



ESTUDO EXPERIMENTAL DA REDUÇÃO DE ARRASTO POR  
POLIISOBUTILENO E OS EFEITOS DA PRÉ-DILUIÇÃO EM SOLVENTES E  
DEGRADAÇÃO MECÂNICA EM ESCOAMENTO TURBULENTO

Plínio Martins Dias da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Rio de Janeiro  
Agosto de 2019

ESTUDO EXPERIMENTAL DA REDUÇÃO DE ARRASTO POR  
POLIISOBUTILENO E OS EFEITOS DA PRÉ-DILUIÇÃO EM SOLVENTES E  
DEGRADAÇÃO MECÂNICA EM ESCOAMENTO TURBULENTO

Plínio Martins Dias da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:



---

Prof. Daniel Onofre de Almeida Cruz, D.Sc.



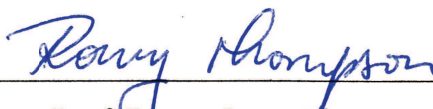
---

Dra. Marcia Cristina Khalil de Oliveira, D.Sc.



---

Prof. Paulo Couto, Dr.Eng.



---

Prof. Roney Leon Thompson, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2019

Silva, Plínio Martins Dias da

Estudo experimental da redução de arrasto por poliisobutileno e os efeitos da pré-diluição em solventes e degradação mecânica em escoamento turbulento/ Plínio Martins Dias da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XX, 121 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 79-81.

1. Redução do arrasto. 2. Poliisobutileno. 3. Escoamento turbulento. 4. Reologia. I. Cruz, Daniel Onofre de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

Dedico esse trabalho a Deus, que incansavelmente vem ao meu auxílio, sempre presente, pai amoroso e piedoso. Dedico também àqueles que Ele me trouxe, em particular à minha esposa Luciana Camila Cacci e aos meus filhos Carina Cacci Dias e Gabriel Cacci Dias, sem os quais eu não sou nada.

# Agradecimentos

Obrigado, meu Deus, por abençoar o meu caminho durante esse trabalho. É Vossa toda a honra e toda a glória desta obra e os frutos que advirem dela.

Gostaria de agradecer à minha família, e em particular meu pai e minha mãe, minha esposa e meus filhos pela torcida e pela fé em mim depositada, que a mim foram a força primordial nessa etapa de minha vida acadêmica.

Ao meu orientador Daniel Onofre de Almeida Cruz por todo apoio e paciência ao longo da elaboração desta dissertação de mestrado. Sou grato também à minha coordenadora de projeto Cecília Mageski M. Santos por sua direção ativa nas importantes tomadas de decisão ao longo do projeto.

Aos funcionários do LIAP Adão de Souza Gonçalves e Daniel Alvarez Maffra, aos funcionários do LADEQ, mas em especial ao Alex Rodrigues de Andrade e Hellen Guilherme da Silva, e aos funcionários do NIDF, todos na UFRJ, por todo apoio e por proporcionarem um ambiente propício para o desenvolvimento do meu trabalho.

Também gostaria de deixar um agradecimento especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e a todos os seus funcionários pela oportunidade de cumprir todas as etapas desse precioso programa.

Agradeço à UFRJ, que me proporcionou a chance de expandir os meus horizontes.

Agradeço à PETROBRAS, pela oportunidade de realizar este importante aprimoramento profissional, com especial gratidão a meu líder Renato Pereira Brum, pelo suporte, compreensão e torcida. Aqui também vai meu agradecimento a Juliano Dantas por acreditar em mim e me proporcionar o crescimento na carreira.

Aos colegas Thiago Fulton, Laert F. da Silva Neto, André Caffé e Alexandre Faustino que construíram e calibraram o circuito experimental de escoamento utilizado neste trabalho.

