Thomaz da Cunha Teixeira

**Desenvolvimento de uma bancada
para ensaios com polímeros
redutores de atrito.**

Projeto de Graduação

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

Orientador: Igor Braga de Paula

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus familiares, principalmente aos meus pais, pois toda a oportunidade que me foi dada de prosseguir minha formação acadêmica na área pela qual tenho paixão e em uma universidade referência como é a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro foi devida ao árduo esforço e sacrifício deles.

Além disto, gostaria também de agradecer a todo o corpo docente da universidade, assim como os funcionários que procuram sempre manter tamanha qualidade na realização de suas atividades, que é o alicerce para a excelência da faculdade.

Um agradecimento especial deve ser feito ao professor Igor Braga de Paula, meu orientador nesse projeto, por toda a paciência, empenho e conhecimento passado não só ao longo da elaboração do projeto proposto, como também em todas as oportunidades de transmitir seus ensinamentos.

Gostaria de agradecer também ao técnico mecânico Márcio França pela enorme eficiência ao colaborar na confecção do aparato experimental com a produção de inúmeras peças necessárias para tal, além da constante dedicação em prestar todo apoio necessário.

E por fim, gostaria de agradecer aos meus colegas de curso que passaram por todos os obstáculos que esta jornada nos proporcionou, mantendo sempre um clima de parceria e ajudando uns aos outros sempre que possível.

RESUMO

Desenvolvimento de uma bancada para ensaios com polímeros redutores de atrito

A redução de atrito em um escoamento turbulento é um tema de enorme interesse para inúmeras áreas da engenharia, uma vez que reduzir o atrito em sua essência significa, basicamente, reduzir as perdas de energia indesejadas. Devido à importância econômica do problema, diversas metodologias vêm sendo estudadas. Dentre as diversas soluções propostas na literatura, uma se destaca que é a utilização de baixas concentrações de polímero ao longo dos anos com o objetivo de reduzir o arrasto no escoamento. Após perceber que este método pode ser de fato bastante eficaz para tal finalidade, diversos autores vêm tentando esclarecer os fenômenos físicos que vêm a causar a redução do atrito. Um dos inconvenientes do uso da técnica é que os polímeros perdem eficiência e sofrem degradação ao longo de tubulações ou quando passam por bombas, válvulas, restrições, dentre outros dispositivos. Na literatura, ainda não há um consenso sobre como essa degradação ocorre e com qual taxa. Sendo assim, buscou-se nesse trabalho projetar, construir e testar um aparato experimental para estudar a degradação de polímeros em tubulações. O aparato proposto permite o escoamento do fluido sem passar por sistemas de bombeamento. Testes foram realizados para avaliação da redução de arrasto com o aparato e os resultados são reportados neste trabalho. Os resultados sugerem que a degradação do polímero atinge uma saturação com o tempo.

Palavras chaves: Redução de Arrasto. Polímero. Escoamento Turbulento. Bancada de Testes.

ABSTRACT

Development of a workbench for tests with drag reduction polymers

The drag reduction in a turbulent flow is a theme of great interest for several engineering fields, since the term drag reduction in its essence means, basically, to reduce the undesired energy losses. Due to the economical irrelevance of the issue, several methodologies have been studied. Among the various solutions suggested in the literature, the use of low concentrations of certain polymers as solute in order to reduce the drag in a turbulent flow is one of the most discussed recently. After realizing that this method could be, in fact, considerably efficient for that purpose, several authors have been trying to clarify the physical phenomena that cause the drag reduction. An inconvenience on using this technic is that the polymer loses efficiency and suffers degradation whenever it passes through hydraulic pumps, valves, restrictions and other devices. On the literature, there is still no consensus about how this degradation occurs and at what rate. Having that in mind, this project tries to build and test an experimental apparatus to study the degradation of polymers in turbulent flow inside pipes. The suggested apparatus enables the flowing of the fluid without passing through any kind of pumping system. Several tests have been run to measure the drag reduction with the apparatus and the results are shown throughout this paper. These results suggest that the polymer degradation reaches a saturation point throughout the time.

Key-words: Drag Reduction. Polymer. Turbulent Flow. Workbench.

CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	9
1.2. OBJETIVO	10
2. REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1. REDUÇÃO DE ARRASTO	11
3. METODOLOGIA	14
3.1. APARATO EXPERIMENTAL	14
3.1.1. <i>Tubulação Circular</i>	14
3.1.2. <i>Aro de Sustentação</i>	15
3.1.3. <i>Motor Elétrico</i>	17
3.1.4. <i>Estrutura de Fixação</i>	18
3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
4. RESULTADOS	23
4.1. ESCOAMENTO LAMINAR/TURBULENTO	23
4.2. DIFERENÇA DE TORQUE	24
4.3. COEFICIENTE DE ATRITO	25
4.4. POLÍMERO	26
4.4.1. <i>Degradação do Polímero</i>	27
4.4.2. <i>Redução de Arraste</i>	30
5. CONCLUSÃO	32
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	33

Lista de figuras

Figura 1 - Representação de Diferentes Trajetórias para a Redução de Atrito	12
Figura 2 - Tubulação Circular	15
Figura 3 - Aro de Sustentação.....	16
Figura 4 - Sistema de Acoplamento de Motor Elétrico e Aro de Sustentação.....	17
Figura 5 - Aparato Experimental Completo	18
Figura 6 - Diagrama do Aparato Experimental.....	25

Lista de tabelas

Tabela 1 - Cálculo do Torque devido às Resistências do Sistema Mecânico	19
Tabela 2 - Degradação do Polímero à Concentração de 5 ppm.....	28
Tabela 3 - Degradação do Polímero à Concentração de 10 ppm.....	28
Tabela 4 - Degradação do Polímero à Concentração de 20 ppm.....	28

Lista de gráficos

Gráfico 1 - Curva de Torque da Água para Diferentes Regimes de Escoamento..... Erro!

