



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

Bruno José Pimentel Pinto

Redução de Arraste em Escoamento Bifásico em Tubulações

Projeto de Graduação

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

Orientadora: Angela O. Nieckele

Rio de Janeiro

Junho de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente aos meus pais Thiago Lucio Bergo Pinto e Rosane Pimentel Pinto por me proporcionar a esta oportunidade única na minha vida e priorizar minha educação independente do esforço envolvido. Agradeço à minha namorada Maria Eduarda Nascimento Santana, por todo o suporte e apoio emocional em momentos difíceis e desanimadores ao longo da vida. Agradeço também aos meus avós que sempre se mostraram motivadores e se orgulharam ao saber que estava matriculado em uma Universidade em um curso de tamanho renome.

Agradeço ao meu grande amigo e irmão de consideração, Miguel Francesco dos Santos por todo o suporte, seja através de experiências ou vivências anteriores, que me permitiu evoluir muito como aluno e, posteriormente, como profissional.

Aos meus amigos e colegas que conheci na PUC-Rio durante minha passagem na graduação, tenham os meus sinceros agradecimentos pelas experiências novas, companheirismo e muitas risadas que nunca esquecerei. Agradeço à PUC-Rio e aos professores do Departamento de Mecânica pelos conhecimentos adquiridos ao longo da minha graduação, aos projetos desenvolvidos e ao crescimento pessoal proporcionado.

E, por fim, agradeço encarecidamente a minha orientadora Profa. Angela O. Nieckele por demonstrar, com maestria, um nível de conhecimento de um tema extremamente complexo e por me dar a oportunidade de ser seu aluno ao longo desses meses. Obrigado pela paciência, compreensão e todo o apoio fornecido não só neste trabalho, mas também no mundo profissional.

Dedico assim este trabalho à minha família que sempre me manteve motivado em todas as minhas conquistas e batalhas.

Resumo

Pimentel Pinto, Bruno José, Nieckele, Angela O. (orientadora).
Redução de Arraste em Escoamento Bifásico em Tubulações.
Rio de Janeiro, 2025. 54p. Trabalho de Conclusão – Departamento
de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de
Janeiro.

A otimização do transporte de fluidos em tubulações é fundamental para aumentar a eficiência operacional e custos associados. O alto atrito característico desses escoamentos acarreta perdas significativas de energia, além de elevar substancialmente os custos de operação. Nesse contexto, a utilização de polímeros como agentes redutores de arraste surge como uma solução promissora, capaz de aumentar a vazão e reduzir o consumo energético. A previsão do potencial de redução de arraste é essencial não apenas na fase de projeto de novas tubulações, dimensionadas para atender a demandas específicas, mas também na operação de sistemas existentes. Essa previsão orienta a definição da frequência e da quantidade de polímero a ser injetada, otimizando o desempenho do sistema. Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho numérico da utilização de fatores de redução de atrito, obtidos em escoamentos monofásicos, em tubulações operando sob condições de escoamento bifásico, no padrão de golfadas, na previsão da redução do arraste. Foram considerados diferentes cenários de escoamento com o propósito de avaliar os efeitos da adição de polímeros na redução da perda de carga, bem como nas grandezas estatísticas associadas às golfadas — como comprimento, velocidade de deslocamento e frequência. Boa concordância foi obtida com os valores experimentais dessas grandezas. Mostrou-se que introdução de polímeros promove redução significativa da perda de pressão e, conseqüentemente, diminuição do consumo energético. Os resultados reforçam o potencial da utilização do Modelo de Dois Fluidos acrescido de fatores de redução de arraste

monofásicos para prever o desempenho de aditivos poliméricos em escoamentos bifásicos complexos.

Palavras-chave:

Escoamento em golfadas, Modelo de Dois Fluidos, Redução de Arraste.

Abstract

Pimentel Pinto, Bruno José, Nieckele, Angela O. (advisor). **Drag Reduction in Pipelines Two-phase Flow**. Rio de Janeiro, 2023. 54p. Final Paper - Department of Mechanical Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

Optimizing fluid transport in pipelines is essential to increase operational efficiency and reduce associated costs. The high friction characteristic of these flows leads to significant energy losses and substantially raises operating expenses. In this context, the use of polymers as drag-reducing agents emerges as a promising solution, capable of increasing throughput and lowering energy consumption. Predicting the drag-reduction potential is crucial not only during the design phase of new pipelines—sized to meet specific demands—but also in the operation of existing systems. Such predictions guide the determination of the frequency and dosage of polymer injections, thereby optimizing system performance. This work aims to analyze, via numerical simulation, the performance of friction-reduction factors derived from single-phase flows when applied to pipelines operating under two-phase flow conditions, in slug pattern, to predict drag reduction. Various flow scenarios were considered to evaluate the effects of polymer addition on pressure-drop reduction as well as on slug-flow statistics—such as slug length, its propagation velocity, and frequency. Good agreement was obtained with experimental measurements of these quantities. It was shown that polymer injection significantly reduces pressure loss and, consequently, energy consumption. The results underscore the potential of employing the Two-Fluid Model augmented with single-phase drag-reduction factors to predict the performance of polymer additives in complex two-phase flows.

Keywords:

Slug flow, Two-Fluid Model, Drag Reduction.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	Objetivo	15
1.2.	Organização do Manuscrito	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.	MODELAGEM MATEMÁTICA	27
3.1.	Modelo de Dois Fluidos	27
3.1.1.	Conservação de Massa	28
3.1.2.	Conservação de Quantidade de Movimento Linear	29
3.1.2.1.	Equações de estado	30
3.1.2.2.	Salto de pressão na interface	30
3.1.2.3.	Pressão hidrostática	30
3.1.2.4.	Modelagem da geometria	31
3.1.2.5.	Tensões cisalhantes	32
3.1.2.6.	Redutor de arraste	34
3.2.	Condições Iniciais de Condições de Contorno	35
3.3.	Grandezas das Golfadas	35
4.	Modelagem Numérica	37
4.1.	Definição dos parâmetros numéricos	38
4.2.	Pós-processamento	39
4.2.1.	Pós-processamento das grandezas das golfadas	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1.	Seleção de Casos	42
5.2.	Redução de Arraste	44

5.3. Grandezas Estatísticas	47
5.3.1. Frequências	48
5.3.2. Comprimento das Golfadas	50
5.3.3. Velocidade das Golfadas	51
6. CONCLUSÃO	54
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	56
8. APÊNDICE A – TESTE DE MALHA	61

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 – Seleção de casos.	43
Tabela 5.2 – Dados experimentais medidos com e sem polímero	43
Tabela 5.3 – Gradiente de pressão numérico com e sem adição de polímero.	44
Tabela 5.4 – Dados numéricos estatísticos com e sem polímero	48
Tabela 8.1 – Teste de malha realizado com o Caso 1 e Caso 8	61

Lista de Figuras

Figura 1.1 Padrões de Escoamentos Multifásicos, Weisman (1983)	14
Figura 3.1 – Vistas da seção transversal e seção axial de um tubo com escoamento estratificado (Adaptado de Tzotzi & Andridtsos, 2013)	28
Figura 3.2 – Esquema de Golfada em um escoamento horizontal. Adaptada de Carneiro et al. (2011).	36
Figura 4.1 – Ilustração da medição da velocidade cada golfada. (a) frente (b) cauda. Chucuya (2010)	40
Figura 5.1 – Comparativo de resultados dP/dx experimental e numérico para casos: (a) sem adição de polímero, (b) com adição de polímero	45
Figura 5.2 – Comparativo numérico e experimental de dP/dx em função de ReL . (a) sem adição de polímero, (b) com adição de polímero.	46
Figura 5.3 – Comparativo de dP/dx numérico para casos sem e com fator redutor de arraste em função de ReL .	46
Figura 5.4 – Efeito do número de Reynolds líquido na redução de arraste para casos numéricos e experimentais	47
Figura 5.5 – Comparativo de valores médios de frequência numérica e experimental, e com correlação de Fossa (2023). (a) sem adição de polímero, (b) com adição de polímero.	49
Figura 5.6 – Comparativo de valores médios de frequência numérica com e sem a adição do polímero.	49
Figura 5.7 – Comparativo do comprimento da golfada numérico e experimental. (a) sem adição de polímero, (b) com adição de polímero.	50
Figura 5.8 – Comparativo do Comprimento da golfada numérico sem e com a adição do polímero.	51
Figura 5.9 – Variação da velocidade da golfada numérica e experimental com a velocidade de mistura. (a) sem adição de polímero, (b) com adição de polímero.	52

Figura 5.10 – Comparativo de valores numéricos da Velocidade da Golfada com e sem adição de polímero.	53
Figura 8.1 – Teste de malha do Caso 1 com e sem adição de polímero	62
Figura 8.2 – Teste de malha do Caso 8 sem adição de polímero.	62

Lista de Símbolos

A	Área da seção transversal da tubulação, [m ²]
a	Coeficiente de discretização, [-]
b	Coeficiente de discretização, [-]
C_0	Número de Courant, [-]
DR	Fator de redução de arraste, [-]
D	Diâmetro do duto, [m]
f	Fator de atrito, [-]
g	Aceleração da gravidade, [m/s ²]
h_L	Espessura do filme líquido, [m]
L	Comprimento, [m]
κ	Curvatura da Interface, [m]
N	Número de pontos, [-]
N_m	Número de medidas de grandezas de golfadas, [-]
P	Pressão, [Pa]
R	Raio de curvatura, [m]
R_G	Constante dos gases, [m ² /s ² /K]
Re	Número de Reynolds, [-]
Res_{max}	Resíduo Máximo no domínio, [-]
S	Perímetro molhado, [m ²]
t	Tempo, [s]
T	Temperatura, [K]
U	Velocidade, [m/s]
ν	Frequência de passagem de golfadas, [Hz]
x	Coordenada axial, [m]
y	Distância à parede do duto, [m]
$\forall$	Volume, [m ³]

Lista de símbolos gregos

α	Fração volumétrica da fase, [-]
β	Ângulo de inclinação da tubulação em relação à horizontal, [°]
μ	Viscosidade dinâmica, [Pa s]
ρ	Massa específica, [kg/m³]
σ	Tensão superficial, [N/m]
φ	Variável genérica, [-]
τ	Tensão cisalhante, [Pa]

Subscritos

G	Gás
i	Interface
L	Líquido
ref	Referência
s	Superficial
$slug$	Golfada
w	Parede
n	n-ésima medida

1. INTRODUÇÃO

Na indústria petroquímica, a otimização do transporte de fluidos em tubulações é uma necessidade constante e de alto valor. O elevado atrito inerente a esse tipo de escoamento resulta em significativas perdas de energia e aumento substancial dos custos operacionais. Existem algumas tentativas para redução do arraste, de forma a reduzir a potência de bombeamento para uma determinada vazão. Para reduzir a queda de pressão em tubulações, diversas abordagens podem ser consideradas. Algumas soluções comuns incluem a redução da pressão de entrada, mas isso pode resultar na diminuição da produção. Outra abordagem seria alterar o diâmetro da tubulação, mas esta opção é muitas vezes impraticável devido aos altos custos envolvidos. Aplicar um revestimento na tubulação é outra possibilidade, mas esse método pode ser complexo, especialmente para linhas de transporte de longa distância. A introdução de polímeros como agentes redutores de arraste é uma solução promissora para mitigar esses efeitos, promovendo aumento de vazão e reduzindo o consumo energético (Abubakar et al., 2014, Fruteau et al., 2024).

Escoamentos bifásicos em tubulações são encontrados em diversas aplicações industriais, como na área nuclear e na área de petróleo e gás. O óleo encontrado nos reservatórios localizados a altíssimas profundidades, encontra-se a altas pressões e temperaturas. No seu transporte em direção a plataforma, a pressão cai, devido a presença do atrito viscoso e devido a redução da pressão hidrostática. Adicionalmente, existe perda de calor para o ambiente, resultando em queda da temperatura. Como resultado, pode ocorrer mudança de fase, formando escoamento bifásico. Muitas vezes o óleo encontrado no reservatório já se encontra misturado com gases e/ou água. Dependendo das propriedades das fases, nos níveis de pressão e temperatura, e da topografia, as fases se arranjam de diferentes formas ao longo da trajetória. Por exemplo, os padrões de escoamento encontrados em geometrias verticais incluem bolhas, golfadas, caótico,

anular, bolhas dispersas; enquanto nas tubulações horizontais são observados estratificado, estratificado ondulado, bolhas dispersas, golfadas, pistão e anular, conforme ilustrado na Figura 1.1.

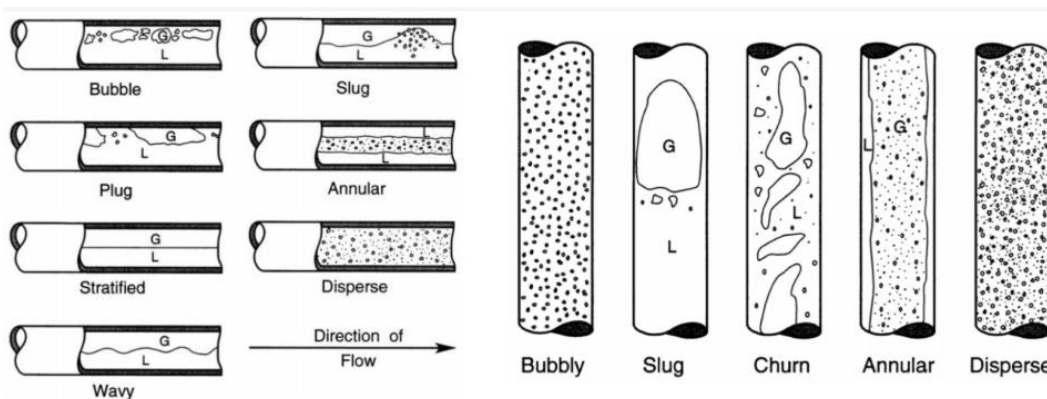


Figura 1.1 Padrões de Escoamentos Multifásicos, Weisman (1983)

Um dos grandes desafios das previsões numéricas é o rastreamento das fases no domínio, que podem ser distribuídas em diferentes padrões dependendo das condições operacionais do escoamento (temperatura, pressão e vazão), propriedades do fluido (densidade, viscosidade e tensão superficial) e a geometria da tubulação. As velocidades superficiais do líquido e do gás influenciam diretamente na dinâmica da interface e, consequentemente, no comportamento dos padrões de fluxo. A instabilidade interfacial é um mecanismo essencial para a transição entre as configurações de escoamento.