E a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

*“Não sei como pareço aos olhos do mundo, mas eu mesmo vejo-me como um pobre garoto que brincava na praia e se divertia em encontrar uma pedrinha mais lisa uma vez por outra, ou uma concha mais bonita do que de costume, enquanto o grande oceano da verdade se estendia totalmente inexplorado diante de mim.”*

Sir Isaac Newton

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO EXPERIMENTAL DA REDUÇÃO DE ARRASTO POR  
POLIISOBUTILENO E OS EFEITOS DA PRÉ-DILUIÇÃO EM SOLVENTES E  
DEGRADAÇÃO MECÂNICA EM ESCOAMENTO TURBULENTO

Plínio Martins Dias da Silva

Agosto/2019

Orientador: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Programa: Engenharia Mecânica

Este projeto experimental é parte integrante da linha de pesquisa REAPA e possui os objetivos de estudar os efeitos da pré-diluição de Poliisobutileno (PIB) em solventes orgânicos para a preparação de soluções oleosas, caracterizar o comportamento reológico destas soluções e avalia-las quanto à redução do arrasto e à degradação mecânica que esses materiais sofrem no escoamento turbulento. Técnicas reométricas de regimes permanente e oscilatório de cisalhamento foram utilizadas para avaliação do comportamento reológico de misturas de PIB de alta massa molar em diferentes concentrações e para verificar o impacto do uso de solventes na dispersão prévia desses polímeros. Um aparato experimental de escoamento em circuito fechado foi utilizado para a avaliação da capacidade de redução de arrasto das soluções oleosas aditivadas com PIB e para a verificação dos efeitos da degradação mecânica induzida pela turbulência. Observou-se que o uso dos solventes na pré-dispersão do PIB não afetou significativamente a densidade e a viscosidade cisalhante enquanto que melhorou o procedimento de preparo. No circuito experimental, notou-se que a massa molar influencia significativamente na eficiência de redução do arrasto obtido, enquanto que a degradação promove a perda de eficiência até atingir uma assíntota residual.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EXPERIMENTAL STUDY OF DRAG REDUCTION BY POLYISOBUTYLENE AND  
THE EFFECTS OF PRE-DILUTION IN SOLVENTS AND MECHANICAL  
DEGRADATION IN TURBULENT FLOW

Plínio Martins Dias da Silva

August/2019

Advisor: Daniel Onofre de Almeida Cruz

Department: Mechanical Engineering

This experimental project is an integral part of REAPA research line and aims to study the effects of pre-dilution of polyisobutylene (PIB) in organic solvents for the preparation of oily solutions, to characterize the rheological behavior of these solutions and to evaluate them regarding their drag reduction effectiveness and their mechanical degradation that these materials suffer in turbulent flow. Rheometric techniques of permanent and oscillatory shear regimes were used to evaluate the rheological behavior of high molecular weight PIB mixtures at different concentrations and to verify the impact of solvent use on the prior dispersion of these polymers. An experimental closed loop flow apparatus was used for the evaluation of the drag reduction capability of PIB additivated oily solutions and for the verification of turbulence-induced mechanical degradation effects. It was observed that the use of solvents in the pre-dispersion of the PIB did not significantly affect the density and shear viscosity while improving the preparation procedure. In the experimental circuit, it was noted that the molar mass significantly influences the drag reduction efficiency, while the degradation promotes the loss of efficiency until reaching a residual asymptote.



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>OBJETIVOS GERAIS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>17</b>
<b>4.2</b>	<b>MATERIAIS .....</b>	<b>20</b>
<b>4.3</b>	<b>EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>20</b>
<b>4.4</b>	<b>PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES .....</b>	<b>22</b>
<b>4.5</b>	<b>MEDIDAS REOLÓGICAS .....</b>	<b>23</b>
<b>4.5.1</b>	<b>CILINDROS CONCÊNTRICOS NO REÔMETRO HAAKE MARS III:..</b>	<b>23</b>
<b>4.5.2</b>	<b>CONE/PLACA NO REÔMETRO HAAKE MARS III: .....</b>	<b>24</b>
<b>4.5.3</b>	<b>CONE/PLACA NO REÔMETRO ANTON PAAR MCR 502: .....</b>	<b>24</b>
<b>4.6</b>	<b>CIRCUITO FECHADO DE ESCOAMENTO .....</b>	<b>26</b>
<b>4.6.1</b>	<b>SISTEMA DE MEDIÇÃO, INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS .....</b>	<b>28</b>
<b>4.7</b>	<b>TRATAMENTO DE DADOS DOS ENSAIOS DE REDUÇÃO DO ARRASTO.....</b>	<b>31</b>
<b>4.8</b>	<b>TRATAMENTO DE DADOS DOS ENSAIOS DE DEGRADAÇÃO MECÂNICA DO FLUIDO .....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>EFEITO DA PRÉ-DISPERSÃO DO PIB EM SOLVENTES ORGÂNICOS .....</b>	<b>37</b>
<b>5.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA.....</b>	<b>44</b>