Indicador não definido.

Gráfico 2 - Diferença de Torque para as Diferentes Concentrações de Glicerina.....24

Gráfico 3 - Curva de Variação do Coeficiente de Atrito com o Número de Reynolds26

Gráfico 4 - Curva de Degradação do Polímero para as Diferentes Concentrações29

Gráfico 5 - Diferença da Redução de Arraste entre as Soluções Poliméricas30

Gráfico 6 - Diferença de Torque entre Água Filtrada e Soluções Poliméricas31

1. INTRODUÇÃO

Há muitas décadas o fenômeno da redução de atrito através da utilização de polímeros como aditivo vem sendo estudado, porém sem conclusões significativas com relação às verdadeiras motivações científicas para a ocorrência deste fenômeno. Na década de 1940, Toms foi o pioneiro na descoberta deste fenômeno, o que causou grande interesse não só no meio científico, como também no meio industrial, com relação ao aprofundamento nos estudos sobre este assunto, uma vez que tal fenômeno possui uma ampla gama de aplicações e pode trazer enormes benefícios econômicos relacionados às inúmeras áreas que englobam o escoamento de um determinado fluido.

Apesar de vários autores já terem elaborado estudos em cima deste assunto, até hoje, o mecanismo físico causador deste fenômeno ainda não é inteiramente conhecido, porém diversos fatores de extrema importância para o entendimento da redução de atrito já foram observados e algumas formulações e correlações já vêm sendo desenvolvidas.

1.1. Contextualização

A redução de atrito pode ser definida como a diminuição da resistência da fricção interna das partículas de uma determinada solução quando submetida a um escoamento em regime turbulento. Esta redução se dá devido à adição de um determinado aditivo polimérico à solução escoada. Diversos polímeros já vêm sendo utilizados na indústria com este propósito, como é o caso da poliacrilamida, do óxido de polietileno, entre vários outros. Estudos comprovam que os polímeros que apresentam melhor eficiência para tal finalidade são aqueles que possuem moléculas com cadeias longas e sem muitas ramificações, que é o caso dos polímeros citados acima.

Vale ressaltar que as concentrações de polímero necessárias para obtenção de um resultado satisfatório são consideravelmente baixas, o que representa mais uma vantagem na utilização deste método. Outra vantagem percebida pela baixa

concentração de polímero necessária é o fato de as propriedades físicas e reológicas da solução estudada não serem substancialmente alteradas.

Um dos fatores que influencia na eficácia deste método de redução de atrito é a degradação do polímero adicionado à solução. Esta degradação consiste na quebra da cadeia principal do polímero, ocasionando a redução do peso molecular do mesmo, além da modificação de suas propriedades e, conseqüentemente, a interrupção na redução do atrito. Diferentes motivos causadores da degradação polimérica já foram abordados em estudos anteriores, tais como a temperatura da solução, reações químicas indesejadas e o cisalhamento, sendo este último um dos principais desafios para aumentar os ganhos associados à aplicação deste método na engenharia em geral.

1.2. Objetivo

O presente projeto tem como principal meta contribuir para o entendimento de alguns dos fenômenos associados à adição de polímeros redutores de arrasto em escoamentos turbulentos. O objetivo neste trabalho é investigar a degradação dos polímeros pelo cisalhamento do escoamento em uma tubulação. Para isto, foi elaborado um experimento no qual é possível reproduzir de forma satisfatória um escoamento constante em regime turbulento de diferentes soluções com diferentes concentrações poliméricas sem a necessidade de um trecho extenso de tubulação e também sem a necessidade de uma bomba que provocasse o escoamento do fluido estudado.

Com base nos dados obtidos experimentalmente, torna-se possível então quantificar a redução de atrito de forma a comparar com os valores obtidos anteriormente por diversos outros autores e assim fazer observações essenciais para uma melhor compreensão do fenômeno estudado.

Além disto, torna-se possível também a verificação dos diversos motivos para a degradação do polímero e, conseqüentemente, possíveis soluções para este imbróglio, que, ainda hoje, inviabiliza a utilização deste método em diversas aplicações.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Redução de Arrasto

A redução de arrasto causada pela adição de polímeros, conforme citado anteriormente, é um fenômeno que passou a despertar o interesse de pesquisadores mais recentemente e, atualmente, tem sido profundamente investigada por diversos autores. Até o momento nenhum consenso foi estabelecido com relação aos mecanismos que de fato causam a redução de atrito no escoamento turbulento, porém diversas teorias com diferentes enfoques foram elaboradas com o objetivo de explicar esta redução.

Segundo Kostic (1994), a adição de polímeros redutores de arrasto causa a laminarização do escoamento turbulento, isto é, apesar das instabilidades de grande escala ainda ocorrerem, as de pequena escala, que representam a parcela mais significativa da turbulência, se reduzem e em alguns casos até se extinguem. Vale ressaltar que esta laminarização também pode ocorrer pelo alongamento dos vórtices presentes no escoamento turbulento.

