



Gabriel Christiano Silva Carvalho

**Estudo do desempenho de redutores de atrito
encapsulados em escoamentos turbulentos**

Trabalho de Conclusão de Curso

Projeto Final do Curso de Engenharia Mecânica entregue para a
obtenção de grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador : Prof. Luís Fernando Alzuguir Azevedo
Coorientador: Dr. Bruna Costa Leopércio, Prof. Igor Braga de Paula

Rio de Janeiro
Junho de 2026

Agradecimentos

Aos meus orientadores pelo seu tempo e pelos seus conselhos.

À PUC-Rio e aos professores, pela formação e preparação.

Ao laboratório LMMP Puc-Rio, pela disponibilidade e pelos recursos.

A Márcio França Soares e Leonardo Pinhal, por seu apoio na montagem experimental, sem a qual este trabalho não existiria.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

À minha mãe, Fernanda, pela educação e pelo carinho, ao meu pai, Márcio, pela ajuda e pela orientação e à minha irmã, Luisa, pela companhia.

À minha namorada, Tatiana, pela paciência, pelo apoio e por todos os momentos de leveza.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Resumo

Christiano Silva Carvalho, Gabriel; Alzuguir Azevedo, Luís Fernando; Costa Leopércio, Bruna. **Estudo do desempenho de redutores de atrito encapsulados em escoamentos turbulentos**. Rio de Janeiro, 2026. 34p. Projeto Final – Departamento de Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de polímeros redutores de atrito (DRA) encapsulados em microcápsulas de goma gelana em oleodutos sob escoamentos turbulentos, em relação ao desempenho do DRA dissolvido diretamente no óleo base, especialmente na aplicação das microcápsulas como mecanismo de entrega de DRA em dutos umbilicais submarinos.

Palavras-chave

Microencapsulamento; Redução de Arraste; Oleodutos; Turbulência.

Abstract

Christiano Silva Carvalho, Gabriel; Alzuguir Azevedo, Luís Fernando (Advisor); Costa Leopércio, Bruna (Co-Advisor). **A study on the performance of encapsulated drag reducers in turbulent flows.** Rio de Janeiro, 2026. 34p. Projeto Final – Departamento de Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This project aims to evaluate the performance of drag reducing polymers (DRA) encapsulated in gellan gum microcapsules in oil ducts under turbulent flows, when compared to DRA dispersed directly in the base oil, especially in the application of the microcapsules as a delivery mechanism for DRA in submarine umbilical ducts.

Keywords

Microencapsulation; Drag Reduction; Oil Ducts; Turbulence.

Sumário

1	Introdução	10
2	Revisão Bibliográfica	12
2.1	Redução de Arraste em Oleodutos	12
2.2	Microcápsulas de goma gelana	13
3	Produção das microcápsulas	15
3.1	Reagentes e materiais	15
3.2	Caracterização	15
3.3	Resultados	15
4	Metodologia experimental	19
4.1	Descrição geral da seção de testes	19
4.2	Procedimento experimental	22
4.3	Modelagem do experimento	24
5	Resultados	25
5.1	Curvas de calibração	25
5.2	Curva $f \times Re$	27
5.3	Curvas de DR	28
6	Conclusão	33
7	Referências bibliográficas	34

Lista de figuras

Figura 3.1	Imagem SEM de uma microcápsula de goma gelana (camada lisa na imagem) contendo DRA (MicroDOTs, 2026)	16
Figura 3.2	Comportamento da viscosidade extensional de querosene contendo microcápsulas de DRA antes (azul) e depois (laranja) da liberação térmica (MicroDOTs, 2026)	17
Figura 3.3	Imagens de câmera de alta velocidade são frames de um filme mostrando microcápsulas de goma gelana contendo DRA a) antes da liberação térmica de um grupo de microcápsulas no centro da imagem e b) depois das mesmas microcápsulas serem engatilhadas termicamente para liberar o seu material nuclear (MicroDOTs, 2026)	18
Figura 4.1	Detalhe da montagem	20
Figura 4.2	Esquema da montagem	21
Figura 5.1	Calibração Densidade	26
Figura 5.2	Calibração Viscosidade	26
Figura 5.3	Calibração Vazão	27
Figura 5.4	Calibração Pressão	28
Figura 5.5	Resultados $f \times Re$	29
Figura 5.6	Resultados Óleo puro	30
Figura 5.7	Resultados DRA livre	31
Figura 5.8	Resultados DRA encapsulado	31
Figura 5.9	DRA livre x encapsulado	32

Lista de tabelas

Tabela 4.1	Dados do setup experimental	21
Tabela 4.2	Propriedades do Óleo	22

Lista de Abreviaturas

DRA – Agente Redutor de Arraste

DR – Redução de Arraste

T – Temperatura (K)

X_p – Concentração de goma gelana em água (%m/m)

X_i – Concentração de íons Ca^{+2} em água (mM/L)

P – Pressão (Pa)

ρ – massa específica (kg/m^3)

U – Velocidade média de escoamento (m/s)

g – Aceleração da gravidade (m/s^2)

z – Coordenada vertical (m)

h – Perda de carga (J/kg)

f – Fator de atrito

L – Comprimento (m)

D – Diâmetro interno (m)

Q – Vazão volumétrica (m^3/s)

$\text{DR}_{\%}$ – Redução de arraste percentual

Só sei que nada sei.

Sócrates, *Apologia de Sócrates*.

1

Introdução

A extração e o transporte de petróleo compõem uma importante fração da economia brasileira. Em 2024, a produção atingiu uma média de 3,358 milhões de barris por dia. Com tamanho volume de produção, se revela de extrema importância o aumento da eficiência no processo de transporte do petróleo através de oleodutos.(BRASIL, 2024)

Uma maior eficiência no transporte ao longo de oleodutos baratearia o custo do barril de petróleo tanto financeiramente, impulsionando a economia brasileira, quanto energeticamente, garantindo uma produção mais limpa e sustentável. Uma das principais maneiras de aumentar essa eficiência é por meio da redução da energia perdida devido ao atrito ao longo de oleodutos. Essa redução de arraste pode ser atingida em escoamentos turbulentos através da injeção de polímeros redutores de atrito. Esses polímeros alteram a estrutura turbulenta do escoamento, levando a uma redução da perda de carga.

Em dutos de extração submarinos, o DRA precisa ser alimentado no tubo principal por meio de um duto umbilical. Porém, devido à sua alta viscosidade e alto peso molecular, o polímero não pode ser bombeado puro pelo duto umbilical, nem diluído em óleo.

O processo de microencapsulamento (contenção de um dado composto em cápsulas com diâmetros pequenos) permite a entrega de compostos ativos de forma que eles permaneçam inertes até o rompimento das membranas protetoras das cápsulas, que pode ser controlado por diferentes gatilhos inerentes a cada processo. Essa tecnologia é largamente utilizada nas indústrias de cosméticos e farmacêutica. A injeção de microcápsulas contendo um polímero redutor de atrito com liberação do DRA somente quando as cápsulas entram em contato com o óleo quente permite que o DRA seja transportado através de linhas umbilicais como uma suspensão de microcápsulas em um solvente de baixa viscosidade, viabilizando assim o uso de DRA em produção offshore.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de polímeros reduto-

res de atrito (DRA) encapsulados em goma gelana em escoamentos turbulentos em oleodutos, validando dessa forma a viabilidade de microcápsulas de goma gelana como mecanismo de entrega com gatilho térmico. Este desempenho será comparado com o de redutores de atrito não-encapsulados.