Dentre os diversos padrões apresentados, o padrão de golfadas, muito comum em diversas aplicações industriais e do petróleo. Este padrão, caracterizado pela intermitência da distribuição espacial e temporal entre fases, gera variação periódica da fração de vazio e pressão na tubulação, sendo sua previsão um grande desafio numérico. Consequentemente, existem diversos modelos matemáticos para prever escoamentos bifásicos (Ishii e Hibiki, 2011). Dentre os modelos disponíveis, o Modelo de Dois Fluidos tem se mostrado bem atraente. De acordo com Issa e Kempf (2003) e Carneiro et al. (2011), este modelo é capaz de prever a formação e evolução do padrão de golfadas, sem a necessidade de introdução de critérios de transição entre regimes ou de correlações empíricas para as características das golfadas.

No setor de óleo e gás, o transporte eficiente de misturas de óleo/água e gás natural impacta diretamente a produtividade e a segurança operacional. Em tais sistemas, o arraste gerado pelo atrito entre as fases e as paredes da tubulação pode limitar a eficiência do escoamento, impondo desafios adicionais ao controle de vazão e ao consumo energético. A redução de arraste em escoamentos bifásicos tem sido objeto de estudos experimentais e numéricos ao longo das últimas décadas, e métodos de modelagem matemática têm evoluído para permitir previsões mais precisas desse fenômeno em condições operacionais complexas.

A previsão da redução de arraste a ser obtida em uma determinada aplicação é fundamental não só nas etapas de projeto das tubulações para determinada demanda, mas para operação de tubulações existentes, orientando na determinação da frequência e quantidade de polímero a ser injetada nas linhas.

A realização de experimentos multifásicos é difícil e cara, além de envolver muitas variáveis. Uma alternativa é determinar o fator de redução de arraste empregando escoamento monofásicos e empregar esses fatores para prever escoamentos multifásicos (De Paula, et al., 2024; Fruteau et al., 2024).

Uma ferramenta computacional que forneça subsídios para a otimização do transporte de misturas bifásicas em tubulações é altamente desejável, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias que promovam a eficiência energética e a sustentabilidade das operações industriais.

1.1. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo analisar a capacidade de previsão numérica do Modelo de Dois Fluidos na determinação do impacto de fatores de redução de atrito, obtidos para escoamentos monofásicos, em tubulações que operam com escoamento bifásico. Diferentes cenários de escoamento foram simulados para avaliar o efeito da introdução de polímeros em escoamento bifásicos no padrão de golfadas. Determinou-se a redução da perda de carga e influência em grandezas características das

golfadas, como o comprimento da golfada, sua velocidade de translação, assim como sua frequência. A solução numérica foi validada com dados experimentais. Esse estudo visa contribuir para a otimização de sistemas de transporte bifásico, oferecendo subsídios para futuras aplicações industriais e para o desenvolvimento de tecnologias que priorizem a eficiência energética e a sustentabilidade operacional.

Para alcançar o objetivo proposto, o Modelo de Dois Fluidos 1D transiente, que vem sendo desenvolvido pelo Grupo de Dinâmica dos Fluidos Computacional da PUC-Rio, foi adaptado para considerar o fator redutor de arraste.

1.2. Organização do Manuscrito

No Capítulo 2 deste trabalho é apresentada uma revisão da literatura sobre os principais avanços experimentais e numéricos em Escoamentos Multifásicos em Golfadas e avanços na modelagem experimental e numérica para fatores de Redução de Atrito.

O Capítulo 3 dedica-se a formulação matemática do Modelo de Dois Fluidos unidimensional, juntamente com as importantes relações de fechamento, e condições de contorno. Destaque é apresentado para a correlação de redução de arraste.

O método numérico é apresentado no Capítulo 4, detalhando as técnicas para discretizar as equações utilizando o método de volumes finitos, bem como o procedimento de solução utilizado e os pós processamentos necessários para análise de dados estatísticos do escoamento em questão.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos no presente trabalho e no Capítulo 6 as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições. Também são oferecidas sugestões para futuras pesquisas associadas à modelagem da redução de arraste em tubulações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos avanços iniciais, mas ainda assim mais intrigantes na turbulência monofásica foi a descoberta de que a introdução de pequenas quantidades de polímeros de cadeia longa em um fluxo líquido pode causar grandes reduções na resistência friccional na parede, realizado em 1948 por Toms (Virk, 1975). Virk (1975) identificou que fluidos com comportamento reológico de fluido não-Newtoniano com tensão limite de escoamento estão associados com redução de arraste.

Neves (2024) apresentou uma excelente revisão da literatura sobre a redução de arraste devido a utilização de polímeros. Dessa forma, a revisão apresentada aqui, foca nos últimos 20 anos.

Com os avanços do século 20 nas áreas de escoamento monofásico e multifásico já consolidadas, Warholic et al. (2001) investigaram a aplicação de polímeros redutores de arraste em escoamentos multifásicos, concentrando-se nos efeitos da degradação dos polímeros sob condições de cisalhamento intenso. Por meio de experimentos em dutos com diferentes configurações, os autores identificaram uma concentração crítica além da qual o benefício da redução de atrito se estabiliza. O estudo destacou a importância de parâmetros como a geometria do duto e o regime de fluxo para a eficácia dos DRPs (Drag Reducing Polymers). Sua análise experimental demonstrou variações no perfil de velocidade e na queda de pressão, contribuindo para o desenvolvimento de modelos preditivos. Esses achados reforçam a necessidade de integrar experimentos e simulações para otimizar processos industriais de transporte de fluidos, fornecendo mais uma base para entender o equilíbrio entre o aumento de viscosidade e os efeitos de cisalhamento nos DRPs.

Al Sarkhi et al. (2004) conduziram experimentos em dutos horizontais de pequeno diâmetro para analisar o efeito dos polímeros redutores de arraste em escoamentos gás-líquido. A pesquisa demonstrou que a adição de pequenas quantidades de DRPs promove redução na frequência das

golfadas, especialmente para altas velocidades superficiais de gás e líquido, reduzindo ainda a perda de carga. Já no padrão estratificado, nenhuma redução é observada, se as velocidades das fases forem baixas. A redução na perda de carga é associada a absorção da turbulência pelos polímeros.

Ruiz-Viera et al. (2006) investigaram a redução de arraste em escoamentos horizontais de misturas gás/líquido envolvendo pastas altamente viscosas, como graxas lubrificantes. Combinando medições de queda de pressão em dutos com ensaios reológicos, os autores utilizaram o modelo de Sisko para prever o comportamento do fluxo sob condições desafiadoras. Os resultados mostraram que a elevada viscosidade modifica significativamente o mecanismo de arraste e que os DRPs atuam de maneira diferenciada quando comparados a fluidos com viscosidades mais baixas. A abordagem experimental foi complementada por adaptações teóricas devido à dificuldade em realizar o projeto, evidenciando a necessidade de correções empíricas para os modelos clássicos sendo relevante para o dimensionamento de sistemas de transporte de materiais pastosos e amplia a compreensão dos efeitos dos DRPs em condições industriais.

Daas et al. (2006) realizaram uma investigação experimental e computacional em tubos horizontais de 10 cm de diâmetro, usando CO₂ como fase gasosa e dois tipos de óleo com viscosidades distintas como fase líquida, no padrão de golfadas. Os autores identificaram separadamente a contribuição do atrito viscoso e aceleração na queda de pressão. Os autores demonstraram que, embora a redução de arraste seja maior em óleos com viscosidade mais elevada, a eficácia dos DRPs se evidencia de forma mais acentuada em óleos menos viscosos. O comparativo entre os dados experimentais e os cálculos computacionais evidenciaram a importância de considerar a contribuição de cada componente da queda de pressão fornecendo assim, um detalhamento valioso para a aplicação prática de DRPs em escoamentos multifásicos e a modelagem de sistemas de transporte de fluidos.

Al-Sarkhi (2010) apresentou uma revisão abrangente sobre a aplicação de polímeros redutores de arraste em escoamentos gás-líquido

e líquido-líquido, sintetizando décadas de pesquisas experimentais e teóricas, discutindo os principais mecanismos propostos, incluindo a diminuição das tensões de Reynolds e a modificação da estrutura turbulenta e destacando as metodologias utilizadas para quantificar os efeitos dos DRPs. A revisão enfatiza os desafios para se prever a eficiência dos aditivos, considerando a degradação dos polímeros e a influência de variáveis operacionais.

Edomwonyi-Otu et al. (2015) realizaram experimentos em dutos acrílicos para avaliar o efeito de polímeros redutores de arraste em escoamentos horizontal de líquido-líquido, envolvendo água e óleo. Os resultados mostraram que a adição de pequenas quantidades de polímeros na fase aquosa reduz significativamente a queda de pressão, promovendo alterações no padrão de fluxo e na dinâmica interfacial. A utilização de alta velocidade para captura dos fenômenos visuais permitiu a análise dos parâmetros de onda e da distribuição de velocidades na interface. Por fim, correlacionaram as medições com as concentrações dos DRPs, destacando a importância da otimização dos parâmetros operacionais para maximizar a redução de atrito fornecendo assim, contribuições práticas para a melhoria da eficiência em sistemas de transporte multifásico.

Alsurakji (2016) desenvolveu uma análise experimental detalhada sobre a redução de arraste em escoamentos multifásicos, investigando escoamentos de água, óleo, ar e suas combinações, com e sem a adição de polímeros solúveis. Utilizando instalações experimentais robustas e técnicas como velocimetria por imagem de partículas (PIV), o autor mostrou que os polímeros reduzem significativamente a queda de pressão em escoamentos monofásicos, bifásicos e trifásicos. Os resultados indicaram que a redução do arraste depende do tipo de fluido, do polímero utilizado e das condições de escoamento, além de apresentar testes de degradação dos polímeros, comparando dados experimentais com simulações numéricas, identificando finalmente uma boa concordância dentro do esperado. A análise energética complementar reforçou os benefícios dos polímeros na redução de perdas de carga em dutos horizontais. Este trabalho é uma das referências mais abrangentes sobre DRAs em escoamentos multifásicos e fundamenta experimentalmente investigações

futuras em modelagem numérica e simulação.

Choueiri et al. (2018) elaboraram um estudo elaborado sobre o limite assintótico máximo de redução de arraste (MDR), tradicionalmente aceito como uma barreira intransponível. Em seus experimentos, mostraram que, sob certas condições, é possível exceder esse limite, levando o escoamento à laminarização completa antes de alcançar o MDR. Com o aumento da concentração de polímero, o escoamento retorna a um estado instável, que corresponde ao MDR. Essa descoberta sugere que o MDR é dinamicamente desconectado da turbulência clássica e pode ser associado à turbulência Elasto-inercial (EIT), como proposto por Samanta et al. (2015) fornecendo uma nova perspectiva para pesquisas que buscam otimizar o uso de DRAs, destacando a possibilidade de regimes de fluxo mais eficientes do que o anteriormente considerado limite superior.

Cosenza (2018), em seu projeto de graduação na PUC-Rio, investigou a degradação de polímeros redutores de atrito em escoamentos turbulentos. O trabalho utilizou uma bancada experimental do tipo “roda”, que simula o escoamento sem a influência de bombas, permitindo isolar o efeito da turbulência na degradação dos polímeros. Foram testadas diversas concentrações e avaliadas propriedades reológicas, como viscosidade extensional e tempo de relaxamento, demonstrando que a degradação ocorre de forma acentuada sob altos cisalhamentos. Os resultados evidenciam que a eficiência dos DRPs diminui com o tempo de residência, sendo essencial a otimização do regime de escoamento para prolongar sua ação contribuindo para a compreensão dos mecanismos de degradação e para o desenvolvimento de estratégias que minimizem perdas em aplicações industriais.

Xi (2019) apresentou uma extensa revisão sobre os fundamentos da redução de arraste turbulento por aditivos, com foco nos desenvolvimentos conceituais recentes. Citando e revisando desde a descoberta de Toms de 1948, que observou redução de arraste com pequenas quantidades de PMMA, até os avanços recentes com DNS e PIV, que permitiram mapear os campos de tensão e conformação dos polímeros. O autor discute mecanismos clássicos como o modelo de Virk e o papel da elasticidade e da viscosidade extensional em transições turbulentas. Ele destaca a

importância do número de Weissenberg (Wi) na identificação do início da redução de arraste, conectando os regimes de escoamento com escalas viscosas e estruturas próximas à parede. Este trabalho forma uma base teórica sólida que ajuda a interpretar resultados experimentais e modelagens mais recentes, como os apresentados a seguir de Brandfellner et al. (2025), que aplicam os conceitos de Wi e elasticidade.

Baseando sua análise nos mecanismos descritos por Xi (2019), e se aprofundando no papel do Número de Weissenberg (Wi) e da transição de alongamento das cadeias poliméricas, a partir de sua configuração enovelada, Tan et al. (2022) investigaram experimentalmente os efeitos de polímeros redutores de arraste em escoamentos bifásicos óleo-água em tubos horizontais. Utilizando soluções de poliacrilamida em concentrações diluídas (100 ppm), os autores observaram alterações significativas nos padrões de escoamento e queda de pressão. A maior taxa de redução de arraste foi obtida na dispersão de óleo em água (Do/w), evidenciando que o efeito do polímero está fortemente ligado à natureza do padrão de escoamento e às velocidades relativas entre as fases. O estudo também propôs um modelo empírico para o fator de atrito, contribuindo com previsões úteis para aplicações industriais.

Rushd et al. (2023) apresentaram uma revisão crítica sobre a aplicação de DRAs no transporte de óleo cru pesados por dutos, enfatizando os desafios associados à alta viscosidade e às perdas de carga em escoamentos multifásicos. O artigo discute como a combinação de técnicas de diluição e a adição de DRPs pode reduzir substancialmente o consumo energético e melhorar a eficiência operacional. Os autores destacam a importância da estrutura molecular dos aditivos e das condições operacionais, como temperatura e taxas de fluxo, para alcançar ganhos significativos na redução de pressão. Sua revisão também aponta para a necessidade de integrar dados experimentais e modelagens teóricas para superar as lacunas atuais na compreensão das interações entre fases, oferecendo direções importantes para pesquisas futuras e aplicações práticas na indústria de petróleo.