<b>5.2.1 REOLOGIA POR CISALHAMENTO OSCILATÓRIO.....</b>	<b>54</b>
<b>5.3 DETERMINAÇÃO DA REDUÇÃO DO ARRASTO.....</b>	<b>60</b>
<b>5.4 DEGRADAÇÃO MECÂNICA DO POLÍMERO REDUTOR DE ATRITO HIDRODINÂMICO .....</b>	<b>68</b>
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>76</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>78</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>
<b>9 APÊNDICES.....</b>	<b>82</b>
<b>9.1 APÊNDICE 1: PROCEDIMENTO OPERACIONAL DOS SISTEMAS SUPERVISÓRIOS DATAACQUISITION.VI (LABVIEW) E PICOLOG RECORDER. ....</b>	<b>83</b>
<b>9.2 APÊNDICE 2: ISOTERMAS REOLÓGICAS DAS SOLUÇÕES PREPARADAS NO LABORATÓRIO.....</b>	<b>93</b>
<b>9.3 APÊNDICE 3: CURVAS DE REOMETRIA OSCILATÓRIA. ....</b>	<b>99</b>
<b>9.4 APÊNDICE 4: PLANILHAS DE TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS NO CIRCUITO FECHADO DE ESCOAMENTO. ....</b>	<b>107</b>
<b>9.5 APÊNDICE 5: PLANILHAS DE TRATAMENTO DOS DADOS DE ENSAIOS DE DEGRADAÇÃO OBTIDOS NO CIRCUITO FECHADO DE ESCOAMENTO. ....</b>	<b>118</b>

# Lista de figuras

<b>Figura 1:</b> Foto histórica do experimento da FDNY de redução do atrito no jato d'água com a adição de Polióxido de Etileno (BAYLEY & KOLESKE, 1976). .....	6
<b>Figura 2:</b> Regimes de escoamento em tubulações cilíndricas segundo Virk (MORGAN & MCCORMICK, 1990). L-regime laminar, N-regime turbulento, M-regime de máxima redução de atrito, P-região em que uma curva de comportamento para um fluido aditivado com polímero ocupa e varia em função das propriedades das soluções poliméricas. ....	11
<b>Figura 3:</b> a) Viscosímetro Anton Paar, modelo SVM 3000, b) Reômetro Thermo Fisher Scientific HAAKE MARS III com banho termostático TMTC e c) Reômetro Anton Paar MCR 502. ....	21
<b>Figura 4:</b> Vista da seção final do trecho em acrílico do circuito experimental. Ao fundo se vê o tanque de 70 litros e pela lateral esquerda se vê os capilares de transmissão de pressão até os transdutores, em catenária livre até a bancada. ....	21
<b>Figura 5:</b> Sistema de agitação magnética (a); balança analítica (b); Capela com sistema de exaustão (c). ....	22
<b>Figura 6:</b> a) Cilindros concêntricos do reômetro HAAKE MARS III, b) Cone/placa do reômetro HAAKE MARS III e c) Cone/placa no reômetro Anton Paar MCR 502. ....	24
<b>Figura 7:</b> Desenho esquemático e isométrico do circuito fechado experimental para ensaios de escoamento de fluidos oleosos (CAFFÉ, 2018). ....	27
<b>Figura 8:</b> Foto do arranjo de válvulas utilizado para isolar os pontos de leitura de pressão à medida que cada diferencial de pressão é lido. ....	28
<b>Figura 9:</b> Painel frontal do módulo de condicionamento de sinal. ....	29
<b>Figura 10:</b> Circuito de condicionamento de sinal para cada medidor de pressão. ....	30
<b>Figura 11:</b> Programa de aquisição de dados. ....	30
<b>Figura 12:</b> a) Tabela de controle do fator de correção para a vazão obtida pelo medidor e b) Tabela de dados médios dos parâmetros de controle do escoamento. ....	31
<b>Figura 13:</b> a) Tabela de temperaturas inicial e final e b) Tabela de variação de comprimento e variação de pressão em função da tomada de pressão lida. ....	32
<b>Figura 14:</b> Representação da tabela de pontos de tensão e taxa de cisalhamento com colunas resultantes da interpolação em função da temperatura do experimento. ....	33
<b>Figura 15:</b> Compilação dos dados do experimento numa determinada vazão. ....	33