Goma gelana será utilizada como o material da membrana, por conta de sua biodegradabilidade, pela literatura já existente sobre sua utilização em microencapsulamento, e por sua termosensibilidade, possibilitando a liberação das cápsulas apenas quando alcançarem o ponto desejado (que se encontra a 70°C).

Estas cápsulas serão suspensas em um óleo, que será utilizado em um dispositivo que simula o escoamento em dutos compridos. A diferença de pressão a uma determinada vazão em regime turbulento do escoamento será comparada para testes com o polímero redutor de atrito nas cápsulas ou diretamente misturado no óleo.

Espera-se que o desempenho do sistema microencapsulado seja similar ao do DRA injetado diretamente no óleo, provando assim a viabilidade da injeção de DRA como uma suspensão de microcápsulas para uso em tubulações submarinas.

2

Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica deste trabalho se dará em duas partes: O uso de polímeros para redução de arraste e o uso de goma gelana para a produção de microcápsulas.

2.1

Redução de Arraste em Oleodutos

O termo turbulência foi introduzido por Leonardo da Vinci no século XVI para descrever o movimento desordenado de fluidos na forma de vórtices. O estudo do comportamento de fluidos evoluiu com a popularização da mecânica newtoniana e com os trabalhos de Euler e Navier, e o conceito da viscosidade dinâmica (μ), que determina a razão entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade de um fluido newtoniano. Dessa forma, o número de Reynolds representa a razão entre as forças inerciais e viscosas sobre um fluido, com Reynolds mais altos representando escoamentos nos quais as dissipações se propagam muito mais rapidamente do que se dissipam, ou seja, turbulentos. (Moriconi, L.; Pereira, R. M., 2021)

L. F. Richardson propôs em 1922 a existência do fenômeno conhecido como cascata de turbulência, no qual os maiores vórtices (que existem na escala do escoamento) geram vórtices menores, que por sua vez geram vórtices ainda menores. A energia seria passada entre as ordens de vórtices até atingir uma escala (denominada escala de Kolmogorov) pequena o suficiente para gerar um gradiente de velocidade suficientemente significativo que a dissipação viscosa possa ocorrer, finalmente convertendo essa energia mecânica em calor. (Moriconi, L.; Pereira, R. M., 2021)

O impacto exercido por polímeros no fator de atrito em escoamentos turbulentos foi nomeado o "fenômeno de Toms" em homenagem ao seu primeiro observador (1948), que concluiu que a redução de atrito (DR) aumenta com vazão, peso molecular e concentração do polímero redutor de atrito (DRA), embora o mecanismo físico que permita essa redução não tenha sido determinado. (Virk, P. S.; Merrill, E. W.; Mickley, H. S.; Smith, K. A., 1967) deliberou sobre os diferentes

modelos físicos que explicariam o fenômeno de Toms, e sob quais condições cada um seria experimentalmente válido, sem alcançar um modelo único para todas as condições. Virk (1975) continua a discussão com *Drag Reduction Fundamentals*, um resumo e interpretação dos experimentos relacionados à redução de arraste polimérica até o momento. (Virk, P. S.; Merrill, E. W.; Mickley, H. S.; Smith, K. A., 1967)

Existem no momento duas principais teorias que buscam explicar o mecanismo pelo qual DR ocorre. A primeira, denominada teoria viscosa, afirma que DRAs, ao serem molecularmente alongados, aumentam a viscosidade efetiva do fluido nas regiões com maiores perdas, reduzindo dessa forma a turbulência efetiva do escoamento. A segunda, denominada teoria elástica, afirma que o alongamento molecular absorve e armazena energia dos vórtices na escala de tamanho das moléculas de DRA, interrompendo a cascata de turbulência. Embora contraditórias, ambas teorias podem ser corroboradas experimentalmente, e estudos recentes parecem indicar que ambos mecanismos ocorrem simultaneamente. (White, C. M.; Mungal, M. G., 2008)

Estudos continuam, focando na elaboração de modelos mais precisos, no uso de novos DRAs e na redução da degradação do polímero. Shi et. al. (2024), por exemplo, investiga a redução da degradação pela mistura de DRAs com elasticidades diferentes. (Shi, Peng-fei.; Hu, Hai-bao; Wen, Jun; Luo, Xie, 2024)

O artigo *Lab-scale investigation of drag reduction for crude oil by oil-soluble polymers* publicado na *Nature* em 2025, informa tanto a breve história do uso de DRAs em óleo, quanto o estado da arte dessa área. Investigando o efeito que cada parâmetro (como composição do DRA e número de Reynolds) exerce na redução total de atrito, bem como a viabilidade do poliisobuteno como DRA em oleodutos. (Liu, Kun; Xiong, Xiao; Liang, Yue; Dai, Xiaodong; Cheng, Zhensong; Gou, Jinxin; Zhang, Jianhua; Zhang, Guoxin; Lu, Yuan, 2025)

2.2

Microcápsulas de goma gelana

A goma gelana é um polissacarídeo solúvel em água. É utilizada mundialmente na indústria alimentícia como um estabilizador e engrossador, devido à sua

biodegradabilidade e aos diversos estudos comprovando sua segurança para ingestão humana. Alhaique et. al. (1996) comprovou sua viabilidade na produção de microcápsulas voltadas para liberação controlada de ativos químicos. (Alhaique, F.; Santucci, E.; Carafa, M.; Coviello, T.; Murtas, E.; Riccieri, F. M., 1996)

Nickerson et. al. (2003) determinou os fatores necessários para o processo de gelificação da goma gelana como temperatura e a presença de íons Ca^{+2} . Mais especificamente, analisou a concentração de gelana necessária para a gelificação para diversos valores de temperatura e concentração de Ca^{+2} . Estes dados foram utilizados para aproximar uma curva que descreve a temperatura abaixo da qual ocorre gelificação como uma função das concentrações de goma gelana e Ca^{+2} :

$$\frac{1}{T} = -6,35\ln(X_p)(10^{-5}) - 6,47\ln(X_i)(10^{-5}) + 3,25(10^{-3}) \quad (2-1)$$

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

X_p = concentração de goma gelana (%m/m)

X_i = concentração de íons Ca^{+2} (mM/L)

3

Produção das microcápsulas

Neste capítulo será explicitada a metodologia utilizada para a produção das microcápsulas de goma gelana utilizadas para encapsular o DRA. As cápsulas foram fornecidos pela MicroDOTs (Brasil).

3.1

Reagentes e materiais

O DRA foi fornecido pela Dorf Ketal (Índia), goma gelana foi fornecida pela CP Kelco (EUA) e acetato de cálcio da Sigma-Aldrich (EUA).

3.2

Caracterização

As emulsões produzidas e microcápsulas foram caracterizadas por microscopia ótica, microscopia de escaneamento de elétron (SEM), e análise de distribuição de tamanho de gotas usando um sistema Mastersizer de difração a laser. O comportamento de liberação termo-responsiva das cápsulas foi avaliado por medições de viscosidade extensional e gravado por uma câmera de alta velocidade.

3.3

Resultados

Microcápsulas de DRA termo-responsivas foram produzidas com sucesso utilizando o sistema de emulsificação de membrana Micropore AXF-1 por encapsulamento direto de DRA em uma matriz de goma gelana. O processo de encapsulamento permitiu a produção de cápsulas esféricas com boa integridade estrutural durante coleta e manuseamento. Imagens SEM obtidas de cápsulas congeladas e fraturadas (figura 3.1) revelam a presença de uma casca polimérica contínua (rasgada na imagem devido ao procedimento crio-SEM) envolvendo a fase interna de DRA, confirmando a formação de estruturas núcleo-casca e retenção do material ativo dentro das cápsulas.