Al Dogail et al. (2023) elaboraram uma revisão abrangente sobre a utilização de agentes redutores de arraste (DRAs) na indústria petrolífera,

abordando desde o transporte de óleo e gás até aplicações em perfuração e fraturamento. O estudo analisa criticamente tanto as abordagens experimentais quanto os modelos teóricos empregados para avaliar o desempenho dos DRAs, enfatizando os desafios relacionados à formulação e à seleção adequada dos aditivos para diferentes sistemas. Os autores destacam a importância de estratégias integradas que combinem dados laboratoriais, simulações numéricas e estudos de campo para otimizar a aplicação dos DRAs. A revisão fornece uma visão atualizada das tendências e inovações na área, servindo de guia para futuras pesquisas e contribuindo para a melhoria da eficiência operacional na indústria.

Shi et al. (2024) investigaram a redução de arrasto turbulento por aditivos poliméricos e a limitação imposta pela degradação das macromoléculas sob cisalhamento. Eles estudaram misturas de um polímero rígido (goma diutana, DG) com um polímero flexível (poli óxido de etileno, PEO), avaliando reologia, eficiência de redução de arrasto (DR) e degradação sob escoamento. As soluções mostraram comportamento pseudoplástico (afinamento por cisalhamento), e a viscosidade da mistura variou entre as das soluções puras conforme a proporção de cada polímero. Ensaios em dispositivo rotativo revelaram que a porcentagem de DR cresce com o número de Reynolds e decai gradualmente com o tempo de cisalhamento devido à ruptura de cadeias. A mistura PEO–DG manteve níveis altos de DR por mais tempo que o PEO isolado, indicando que o polímero rígido confere maior estabilidade ao efeito de redução de arrasto sem perda significativa de desempenho inicial. Um modelo teórico de degradação turbulenta foi ajustado aos dados de declínio da DR, e um parâmetro de interação sinérgica calculado para as misturas apresentou valor positivo na maioria dos casos. Isso demonstra que a combinação polimérica gerou um efeito de DR superior ao esperado pela soma dos efeitos individuais; ademais, observou-se que, a um dado Reynolds, o grau de sinergia diminui inicialmente e depois aumenta com o tempo de escoamento, refletindo interações complexas entre a degradação de cada polímero.

Yoshida et al. (2024) investigaram experimentalmente como

surfactantes afetam o transporte turbulento de quantidade de movimento em escoamento de dutos, descrevendo mecanismos de redução de arrasto. Com uma metodologia chamada velocimetria por imagem de partículas (PIV) estereoscópica, foi medido os campos instantâneos de velocidade em uma seção transversal do escoamento (água pura versus solução com surfactante) e calcularam o campo de pressão resolvendo a equação de Poisson para satisfazer a continuidade. A adição do surfactante causou uma redução de aproximadamente 20% da tensão de Reynolds em comparação à água, indicando atenuação da turbulência. Para analisar a causa, avaliaram os termos da equação de balanço das tensões de Reynolds: no escoamento com surfactante, o termo de produção turbulenta foi fortemente suprimido e o termo de correlação velocidade-pressão (redistribuição de tensões) também diminuiu, de forma a manter o equilíbrio dinâmico. Esses resultados sugerem que o surfactante inibe a geração e a redistribuição de energia turbulenta, reduzindo as flutuações e o atrito no escoamento. Diferentemente dos aditivos poliméricos – cujo efeito de redução de arrasto decai sob cisalhamento severo (Shi et al., 2024) – os surfactantes mantêm sua eficácia mesmo em sistemas com bombeamento, graças à recomposição de suas estruturas micelares após deformação.

Salgado (2024) abordou a modelagem de escoamentos bifásicos intermitentes horizontais (fluxo de golfadas) com líquidos não-Newtonianos, um tópico pouco explorado apesar de sua relevância na indústria do petróleo, especialmente para fluidos pseudoplásticos (afinamento por cisalhamento) e fluidos de Bingham (com tensão limite). O autor comparou dados experimentais da literatura (velocidade da bolha e queda de pressão) nessas condições com previsões de simulação numérica. Considerou-se a reologia pseudoplástica em regime permanente e transiente, enquanto a de Bingham foi tratada apenas no permanente. As simulações foram realizadas com o software LedaFlow e um modelo mecânico unificado adaptado para incluir propriedades reológicas não-newtonianas (originalmente desenvolvido para escoamento gás/óleo viscoso). No modelo proposto, a velocidade da bolha é estimada a partir de perfis de velocidade monofásicos, e a perda de carga é calculada via correlações de forças (empuxo e arrasto). As previsões apresentaram boa

concordância com os dados experimentais, com erro médio de aproximadamente 10% na velocidade da bolha para fluidos pseudoplásticos e cerca de 6% em fluidos Bingham gerando erros abaixo da média para a queda de pressão. Notou-se também uma perda de precisão do modelo transiente em altas velocidades do líquido, possivelmente devido à mudança no padrão de escoamento. Por fim, discute-se o fenômeno de "redução de arrasto" em escoamentos bifásicos, diminuição do atrito via injeção de gás em um líquido laminar não-Newtoniano, destacando que esse efeito difere da clássica redução de arrasto em escoamentos monofásicos turbulentos com aditivos poliméricos (Shi et al., 2024) ou surfactantes (Yoshida et al., 2024), enfatizando as particularidades do comportamento de fluidos complexos em escoamentos bifásicos.

Utilizando-se de alguns dos conceitos demonstrados no trabalho de Cosenza (2018), Neves (2024) focou na investigação da degradação do polímero redutor de atrito poli-isobuteno em escoamentos bifásicos gás-líquido. Utilizando uma bancada experimental inovadora, que minimiza o uso de bombas para evitar degradação precoce, o estudo avaliou diferentes concentrações do polímero. Os resultados demonstraram que a redução de atrito é proporcional à concentração inicial, mas que o efeito se deteriora após um período crítico, independentemente da concentração testada. A análise do tempo de degradação e das propriedades reológicas fornece mais detalhes sobre a influência do cisalhamento intenso no desempenho dos DRPs. Por fim, o trabalho aponta para a necessidade de investigações adicionais envolvendo variáveis operacionais para a aplicação eficaz dos aditivos em sistemas industriais.

Niazi et al. (2024) realizaram simulações por CFD para investigar o comportamento de fluidos redutores de arraste em escoamentos turbulentos não-newtonianos em dutos. Utilizando a abordagem $k-\epsilon$ com funções de amortecimento específicas para fluidos não-newtonianos, os autores otimizaram os parâmetros do modelo e incorporaram termos não-lineares para representar os efeitos da viscosidade molecular e dos DRPs. A comparação com dados experimentais revelou que o modelo previu com uma boa margem de precisão o fator de atrito, a velocidade axial e os perfis

de tensão de Reynolds, com erro médio inferior a 6%. Este estudo demonstra a importância de modelos otimizados para capturar os efeitos complexos dos DRPs e oferece uma ferramenta robusta para a predição do comportamento de escoamentos multifásicos em aplicações industriais.

Fruteau et al. (2024) apresentaram uma abordagem baseada em modelagem numérica para avaliar o uso de DRAs em sistemas de produção multifásicos, com foco em três casos de campo reais. O trabalho destacou como simulações precisas permitem prever ganhos na redução de queda de pressão e identificar desafios operacionais, como distribuição desigual do aditivo entre fases e limitações em regimes interfaciais. Apesar das limitações de dados para escoamentos multifásicos complexos, o estudo propõe um modelo que integra testes laboratoriais, simulação e dados de campo para melhorar a eficácia dos DRAs. A abordagem proposta representa uma mudança de paradigma frente às avaliações tradicionais baseadas em escoamento monofásico, e avança no sentido de preencher lacunas apontadas em estudos anteriores como o de Alsurakji (2016).

De Paula et al. (2025) apresentaram um estudo experimental e numérico, sobre o desempenho de polímeros redutores de arraste em escoamentos bifásicos. A pesquisa combinou testes em tubos circulares de diâmetro de 1 polegada com simulações de modelos unidimensionais de Dois Fluidos, ajustando o fator de atrito para escoamentos gás-líquido. Os resultados demonstraram boa concordância entre as predições e os dados experimentais, em regime de golfada, sugerindo que a metodologia proposta pode ser aplicada em ferramentas de cálculo para sistemas multifásicos. O estudo também aborda a influência da degradação dos polímeros e reforça a importância de testes em diferentes configurações para aprimorar modelos preditivos.

Brandfellner et al. (2025) expandem a discussão teórica de Xi (2019) e Tan et al. (2022), investigando experimentalmente a relação entre os números de Reynolds (Re) e Weissenberg (Wi) no início da redução de arraste. O estudo demonstrou que o Wi calculado com base na taxa de cisalhamento volumétrica (e não na região da parede) é mais adequado para identificar o início da redução de arraste, sugerindo que os efeitos dos

polímeros ocorrem majoritariamente no volume do escoamento. A análise envolveu diferentes massas molares de poliacrilamida degradada e resultou em um mapeamento do início da redução de arraste no plano $Re-Wi$, fornecendo uma nova métrica para prever o desempenho de DRAs, essencial para futuras modelagens em escoamentos multifásicos com degradação polimérica.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste trabalho deseja-se determinar numericamente o impacto da introdução de polímeros na redução de arraste e nas grandezas características das golfadas. Fatores de redução de arraste determinados experimentalmente para escoamentos monofásicos são utilizados para prever numericamente a redução de arraste em escoamentos multifásicos.

O escoamento bifásico foi modelado utilizando o Modelo de Dois Fluidos (Ishii e Hibiki, 2011), o qual será brevemente descrito a seguir, com destaque para a correlação para o fator redutor de arraste. A seguir, uma breve descrição sobre golfadas é apresentada com a definição das grandezas característica analisadas neste trabalho.

3.1. Modelo de Dois Fluidos

O Modelo de Dois Fluidos (Ishii e Hibiki, 2011) envolve a resolução de uma equação de conservação para cada fase, as quais são complementados por equações de fechamento empíricas que avaliam os fluxos interfaciais. Como o presente estudo considera escoamento isotérmico, as equações de conservação de energia não são consideradas. Para a determinação das velocidades de cada fase, pressão e fração volumétrica, o modelo envolve a resolução de uma equação de conservação de massa e de quantidade de movimento para cada fase.

A metodologia do Modelo de Dois Fluidos se baseia na obtenção das médias volumétricas para cada fase K . Além disso, como o interesse do presente trabalho consiste em escoamentos ao longo de tubulações muito longas, considera-se uma modelagem 1D, aplicando-se a hipótese de que as variações transversais são menos importantes que as variações axiais. As equações de conservação resultantes são obtidas a partir da integração nas seções transversais das equações de conservação médias na fase, de forma a fornecer as grandezas de interesse médias na fase e na área.

A região ocupada por cada fluido é representada pela fração volumétrica denominada como α_K correspondente a cada fase, onde K corresponde a uma fase genérica, sendo as fases líquidas e gasosas representadas pelos subscritos “L” e “G”. A fração volumétrica associada a fase K é definida como:

$$\alpha_K = \frac{\forall_K}{\forall} = \frac{A_K}{A} \quad (3.1)$$

onde $\forall$ é o volume e A é a área da seção transversal, para um espaçamento Δx . A fração volumétrica deve respeitar a seguinte restrição

$$\alpha_G + \alpha_L = 1 \quad (3.2)$$

As equações de conservação 1D são apresentadas a seguir considerando uma tubulação horizontal ou levemente inclinada de β conforme ilustrado na Figura 3.1, com o líquido localizado na parte inferior da tubulação (estratificado). De acordo com a figura, h_L é espessura do nível de líquido, A é a área da seção transversal do duto, sendo A_G e A_L as áreas das seções transversais das fases gasosa e líquida. τ_{wG} e τ_{wL} são as tensões de cisalhamento da fase gasosa e líquida com a parede, τ_i é a tensão de cisalhamento da interface gás-líquido, S é o perímetro molhado da fase K , S_i é o perímetro da interface gás-líquido.

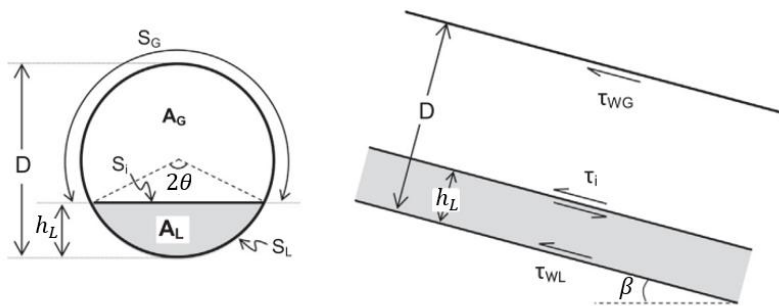


Figura 3.1 – Vistas da seção transversal e seção axial de um tubo com escoamento estratificado (Adaptado de Tzotzi & Andridtsos, 2013)

3.1.1. Conservação de Massa

Com base no Modelo de 2 Fluidos e, baseado nas simplificações explicitadas anteriormente, as equações de conservação de massa para

cada uma das fases (gasosa e líquida, representadas pelos subscritos 'G' e 'L'), na ausência de mudança de fase, podem ser expressas por

$$\frac{\partial \rho_G \alpha_G}{\partial t} + \frac{\partial \rho_G \alpha_G U_G}{\partial x} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \rho_L \alpha_L}{\partial t} + \frac{\partial \rho_L \alpha_L U_L}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

sendo ρ a densidade, U a velocidade, x e t , coordenada axial e tempo, respectivamente.