Outros autores como Kawaguchi (2002), Sureshkumar e Beris (1996) demonstram através de visualizações experimentais ou simulações numéricas que a adição do polímero na solução causa uma redução nas flutuações de vorticidades em regiões próximas às paredes da tubulação através da qual o fluido escoar. Além disto, é percebida também uma inibição na geração de energia turbulenta, uma vez que as penetrações das regiões de baixa velocidade nas de alta velocidade deixam de ocorrer com a adição destes redutores de arraste.

A interação entre o fluido e o polímero tem sido recentemente apresentada como um das principais causas para a redução de atrito. Como reflexo disto, podemos perceber que o efeito só é observado a partir de um determinado valor de número de Reynolds. Segundo Lumley (1969), a redução de arraste se inicia a partir de uma determinada razão entre o período das flutuações de velocidade e o tempo de relaxamento da molécula de polímero.

Em seus estudos, Lumley também propõe que a redução de atrito estaria diretamente relacionada ao aumento da viscosidade localizada nas áreas suscetíveis às maiores deformações, isto é, onde o polímero tende a se expandir. A

representação de uma estrutura molecular do polímero sujeita à deformação pode ser compreendida na Figura 1.

Figura 1 - Molécula de Polímero Sujeita a Deformação

Ao plotarmos o gráfico do fator de atrito em coordenadas Prandtl-Kármán, é possível determinar o início da redução de atrito como o ponto de partida da lei Prandtl-Kármán, que corresponde ao comportamento turbulento de fluidos Newtonianos. O aumento na redução de atrito pode ser percebido inicialmente conforme a concentração de polímero na solução é aumentada para um mesmo número de Reynolds, porém em certo ponto a redução de atrito atinge uma assíntota que corresponde ao valor máximo de saturação que limita este fenômeno, como pode ser verificado no gráfico da Figura 2.

Figura 2 - Representação de Diferentes Trajetórias para a Redução de Atrito

Um efeito similar ao descrito anteriormente pode ser notado se fixarmos uma determinada concentração do polímero e aumentarmos o número de Reynolds do escoamento estudado, porém desta vez por uma trajetória diferente, isto é, a redução de atrito máxima é limitada não somente pela concentração de polímero na solução, como também pelo número de Reynolds do escoamento.

No gráfico retratado na Figura 2, a linha pontilhada representa a variação da redução de atrito no caso em que a concentração do polímero na solução está fixada e o número de Reynolds varia, enquanto a linha tracejada representa esta mesma variação, porém para o caso onde o número de Reynolds é fixado e a concentração de polímero é incrementada.

Sreenivasan e White (2000), assim como Virk (1975) defendem uma explicação fenomenológica para os mecanismos que limitam os valores máximos da redução de atrito. Esta explicação afirma que a máxima redução de atrito ocorre quando o efeito da adição do polímero é percebido em todas as regiões do escoamento, causando a expansão da espessura da camada intermédia através de toda a camada limite do escoamento.

Outra explicação para os mecanismos limitadores da redução de atrito, defendida por Min et al. (2004), Ptasinski et al. (2001) e Warholic et al. (1999), sugere que a máxima redução de atrito ocorre quando as tensões de Reynolds são drasticamente reduzidas e os mecanismos responsáveis pela turbulência são contidos pelas tensões flutuantes do polímero.

Apesar de ambas as explicações parecerem plausíveis a princípio, alguns resultados experimentais contradizem estas teorias. Estudos realizados por Fontaine et al. (1992) e McComb e Rabie (1979) mostram que a redução de atrito devido a adição do polímero se dá principalmente na região da camada limite mais próxima às paredes da tubulação, isto é, os efeitos causados pela adição do polímero na região mais externa da camada limite não são tão expressivos quando comparados aos efeitos causados nas regiões próximas às paredes. Além disto, estudos realizados em 2003 por Ptasinski et al. demonstram que as tensões poliméricas dissipam a energia turbulenta.

Pelo que é possível perceber comparando os dados obtidos experimentalmente ao longo dos anos, a compreensão do comportamento do valor máximo de redução de atrito é bastante complexa e isto ocorre devido ao fato do escoamento se manter altamente turbulento para altos valores de redução de atrito.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para realização dos experimentos aborda o estudo da redução de arrasto pela adição do polímero em uma geometria simplificada, uma vez que no sistema proposto o fluido escoado não passa por nenhuma forma de bombeamento, visando reproduzir a degradação polimérica em tubulações de grandes comprimentos.

Para tal, foi projetado um aparato experimental no qual uma tubulação envolta em uma roda e parcialmente preenchida com o fluido estudado era posta para rodar e o torque necessário para tal era medido no motor elétrico, subtraindo-se o valor de torque para a roda vazia. Desta forma, foi possível garantir que o torque medido no motor era exclusivamente devido ao escoamento do fluido.

3.1. Aparato Experimental

O aparato experimental elaborado tem como principal função reproduzir um escoamento desenvolvido constante em regime turbulento através de um tubo de seção circular de forma a possibilitar a análise dos efeitos causados pela adição do polímero em uma solução aquosa sem a necessidade de implantação de uma bomba no sistema.