<b>Figura 16:</b> Diagrama de Moody dos regimes de escoamento em tubo liso.....	35
<b>Figura 17:</b> Imagem representativa do gráfico de fator de atrito de Darcy-Weisbach em função do tempo. ....	36
<b>Figura 18:</b> Imagem representativa do gráfico de redução percentual do arrasto em função do tempo. ....	36
<b>Figura 19:</b> Gráficos de densidade em função da temperatura das amostras de vaselina contendo 2 e 4% de ciclohexano, com e sem PIB de $1.10^6$ e $4.10^6$ g/mol. ....	40
<b>Figura 20:</b> Gráficos de densidade em função da temperatura das amostras de óleo mineral contendo 0, 2 e 4% de querosene, com e sem PIB de $1.10^6$ e $4.10^6$ g/mol. ....	41
<b>Figura 21:</b> Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento a 40°C das soluções solvente, vaselina com 2 e 4% de ciclohexano e vaselina sem ciclohexano. ...	42
<b>Figura 22:</b> Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento a 40°C das soluções de PIB $1.10^6$ g/mol em vaselina com e sem ciclohexano. ....	42
<b>Figura 23:</b> Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento a 40°C das soluções de PIB $4.10^6$ g/mol em vaselina com e sem ciclohexano. ....	43
<b>Figura 24:</b> Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento a 40°C das soluções de OMB com ciclohexano e de PIB $1.10^6$ g/mol e $4.10^6$ g/mol em OMB com ciclohexano como pré-solvente. ....	45
<b>Figura 25:</b> Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento das soluções de PIB $4.10^6$ g/mol a 0,1% e a 0,2% em OMB com querosene a 40°C, onde CP designa ensaios com geometria cone-placa e CC designa ensaios com geometria cilindros concêntricos. ....	46
<b>Figura 26:</b> Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento a 40°C das soluções de PIB $1.10^6$ g/mol e $4.10^6$ g/mol a 0,1% e a 0,2% em OMB e pré-solventes ciclohexano ou querosene, obtidos em ensaios com geometria cilindros concêntricos. ....	47
<b>Figura 27:</b> Curvas isotérmicas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento das soluções de OMB contendo 4% de querosene, obtidos em ensaios com geometria cilindros concêntricos. ....	48
<b>Figura 28:</b> Curvas isotérmicas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento da solução de PIB $4.10^6$ g/mol a 0,2% em OMB e querosene (4%), obtidos em ensaios com geometria cilindros concêntricos. ....	49
<b>Figura 29:</b> Corte da curva viscosidade em função da taxa de cisalhamento da solução de PIB $4.10^6$ g/mol a 0,2% em OMB e querosene (4%), a 40°C e obtido em ensaio com	

geometria cilindros concêntricos, destacando o comportamento pseudoplástico da solução, ainda que bastante diluída. ....	50
<b>Figura 30:</b> Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas a 30 e a 60°C para as amostras de solução de 500ppm de PIB 4.10 <sup>6</sup> g/mol coletadas no início e no final do ensaio de redução do arrasto no circuito fechado de escoamento.....	51
<b>Figura 31:</b> Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas a 30 e a 60°C para as amostras de solução de 500ppm de PIB 1.10 <sup>6</sup> g/mol coletadas no início e no final do ensaio de redução do arrasto no circuito fechado de escoamento.....	52
<b>Figura 32:</b> Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas a 30 e a 60°C para as amostras de solução de 1000ppm de PIB 4.10 <sup>6</sup> g/mol coletadas no início e no final do ensaio de redução do arrasto no circuito fechado de escoamento.....	53
<b>Figura 33:</b> Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas a 30 e a 60°C para as amostras de solução de 1000ppm de PIB 1.10 <sup>6</sup> g/mol coletadas no início e no final do ensaio de redução do arrasto no circuito fechado de escoamento.....	54
<b>Figura 34:</b> Histograma dos resultados de cruzamento entre as curvas dos módulos $G'$ e $G''$ em função da frequência angular, cada qual com uma barra de erro simbolizando o desvio padrão das triplicatas.....	56
<b>Figura 35:</b> Destaque do histograma da figura 34, das bases oleosas (com solvente e sem PIB).....	57
<b>Figura 36:</b> Destaque do histograma da figura 34, das amostras com PIB de 4.10 <sup>6</sup> g/mol do lado direito de suas respectivas bases oleosas (com solvente e sem PIB).....	58
<b>Figura 37:</b> Destaque do histograma da figura 34, das amostras com PIB de 1.10 <sup>6</sup> g/mol do lado direito de suas respectivas bases oleosas (com solvente e sem PIB).....	58
<b>Figura 38:</b> Destaque do histograma da figura 34, das amostras com PIB de 1.10 <sup>6</sup> g/mol do ensaio de degradação comparadas à amostra produzida no laboratório.....	59
<b>Figura 39:</b> Avaliação do fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, para o escoamento do óleo mineral com 1 e 2% de querosene no circuito fechado de escoamento frente às curvas teóricas de regime de escoamento.....	61
<b>Figura 40:</b> Avaliação comparativa dos resultados de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, obtidos com as soluções de PIB 4.10 <sup>6</sup> g/mol a 500 e 1000ppm frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR. ....	62
<b>Figura 41:</b> Avaliação comparativa dos resultados de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, obtidos com as soluções de PIB	