A distribuição de tamanho das cápsulas obtida por difração a laser demonstrou boa reprodutibilidade dentro das condições de produção, com valores apro-

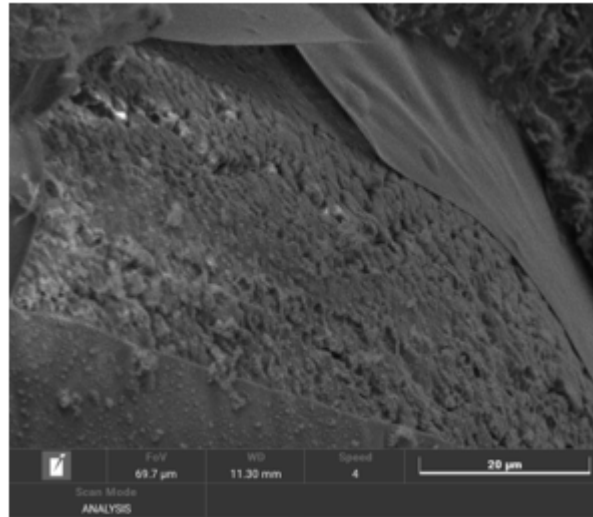


Figura 3.1: Imagem SEM de uma microcápsula de goma gelana (camada lisa na imagem) contendo DRA (MicroDOTs, 2026)

ximados de $D_{10} \approx 150\mu m$, $D_{50} \approx 460\mu m$ e $D_{90} \approx 822\mu m$. A variação relativamente pequena entre distribuições obtidas a vazões externas diferentes indica produção de cápsulas estável dentro das condições de operação investigadas. Os valores de D_{10} permaneceram próximos do diâmetro dos poros da membrana, indicando que a formação de gotas foi altamente influenciada pela geometria da membrana. Observações de microscopia ótica também indicaram a tendência para a formação de cápsulas menores a maiores vazões de fase contínua, que é consistente com o aumento de forças cisalhantes atuando na superfície da membrana durante o descolamento das gotas.

O comportamento de liberação termo-responsiva das cápsulas foi avaliado através de medições de reologia extensional, considerando viscosidade extensional, um parâmetro importante associado ao esticamento de polímeros e DR em condições de escoamento turbulento. Cápsulas dispersas em querosene em temperatura ambiente apresentam comportamento reológico similar ao do querosene puro, indicando que o DRA encapsulado permanece isolado do meio externo antes da liberação, conforme mostrado na figura 3.2. Após o aquecimento acima de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, a dissolução da matriz de goma gelana levou à ruptura das cápsulas e à liberação do polímero encapsulado para a fase oleosa. Como consequência, um aumento significativo na resposta reológica extensional foi observado, aproximando o comportamento obtido do DRA dispersado livremente no querosene.

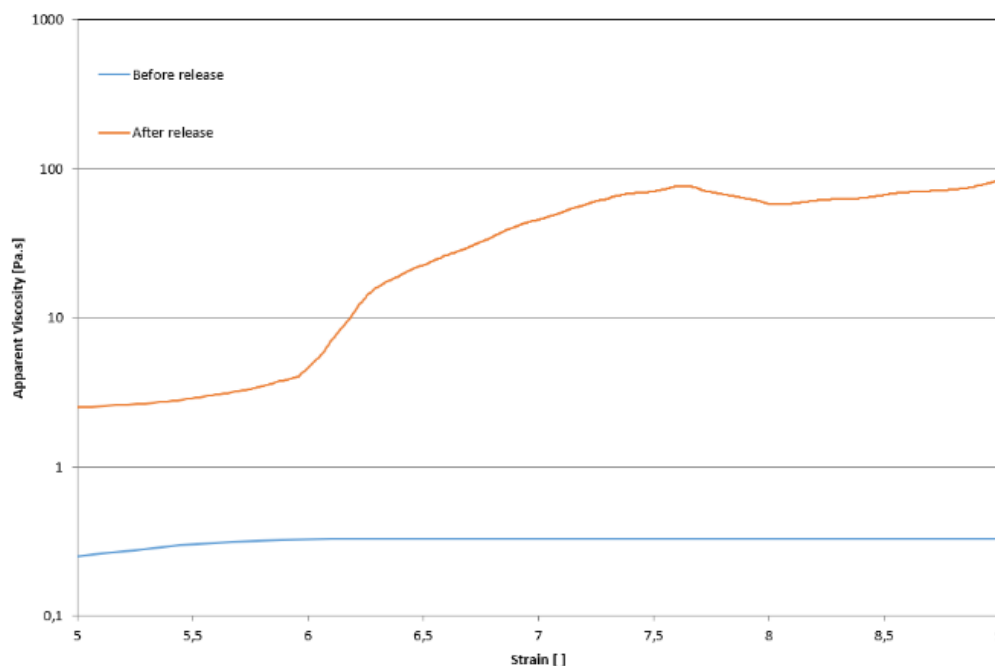


Figura 3.2: Comportamento da viscosidade extensional de querosene contendo microcápsulas de DRA antes (azul) e depois (laranja) da liberação térmica (MicroDOTs, 2026)

O aumento na viscosidade extensional aparente após a liberação confirma que o processo de encapsulamento preserva as propriedades funcionais do DRA após a produção, armazenamento e liberação térmica.

Imagens de alta velocidade validam o mecanismo de liberação térmica. Frames sequenciais gravados durante o aquecimento mostram a ruptura das cápsulas seguida de liberação rápida e dispersão do DRA encapsulado no meio externo (figura 3.3). A falta de resíduo depois da solução da casca é particularmente atrativa para sistemas de injeção química submarinas, nos quais acumulação de sólidos deve ser evitada.

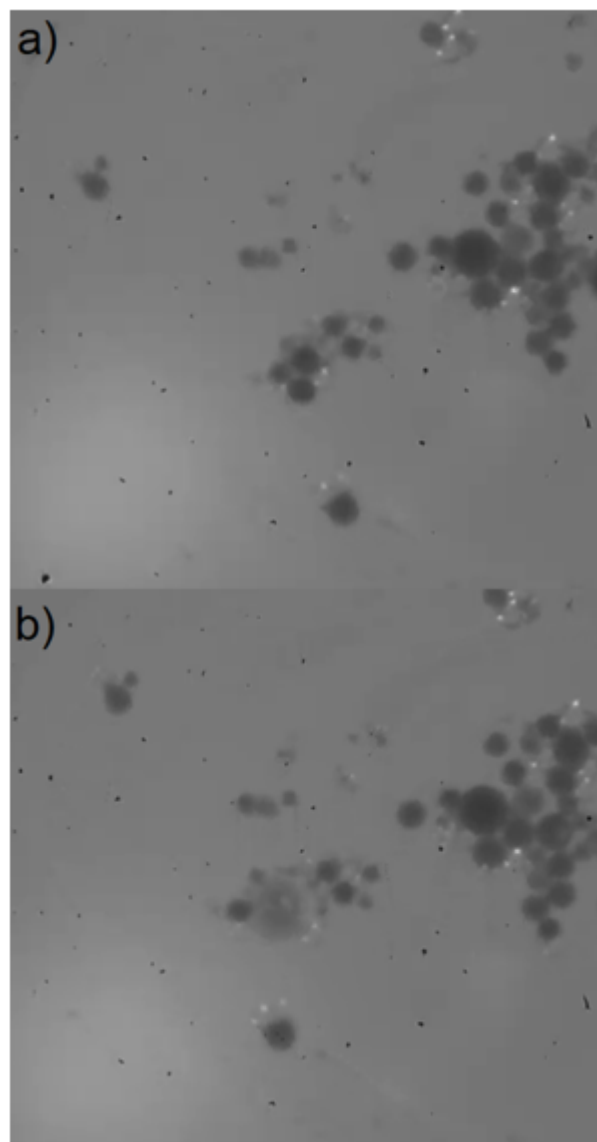


Figura 3.3: Imagens de câmera de alta velocidade são frames de um filme mostrando microcápsulas de goma gelana contendo DRA a) antes da liberação térmica de um grupo de microcápsulas no centro da imagem e b) depois das mesmas microcápsulas serem engatilhadas termicamente para liberar o seu material nuclear (MicroDOTs, 2026)