Para tal, foi proposta uma solução onde no aparato experimental se utiliza um motor elétrico acoplado a um aro de bicicleta com o intuito de provocar uma rotação em uma tubulação de testes que se encontra fixada a este aro. Esta configuração nos permite então medir/controlar a velocidade de rotação da tubulação, assim como o torque realizado pelo motor.

Nesta seção, será apresentada uma descrição mais detalhada de cada uma das partes que compõem o aparato experimental projetado e construído com o auxílio dos técnicos e funcionários do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da PUC-Rio.

3.1.1. Tubulação Circular

No experimento proposto utiliza-se um circuito fechado composto por duas mangueiras trançadas transparentes de PVC, com diâmetro interno de uma

polegada, acopladas em ambas as extremidades. As mangueiras envolveram um aro de bicicleta de 26 polegadas de modo a possibilitar a rotação da tubulação em torno do eixo do aro e também para assegurar que a tubulação mantivesse seu formato circular.

Vale ressaltar que o duplo acoplamento das mangueiras foi necessário para que enquanto fosse inserida a solução de líquido através de uma extremidade, fosse possível extrair o ar do sistema através da outra. Além disto, foram adicionados anéis de espaçamento ao redor da tubulação para que esta mantivesse o formato mais circular possível.

Desta forma foi possível criar um escoamento turbulento com velocidade constante, uma vez que ao girar a tubulação o fluido estudado, por efeitos da gravidade, se manteria na parte inferior da mesma, ocasionando assim o escoamento devido ao movimento das paredes da tubulação.

Figura 3 - Tubulação Circular

3.1.2. Aro de Sustentação

Conforme citado anteriormente, foi utilizado no aparato experimental um aro de bicicleta de 26 polegadas de diâmetro com o objetivo não só de sustentar a tubulação circular, mas também de possibilitar a rotação do sistema fechado no qual ocorreria o escoamento.

Para que fosse possível atribuir a rotação ao aro foi necessário encontrar uma forma de se travar o eixo da roda no cubo da mesma. Portanto foram usinados dois anéis metálicos que substituiriam os rolamentos da roda e, entrando por interferência tanto no eixo quanto no cubo, possibilitariam a transferência de torque do eixo para a roda e, conseqüentemente, para a tubulação.

Figura 4 - Aro de Sustentação

Além disto, foi necessário também instalar dois rolamentos em um suporte que apoiaria uma das extremidades do eixo para possibilitar a fixação da roda na bancada do experimento e ainda permitir a rotação do eixo. Este suporte ficaria apoiado sobre um dos perfis tipo Bosch® superiores da bancada de modo a manter o aro posicionado paralelamente ao perfil tipo Bosch® do lado externo da bancada. O desenho técnico do suporte se encontra representado na Figura 4.

Figura 5 - Desenho Técnico do Suporte do Aro de Sustentação

3.1.3. Motor Elétrico

Um motor elétrico DC de 12 V com caixa de redução foi utilizado para fornecer o torque necessário à roda. A partir do motor elétrico foi possível controlar a velocidade de rotação do aro e, conseqüentemente, a velocidade do escoamento, definindo assim o número de Reynolds necessário para que o escoamento se torne turbulento.

Dados sobre a potência elétrica fornecida ao motor foram utilizados para se estimar o torque aplicado ao sistema. Para a estimação do torque devido ao atrito do fluido, realizou-se medidas com o sistema vazio, de modo a quantificar as perdas por atrito do sistema mecânico. A partir daí foi possível medir o torque necessário para se manter uma determinada velocidade angular para o caso da solução aquosa pura como também para o caso da solução com o polímero redutor de atrito. Com esses dados, foi possível determinar então a redução de arrasto causada pela adição do polímero.

Vale lembrar que a transferência de torque do eixo do motor elétrico para o eixo da roda da bicicleta foi feita através de um acoplamento flexível para evitar o travamento do motor no caso de os eixos não se encontrarem perfeitamente alinhados. Esta possível falta de alinhamento entre os eixos foi minimizada através da utilização de um suporte usinado de forma a garantir que o eixo do motor e do aro se mantivessem concêntricos.

Figura 6 - Sistema de Acoplamento do Motor Elétrico e Aro de Sustentação

Além disto, foi fixado um odômetro magnético ao raio do aro para garantir que a velocidade angular programa no motor fosse de fato a velocidade angular do aro da bicicleta.

3.1.4. Estrutura de Fixação

A estabilidade do aparato experimental é de extrema importância para se certificar que nenhuma vibração devido à qualquer excentricidade ou desbalanceamento afete no comportamento do escoamento e, conseqüentemente, nos resultados do experimento.

Para garantir esta estabilidade foi montada uma estrutura de formato cúbico com perfis do tipo Bosch® de aproximadamente 60 cm de altura e 50 cm de largura, onde em uma das arestas superiores está fixada a roda. Um novo perfil do tipo Bosch®, fixado ao perfil que sustenta a roda, sustenta o motor elétrico com auxílio do suporte citado anteriormente de forma que seu eixo e o eixo da roda fiquem posicionados da forma mais alinhada possível, evitando assim qualquer tipo de oscilação indesejada.

Figura 7 - Aparato Experimental Completo

3.2. Procedimento Experimental

Nesta seção será descrito detalhadamente o procedimento experimental adotado para a realização de todos os experimentos abordados no presente relatório, visando obter resultados coerentes e com valores de incerteza satisfatórios.