3.1.2. Conservação de Quantidade de Movimento Linear

As equações de conservação da quantidade de movimento linear para cada uma das fases são

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_G \alpha_G U_G}{\partial t} + \frac{\partial \rho_G \alpha_G U_G U_G}{\partial x} = & -\alpha_G \frac{\partial P_{Gi}}{\partial x} - \frac{\partial \alpha_G (P_G - P_{Gi})}{\partial x} - \\ & -\alpha_G \rho_G g \sin \beta - \tau_{wG} \frac{S_G}{A} - \tau_i \frac{S_i}{A} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_L \alpha_L U_L}{\partial t} + \frac{\partial \rho_L \alpha_L U_L U_L}{\partial x} = & -\alpha_L \frac{\partial P_{Li}}{\partial x} - \frac{\partial \alpha_L (P_L - P_{Li})}{\partial x} - \\ & -\alpha_L \rho_L g \sin \beta - \tau_{wL} \frac{S_L}{A} + \tau_i \frac{S_i}{A} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Nas equações acima, o índice 'i' refere-se à interface gás-líquido, P é a pressão, e g é a aceleração da gravidade. τ_{wL} ; τ_{wG} e τ_i são as tensões cisalhantes entre líquido/parede; gás/parede e interface líquido/gas. S e A são os perímetros e áreas ilustrados na Figura 3.1.

Para definir completamente o sistema de equações apresentado, várias equações adicionais de fechamento precisam ser incluídas. Será necessário introduzir equações de estado para determinar a massa específica do gás e do líquido. É preciso especificar as grandezas geométricas básicas de referência, incorporar equações para relacionar as pressões de cada fase entre si e com a pressão na interface ainda indicar como determinar as tensões cisalhantes na parede e na interface.

3.1.2.1. Equações de estado

A densidade do líquido é considerada constante e o gás é tratado como um gás ideal. Segundo Issa e Kempf (2003), os efeitos de compressibilidade são significativos neste tipo de escoamento, pois, quando as golfadas se formam, as variações temporais e espaciais da pressão (e consequentemente da densidade) podem atingir até 40%. Portanto, a densidade do gás pode ser obtida por:

$$\rho_G = \frac{P_G}{R_G T_{ref}} \approx \frac{P_{iG}}{R_G T_{ref}} \quad (3.7)$$

onde R_G é a constante do gás, e T_{ref} é a temperatura de referência do escoamento isotérmico. A pressão média do gás P_G é considerada, por simplicidade, igual ao valor na interface do lado do gás (P_{iG}), uma vez que a altura hidrostática associada é pequena.

3.1.2.2. Salto de pressão na interface

O salto de pressão interfacial pode ser determinado aplicando-se a fórmula de Young-Laplace, Eq. (3.7), onde σ é a tensão interfacial (ou superficial), que é uma propriedade das fases em contato entre si, e κ é a curvatura da superfície associada.

$$P_{iG} - P_{iL} = \sigma \kappa \quad (3.8)$$

Para uma geometria associada ao escoamento estratificado (Figura 3.1), considera-se que a curvatura relevante ocorre na direção axial. A curvatura da interface pode ser estimada como sendo proporcional ao nível do líquido h_L (Carneiro, 2006), resultando em

$$\frac{\partial P_{Li}}{\partial x} = \frac{\partial P_{Gi}}{\partial x} - \sigma \frac{\partial^3 h_L}{\partial x^3} \quad (3.9)$$

3.1.2.3. Pressão hidrostática

A diferença entre a pressão média da fase e a pressão na interface da fase pode ser estimada considerando a variação hidrostática da pressão

na seção transversal (Issa e Kempf, 2003; Carneiro et al., 2011), de acordo com

$$P_{iK} - P_K = -\rho_K g \cos \beta (h_L - y) \quad (3.10)$$

Resultando em

$$\frac{\partial(P_{iK} - P_K)}{\partial x} = -\rho_K g \cos \beta \frac{\partial h_L}{\partial x} \quad (3.11)$$

Este termo é fundamental para estabilidade de escoamentos horizontais ou quase horizontais.

3.1.2.4. Modelagem da geometria

Para a determinação dos parâmetros geométricos considera-se o escoamento estratificado, conforme ilustrado na Figura 3.1, como referência. Inicialmente é conveniente definir uma espessura de filme adimensional de acordo com

$$\xi = 2 \frac{h_L}{D} - 1 \quad (3.12)$$

onde D é o diâmetro da tubulação, que se encontra relacionado com o ângulo θ com:

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = -\xi \quad ; \quad \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \sqrt{1 - \xi^2} \quad (3.13)$$

A fração de gás encontra-se geometricamente relacionada com o nível do líquido por

$$\alpha_G = \frac{1}{\pi} [\cos^{-1}(\xi) - \xi \sqrt{1 - \xi^2}] \quad (3.14)$$

Sendo as áreas e perímetros dados por

$$A_G = \frac{D}{4} [S_G - S_i \xi] \quad ; \quad A_L = \frac{\pi D^2}{4} - A_G \quad (3.15)$$

$$S_G = D \cos^{-1}(\xi) \quad ; \quad S_L = \pi D - S_G \quad ; \quad S_i = D \sqrt{1 - \xi^2} \quad (3.16)$$

No entanto, a Eq. (3.12) é implícita em relação a h_L , o que é um

aspecto indesejado, visto que um algoritmo de busca de raízes teria que ser utilizado para fornecer h_L para um dado α_G . Com isso em mente, Biberg (1999) propôs seguinte aproximação explícita para h_L em relação a α_L

$$h_L \approx \pi \alpha_L + \left(\frac{3\pi}{2}\right)^{\frac{1}{3}} [1 - 2\alpha_L + \alpha_L^{1/3} - (1 - \alpha_L)^{1/3}] - \frac{1}{200} \alpha_L (1 - \alpha_L) (1 - 2\alpha_L) \{1 + 4[\alpha_L^2 + (1 - \alpha_L)^2]\} \quad (3.17)$$

Essa equação foi testada com sucesso por Pasqualetto et al. (2014) e foi utilizada ao longo do presente trabalho.

3.1.2.5. Tensões cisalhantes

As tensões de cisalhamento das fases com a parede e na interface podem ser calculadas com base nos coeficientes de atrito f_K , considerando o escoamento localmente hidrodinamicamente desenvolvido.

$$\tau_{wG} = \frac{1}{2} f_G \rho_G |U_G| U_G \quad (3.18)$$

$$\tau_{wL} = \frac{1}{2} f_L \rho_L |U_L| U_L \quad (3.19)$$

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_G |U_G - U_L| (U_G - U_L) \quad (3.20)$$

Nas equações acima é utilizado o módulo para prever reversão de escoamento.

Os fatores de atrito dependem do regime através do número de Reynolds Re_K e do padrão do escoamento. Como no caso de escoamento em golfada a configuração de referência é estratificada, correlações empíricas para escoamento estratificado foram selecionadas.

O fator de atrito para a fase gasosa/parede e interface são iguais no regime laminar ($Re_G \leq 2200$), correspondendo a solução de Hagen-Poiseuille

$$f_G = \frac{16}{Re_G} \quad ; \quad f_i = \frac{16}{Re_i} \quad (3.21)$$

Já no regime turbulento ($Re_G \leq 2200$), apesar de se utilizar a mesma correlação de Taitel e Duckler, (1976) para a fase gasosa/parede e interface, utiliza-se número de Reynolds diferentes

$$f_G = 0,046 (Re_G)^{-0,2} \quad ; \quad f_i = 0,046 (Re_i)^{-0,2} \quad (3.22)$$

Os números de Reynolds da fase gasosa e interface são

$$Re_G = \frac{\rho_G U_G D_{h,G}}{\mu_G} \quad ; \quad Re_i = \frac{\rho_G |U_G - U_L| D_{h,G}}{\mu_G} \quad (3.23)$$

onde μ_G é a viscosidade dinâmicas da fase gasosa e $D_{h,G}$ é o diâmetro hidráulico

$$D_{h,G} = \frac{4A_G}{(S_G + S_i)} \quad (3.24)$$

O fator de atrito da fase líquida com a parede é determinado considerando a aplicação do fator redutor de atrito DR (Drag Reduction) determinado experimentalmente no LEF, descrito na próxima seção.

Para o regime laminar ($Re_{Dh_L} \leq 2200$), utilizou-se a correlação de Hand (1991) combinada com RR de acordo com

$$f_L = \frac{24}{Re_{sL}} DR \quad (3.25)$$

Já para o regime turbulento ($Re_{Dh_L} > 2200$), selecionou-se a correlação de Spedding e Hand (1997)

$$f_L = 0,0262 (\alpha_L Re_{sL})^{-0,139} DR \quad (3.26)$$

No caso do líquido, as correlações empíricas dependem do número de Reynolds superficial do líquido Re_{sL} , sendo o regime identificado pelo número de Reynolds da fase Re_L :

$$Re_{sL} = \frac{\rho_L U_{sL} D}{\mu_L} \quad ; \quad Re_{Dh_L} = \frac{\rho_L U_L D_{h,L}}{\mu_L} \quad (3.27)$$

onde μ_L é a viscosidade dinâmica da fase. $D_{h,L}$ é o diâmetro hidráulico do líquido

$$D_{h,L} = \frac{4A_L}{S_L} \quad (3.28)$$

Enquanto que U_{sL} é a velocidade superficial do líquido

$$U_{sL} = U_L \alpha_L \quad (3.29)$$

Também é conveniente definir o Reynolds da fase líquida em relação ao diâmetro da tubulação, como

$$Re_L = \frac{\rho_L U_L D}{\mu_L} \quad (3.30)$$

No presente trabalho, para evitar transição abrupta entre os fatores de atrito dependendo do regime de escoamento, introduziu-se uma faixa de transição entre $Re_1=2000$ e $Re_2=2200$ com uma interpolação baseada na tangente hiperbólica, de acordo com

$$f = \omega f_{Re_1} + (1 - \omega) f_{Re_2} \quad (3.31)$$

$$\omega = 0,5 \left\{ 1 + \tanh \left[\frac{3 (2 Re_k - Re_2 - Re_1)}{Re_2 - Re_1} \right] \right\} \quad (3.32)$$

3.1.2.6. Redutor de arraste

Uma vez que o polímero ao ser inserido no escoamento é diluído na fase líquida, o modelo para a previsão de redução de atrito no escoamento bifásico é baseado no conceito de que o polímero atua somente na fase líquida. Dessa forma, pode-se determinar o efeito da redução de arraste devido a presença do polímero em um escoamento monofásico.

Experimentos foram realizados no Laboratório de Engenharia de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica (LEF/DEM) com diferentes números de Reynolds, com e sem polímero e o fator de redução de arraste (DR – Drag Reduction) foi medido

$$DR = \frac{\Delta P_{\text{com_polímero}} - \Delta P_{\text{sem_polímero}}}{\Delta P_{\text{sem_polímero}}} \quad (3.33)$$

Foi então proposta a seguinte uma correlação para o fator de redução de arraste

$$DR = \begin{cases} 1 - 0,01 \sqrt{0,025 Re_L - 704,156} & \text{para } Re_L \geq 2,82 \times 10^4 \\ 1 & \text{para } Re_L < 2,82 \times 10^4 \end{cases} \quad (3.34)$$

onde Re_L é o número de Reynolds da fase líquida.

Note que para baixos números de Reynolds ($Re_L < 2,82 \times 10^4$) devido a baixa turbulência o fator redutor de arraste não atua.

3.2. Condições Iniciais de Condições de Contorno

Para a resolução numérica do sistema de equações, é necessário definir tanto as condições de contorno quanto as condições iniciais em todo o domínio computacional.

Na entrada, impõem-se velocidades superficiais das fases líquida e gasosa. A altura do filme de equilíbrio é determinada com base nessas velocidades e nos parâmetros geométricos do escoamento. Na saída, adotou-se uma condição de contorno de pressão imposta.

Como a análise é restrita ao regime estatisticamente estabilizado, a condição inicial não influencia os resultados. Ainda assim, para inicializar as simulações, foram adotados campos uniformes de velocidade e pressão, e as soluções foram analisadas somente após atingir esta condição.

3.3. Grandezas das Golfadas

As grandezas características das golfadas que são analisadas no presente trabalho são o comprimento da golfada L_{slug} , sua velocidade de translação U_{slug} , assim como a sua frequência ν_{slug} . Para identificar essas grandezas, pode-se consultar a Figura 3.2 que mostra esquematicamente uma unidade de golfada, consistindo basicamente em uma região de golfada líquida, uma bolha de gás, com um filme líquido embaixo. A golfada desloca-se à velocidade de translação U_{slug} enquanto o comprimento da golfada é denominado como L_{slug} .

Em geral as propriedades da golfada dependem da vazão das fases (velocidades superficiais), das propriedades dos fluidos e da geometria do duto.

A frequência de passagem das golfadas ν_{slug} é inversamente proporcional ao tempo entre duas frentes sucessivas de golfada.

As grandezas numéricas estatísticas das golfadas foram comparadas

com os dados experimentais medidos no LEF e com correlações empíricas disponíveis na literatura.

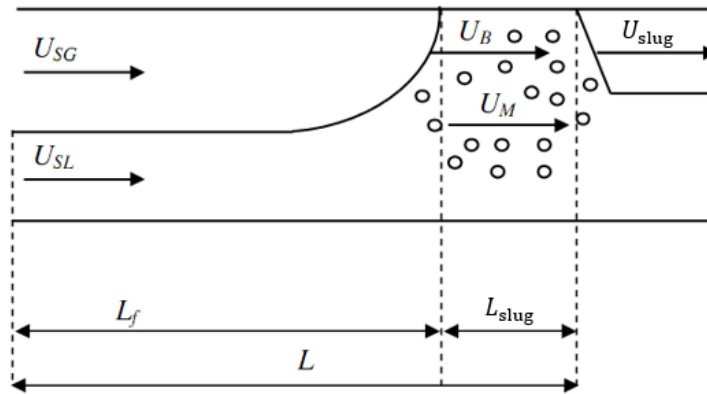


Figura 3.2 – Esquema de Golfada em um escoamento horizontal. Adaptada de Carneiro et al. (2011).

Com relação a velocidade de translação das golfadas, duas correlações foram utilizadas

$$U_{slug} = 1,35(U_m) \quad (\text{Gregory e Scott, 1969}) \quad (3.35)$$

$$U_{slug} = 1,13(U_m) + 0,542\sqrt{gD} \quad (\text{Bendiksen, 1984}) \quad (3.36)$$

onde g como aceleração da gravidade, D é o diâmetro do duto e U_m é a velocidade da mistura, a qual é igual a soma das velocidades superficiais das duas fases.

$$U_m = U_{SL} + U_{SG} \quad (3.37)$$

Apesar de não haver uma correlação para o comprimento das golfadas, sabe-se que varia de $10D$ a $20D$ (De Oliveira et al., 2015).