4

Metodologia experimental

Neste capítulo serão descritos a montagem e procedimento experimental utilizados no estudo do desempenho dos polímeros redutores de atrito encapsulados. Em linhas gerais, a seção de testes projetada é composta por um duto longo em forma de circuito fechado por onde é bombeado o fluido de trabalho contendo o redutor de atrito. A medição da vazão de fluido e da queda de pressão ao longo do duto fornecem a informação desejada sobre o desempenho do redutor de atrito. Para avaliar o desempenho de redutores de atrito encapsulados em cápsulas com entrega por efeito térmico, a seção de testes foi equipada com um sistema de aquecimento e controle de temperatura. A seguir a seção de testes é descrita em detalhes.

4.1

Descrição geral da seção de testes

A Figura 4.1 foi preparada para auxiliar na descrição da seção de testes. A parte principal de seção é formada pelo duto de cobre de 30 m de comprimento e 13 mm de diâmetro interno por onde escoar o fluido de teste. Estas dimensões correspondem a um comprimento adimensional de 2308 diâmetros. Para ser compatível com o espaço de laboratório disponível, o duto foi enrolado em espiras de 0,6 m de diâmetro e introduzido em um reservatório de aço com 200 L de volume. Água aquecida por um banho termostático mantém o duto sob condição de temperatura controlada. A água proveniente do banho termostático é bombeada em circuito fechado por uma serpentina de cobre imersa na água do tanque de 200 L. Como as temperaturas de trabalho esperadas para os testes de rompimento das cápsulas eram relativamente elevadas, cerca de 70°C, ambos os tanques foram isolados termicamente com mantas de lã de rocha.

Uma bomba de cavidades progressivas é responsável por bombear o fluido de trabalho de um reservatório metálico de 20 L através do tubo e de volta ao reservatório, formando um circuito fechado. Um inversor de frequência foi utilizado para ajustar a rotação da bomba, definindo a vazão de cada teste. A relação entre

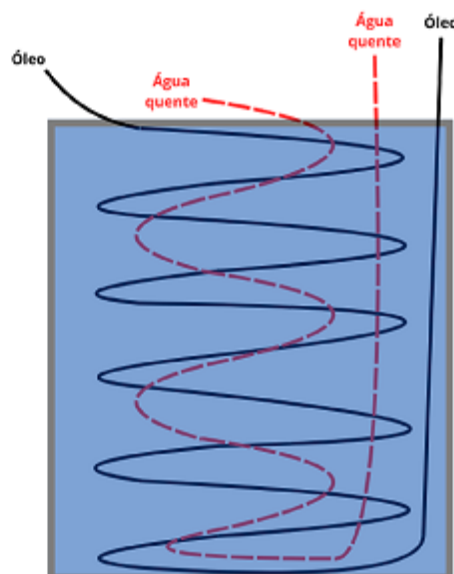


Figura 4.1: Detalhe da montagem

a rotação da bomba e a vazão do fluido de trabalho foi estabelecida por um processo gravimétrico de calibração que será detalhado mais adiante. A conexão entre a bomba e o circuito de testes dentro do tanque grande e de volta ao tanque de armazenagem de fluido foi feita com mangueiras lonadas de borracha com especificação para trabalho a máxima pressão e temperatura de 21 bar e 250°C.

A queda de pressão ao longo do circuito de testes foi medida por transdutor de pressão diferencial capacitivo Validyne. As leituras do sensor de pressão eram registradas por sistema de aquisição de dados Agilent LXI. A pressão pode ser medida entre 2 pontos com uma distância de 22 m entre eles.

A Tabela 4.2 apresenta as especificações dos equipamentos e instalações utilizadas.

O fluido de trabalho para os testes foi selecionado para atender a dois requisitos principais. Em primeiro lugar, deveria ser um óleo já que o redutor de atrito de interesse atua em fluidos de base óleo, atendendo à motivação principal do trabalho que era a caracterização do desempenho de um redutor de atrito que fosse compatível com a produção de petróleo. Em segundo lugar, por questões de segurança operacional, buscou-se um óleo com ponto de fulgor acima da temperatura prevista para os testes, em torno de 70°C. O óleo selecionado foi

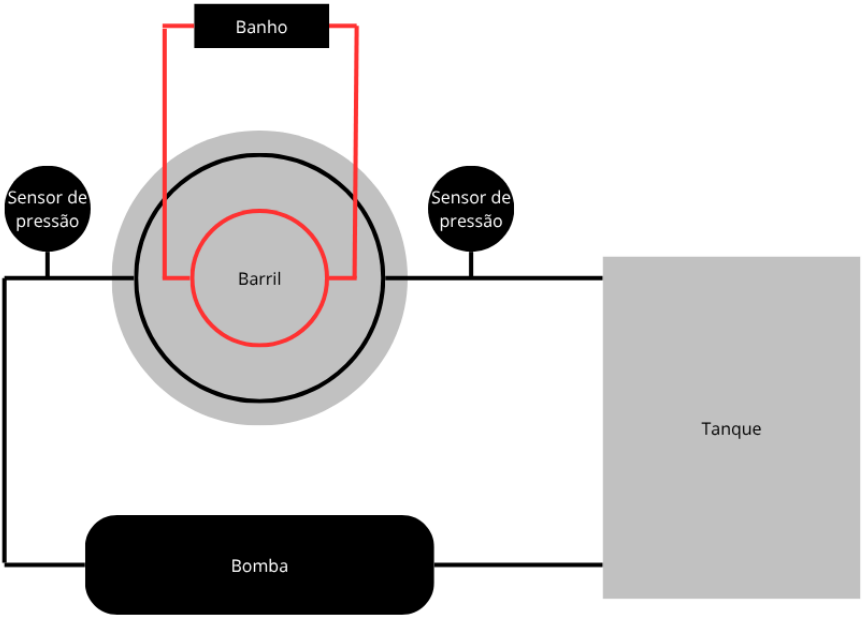


Figura 4.2: Esquema da montagem

Bomba (NM031BY)	
P max (bar)	24
Q max (m ³ /h)	5,5
Rotação max (Hz)	60
Duto de cobre	
D (mm)	13
L (m)	30
Mangueira Tanque-Bomba (SAE100R1AT)	
D (in)	1 1/2
L (m)	2
P max (bar)	250
T max (°C)	100
Mangueiras Bomba-Duto e Duto-Tanque (SAE100R6AT)	
D (in)	3/4
L (m)	3
P max (bar)	21
T max (°C)	100

Tabela 4.1: Dados do setup experimental

Propriedades Óleo		
T (°C)	ρ (kg/m ³)	μ (cP)
20	829,29	21,68
23	-	19,14
25	825,97	-
30	822,76	14,94
40	816,42	-
50	810,05	8,17
60	803,68	-
70	797,49	3,93
80	793,94	-
90	-	2,98

Tabela 4.2: Propriedades do Óleo

o óleo mineral ALOGRO. As propriedades do óleo estão listadas na Tabela 4.2.