Antes de dar início a qualquer experimento a ser realizado no aparato, foram realizados procedimentos preliminares para garantir a repetibilidade dos resultados. Estes procedimentos preliminares se resumiam em efetuar a limpeza da seção de testes com água filtrada e secar para garantir que ao iniciarmos os testes, a parte interna da tubulação não estaria contaminada com qualquer outro produto que pudesse afetar o comportamento do fluido estudado.

Após efetuar a limpeza e secagem da seção de testes e instalar a tubulação de volta à estrutura, eram feitas todas as conexões entre a fonte de alimentação, o multímetro e o motor elétrico. A fonte de alimentação utilizada possuía uma regulagem analógica tanto para a corrente, quanto para a tensão imposta ao motor elétrico, porém, uma vez que a regulagem da tensão fornecia maior precisão, a quantidade de potência fornecida ao motor era regulada através desta.

Primeiramente o motor era posto em funcionamento e a tubulação, preenchida somente com ar, iniciava sua rotação. Os dados de corrente e tensão eram colhidos através da leitura do multímetro para as diferentes velocidades de rotação, velocidades estas que eram indicadas pelo odômetro, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Cálculo do Torque devido às Resistências do Sistema Mecânico

	AR					
	Velocidade [km/h]	Reynolds	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [W]	Torque [N.m]
1º TESTE	4,0	2211	0,282	2,427	0,684	0,201
	4,5	2488	0,285	2,637	0,752	0,196
	5,0	2764	0,289	2,814	0,813	0,191
	5,5	3041	0,291	3,016	0,878	0,187
	6,0	3317	0,292	3,222	0,941	0,184
	6,5	3593	0,295	3,414	1,007	0,182
	7,0	3870	0,305	3,581	1,092	0,183

Ar						
2º TESTE	Velocidade [km/h]	Reynolds	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [W]	Torque [N.m]
	4,0	2211	0,276	2,409	0,665	0,195
	4,5	2488	0,284	2,586	0,734	0,192
	5,0	2764	0,289	2,803	0,810	0,190
	5,5	3041	0,298	2,993	0,892	0,190
	6,0	3317	0,296	3,177	0,940	0,184
	6,5	3593	0,297	3,378	1,003	0,181
	7,0	3870	0,294	3,572	1,050	0,176

Tendo em vista que o odômetro utilizado era configurado para dar a velocidade tangencial da extremidade do aro da bicicleta, foi necessário realizar uma conversão para que se obtivesse a velocidade do escoamento no centro da tubulação. Uma vez que tanto o raio do aro da bicicleta, quanto o raio da tubulação eram conhecidos, tornou-se simples equacionar a conversão da velocidade. Com a velocidade já convertida, era calculado então o número de Reynolds do escoamento correlacionando a velocidade (u) do escoamento com a massa específica (ρ), o diâmetro hidráulico (D) e a viscosidade dinâmica (μ) do fluido, conforme descrito na Equação 01.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad (Eq. 01)$$

Após obter os valores de corrente (i) e tensão (V), era calculada a potência elétrica (P) fornecida ao motor, através da Equação 02 e finalmente o torque (τ) realizado pelo motor através da Equação 03.

$$P = V \cdot i \quad (Eq. 02)$$

$$\tau = \frac{P}{u} \quad (Eq. 03)$$

Este primeiro teste teria como principal objetivo a medição do torque realizado pelo motor para vencer apenas as resistências impostas pela estrutura, para então poder subtraí-lo do valor de torque medido ao preencher a seção de testes com o fluido a se estudar.

Logo após realizar o teste com ar, a tubulação era preenchida com 500 ml de água filtrada através do acoplamento das mangueiras e então realizavam-se os

mesmos procedimentos descritos acima, porém neste momento já se tornava possível calcular o torque líquido do motor necessário para vencer a resistência do escoamento da água filtrada.

Posteriormente ao experimento com água filtrada, foi realizado um experimento com quatro soluções com diferentes concentrações de água e glicerina. Este experimento tinha como principal objetivo verificar se a diferença de torque devido à resistência ao escoamento poderia ser de fato medida com precisão utilizando o aparato experimental desenvolvido, além de verificar também a possibilidade de se calcular o fator de atrito através dos dados obtidos experimentalmente.

A preparação da solução polimérica era feita enquanto os testes com ar e água filtrada eram realizados. Esta preparação se dava da seguinte forma: primeiramente enchia-se um Becker com 1000 ml de água filtrada. Então, com uma balança de quatro casas decimais de precisão, pesava-se a quantidade de polímero calculada para que se obtivesse a concentração desejada.

Após ter a quantidade correta de polímero separada, posicionava-se o Becker com a água e um bastão magnético sobre a base do misturador magnético e, lentamente, despejava-se o polímero na água, distribuindo-o uniformemente de modo a não deixar que as partículas de polímero se juntassem formando um grão maior e, conseqüentemente, não solubilizando facilmente.

Após aproximadamente 20 minutos, o polímero já estava completamente solubilizado e a solução pronta para ser despejada no interior da tubulação. Com a seção de testes já preenchida com a solução polimérica a ser estudada, dava-se início ao teste de degradação do polímero, regulando a tensão da fonte de alimentação de forma que a velocidade indicada no odômetro se mantivesse em 6 km/h (1,7 m/s). Conforme o polímero ia se degradando, a tensão era ajustada para manter a velocidade e a leitura da corrente e tensão pelo multímetro era registrada.