1.10 <sup>6</sup> g/mol a 500 e 1000ppm frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR. .....	62
<b>Figura 42:</b> Curvas experimentais de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, obtidas com as soluções de PIB de 1.10 <sup>6</sup> g/mol e de 4.10 <sup>6</sup> g/mol nas concentrações de 500 e 1000ppm, cada, frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR. ....	63
<b>Figura 43:</b> Histograma comparativo dos resultados de redução de arrasto obtidos com as soluções de 500 e 1000 ppm de PIB 1.10 <sup>6</sup> e 4.10 <sup>6</sup> g/mol e em ensaios consecutivos. ....	64
<b>Figura 44:</b> Avaliação de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, da solução polimérica de PIB 1.10 <sup>6</sup> g/mol a 500ppm em 3 ensaios consecutivos, frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR.....	65
<b>Figura 45:</b> Avaliação de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, da solução polimérica de PIB 1.10 <sup>6</sup> g/mol a 1000ppm em 2 ensaios consecutivos, frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR.....	66
<b>Figura 46:</b> Avaliação de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, das soluções poliméricas preparadas com 500ppm de PIB 4.10 <sup>6</sup> g/mol em 3 ensaios consecutivos, frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR. .....	67
<b>Figura 47:</b> Avaliação de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, das soluções poliméricas preparadas com 1000ppm de PIB 4.10 <sup>6</sup> g/mol em 2 ensaios consecutivos, frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR. .....	67
<b>Figura 48:</b> Resultados experimentais de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, obtidos com as soluções de PIB de 1.10 <sup>6</sup> g/mol na concentração de 500ppm em 3 ensaios de degradação a vazão constante, frente às curvas teóricas de regime de escoamento.....	69
<b>Figura 49:</b> Resultados experimentais de n° de Re obtidos com as soluções de PIB de 1.10 <sup>6</sup> g/mol na concentração de 500ppm em 3 ensaios de degradação a vazão constante frente às curvas teóricas de regime de escoamento. ....	70
<b>Figura 50:</b> Resultado experimental de redução percentual do arrasto em função do tempo com a solução de PIB de 1.10 <sup>6</sup> g/mol na concentração de 500ppm a vazão constante de 48L/min (2,90m <sup>3</sup> /h), frente à curva teórica de regime de escoamento turbulento.....	71

**Figura 51:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas para as amostras de solução de 500ppm de PIB  $1.10^6$ g/mol coletadas no início e no fim de cada ensaio de degradação (de vazão fixa) realizados no circuito fechado de escoamento. ... 72

**Figura 52:** Curva de eficiência do PIB  $1.10^6$ g/mol (5% em querosene) a 500ppm no óleo mineral em função do comprimento de tubulação de acrílico com 11mm de diâmetro interno simulado com base nos dados experimentais..... 73

**Figura 53:** Curva de eficiência de redução do arrasto simulada para um cenário de reinjeção periódica de PIB  $1.10^6$ g/mol (5% em querosene) em quantidade suficiente para 500ppm no óleo mineral a cada 26,88km numa tubulação de 11mm de diâmetro interno similar à utilizada no circuito fechado de escoamento..... 74

