducing additives," *Chem Engng Commun*, vol. 45, 1986.
- [27] R. C. R. Figueredo and E. Sabadini, "Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide," *Colloids and Surfaces A*, vol. 215, 2003.
- [28] R. H. J. Sellen, J. W. Hoyt, J. Poliert, and O. Scrivener, "The effect of drag reducing additives on fluid flows and their industrial applications part ii: present applications and futures proposals," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 20, 1982.
- [29] B. A. Toms, Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large reynolds numbers. *Proceedings of the International Congress of Rheology*, Holanda, North-Holland, Amsterdam, Section II, p. 135-141, 1948.