Este procedimento era realizado durante uma hora e trinta minutos para cada concentração de polímero estudada, tornando possível gerar uma curva de degradação do polímero e estabelecendo assim valores máximos e mínimos de redução de arraste para uma determinada concentração polimérica e para um determinado número de Reynolds.

Ao término de cada teste de degradação, isto é, quando o valor de redução de arraste para aquela determinada concentração começava a se estabilizar, dava-se início ao experimento no qual se determinava a redução de arraste conforme a

variação do número de Reynolds do escoamento. Vale ressaltar que todos os testes descritos até o momento eram realizados com o escoamento em regime turbulento.

Este último experimento permite visualizar mais facilmente a relação direta entre o aumento do fator de turbulência do escoamento e o aumento na eficiência de redução de arraste pela adição do polímero. Além disto, torna mais fácil também a visualização da variação da redução de arraste conforme a concentração da solução polimérica estudada.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados alguns resultados obtidos através dos experimentos preliminares descritos, comparando os efeitos notados para os diversos casos estudados com os conhecimentos teóricos já estabelecidos de forma a comprovar a eficácia do aparato experimental quanto aos fins para os quais foi desenvolvido.

Além destes, serão analisados também os resultados obtidos através dos experimentos que envolvem as soluções poliméricas, apresentando o real efeito causado pela adição do polímero a um determinado fluido, testando sua eficiência e contestando algumas informações fornecidas por diversos fabricantes do polímero redutor de arraste.

4.1. Escoamento Laminar/Turbulento

Uma vez que para baixos números de Reynolds, isto é, em escoamentos laminares, a resistência do fluido ao escoamento é significativamente menor, todos os experimentos foram realizados com o escoamento em regime turbulento. De modo a se verificar quanto a turbulência do escoamento, foi calculado o número de Reynolds crítico no qual ocorreria a transição do regime laminar para o turbulento através da Equação 04 proposta por Srinivason (1968)

$$Re_{crit} = 2100 \left[1 + 12 \left(\frac{D}{2R} \right)^{0,5} \right] \quad (Eq. 04)$$

Inicialmente foi proposta a realização de um experimento no qual seria possível comparar o torque aplicado ao sistema preenchido com água para diferentes números de Reynolds iniciando no regime laminar e finalizando no regime turbulento, de modo a se visualizar a região de transição do escoamento e então comparar com a obtida através da literatura. Porém, devido ao fato de o escoamento tornar-se turbulento para velocidades já significativamente baixas e também devido à faixa de operação do motor elétrico não foi possível realizar o teste proposto.

Desta forma, o número de Reynolds crítico utilizado para definição da transição entre escoamento laminar e turbulento utilizado em nosso caso foi o obtido a partir da Equação 03, que fica em torno de 6930.

4.2. Diferença de Torque

A maior preocupação no início deste projeto era se o aparato experimental teria a capacidade de medir, com exatidão e repetibilidade satisfatórias, os valores de torque transmitidos ao motor para vencer a resistência ao escoamento para que então fosse possível quantificar a diferença de torque para cada solução.

Para verificar se esta diferença de torque seria de fato percebida através da obtenção dos dados pelo multímetro instalado, foram confeccionadas quatro soluções de água filtrada com glicerina com diferentes concentrações, estando estas concentrações listadas na legenda do Gráfico 2.

Gráfico 1 - Diferença de Torque para as Diferentes Concentrações de Glicerina

Analisando o comportamento das curvas geradas ao realizar os testes com as soluções de diferentes concentrações, foi possível notar que o aparato experimental desenvolvido, em conjunto com a alta precisão do multímetro e da fonte de alimentação utilizada, é capaz de explicitar com facilidade as diferenças de torque as quais se deseja estudar.

4.3. Coeficiente de Atrito

O coeficiente de atrito relacionado a um determinado escoamento turbulento dado em uma seção de teste circular, como é o caso do presente relatório, pode ser calculado através de diferentes métodos teóricos, porém segundo White & Bond (1971) as duas correlações mais comumente utilizadas são a de White, que está representada na Equação 05 e a de Ito, que está representada na Equação 06.

$$Cf = 0,08Re^{-0,25} + 0,012\left(\frac{D}{2R}\right)^{0,5} \quad (Eq. 05)$$

$$Cf = 0,076Re^{-0,25} + 0,00725\left(\frac{D}{2R}\right)^{0,5} \quad (Eq. 06)$$

É possível notar que ambas as equações relacionam o coeficiente de atrito (Cf) com o número de Reynolds (Re) do escoamento, o diâmetro hidráulico (D) e o raio (R) da seção de testes, medidas estas representadas na Figura 6.

Figura 8 - Diagrama do Aparato Experimental

Um método de cálculo experimental para se quantificar o coeficiente de atrito relacionado ao escoamento também é apresentado por White & Bond (1971) e se resume na correlação entre a altura (H), o ângulo (Θ), o raio (R), o diâmetro hidráulico (D) e a velocidade angular (ω), conforme representado na Equação 07.

$$Cf = \frac{DHg}{2\theta R^3 \omega^2} \quad (Eq. 07)$$

Após coletar os dados de necessários para o cálculo do coeficiente de atrito através do método experimental, foi possível então traçar um gráfico no qual pode-se visualizar as curvas geradas pelas equações teóricas apresentadas, assim como a curva gerada pelo coeficiente de atrito obtido experimentalmente, conforme apresentado no Gráfico 3.