# Lista de tabelas

<b>Tabela 1:</b> Principais polímeros redutores de arrasto (TRUONG, 2001). .....	7
<b>Tabela 2:</b> Soluções preparadas e avaliadas ao longo do projeto, correspondendo às siglas utilizadas nas figuras. ....	18
<b>Tabela 3:</b> Localização dos pontos de controle de pressão na tubulação de acrílico.....	27
<b>Tabela 4:</b> Parâmetros de solubilidade a 25°C e pressão atmosférica, segundo Hildebrand, para os fluidos utilizados (BATISTA <i>et al.</i> , 2015; BRANDRUP <i>et al.</i> , 1999; CHOI <i>et al.</i> , 1999; STRATE & LOHSE, 1999; RODRIGUEZ <i>et al.</i> , 2015). ...	39
<b>Tabela 5:</b> Tempo médio de preparação das dispersões de PIB, 1.10 <sup>6</sup> e 4.10 <sup>6</sup> g/mol, a 5% em massa nos solventes escolhidos. ....	39
<b>Tabela 6:</b> Registros de $k$ , $n$ e $R^2$ das soluções estudadas a 40°C.....	41
<b>Tabela 7:</b> Registros de $k$ , $n$ e $R^2$ das soluções de óleo mineral com ciclohexano e de PIB 1.10 <sup>6</sup> e 4.10 <sup>6</sup> g/mol em óleo mineral e com ciclohexano, estudadas a 40°C.....	44



# Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

## Termos latinos:

$a$  e  $a_1$  até  $a_5$  – Designa as constantes de uma equação qualquer, onde os índices de 1 a 5, ou a sua ausência, determinam que são constantes com valores diferentes entre si.

A – Área transversal do tubo cilíndrico.

aprox. – Abreviação para aproximadamente.

BCP – Bomba de Cavidades Progressivas.

C – Concentração do polímero.

CAS – Número de registro de substância química no banco de dados do *Chemical Abstracts Service*, uma divisão da *Chemical American Society*.

CC – Designa ensaios utilizando a geometria do par de cilindros concêntricos.

CMC – Carboximetilcelulose.

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CP – Designa ensaios utilizando a geometria do par cone e placa.

$D$  e  $D_0$  – Diâmetro do tubo cilíndrico, sendo quando há o índice  $0$  designa o diâmetro nominal do tubo à temperatura de 25°C.

DNA – Do inglês *Deoxyribonucleic Acid*.

DNS – Do inglês *Direct Numerical Simulation*.

$DR$ ,  $DR_{(0)}$  e  $DR_{(t)}$  – Do inglês *Drag Reduction*. Os índices  $0$  e  $t$  designam o parâmetro tempo, sendo  $0$  o tempo inicial e  $t$  um tempo qualquer, indeterminado ou a definir.

DRA – Do inglês *Drag Reduction Additive*.

$e$  – Função exponencial cuja base é o número de Euler.

$E_A$  – Energia de ativação.

EIT – Do inglês *Elasto-Inertial Turbulence*.

$f$  – Fator de atrito de Darcy–Weisbach.

FDNY – Do inglês *New York City Fire Department*.

$f_{exp}$  – Fator de atrito de Darcy-Weisbach obtido experimentalmente.

$f_F$  – Fator de atrito de Fanning.

*flow loop* – Circuito Fechado de Escoamento.

$f_{tl}$  – Fator de atrito de Darcy-Weisbach para o tubo liso.

$G$  – Módulo de Young.

$G'$  – Módulo de armazenamento ou rigidez dinâmica, que por extensão reflete o comportamento elástico do material.

$G''$  – Módulo de perda, que é uma medida da energia dissipada por ciclo e que por extensão reflete o comportamento viscoso.

*gap* – Distância vertical entre a parte baixa do *splindle* conectado ao rotor e a superfície horizontal das geometrias.

$h$  – Distância axial entre as superfícies cisalhantes da geometria de cilindros concêntricos.

$k$  – Índice de comportamento do fluido não newtoniano.

$k_f$  – Fator característico do circuito de condicionamento de sinal do medidor de vazão para a placa de aquisição de dados que relaciona a frequência de pulsos recebidos pelo medidor com a vazão.

LADEQ/EQ – Laboratório do Departamento de Engenharia Química da Escola de Química.

LAOS – do inglês *Large Amplitude Oscillatory Shear*.

LIAP – Laboratório de Instrumentação Aplicada a Petróleo.

LRAP – Laboratório de Recuperação Avançada de Petróleo.