A frequência das golfadas ν_{slug} é comparada com a correlação de Fossa et al. (2003), que apresenta a frequência adimensionalizada com a velocidade superficial do gás U_{SG} e diâmetro da tubulação D , em função da fração volumétrica de gás α_L

$$S_t = \frac{\nu_{slug} D}{U_{SG}} = \frac{A \chi_L}{1+B \chi_L + C (\chi_L)^2} \quad ; \quad \chi_L = \frac{U_{SL}}{U_m} \quad (3.38)$$

sendo $A = 0,044$; $B = -1,71$ e $C = 0,70$.

4. Modelagem Numérica

A modelagem numérica é baseada no método de volumes finitos (Patankar, 1980). O código-fonte utilizado foi desenvolvido pelo grupo de Dinâmica dos Fluidos Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. O software foi implementado em Fortran e vem sendo continuamente aprimorado pelo Grupo de Dinâmica dos Fluidos Computacional do laboratório de Engenharia de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio por Carneiro et al. (2011), Nieckele et al. (2013), Simões et al. (2014), Fontalvo et al. (2020) e Castello Branco et al. (2022). No presente trabalho foi incluído o fator de redução de arraste (DR).

As equações de conservação foram discretizadas utilizando o método dos volumes finitos, que consiste em integrar as equações de conservação sobre volumes de controle distribuídos ao longo do domínio com um ponto nodal no seu interior. Para as velocidades, empregou-se uma malha deslocada, enquanto as variáveis escalares, como pressão e fração de vazios, foram posicionadas nos pontos centroides dos volumes.

Os termos convectivos foram tratados pelo método “upwind” para garantir maior estabilidade numérica, enquanto a integração temporal adotou um esquema totalmente implícito de 1ª ordem.

O acoplamento velocidade pressão é resolvido combinando as equações de conservação de massa normalizadas pela massa específica de acordo com sugestão de Issa e Kempf (2003), juntamente com o procedimento desenvolvido por Ortega e Nieckele (2005).

O sistema de equações discretizadas para a fração volumétrica do gás, para as velocidades do gás e do líquido, assim como da pressão resultam num sistema tri-diagonal para cada variável do tipo

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + b \quad (4.1)$$

onde P é o ponto central, o qual é relacionado com os pontos vizinhos do

lado oeste W e leste E . φ corresponde as velocidades U_L e U_G , a fração de vazio a_G e a pressão P . Casa equação discretizada é resolvida pelo algoritmo de Thomas (TDMA – tri-diagonal algoritmo) (Patankar, 1980)

A convergência do sistema de equações algébricas resultante da discretização é procurada a cada passo de tempo, onde a solução é considerada convergida quando o critério do resíduo máximo de todas as equações for inferior a uma tolerância especificada.

$$Res_{max} \leq tolerância \quad (4.2)$$

O máximo resíduo de cada equação em todo o domínio é obtido de acordo com a seguinte expressão

$$Res_{max} = \max(|a_P\varphi_P - a_E\varphi_E - a_W\varphi_W - b|) \quad (4.3)$$

Para as simulações, é necessário definir o espaçamento de discretização da malha. Adotou-se uma malha uniforme,

$$\Delta x = \frac{L}{N-1} \quad (4.4)$$

sendo o comprimento total do domínio L e no número de pontos N .

Além da malha, é preciso escolher um intervalo de tempo adequado. A condição de Courant–Friedrichs–Lewy relaciona o passo temporal Δt ao espaçamento da malha Δx e à velocidade característica do fluxo. O número de Courant limita quantos volumes de controle podem ser atravessados em um único passo de tempo. Para uma dada malha, se a velocidade do escoamento aumenta, então Δt deve diminuir proporcionalmente. Define-se, portanto:

$$C_o = \frac{\max|U|\Delta t}{\Delta x} \quad (4.5)$$

onde $\max|U|$ é a velocidade máxima do escoamento.

4.1. Definição dos parâmetros numéricos

Foi realizado um teste de malha, ilustrado no Apêndice A, e foi definida uma malha com $N=1000$ pts. Nas simulações deste estudo,

adotou-se um número de Courant igual a 0,05. A cada passo de tempo, de forma a garantir convergência foi utilizada uma tolerância de 10^{-7} para o máximo resíduo no domínio.

A simulações foram resolvidas durante 500s e os primeiros 300s foram descartadas antes da avaliação dos resultados, garantindo que a simulação houvesse atingido um estado estatisticamente estacionário, para que os pós-processamentos fossem realizados.

4.2. Pós-processamento

Como o escoamento é intermitente, médias temporais da pressão foram calculadas ao longo de um intervalo de $\Delta T = 200$ segundos, com passo temporal de $\Delta t = 0,001$ s. Para avaliar médias no tempo, após a obtenção do regime estatisticamente permanente, utilizou-se

$$\bar{P} = \frac{1}{\Delta T} \sum P \Delta t \quad (4.6)$$

Adicionalmente, a queda de pressão foi avaliada na região final do duto, i.e., desconsiderou-se a região de entrada, a fim de assegurar que a solução estivesse estatisticamente Hidrodinamicamente desenvolvida.

Vale mencionar aqui que a região de desenvolvimento hidrodinâmico do escoamento na entrada do duto, depende da transição do padrão de escoamento estratificado para golfada, a qual depende das velocidades superficiais. Dessa forma, para avaliar o gradiente de pressão, inicialmente, traçou-se o perfil de pressão média no tempo ao longo do duto. A região selecionada para determinar o gradiente de pressão foi selecionada como a região com queda de pressão média constante. Na maioria dos casos essa região foi definida de $x=4\text{m}$ a 10m .

4.2.1. Pós-processamento das grandezas das golfadas

A velocidade da frente da golfada é medida pela razão entre a distância percorrida, entre dois pontos fixos pré-definidos x_1 e x_2 , e o tempo total decorrido durante a passagem da frente, conforme ilustrado na Figura 4.1.

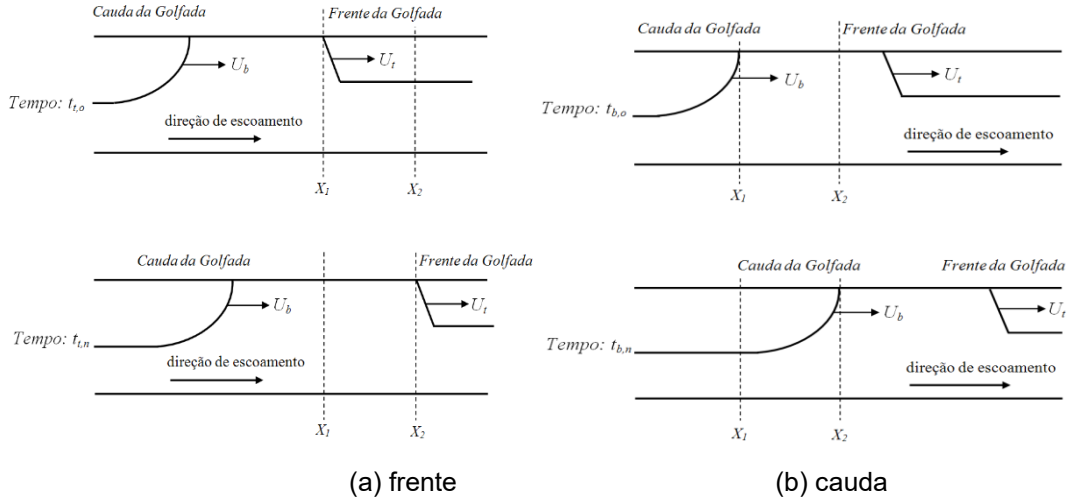


Figura 4.1 – Ilustração da medição da velocidade cada golfada. (a) frente (b) cauda. Chucuya (2010)

Adota-se como critério de detecção o instante em que a variável $\bar{\alpha}_{G_w}$ em x_1 fica abaixo de 0,02 e, em x_2 , atinge novamente o limiar de 0,02. O intervalo de tempo $\sum_{t=1}^2 \Delta t_t$ correspondente a essa travessia é então usado para estimar a velocidade média da frente segundo:

$$U_{\text{slug},n} = \frac{x_2 - x_1}{\sum_{t=1}^2 \Delta t_t} \quad (4.7)$$

Para o comprimento $L_{\text{slug},n}$ de cada golfada que passa pela posição x_2 , monitora-se continuamente $\bar{\alpha}_{G_w}(x_2)$. Detecta-se a chegada da frente quando o valor cai abaixo de 0,02 e, em seguida, inicia-se um novo registro de tempo até que o mesmo parâmetro volte a exceder 0,02, momento em que a cauda alcança x_2 . Admitindo-se constante a velocidade de translação $U_{\text{slug},n}$ obtém-se:

$$L_{\text{slug},n} = U_{\text{slug},n} \sum_{t=f}^c \Delta t_t \quad (4.8)$$

onde os índices f e c remetem, respectivamente, aos instantes de passagem da frente e da cauda pela posição de referência.

A frequência de passagem das golfadas $v_{\text{slug},n}$ em um dado ponto x_0 é calculada como o inverso do intervalo de tempo Δt_n entre duas frentes sucessivas:

$$v_{\text{slug},n} = \frac{1}{\Delta t_n} \quad (4.9)$$

Por fim, para obter os valores médios de cada um dos parâmetros $\langle U_{\text{slug}} \rangle$, $\langle L_{\text{slug}} \rangle$ e $\langle v_{\text{slug}} \rangle$, realiza-se uma média aritmética simples sobre N_m medições distintas:

$$\langle U_{\text{slug}} \rangle = \frac{1}{N_m} \sum_{n=1}^{N_m} U_{\text{slug},n} \quad (4.10)$$

$$\langle L_{\text{slug}} \rangle = \frac{1}{N_m} \sum_{n=1}^{N_m} L_{\text{slug},n} \quad (4.11)$$

$$\langle v_{\text{slug}} \rangle = \frac{1}{N_m} \sum_{n=1}^{N_m} v_{\text{slug},n} \quad (4.12)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os dados obtidos através da simulação numérica do escoamento bifásico no padrão de golfadas em uma tubulação horizontal, com e sem redutor de arraste, utilizando o Modelo de Dois Fluidos 1D descrito nos capítulos anteriores.

Para as análises, foram selecionados casos experimentais disponibilizados pelo Laboratório de Engenharia de Fluidos (PUC-RIO). Os experimentos foram realizados em uma seção de teste com $L = 10$ m de comprimento e diâmetro de $D=40$ mm, correspondendo a razão $L/D = 250$, garantindo escoamento hidrodinamicamente desenvolvido próximo à saída da tubulação. O gradiente de pressão foi medido na região de escoamento hidrodinamicamente desenvolvido (próximo ao final do duto). As medidas experimentais para as grandezas estatísticas das golfadas foram obtidas na coordenada $x = 9$ m.

Os fluidos utilizados foram ar e água, sendo considerada a viscosidade dinâmica do ar como $\mu_{ar} = 1,79 \times 10^{-5}$ Pa s. Considerando pressão atmosférica (101 325 Pa), temperatura ambiente (298,15 K), e sabendo que a constante do ar é $R_{ar} = 287$ Nm/(kg K), a densidade do ar de referência foi $1,2$ kg/m³. Com relação a água, considerou-se a viscosidade dinâmica igual a $\mu_{agua} = 10^{-3}$ Pa s, com densidade igual a $\rho_{agua} = 1000$ kg/m³. O polímero adicionado para reduzir o arraste é denominado Goma Guar. Sua adição na água resultou numa viscosidade dinâmica igual a $\mu_{agua_pol} = 1,5 \times 10^{-3}$ Pa s.

5.1. Seleção de Casos

Foram realizados experimentos para 8 combinações de velocidades superficiais do gás e do líquido, as quais estão detalhados na Tabela 5.1. Nesta tabela também foram inseridos os valores da velocidade de mistura, das frações de vazio, assim como os números de Reynolds superficiais do

gás e do líquido e número de Reynolds do líquido

Tabela 5.1 – Seleção de casos.

Casos	U_{sG} (m/s)	U_{sL} (m/s)	U_m (m/s)	α_L	R_{sG}	R_{sL}	R_L
Caso 1	0,20	0,36	0,56	0,90	536	14.400	16.004
Caso 2	0,20	0,55	0,75	0,83	536	22.000	26.602
Caso 3	0,20	0,81	1,01	0,85	536	32.400	38.140
Caso 4	0,56	0,36	0,92	0,58	1.502	14.400	24.823
Caso 5	0,56	0,55	1,11	0,60	1502	22.000	36.789
Caso 6	0,56	0,81	1,37	0,66	1.502	32.400	48.825
Caso 7	1,50	0,36	1,86	0,32	4.022	14.400	45.255
Caso 8	1,50	0,55	2,05	0,38	4.022	22000	57.728

A Tabela 5.2 apresenta os dados de gradiente de pressão no final da tubulação e dados estatísticos das golfadas referentes a frequência adimensional, comprimento e velocidade de translação das golfadas, medidos experimentalmente em $x=9m$.

Tabela 5.2 – Dados experimentais medidos com e sem polímero

	Sem Adição de Polímero				Com Adição de Polímero				DR
Casos	$\frac{dP}{dx}$ (Pa/m)	S_t	$\frac{L_{slug}}{D}$	U_{slug} (m/s)	$\frac{dP}{dx}$ (Pa/m)	S_t	$\frac{L_{slug}}{D}$	U_{slug} (m/s)	$1 - \frac{(\frac{dP}{dx})_{com}}{(\frac{dP}{dx})_{sem}}$ (%)
Caso 1	76	0,064	26	0,74	75	0,070	25	0,71	1
Caso 2	139	0,160	14	0,90	137	0,183	12	0,89	1
Caso 3	253	0,367	9	1,26	238	0,372	9	1,19	6
Caso 4	121	0,027	15	1,27	117	0,028	17	1,27	4
Caso 5	221	0,060	10	1,41	208	0,060	11	1,48	6
Caso 6	371	0,098	9	1,76	327	0,099	9	1,78	12
Caso 7	234	0,009	12	3,34	196	0,010	13	3,33	16
Caso 8	402	0,012	-	3,47	318	0,013	-	3,51	21

5.2. Redução de Arraste

A seguir são apresentados os resultados relacionados com a redução de arraste. Inicialmente o gradiente de pressão é analisado, seguido do fator de redução de arraste (DR). Apresenta-se uma comparação dos gradientes de pressão numéricos com os dados experimentais, com e sem a adição de polímero, validando a metodologia numérica. Avalia-se ainda a dependência do gradiente de pressão no número de Reynolds do líquido.