Gráfico 2 - Curva de Variação do Coeficiente de Atrito com o Número de Reynolds

Realizada uma breve análise gráfica, torna-se trivial a percepção de que para números de Reynolds mais elevados, isto é, escoamentos com maiores fatores de turbulência, os valores de coeficiente de atrito obtidos experimentalmente se aproximam cada vez mais do intervalo definido pelas curvas teóricas estudadas.

4.4. Polímero

Conforme descrito na seção 3.2 do presente relatório, dois tipos de experimento diferentes foram realizados com cada uma das soluções poliméricas, sendo estes: o de degradação do polímero e da redução de arraste. Ambos os experimentos envolviam a quantificação da redução de arrasto causada pelo polímero, porém com objetivos distintos.

Nas seções a seguir serão apresentados os principais objetivos de cada um dos métodos experimentais, assim como os resultados obtidos através do procedimento experimental descrito anteriormente.

4.4.1. Degradação do Polímero

O teste da degradação do polímero foi realizado com o objetivo de conhecer o comportamento da solução polimérica ao longo do tempo após iniciado seu escoamento. Para tal, foi imposto um escoamento com velocidade constante, e, consequentemente, com número de Reynolds também constante, ao sistema durante um intervalo de 90 minutos.

Dentre estes 90 minutos, a tensão que alimentava o motor elétrico era ajustada de forma a se manter a velocidade de escoamento constante e a aquisição dos dados ocorria em períodos de 2 minutos para os primeiros 10 minutos de escoamento, 5 minutos para os 20 minutos seguintes e 10 minutos para os 60 minutos subsequentes.

O cálculo para se quantificar o valor real da redução de arraste (*DR*) está explicitado na Equação 08 descrita abaixo.

$$DR = \frac{\tau_{\text{solução}} - \tau_{\text{água filtrada}}}{\tau_{\text{água filtrada}}} \quad (\text{Eq. 08})$$

Onde o valor de torque é obtido através da relação entre a potência (*P*) fornecida ao sistema, a velocidade angular (ω) de rotação da tubulação e o raio (*R*) desta mesma tubulação, conforme demonstrado na Equação 09.

$$\tau = \frac{P}{\omega R} \quad (\text{Eq. 09})$$

Enquanto isto, o valor da potência fornecida ao sistema é obtido através da simples multiplicação entre os parâmetros lidos pelo multímetro conectado à fonte de alimentação, sendo estes: a tensão (*V*) e a corrente (*i*), conforme relacionado na Equação 3 apresentada na seção 3.2 do presente relatório.

Através deste teste, tornou-se possível quantificar os valores máximos de redução de arraste devido ao polímero para cada uma das concentrações estudadas, além de se verificar a perda na eficiência do mesmo conforme o tempo de escoamento, conforme apresentado nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 - Degradação do Polímero à Concentração de 5 ppm

SOLUÇÃO POLIMÉRICA (5 PPM)					
Tempo [min]	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [W]	Torque [N.m]	DR [%]
0	0,545	4,121	2,244	0,248	40,40
10	0,578	4,443	2,568	0,312	25,17
20	0,585	4,470	2,616	0,321	22,94
30	0,586	4,446	2,607	0,319	23,37
40	0,589	4,483	2,642	0,326	21,71
50	0,591	4,474	2,643	0,326	21,65
60	0,590	4,468	2,635	0,325	22,06
90	0,597	4,445	2,653	0,328	21,21

Tabela 3 - Degradação do Polímero à Concentração de 10 ppm

SOLUÇÃO POLIMÉRICA (10 PPM)					
Tempo [min]	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [W]	Torque [N.m]	DR [%]
0	0,522	3,936	2,055	0,218	47,83
10	0,559	4,022	2,248	0,256	38,75
20	0,558	4,081	2,277	0,261	37,40
30	0,571	4,095	2,338	0,273	34,54
40	0,577	4,093	2,362	0,278	33,44
50	0,575	4,131	2,375	0,281	32,80
60	0,576	4,138	2,383	0,282	32,42
90	0,580	4,143	2,403	0,286	31,51

Tabela 4 - Degradação do Polímero à Concentração de 20 ppm

SOLUÇÃO POLIMÉRICA (20 PPM)					
Tempo [min]	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [W]	Torque [N.m]	DR [%]
0	0,494	3,877	1,915	0,193	54,41
10	0,507	3,938	1,997	0,209	50,65
20	0,512	4,024	2,060	0,221	47,70
30	0,513	4,069	2,087	0,227	46,45
40	0,519	4,054	2,104	0,230	45,68
50	0,524	4,045	2,120	0,233	44,97
60	0,524	4,047	2,121	0,233	44,92
90	0,529	4,032	2,133	0,236	44,35

Outro fator que também pode ser avaliado foi a estabilização do valor de redução de arraste causado pelo polímero após um determinado período. Posteriormente à análise do Gráfico 4, verificou-se que o tempo de estabilização da redução de arraste aparenta ter um comportamento similar para as diferentes soluções, estabilizando sempre em torno de 40 minutos após o início do escoamento.