4.2

Procedimento experimental

Nesta seção serão descritos os procedimentos experimentais empregados. Os resultados provenientes destes testes serão apresentados no capítulo seguinte.

4.2.1

Procedimentos pré-testes

Antes do início dos testes, são necessários procedimentos de calibração da vazão da bomba e do transdutor de pressão. Para a calibração da vazão, o inversor foi ligado a uma frequência desejada, então o óleo no circuito é desviado em um balde durante um intervalo de tempo cronometrado. Após esse intervalo, a massa de óleo no balde foi pesada em uma balança. Esse procedimento foi repetido para vários valores de rotação do inversor, obtendo assim uma relação entre a rotação e a vazão mássica da bomba.

O transdutor diferencial foi calibrado comparando a pressão barométrica medida em um manômetro analógico (Willtec, 5 a 350 psi) com a pressão atmosférica. Ambas curvas de calibração se encontram na sessão de resultados.

4.2.2

Testes com óleo base

Os testes iniciais foram realizados com o fluido de trabalho formado apenas pelo óleo base ALOGRO. Para isso, o tanque de 10 L foi abastecido com óleo e a

seção de testes sangrada para eliminação de ar. Em seguida, o inversor de frequência é acionado na frequência pré-determinada que produziria a vazão desejada para um dado teste particular. O banho termostático é acionado, aquecendo o fluido até a temperatura desejada para o teste. O sensor de temperatura instalado no tanque e a queda de pressão na seção de testes são monitorados no sistema de aquisição de dados até que a condição de regime permanente seja atingida. Após o registro das medidas de frequência da bomba, temperatura e queda de pressão, a frequência no inversor é alterada para a obtenção de uma nova vazão. Após um novo período de espera para obtenção do regime permanente, as medidas são realizadas e nova vazão ajustada até que a faixa de vazão desejada seja investigada.

4.2.3

Teste com óleo base e polímero dissolvido

Para calcular a DR percentual do DRA livre, esperou-se o óleo alcançar o regime permanente na vazão desejada, então DRA livre foi injetado no tanque de 20 L a uma vazão de forma que a concentração do DRA no fluxo de óleo fosse igual a 200 ppm por uma bomba de seringa, com a temperatura e queda de pressão na bobina monitoradas ao longo do tempo. Este teste permite a observação do comportamento do fator de atrito relacionado ao escoamento com DRA livre, para ser comparado com o escoamento com DRA encapsulado.

4.2.4

Teste com polímero encapsulado

Uma amostra de microcápsulas suspensas no óleo base foi coletada. Caracterização das cápsulas foi utilizada para garantir que volume total de DRA seja de 200 ppm em relação ao volume do óleo no teste foi encapsulado na amostra. A amostra foi então também injetada no tanque de 20 L a uma vazão relativa de 200 ppm. O monitoramento da temperatura e queda de pressão na bobina permitem a obtenção do fator de atrito ao longo do tempo, para ser comparado com o teste com DRA livre.

4.3

Modelagem do experimento

Os seguintes procedimentos de redução de dados foram utilizados nos experimentos. O fator de atrito hidrodinâmico foi calculado pela equação de Darcy-Weisbach,

$$f = \frac{2D\Delta P}{U^2\rho L} \quad (4-1)$$

Em termos da vazão medida na bomba a equação torna-se,

$$f = \frac{\pi^2 D^5 \Delta P}{8Q^2 \rho L} \quad (4-2)$$

f = fator de atrito hidrodinâmico

D = diâmetro do tubo (m)

ΔP = queda de pressão (Pa)

U = velocidade média do fluido (m/s²)

ρ = massa específica do óleo (kg/m³)

L = comprimento do tubo (m)

Q = vazão volumétrica (m³/s)

A porcentagem de redução de atrito, DR, é obtida comparando o fator de atrito de fluxos com DRA com o fator de atrito do fluxo de óleo puro:

$$DR_{\%} = (1 - \frac{f_{DR}}{f_0})100 \quad (4-3)$$

O número de Reynolds é um parâmetro importante para caracterizar o escoamento e foi calculado por,

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (4-4)$$

Em termos da vazão medida na bomba a equação torna-se,

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi D\mu} \quad (4-5)$$

μ = viscosidade dinâmica do óleo (Pa*s)

A massa específica e viscosidade do óleo utilizado foram avaliadas como função da temperatura utilizando os dados fornecidos na tabela 4.2.

5

Resultados

Nesse capítulo serão apresentados os resultados dos testes realizados.

5.1

Curvas de calibração

As curvas de calibração foram utilizadas para converter os dados capturados nos testes para propriedades físicas quantificáveis. As incertezas associadas a cada curva também foram utilizadas para calcular as incertezas dos resultados dos experimentos.

5.1.1

Propriedades do óleo

A relação da densidade do óleo base com sua temperatura pode ser aproximada linearmente, com a seguinte equação:

$$\rho = -0,607T + 841 \pm 0,6(95\%) \quad (5-1)$$

ρ = massa específica do óleo (kg/m³)

T = temperatura (°C)

A relação da viscosidade do óleo base com sua temperatura pode ser descrita pela seguinte equação exponencial:

$$\mu = 0,0387^{-0,0306T} \pm 0,0005(95\%) \quad (5-2)$$

μ = viscosidade dinâmica do óleo (Pa*s)

5.1.2

Calibração dos equipamentos

A curva de calibração da vazão volumétrica do óleo em relação da frequência da bomba é aproximada linearmente:

$$Q = (0,137F + 0,5 \pm 0,5)10^{-4}(95\%) \quad (5-3)$$

Q = vazão volumétrica (m³/s)

F = frequência no inversor (Hz)