A Tabela 5.3 apresenta os gradientes de pressão numericamente obtidos para todos os casos, sem e com adição do fator de redução de atrito (Eq. 3.34). Note que no Caso 1, devido as baixas velocidades superficiais não ocorreu redução de arraste.

Tabela 5.3 – Gradiente de pressão numérico com e sem adição de polímero.

Casos:	Sem Polímero dP/dx (Pa/m)	Com Polímero dP/dx (Pa/m)	$DR = 1 - \frac{\left(\frac{dP}{dx}\right)_{com}}{\left(\frac{dP}{dx}\right)_{sem}}$ (%)	$1 - \frac{DR_{num}}{DR_{exp}}$ (%)
Caso 1	46	47	-	-
Caso 2	121	114	5	4
Caso 3	225	199	12	6
Caso 4	112	95	15	11
Caso 5	181	162	10	4
Caso 6	342	279	18	7
Caso 7	209	186	11	5
Caso 8	419	349	17	4

As Figura 5.1 (a) e (b) apresentam a validação da modelagem numérica com relação à previsão do gradiente de pressão, com uma comparação direta entre os dados numéricos e experimentais, com e sem a adição de polímero. Nos gráficos foi adicionada uma linha indicando desvios de $\pm 15\%$. Observa-se em ambos os casos que os resultados

numéricos apresentam excelente concordância com os dados experimentais, com a maioria dos dados dentro dessa faixa de desvio.

Os resultados obtidos sem a adição de polímero validam a modelagem numérica de Dois Fluidos para prever escoamento no padrão de golfadas. No caso com a adição de polímero, a excelente concordância indica que o procedimento de introduzir um fator redutor de arraste obtido em experimentos monofásicos é uma ótima estratégia para prever a redução de atrito em escoamentos bifásicos devido a adição do polímero.

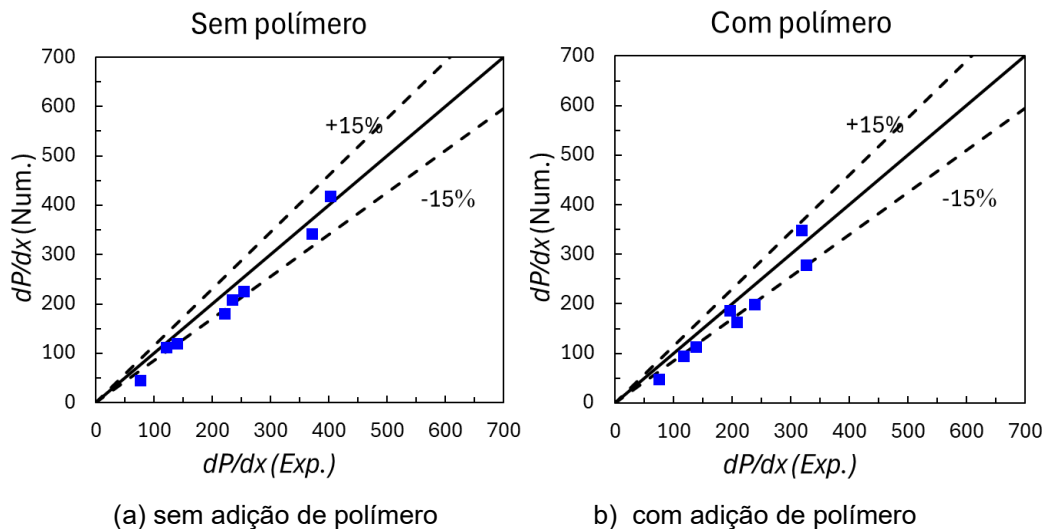


Figura 5.1 – Comparativo de resultados dP/dx experimental e numérico para casos: (a) sem adição de polímero, (b) com adição de polímero

A partir das informações provenientes das Figura 5.1 (a) e (b), pode-se afirmar que o modelo proposto apresentou excelentes resultados, uma vez que, reproduz resultados muito semelhantes aos experimentais, dentro de uma faixa de 15% de erro, com um único caso com desvio de 18%, correspondendo ao Caso 1, com baixa velocidade superficial de líquido, combinado com baixa velocidade superficial do gás.

Com os valores do gradiente de pressão considerados de boa precisão, podemos agora avaliar a influência do número de Reynolds da fase líquida Re_L no gradiente de pressão nas Figura 5.2 (a) e (b), sem e com adição de polímero, respectivamente. É possível observar que a dependência do número de Reynolds líquido do gradiente de pressão também é validada, uma vez que os dados numéricos seguem a mesma tendência que os dados experimentais, apesar de serem ligeiramente

menores que os dados experimentais. Note que a medida que o número de Reynolds do líquido cresce, o gradiente de pressão também cresce, como esperado.

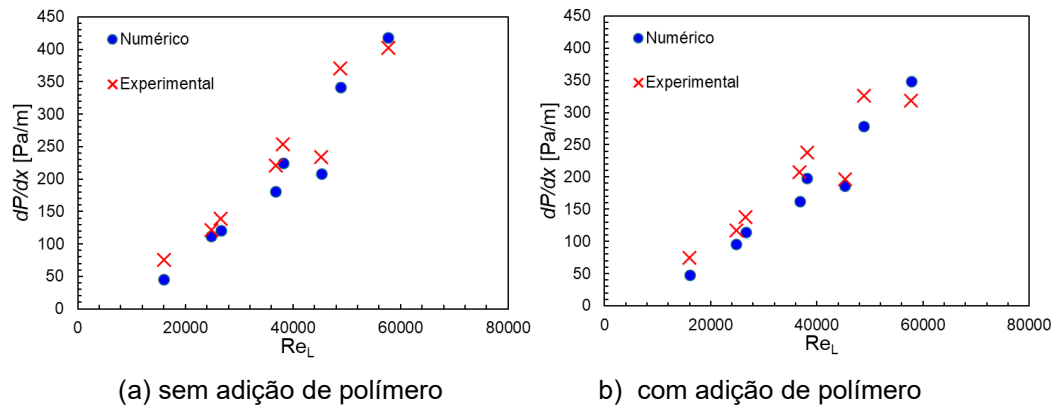


Figura 5.2 – Comparativo numérico e experimental de dP/dx em função de Re_L .
(a) sem adição de polímero, (b) com adição de polímero.

A seguir, pode-se analisar através da Figura 5.3, uma comparação direta do efeito do fator redutor de atrito no gradiente de pressão obtido com a modelagem numérica do escoamento. Observa-se em todos os casos a presença da redução do gradiente de pressão com a inclusão do fator. Observa-se ainda, um aumento na redução com o aumento do número de Reynolds do líquido. Como já mencionado, para baixos número de Reynolds do líquido, redução do gradiente de pressão não é obtida, pois o nível de turbulência é muito baixo para ser amortecida.

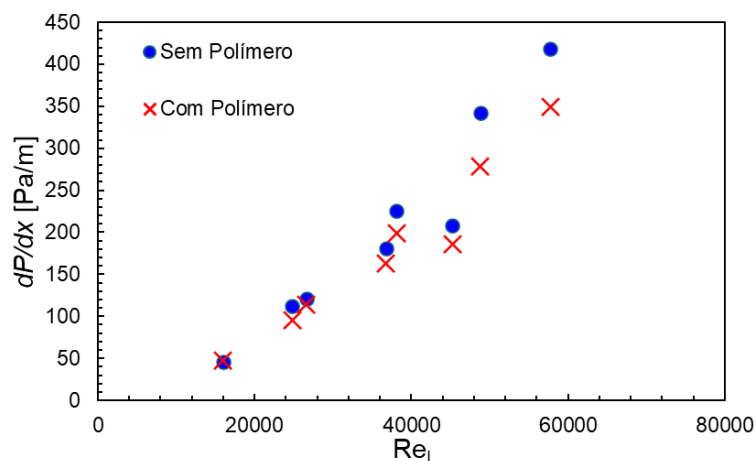


Figura 5.3 – Comparativo de dP/dx numérico para casos sem e com fator redutor de arraste em função de Re_L .

A comparação da redução de arraste, DR, experimental versus

numérica é listrada Figura 5.4. Observa-se a mesma tendência de redução com o aumento do número de Reynolds do líquido, como já mencionado ao analisar o gradiente de pressão. As predições numéricas seguem de perto os dados experimentais, com discrepâncias máximas de 10% em todo o intervalo. Esse comportamento confirma a eficácia crescente do polímero em regimes mais turbulentos. A boa convergência validada aqui justifica o uso do fator redutor de atrito obtido em escoamentos monofásicos no estudo de escoamentos bifásicos.

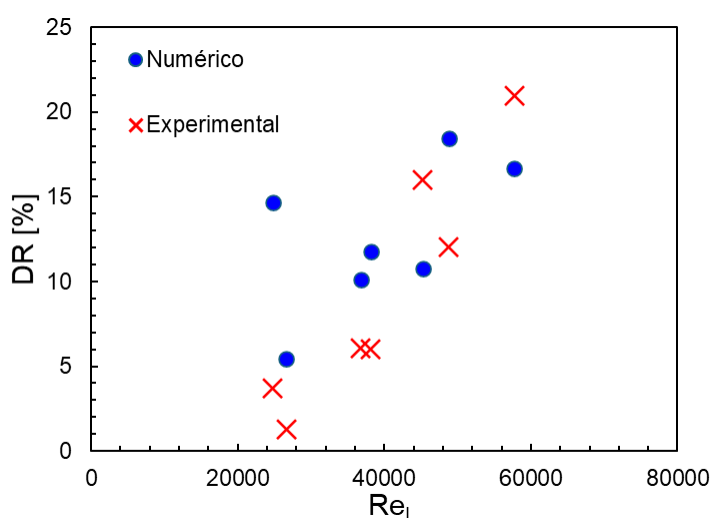


Figura 5.4 – Efeito do número de Reynolds líquido na redução de arraste para casos numéricos e experimentais

Ainda observando a Figura 5.4, verifica-se que DR cresce com o número de Reynolds da fase líquida, variando de 4% em baixas velocidades até 20% em velocidades elevadas. As previsões numéricas coincidem com as medições experimentais, dentro de margens aceitáveis. Como já mencionado, quanto menor o Reynolds, menor será a turbulência e menor será a redução de arraste DR.

5.3. Grandezas Estatísticas

A influência da introdução do fator redutor de arraste na modelagem numérica, devido a presença do polímero, nas grandezas estatísticas das golfadas são apresentadas nessa seção. A Tabela 5.4 apresenta os dados de frequência adimensional das golfadas, assim como o comprimento e

velocidade de translação das golfadas, com e sem modelar a presença do polímero.

Tabela 5.4 – Dados numéricos estatísticos com e sem polímero

	Sem Adição de Polímero			Com Adição de Polímero		
Casos	S_t	$\frac{L_{slug}}{D}$	U_{slug} (m/s)	S_t	$\frac{L_{slug}}{D}$	U_{slug} (m/s)
Caso 1	0,026	61	2,53	0,026	67	1,94
Caso 2	0,050	44	1,31	0,057	61	1,25
Caso 3	0,220	20	1,40	0,240	15	1,48
Caso 4	0,056	45	1,32	0,047	71	1,28
Caso 5	0,046	23	1,41	0,046	23	1,40
Caso 6	0,140	6	1,76	0,145	4	1,76
Caso 7	0,017	21	2,23	0,018	21	2,20
Caso 8	0,084	6	2,58	0,080	6	2,62

5.3.1. Frequências

A seguir, nas Figura 5.5 (a) e (b) são apresentadas a evolução das frequências adimensionalizadas S_t em função de $\chi_L = U_{SL}/U_m$, comparando os resultados numéricos e experimentais nos cenários sem e com adição de polímero, e utilizando a correlação de Fossa et al. (2003) apresentada na Eq. 3.38 como base empírica confiável de referência.

Assim, elas mostram uma excelente concordância dos dados experimentais obtidos no LEF, com a correlação de Fossa (2003), com frequência ligeiramente inferiores. A introdução do polímero altera muito pouco a frequência das golfadas, e os resultados experimentais continuam com boa concordância com os dados da correlação de Fossa (2003). A concordância dos dados numéricos sem e com polímero também é boa, sendo ligeiramente maior do que a correlação de Fossa (2003) para a

maioria dos casos, porém subestima a frequência para altos valores de χ_L .

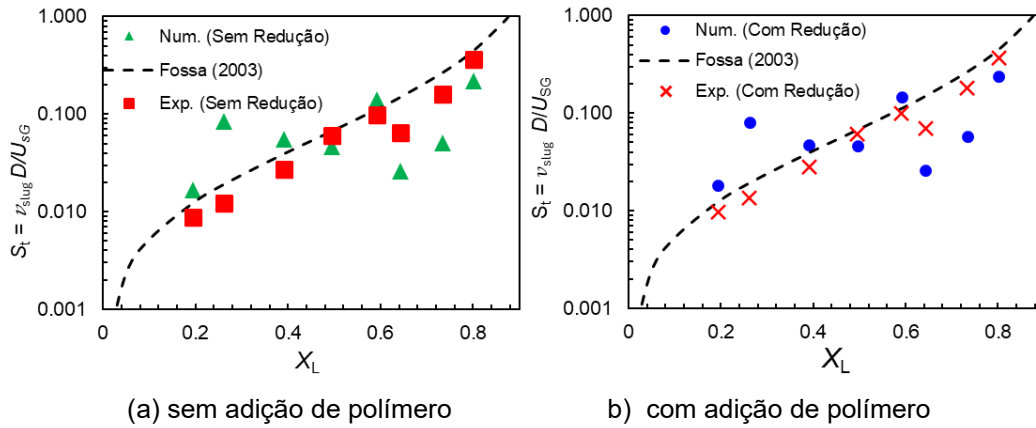


Figura 5.5 – Comparativo de valores médios de frequência numérica e experimental, e com correlação de Fossa (2003). (a) sem adição de polímero, (b) com adição de polímero.