Gráfico 3 - Curva de Degradação do Polímero para as Diferentes Concentrações

Além disto, é possível também quantificar a variação total relacionada à eficiência do polímero, determinando os valores máximos de redução de arraste e os valores nos quais ocorre a estabilização. Vale ressaltar que a solução com maior concentração de polímero (20 ppm) obteve a menor variação de redução de arraste, iniciando em aproximadamente 55% e estabilizando em aproximadamente em 44% de redução de arraste. Enquanto isso, a solução de menor concentração (5 ppm) apresentou comportamento contrário, obtendo a maior variação de redução de arraste, iniciando em 41% e estabilizando em 21%.

4.4.2. Redução de Arraste

Posteriormente à realização de cada teste de degradação do polímero, isto é, após notar que a redução de arraste do mesmo já se estabilizou, deu-se início ao experimento de medição da redução de arraste ocasionada pelo polímero para diferentes números de Reynolds. Vale ressaltar que todos os testes, independente da concentração da solução utilizada, foram realizados para escoamentos em regime turbulento, havendo como única variação o grau de turbulência do escoamento.

A partir da análise do Gráfico 5, foi possível notar o aumento da eficiência do polímero na redução de arraste conforme a intensificação da turbulência do escoamento, como já havia sido comentado anteriormente na análise teórica.

Gráfico 4 - Diferença da Redução de Arraste entre as Soluções Poliméricas

Esta variação no valor de redução de arraste pareceu ser linear e com taxa de variação constante, independentemente assim da concentração da solução estudada. Este fator pode ser facilmente percebido na análise do Gráfico 5, uma vez que as curvas correspondentes a cada uma das soluções apresentam um certo paralelismo entre si.

Além da representação gráfica da redução de arraste, foi plotado também as curvas de torque para os diferentes números de Reynolds estudados, conforme

ilustrado no Gráfico 6. Esta representação possibilitou a comparação da diferença entre o torque líquido necessário para o escoamento da água filtrada e da solução polimérica para as diferentes concentrações testadas, notando assim a linearidade desta relação.

Gráfico 5 - Diferença de Torque entre Água Filtrada e Soluções Poliméricas

5. CONCLUSÃO

Ao término dos experimentos realizados no decorrer do presente relatório, foi possível concluir quanto à aplicabilidade do aparato experimental elaborado para medição da redução de arrasto ocasionada pela adição de polímero em uma determinada solução, avaliando as diferenças causadas pela variação da concentração de polímero na solução e as diferenças causadas pela variação das condições impostas ao escoamento estudado.

Além disto, foi possível também estudar a degradação deste polímero, quantificando sua vida útil e contrariando a informação fornecida por diversos fabricantes de polímeros, que alegam que a degradação do mesmo é mais acelerada do que de fato foi comprovado, além de alegarem também que a redução de arrasto após a degradação se reduz a zero, tornando necessária a injeção de mais polímero na rede, enquanto o que ficou provado no presente relatório foi que esta redução de arrasto pós degradação se estabiliza em um valor menor que o inicial porém distante de zero.

Vale salientar que devido à configuração do experimento elaborado, a solução polimérica não atravessou nenhum tipo de bomba para ter seu escoamento induzido, eliminando assim a aceleração da degradação do polímero devido a ação da bomba. Desta forma, o experimento teve capacidade de replicar com maior exatidão a situação que ocorre de fato em grandes indústrias, onde o polímero é injetado diretamente na tubulação onde ocorre o escoamento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KOSTIC, M. *The ultimate asymptotes and possible causes of friction drag and heat transfer reduction phenomena*. Journal of Energy, Heat and Mass Transfer. 1994. Vol. 16, 01-14.

WHITE, C.M.; MUNGAL, M.G. *Mechanics and Prediction of Turbulent Drag Reduction with Polymer Additives*. Annu. Rev. Fluid Mech. 2008. 40:235-56

LUMLEY, J.L. *Drag Reduction by Additives*. Department of Aerospace Engineering, Pennsylvania State University. Annu. Rev. Fluid Mech. 1969.1:367-384.

VIRK, P.S. *Drag reduction fundamentals*. AIChE Journal. 1975

TOMS, B.A. *Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers*. Proc. 1st Intern. Congr. Rheol. North Holland. 1949.

BERMAN, N.S. *Drag reduction by polymers*. Ann. Rev. Fluid Mech. 1978. 10: 47-64.

DEN TOONDER, J.M.J.; HULSEN, M.A.; KUIKEN, G.D.C.; NIEUWSTADT, F.T.M. *Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments*. J. Fluid Mech. 1997. Vol. 337. Pp 193-231.

MIN, T.; YOO, J.Y.; CHOI, H.; JOSEPH, D.D. *Drag reduction by polymer additives in a turbulent channel flow*. J. Fluid Mech. 2003. Vol. 486. Pp 213-238.

WHITE, D.A.; BOND, J.A. *A low shear rate turbulent flow apparatus*. Dept. of Chemical Engineering University College, London, U.K. 1971.

PAULA, B.R.F.C. *Redução de arrasto via adição de polímeros*. Dept. de Engenharia Mecânica, PUC-Rio. 2005

PEREIRA, P.P. *Estudo experimental da redução de atrito em escoamentos em dutos por adição de polímero*. Dept. de Engenharia Mecânica, PUC-Rio. 2009.