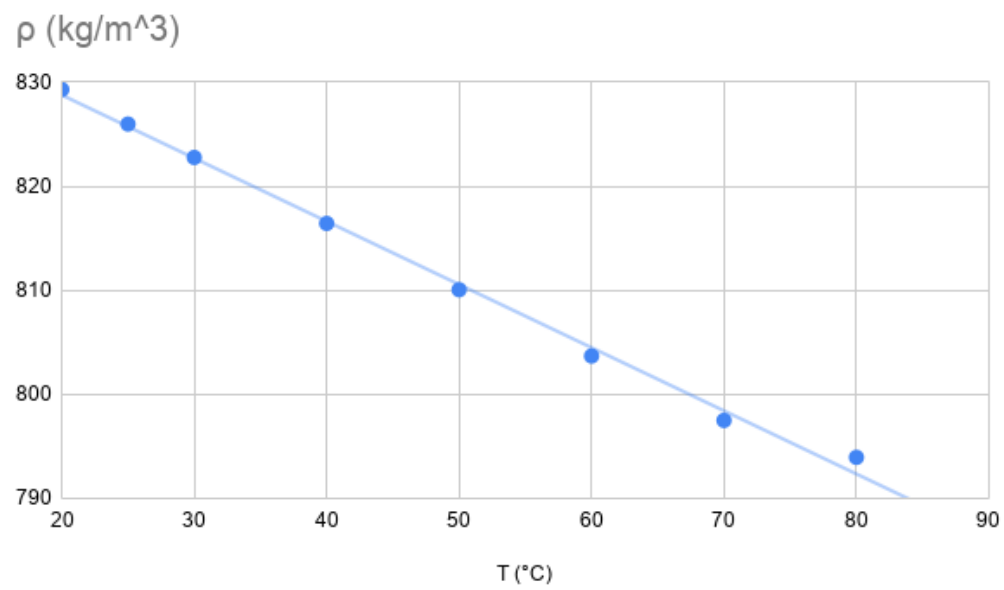


Figura 5.1: Calibração Densidade

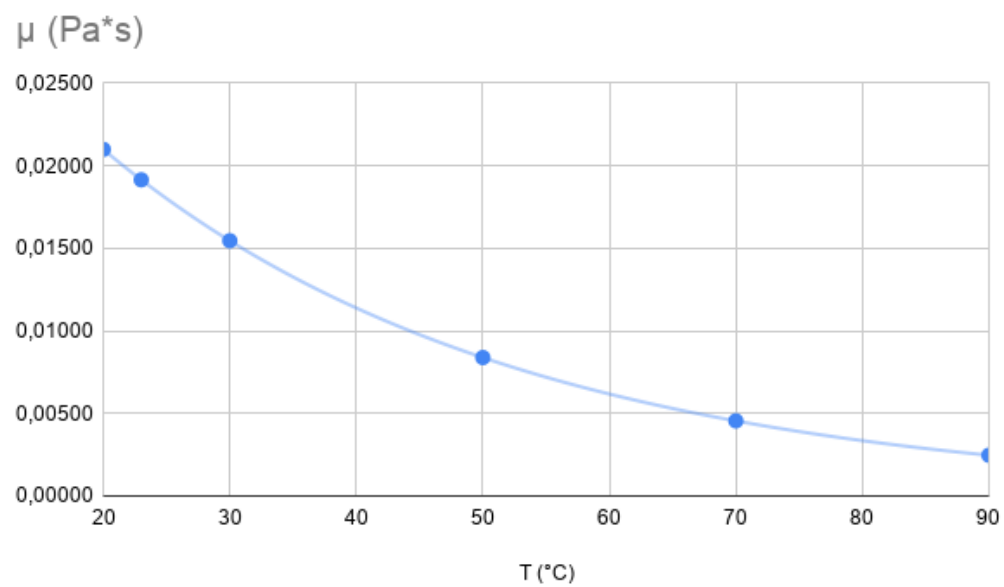


Figura 5.2: Calibração Viscosidade

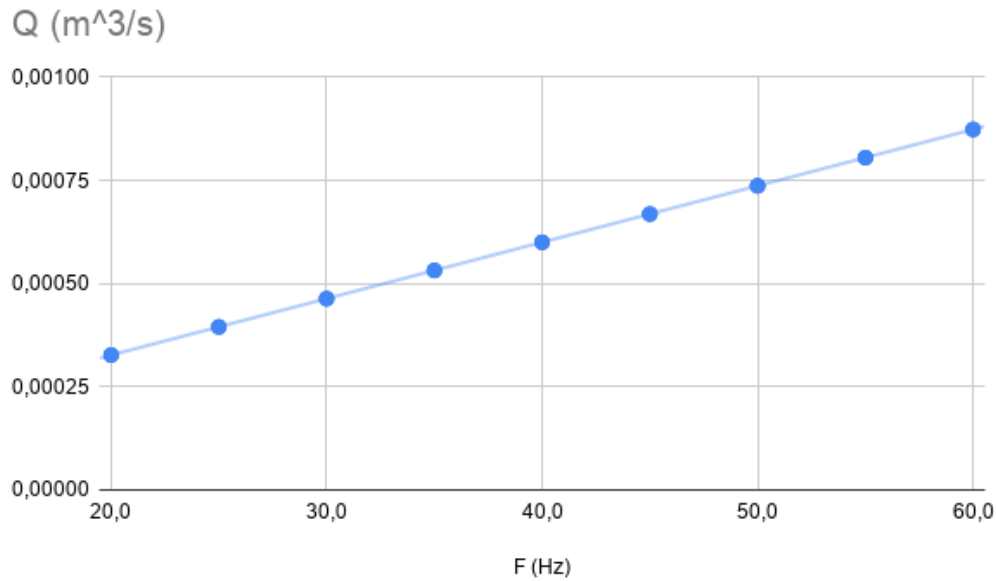


Figura 5.3: Calibração Vazão

A queda de pressão ao longo do duto também pode ser aproximada linearmente:

$$\Delta P = (11,0V \pm 20)10^3(95\%) \quad (5-4)$$

ΔP = queda de pressão (Pa)

V = voltagem no transdutor (V)

5.2

Curva $f \times Re$

Uma vez obtidas as curvas de calibração descritas anteriormente, é possível obter os valores do fator de atrito e do número de Reynolds dos escoamentos de interesse, que permitirão a comparação da redução de atrito percentual dos casos estudados. Para validar os dados obtidos, a relação entre fator de atrito e número de Reynolds será calculada para vazões diferentes e comparada com a literatura estabelecida. Os dados obtidos de f foram comparados com os valores obtidos pelo diagrama de Moody para o escoamento laminar e pela correlação de Blasius para escoamentos turbulentos, segundo a equação:

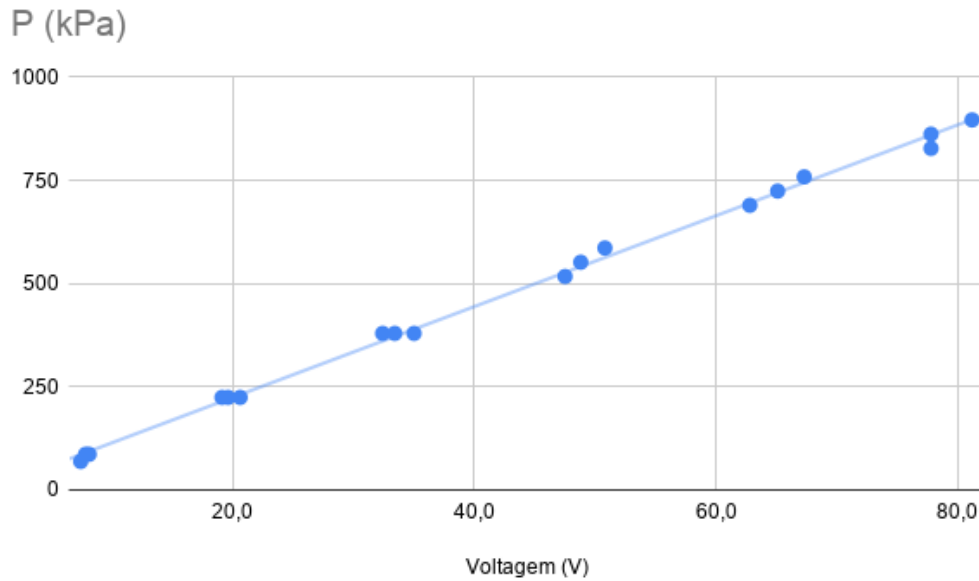


Figura 5.4: Calibração Pressão

$$f = \frac{64}{Re} | Re < 2300 \quad (5-5)$$

$$f = 0,316 Re^{-0,25} | Re > 2300$$

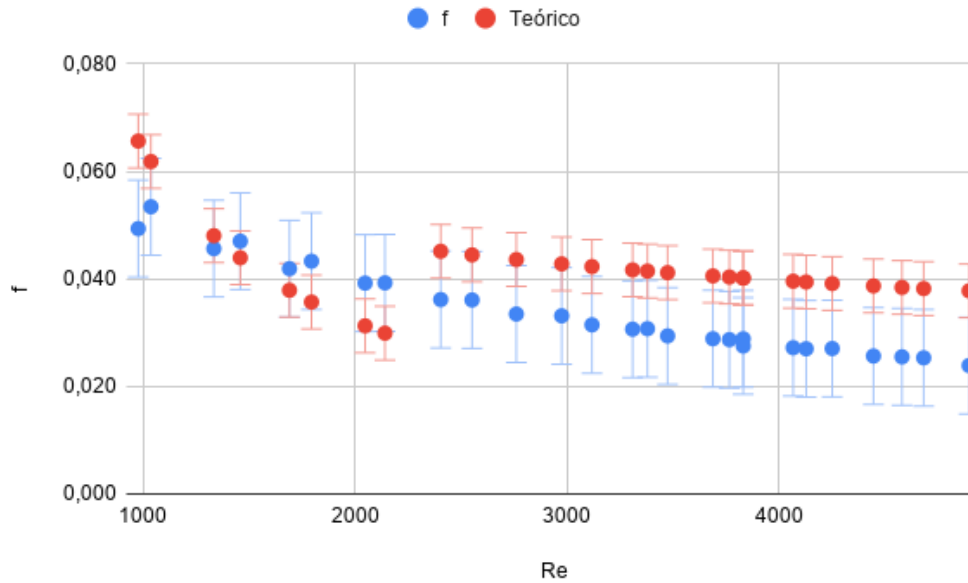
f = fator de atrito hidrodinâmico

Re = número de Reynolds

Os valores de f obtidos experimentalmente tiveram uma incerteza associada de $\pm 0,009$ (95%), e os valores de f calculados pela literatura tiveram uma incerteza associada de $\pm 0,005$ (95%), vinda da incerteza associada ao número de Reynolds. A figura 5.5 demonstra que os valores de fator de atrito obtidos condizem com a literatura, dentro das incertezas calculadas.

5.3 Curvas de DR

Tendo os dados calibrados e validados, é possível iniciar os testes de redução de atrito percentual. Para se melhor observar a redução do fator de atrito, todos os seguintes testes foram realizados na frequência máxima permitida pela bomba (60 Hz). A temperatura foi controlada ao redor de 55°C para evitar ao máximo incertezas associadas à mudanças de propriedades do óleo base com sua

Figura 5.5: Resultados $f \times Re$

temperatura. Idealmente, a temperatura seria mantida a 70°C para permitir a liberação das cápsulas diretamente no óleo base, porém, a montagem atual não permitiu que esta temperatura fosse alcançada. Ambos os testes apresentam uma incerteza associada ao fator de atrito de $\pm 0,002$ (95%).

5.3.1

Cálculo do f_0

Antes de calcular a redução de atrito percentual, é necessário calcular o fator de atrito presente no escoamento antes de qualquer DRA ser introduzido. A figura 5.6 contém os resultados deste experimento.

O valor do fator de atrito na vazão máxima, antes da redução de atrito, foi obtido a partir da média dos pontos demonstrados na figura 6.2. O valor estimado foi de:

$$f_0 = 0,018 \pm 0,002(95\%) \quad (5-6)$$

5.3.2

DRA livre

A figura 5.7 contém os dados obtidos do teste envolvendo a liberação de DRA livre no óleo base. É possível observar uma redução brusca da diferença de pressão

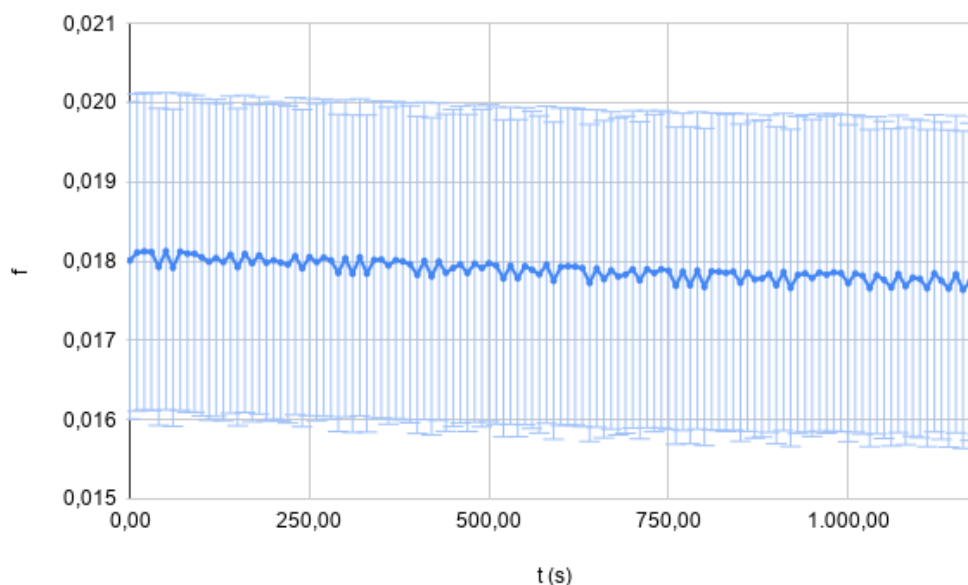


Figura 5.6: Resultados Óleo puro

no momento da introdução do DRA com um leve aumento devido à degradação do DRA.

5.3.3

DRA encapsulado

A figura 5.8 contém os dados obtidos do teste envolvendo a liberação de DRA encapsulado. Como não foi possível esquentar o óleo base até a temperatura de liberação, as cápsulas foram imersas em uma amostra de 15 ml do óleo base e aquecidas até 70°C (acima da temperatura de liberação) antes de serem rapidamente diluídas no óleo base. Assim como no teste com DRA livre, é possível ver uma redução brusca na diferença de pressão no momento de diluição, seguida por um aumento gradual devido à degradação do DRA.

A figura 5.9 compara as $DR_{\%}$ para os casos do DRA livre (azul) e encapsulado (vermelho) em função da distância percorrida no tubo, adimensionalizada pelo diâmetro. Os dados foram ajustados de forma a coincidir os momentos de diluição dos testes, para uma melhor visualização dos resultados. É possível observar que em ambos os casos a $DR_{\%}$ máxima foi similar (aproximadamente 17%). Nota-se também a taxa de degradação do DRA encapsulado menor que a do DRA livre. Um resultado que pede estudos mais aprofundados sobre o efeito que o encapsulamento