A comparação da frequência adimensional da golfada com e sem fator redutor de arraste, obtida numericamente é ilustrada na Figura 5.6, onde nota-se que a frequência não é afetada pelo modelo de redução de arraste. O mesmo foi observado com relação as medidas experimentais da frequência.

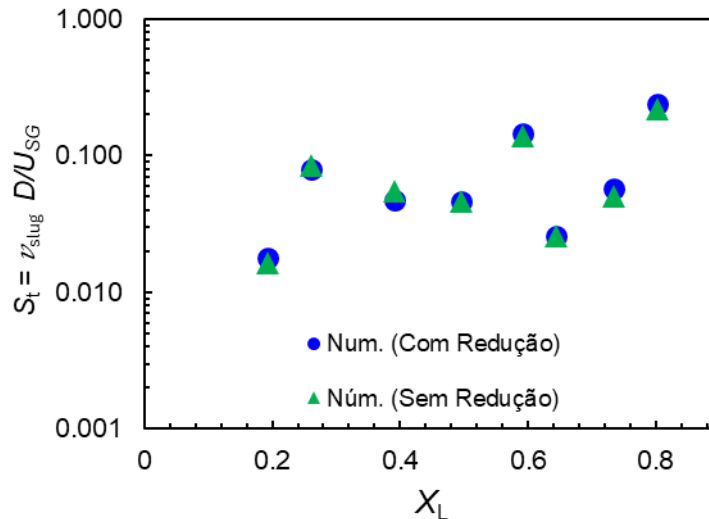


Figura 5.6 – Comparativo de valores médios de frequência numérica com e sem a adição do polímero.

5.3.2. Comprimento das Golfadas

Neste subcapítulo, investiga-se os comprimentos médios de golfada em função da velocidade de mistura U_m , utilizando o critério de detecção baseado no tempo de passagem entre frente e cauda apresentado na Seção 4.2.1.

São apresentados os comparativos dos dados numéricos versus experimentais sem polímero (sem redução) e com polímero (com redução) nas Figura 5.7 (a) e (b), e a comparação direta do efeito da adição de polímero no modelo na Figura 5.8. Em todos os gráficos, o comprimento médio de golfada L_{slug}/D aparece na ordenada e a velocidade de mistura U_m na abscissa, permitindo avaliar como o aumento da velocidade de mistura U_m impacta no comprimento das golfadas nas diferentes situações (sem e com adição de polímero).

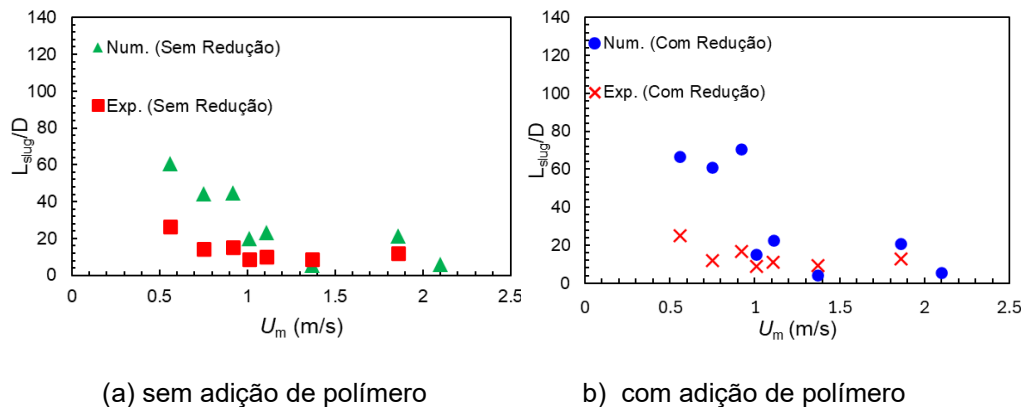


Figura 5.7 – Comparativo do comprimento da golfada numérico e experimental. (a) sem adição de polímero, (b) com adição de polímero.

Os dados experimentais obtidos no LEF corroboram a informação relacionada ao comprimento médio das golfadas, de que o comprimento varia de $10 D$ a $20 D$ (de Oliveira et al., 2015). Assim como no caso da frequência das golfadas, i.e., a presença do polímero não impactou no comprimento médio das golfadas, com variações inferiores a 10%, dentro da incerteza das medidas. Observa-se dependência muito pequena da velocidade de mistura no comprimento das golfadas.

Analisando os dados numéricos, observa-se que os comprimentos das golfadas foram superestimados, variando de $6 D$ a $60 D$, com um valor

médio de 30 D . Observa-se ainda que maiores comprimentos de golfada foram obtidos para baixas velocidades de mistura.

O impacto do fator redutor de atrito no comprimento da golfada obtido numericamente é apresentado na Figura 5.8. Numericamente, o fator redutor de arraste induziu a formação de golfadas mais longas ($\approx 30\%$ maiores), para baixas velocidades de mistura. A obtenção numérica das grandezas estatísticas é difícil de ser obtida, e mais investigações devem ser realizadas de forma a melhor captar essa grandeza. Mesmo, com essa diferença, pode-se afirmar que, como observado experimentalmente, de um modo geral a influência do redutor de atrito no comprimento das golfadas é pequena.

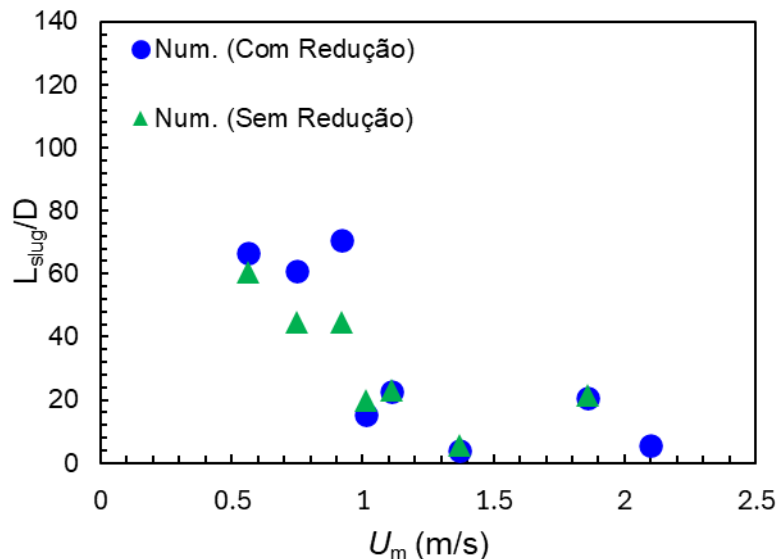


Figura 5.8 – Comparativo do Comprimento da golfada numérico sem e com a adição do polímero.

5.3.3. Velocidade das Golfadas

Nesta seção, é analisada a grandeza estatística referente a velocidade de translação das golfadas. Avalia-se a influência da velocidade de mistura U_m , assim como a presença ou não de polímero no líquido. Nesta seção, além de comparar os dados numéricos com os dados experimentais obtidos no LEF, duas correlações empíricas da literatura também são utilizadas. A primeira é correlação de Gregory et al. (1969),

apresentada Eq. 3.35 e a segunda é a correlação de Bendiksen (1984) explicitada na Eq. 3.36.

Observa-se nas Figura 5.9 (a) e (b), que a variação da velocidade da golfada com a velocidade de mistura medida experimentalmente e prevista numericamente, sem e com a adição de polímero, apresenta excelente concordância com as 2 correlações empíricas, com praticamente todos os dados entre os valores da correlação de Bendiksen (1984) e Gregory e Scott (1969). Observa-se, no entanto, um desvio dos dados experimentais para altos valores da velocidade de mistura, enquanto numericamente, o desvio é observado para o baixo valor de U_m . Observa-se ainda que a medida que a velocidade de mistura cresce, a velocidade de translação da golfada também cresce, como esperado e representado pelas correlações empíricas. Essa boa concordância válida a capacidade do modelo em reproduzir corretamente a dinâmica de translação das golfadas.

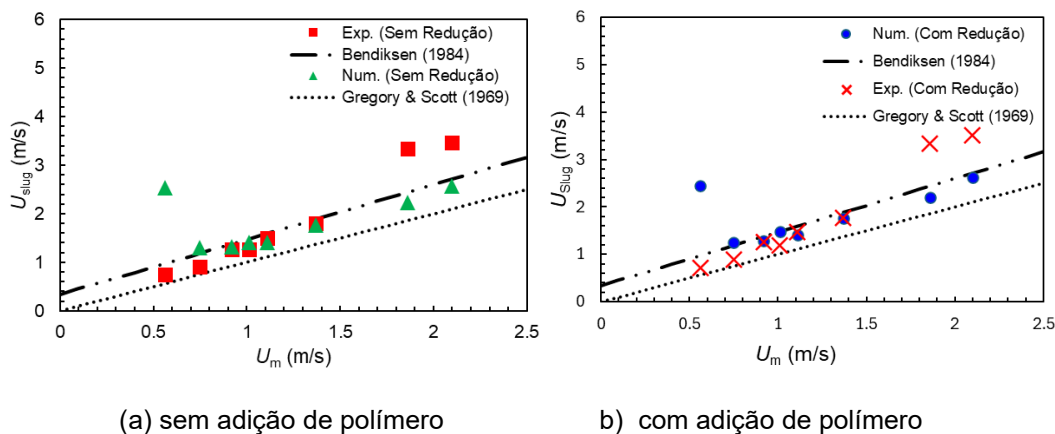


Figura 5.9 – Variação da velocidade da golfada numérica e experimental com a velocidade de mistura. (a) sem adição de polímero, (b) com adição de polímero.

O impacto do fator redutor de arraste na solução numérica é ilustrado na Figura 5.10, onde pode-se observar uma pequena redução na velocidade de translação da golfada com a introdução do polímero.

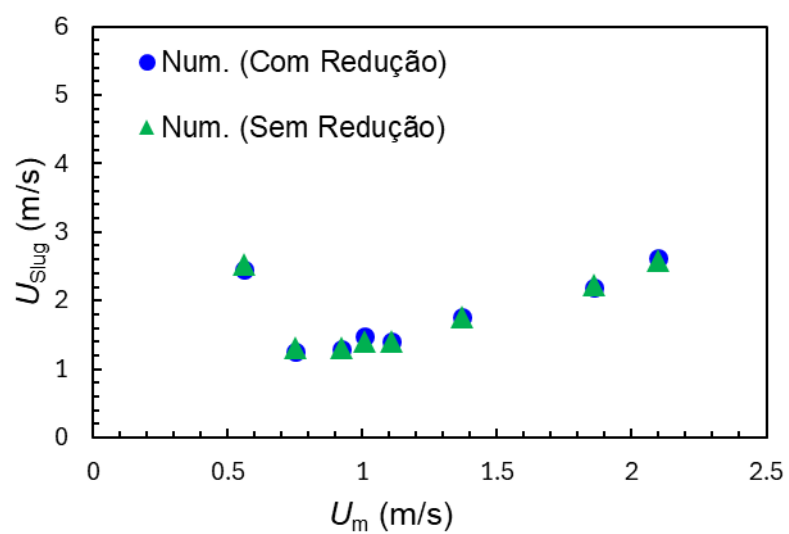


Figura 5.10 – Comparativo de valores numéricos da Velocidade da Golfada com e sem adição de polímero.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, desenvolveu-se e validou-se um modelo de Dois Fluidos Unidimensional, incorporando uma correlação para o fator de arraste devido a presença de polímeros no líquido, o qual foi obtido a partir de ensaios monofásicos (Eq. 3.34) e subsequentemente aplicado ao regime de golfada em escoamentos bifásicos. Os resultados numéricos reproduziram com alta fidelidade tanto a redução de arraste observada experimentalmente quanto as alterações na dinâmica das golfadas. Observou-se que apesar do fator redutor de arraste ter induzido a uma redução na perda de carga, a influência nas grandezas estatísticas das golfadas foi muito pequena, concordando com as medidas experimentais realizadas no LEF.

A coesão entre simulação e experimento, confirma que o modelo proposto para o fator redutor de arraste, aplicado ao Modelo de Dois Fluidos 1D é capaz de capturar de forma consistente os mecanismos físicos de interação polímero–escoamento no padrão de golfada. Essa robustez numérica valida o uso do desenvolvimento de correlações de redução de arraste em escoamentos monofásicos para previsões em sistemas multifásicos, ampliando o escopo de aplicação das ferramentas de simulação 1D em operações de transporte de hidrocarbonetos.

Interessante ressaltar, que a presença do polímero não induziu modificações nas características das golfadas, com variações muito pequenas prevista numericamente, as quais concordam com as medidas experimentais.

Do ponto de vista prático, a demonstração de que a injeção de polímeros pode reduzir significativamente as perdas de carga, abre caminho para estratégias de otimização de injeção, que visem não apenas a diminuição do consumo energético, mas também a mitigação de instabilidades operacionais em dutos. A quantificação dos ganhos de eficiência e a previsão de parâmetros operacionais essenciais (frequência,

comprimento e velocidade) fornecem subsídio para o dimensionamento de sistemas de dosagem e para a avaliação de custos-benefícios em campo.

No desenvolvimento de pesquisas futuras, a ampliação do escopo geométrico e físico do modelo para tubulações com outras dimensões, e diferentes combinações de fluidos e velocidades superficiais. Além disso, a extensão para padrões de escoamento distintos, como regimes anulares e estratificados, viabilizará a avaliação da aplicabilidade de correlações para prever a redução de arraste em situações industriais mais variadas, onde a interação entre fases assume diferentes morfologias.

Do ponto de vista numérico, pode-se recomendar o desenvolvimento de esquemas numéricos de 2ª ordem no tempo e no espaço, para aumentar a precisão das simulações, sem a necessidade de malhas muito finas. Investimento em aumentar o acoplamento na solução das equações de conservação, também pode colaborar em acelerar a velocidade de convergência.