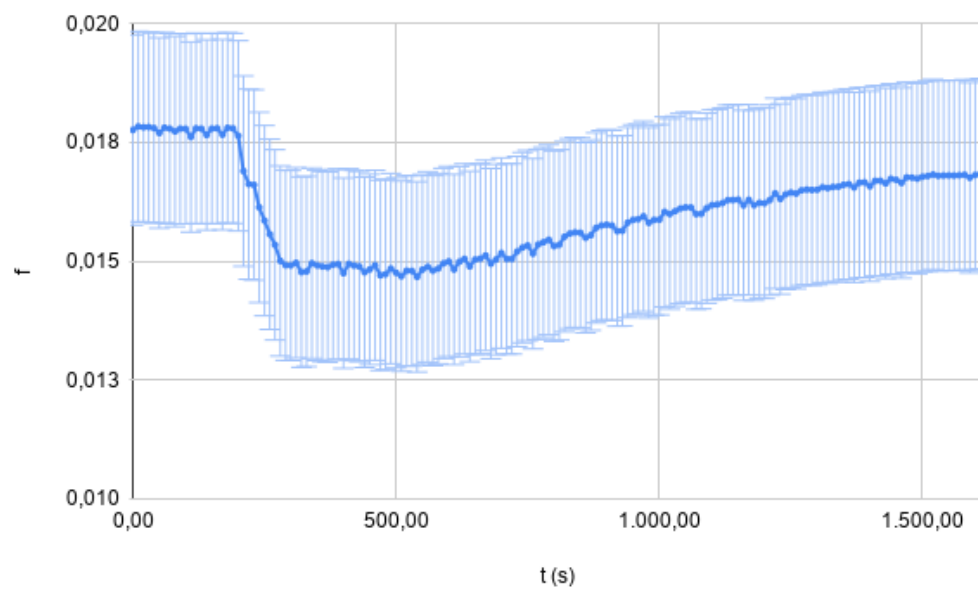


Figura 5.7: Resultados DRA livre

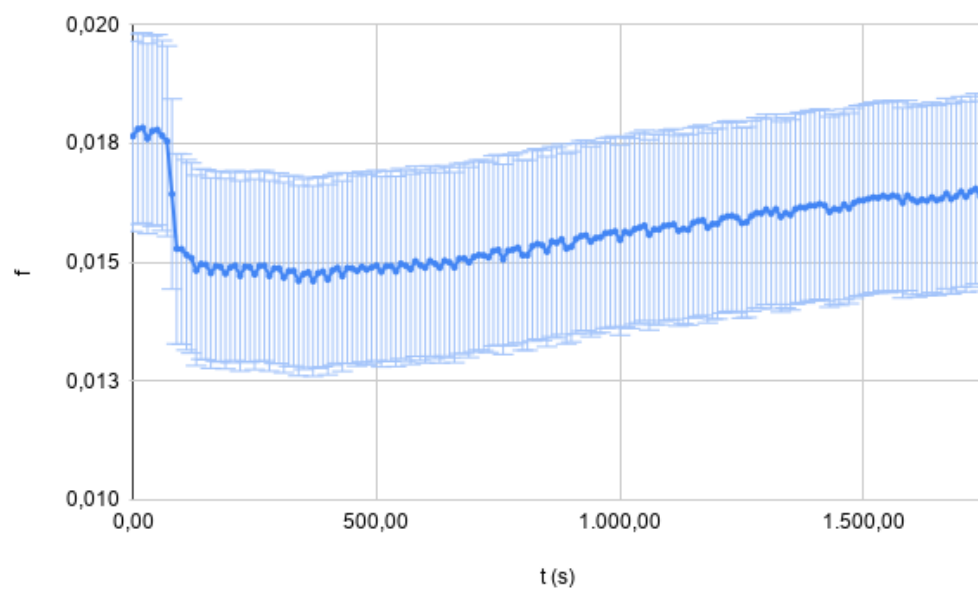


Figura 5.8: Resultados DRA encapsulado

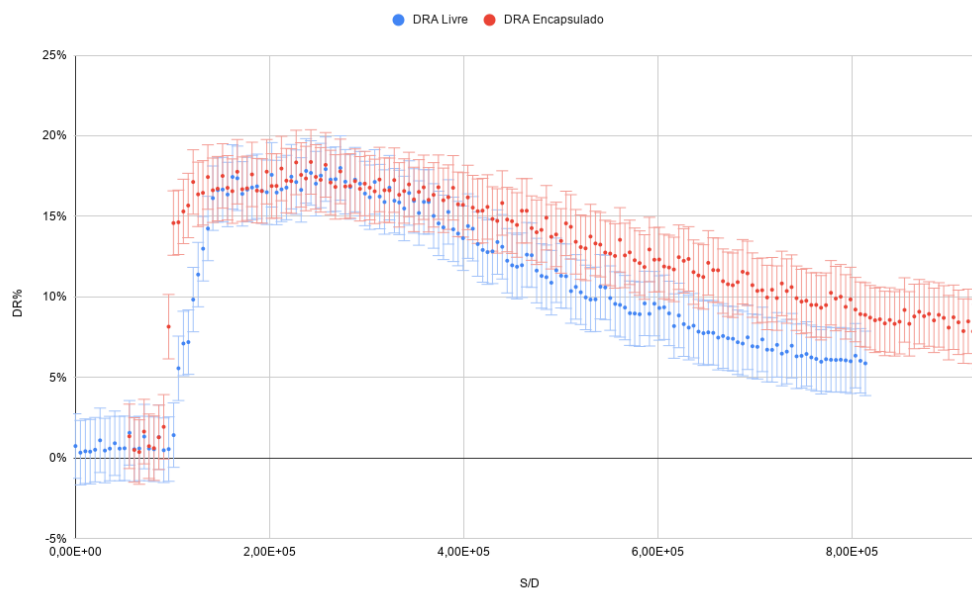


Figura 5.9: DRA livre x encapsulado

pode exercer no tempo de degradação do DRA. A incerteza associada a $DR_{\%}$ foi de 2 pontos percentuais.

6

Conclusão

A partir dos resultados, é possível caracterizar como válido não apenas o uso de microcápsulas de goma gelana para o transporte de DRA em oleodutos, como também o uso de gatilhos térmicos para a liberação das cápsulas. O processo de encapsulamento e liberação térmica comprovadamente não afeta negativamente o desempenho de DRAs no escoamento turbulento em oleodutos. Estudos futuros podem envolver uma melhora no sistema de aquecimento da montagem experimental, de forma a permitir que o óleo base chegue a 70°C dentro do circuito, o que possibilitaria a liberação das cápsulas diretamente no circuito, levando a um experimento mais perto da realidade. Outro possível estudo futuro poderia se aprofundar no efeito que o encapsulamento exerce na degradação do DRA.

Referências bibliográficas

Alhaique, F.; Santucci, E.; Carafa, M.; Coviello, T.; Murtas, E.; Riccieri, F. M. Gellan in sustained release formulations: preparation of gel capsules and release studies. **Elsevier Science**, v. 17, p. 1981–1986, 1996. Citado na página 14.

BRASIL. Homepage, **Encarte de consolidação da produção 2024: boletim da produção de petróleo e gás natural. Boletim da produção de petróleo e gás natural**. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/arquivos-bmppgn/2024/dezembro.pdf>: [s.n.], 2024. Citado na página 10.

Liu, Kun; Xiong, Xiao; Liang, Yue; Dai, Xiaodong; Cheng, Zhensong; Gou, Jinxin; Zhang, Jianhua; Zhang, Guoxin; Lu, Yuan. Lab-sacle investigation of drag reduction for crude oil by oil-soluble polymers. **Nature**, v. 1, p. 1–12, 2025. Citado na página 13.

Moriconi, L.; Pereira, R. M. A física estatística da turbulência. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, p. 1–1, 2021. Citado na página 12.

Shi, Peng-fei.; Hu, Hai-bao; Wen, Jun; Luo, Xie. Drag reduction and degradation of binary polymer soluntions. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 330, p. 1–1, 2024. Citado na página 13.

Virk, P. S.; Merrill, E. W.; Mickley, H. S.; Smith, K. A. The toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions. **J. Fluid. Mech.**, v. 30, p. 305–328, 1967. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

White, C. M.; Mungal, M. G. Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 40, p. 235–256, 2008. Citado na página 13.