Finalmente, é interessante incorporar ao modelo numérico a dinâmica de degradação polimérica induzida pelo cisalhamento e pela temperatura do fluido ao longo de uma simulação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUBAKAR. A; AL-WAHAUBI T.; AL-WAHAUBI Y.; AL-HASHMI A.R; AL-AJMI A.; Roles of drag reducing polymers in single- and multi-phase flows, Chemical Engineering Research and Design, 2014, v. 92, pp. 2153-2181.

ALSURAKJI. I.H.H.; Drag Reduction by Additives in Multiphase Flow in Pipes; Ph.D. Dissertation – King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia; 2016; v. 1; pp. 1–187.

AL-SARKHI. A.; SOLEIMANI. A.; Effect of drag reducing polymers on two-phase gas–liquid flows in a horizontal pipe; Chemical Engineering Research and Design; 2004; v. 82; pp. 1583–1588.

BIBERG, D., 1999. An explicit approximation for the wetted angle in two-phase stratified pipe flow. The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 77, n. 6, p. 1221-1224.

BRANDFELLNER. L.; BISMARCK. A.; MULLER. H.W.; Time for polymers: Onset of drag reduction in the Reynolds–Weissenberg-plane; Physics of Fluids; 2025; v. 37; pp. 035175.

BENDIKSEN. K.H.; An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes; International Journal of Multiphase Flow; 1984; v. 10; pp. 467–483.

CARNEIRO, J. N. E., 2006, Simulação Numérica de Escoamentos Bifásicos no Regime de Golfadas em Tubulações Horizontais e Levemente Inclinadas, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

CARNEIRO, J.N.E., FONSECA JR., R., ORTEGA, A.J., CHUCUYA, R.C., NIECKELE, A.O., AZEVEDO, L.F.A., 2011. Statistical characterization of two-phase slug flow in a horizontal pipe. Journal of the Brazilian Society of

Mechanical Sciences and Engineering 33, 251-258. doi:10.1590/S1678-58782011000500007

CASTELO BRANCO, R.L.C., FONTALVO, E.M.G., DE PAULA, I.B., CARNEIRO, J.N.E., NIECKELE, A.O. Stability analysis of vertical annular flows with the 1D Two-Fluid Model: effect of closure relations on wave characteristics. *Int. J. Multiphase Flow*, 2022, v.152, 103347 (24 pages). doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow, 2021.103947.

CHOUERI. G.H.; LOPEZ. J.M.; HOF. B.; Exceeding the Asymptotic Limit of Polymer Drag Reduction; *Physical Review Letters*; 2018; v. 120; pp. 124501–124505.

CHUCUYA HUALLPACHOQUE. R.C.; Análise Numérica do escoamento Bifásico Horizontal em Padrão de Golfadas Estatisticamente Permanente; Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro; 2010; v. 1; pp. 1–116.

COSENZA. I.; Estudo sobre a degradação de polímeros redutores de atrito em escoamentos turbulentos; Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio; 2018; pp. 43.

DE OLIVEIRA, W.R.; DE PAULA, I.B.; MARTINS, F.J.W.A.; FARIAS, P.S.C.; AZEVEDO, L.F.A., Bubble characterization in horizontal air–water intermittent flow, *Int. J. Multiphase Flow*, 2015, v. 69, pp. 18–30, 2015, doi: 10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2014.10.014.

DE PAULA. I.B.; NIECKELE. A.O.; KHALIL DE OLIVEIRA. M.C.; AZEVEDO. L.F.A.; Methodology for predicting polymer drag reduction in two-phase flows; *Proceedings of the 12th International Conference on Multiphase Flow (ICMF)*, Toulouse, France; 2025; v. 12; pp. 1–6.

DUKLER, A. E., HUBBARD, M.G., A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes, *Ind. Eng. Chem. Fundamentals.*, 14, no.4, 1975

FRUTEAU A.; LESAGE N.; ARNAULT R.; DROUILLY C.; Application of Drag Reducer Agents on Multiphase Production Fluids; SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, , 2024, DOI 10.2118/220720-MS.

FONTALVO, E.M.G., CASTELLO BRANCO, R.L., CARNEIRO, J.N.E., NIECKELE, A.O. Assessment of closure relations on the numerical predictions of vertical annular flows with the Two-Fluid Model. *Int. J. Multiphase Flow*, 2020, v.126, 103243 (19 pages). doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103243.

FOSSA. M.; GUGLIELMINI. G.; MARCHITTO. A.; Intermittent flow parameters from void fraction analysis; *Flow Measurement and Instrumentation*; 2003; v. 14; pp. 161–168.

GREGORY. G.A.; SCOTT. D.S.; Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow; *AIChE Journal*; 1969; v. 15; pp. 933–935.

ISSA. R.I.; KEMPF. M.H.W.; Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model; *International Journal of Multiphase Flow*; 2003; v. 29; pp. 69–95.

ISHII. M.; HIBIKI. T.; *Thermo-fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow*; Springer; 2011; v. 1; pp. 1–517.

NIAZI M.; ASHRAFIZADEH S. N.; HASHEMABADI S. H.; KARAMI H.; CFD Simulation of drag-reducing fluids in a non-Newtonian turbulent pipe flow; *Chemical Engineering Science*, 2024, v. 285, pp. 119612.

NIECKELE, A.O., CARNEIRO, J.N.E., CHUCUYA, R.C., AZEVEDO, J.H.P., 2013. Initiation and statistical evolution of horizontal slug flow with a Two-Fluid Model. *ASME J. Fluids Eng.* 135 (12), 121302. doi:10.1115/1.4025223.

ORTEGA, A.J.M., NIECKELE, A.O., 2005. Simulation of horizontal two-phase slug flows using the two-fluid model with a conservative and non-

conservative formulation. 18th International Congress of Mechanical Engineering. November 6-11, Ouro Preto, MG, Brazil.

PATANKAR, S.V.; Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation. New York. 1980.

PASQUALETTE, M.A., CARNEIRO, J.N.E., NIECKELE, A.O., 2014. Numerical simulation of horizontal slug flows with the Two-Fluid Model using explicit geometrical approximations. 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Belém, Brazil, 10-13 Nov.

NEVES. R.R.S.P.; Estudo sobre a degradação do polímero redutor de atrito poli-isobuteno em escoamentos turbulentos; Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro; 2024; pp. 1–51.

RUIZ-VIERA. M.J.; DELGADO. M.A.; FRANCO. J.M.; SÁNCHEZ. M.C.; GALLEGOS. C.; On the drag reduction for the two-phase horizontal pipe flow of highly viscous non-Newtonian liquid/air mixtures: Case of lubricating grease; International Journal of Multiphase Flow; 2006; v. 32; pp. 232–247.

RUSHD. S.; FERROUDJI. H.; YOUSUF. H.; WALKER. T.W.; BASU. A.; SEN. T.K.; Applications of drag reducers for the pipeline transportation of heavy crude oils: A critical review and future research directions; Canadian Journal of Chemical Engineering; 2024; v. 102; pp. 438–458.

SALGADO. R.C.; Bubble velocity and pressure drop predictions in horizontal intermittent flows for shear-thinning and Bingham fluids; Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ; 2024.

SHI. P.F.; HU. H.B.; WEN. J.; XIE. L.; Drag reduction and degradation of binary polymer solutions; Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics; 2024; v. 330; pp. 105279.

SIMÕES, E. F. CARNEIRO, J. E., NIECKELE, A. O. Numerical prediction of non-boiling heat transfer in horizontal stratified and slug flow by the two-

fluid model. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 2014, v. 47, p. 135–145.

SPEDDING. P.L.; HAND. N.P.; Prediction in stratified gas-liquid co-current flow in horizontal pipelines; *International Journal of Heat and Mass Transfer*; 1997; v. 40; pp. 1923–1935.

TAITEL. Y.; DUKLER. A.E.; A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas–liquid flow; *AIChE Journal*; 1976; v. 22; pp. 47–55.

TAN J.; HU H.; VAHAJI S.; JING J.; TU J.; Effects of drag-reducing polymers on the flow patterns, pressure gradients, and drag-reducing rates of horizontal oil–water flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, v. 153, pp. 104136.

VIRK, P. S.; Drag reduction fundamentals. *AIChE J.* 21:625–56. 1975

XI L.; Turbulent drag reduction by polymer additives: Fundamentals and recent advances. *Physics of Fluids*, 2019, v. 31, pp. 121302.

YOSHIDA, T.; OBI. S.; Experimental study of instantaneous velocity-pressure correlations by PIV measurement in a turbulent pipe flow with drag reduction by added surfactant; *13th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*; 2024; v. 13; pp. 1–6.

WARHOLIC. M.D.; HEIST. D.K.; KATCHER. M.; HANRATTY. T.J.; A study with particle-image velocimetry of the influence of drag-reducing polymers on the structure of turbulence; *Experiments in Fluids*; 2001; v. 31; pp. 474–483.

WEISMAN, J. Two-phase flow patterns. *Handbook of Fluids in Motion*; Cheremisinoff, N.P., Gupta, R., Eds.; Chapter 15; Ann Arbor Science Publishers: Ann Arbor, Michigan, USA, 1983; pp. 409–425.

8. APÊNDICE A – TESTE DE MALHA

Foram selecionados os Casos 1 e 8, referentes a menor e maior velocidade de mistura para definir a malha a ser utilizada nas simulações. Selecionou-se casos sem a introdução do polímero.

Três malhas foram selecionadas, $N = 450$, 670 e 1000 . Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 8.1. Nesta tabela a diferença percentual do gradiente de pressão obtido com a malha mais grossa em relação a malha mais fina também é apresentado. Esses resultados encontram-se ilustrados graficamente na Figura 8.1 e Figura 8.2.

Tabela 8.1 – Teste de malha realizado com o Caso 1 e Caso 8

	Malha	dP/dx (Pa/m)	ε (%)
Caso 1	N = 450	41	9
	N = 670	44	6
	N = 1000	47	-
Caso 8	N = 450	387	6
	N = 670	418	1
	N = 1000	415	-

Pode-se observar que para os dois casos, ao refinar a malha, a variação do gradiente de pressão diminui, tendendo a um valor constante indicando que uma solução independente da malha está sendo obtida. Uma malha mais fina poderia ter sido investigada, mas devido ao alto esforço computacional, e como a variação com a malha foi considerada pequena, entre a malha 670 e 1000, optou-se pela utilização de malha com $N=1000$ pontos para todos os casos.

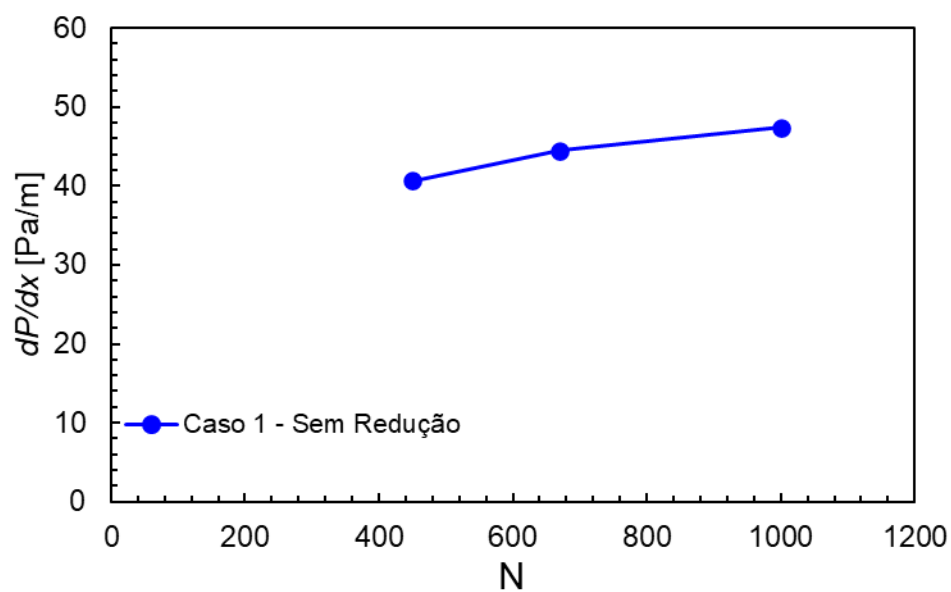


Figura 8.1 – Teste de malha do Caso 1 com e sem adição de polímero

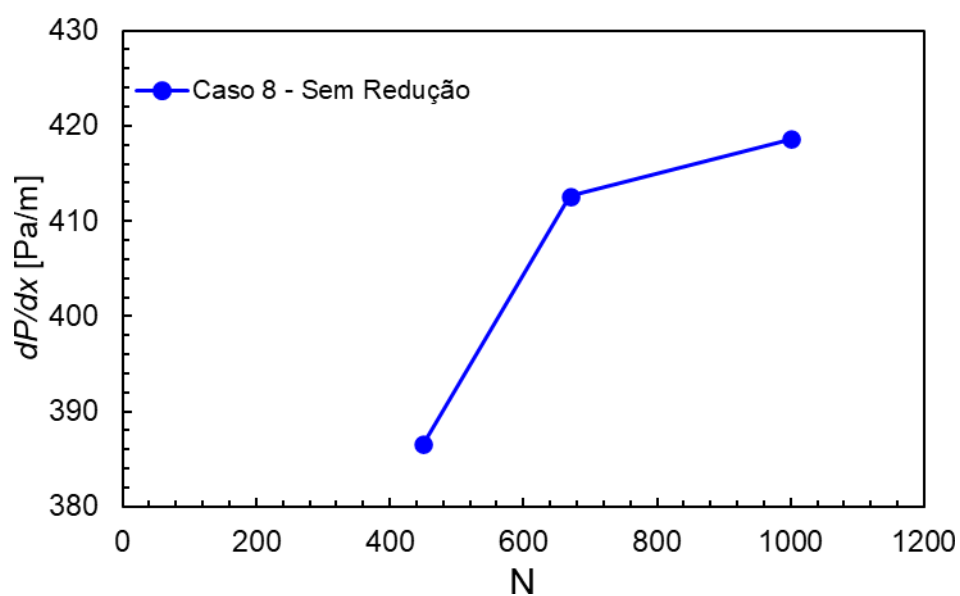


Figura 8.2 – Teste de malha do Caso 8 sem adição de polímero.