LVER – Do inglês *Linear Visco-Elastic Range*.

MDR – Do inglês *Maximum Drag Reduction*.

$M_v$  – Massa molecular viscosimétrica média do polímero,

$M_w$  – Massa molecular ponderal média do polímero.

$n$  – Índice de consistência do fluido não newtoniano.

NIDF – Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos.

OBT – Óleo Básico de Turbina.

PA – Para Análise, determina grau de qualidade do produto.

PAM – Poliacrilamida.

PEG – Polietileno Glicol.

PEO – Polióxido de etileno.

PIB – Poliisobutileno.

PMMA – Poli(metil metacrilato).

PS – Poliestireno.

Q – Vazão média do escoamento.

$R$  – Constante dos gases.  
 $r$  – Raio do vórtice gerado pelo escoamento turbulento.  
 $r^*$  – Raio do vórtice abaixo do qual o polímero não se deforma no escoamento.  
 $r^{**}$  – Raio do vórtice acima do qual o polímero atinge seu limite elástico.  
 $R^2$  – Coeficiente de determinação.  
 $Re$  – Número adimensional de Reynolds.  
 $Re_{MR}$  – Número de Reynolds segundo Metzner & Reed.  
 $R_g$  – Raio de giro.  
 $S_{10}$  – Teor de enxofre máximo de 10ppm, determina grau de qualidade do produto.  
 $SAOS$  – Do inglês *Small Amplitude Oscillatory Shear*.  
 $SEC$  – Do inglês *Size Exclusion Chromatography*.  
 $t$  – Parâmetro de tempo.  
 $T$  – Parâmetro de temperatura.  
 $U$  e  $v$  – Velocidade média do escoamento.  
 $UFRJ$  – Universidade Federal do Rio de Janeiro.  
 $U(r)/r$  – Frequência de formação de vórtices gerados no escoamento turbulento.  
 $W^*$  – Número de onda de vórtices gerados no escoamento turbulento.

#### Termos gregos:

$\alpha$  – Coeficiente de expansão linear do acrílico.  
 $\Delta G$  – Variação de energia livre de Gibbs.  
 $\Delta H$  – Variação de entalpia.  
 $\Delta S$  – Variação de entropia.  
 $\delta$  – Uma medida da quantidade de redução de arrasto definida por Virk e apresentada na equação 6.  
 $\delta_f$  – Atraso de fase sinusoidal em relação à tensão.  
 $\partial p / \partial x$  – Diferencial de pressão em função do espaço na direção  $x$ .  
 $\varepsilon$  – Rugosidade relativa, dada por  $K/D$ .  
 $\Gamma$  – Comprimento característico do vórtice turbulento.  
 $\dot{\gamma}$  – Taxa de cisalhamento.  
 $\gamma^*$  – Deformação complexa.  
 $\gamma_m$  – Amplitude da deformação.

$\kappa$  e  $\kappa_0$  – Constante de reação, sendo que o índice 0 designa a condição inicial da reação.

$\kappa_i$  – Autovalor do  $i$ -ésimo modo de relaxação coordenado da macromolécula.

$K$  – Rugosidade equivalente.

$\lambda_l$  – Tempo de relaxação da macromolécula.

$\lambda_i$  – Tempo de relaxação do  $i$ -ésimo modo vibracional molecular do polímero.

$[\mu]$  – Viscosidade intrínseca do polímero.

$\mu$  – Viscosidade dinâmica do fluido.

$\mu_p$  – Viscosidade dinâmica do polímero.

$\mu_s$  – Viscosidade dinâmica do solvente.

$\rho$  – Massa específica do polímero.

$\tau$  – Tensão de cisalhamento.

$\tau^*$  – Tensão de cisalhamento complexa.

$\tau_w$  – Tensão de cisalhamento na parede.

$\tau_w^*$  – Tensão de cisalhamento crítica na parede.

$v$  e  $U$  – Velocidade média do escoamento.

$\omega$  – Frequência angular.

$\Omega_t$  – Constante que é única para cada par polímero/solvente.

# 1 Introdução

Descoberto em meados da década de 40 pelo químico inglês B. A. Toms, o fenômeno de redução do arrasto no escoamento turbulento tem despertado o interesse de muitos pesquisadores (KULICKE *et al.*, 1989; SHENOY, 1984) por revelar-se altamente complexo, tanto pelo aspecto mecânico quanto pelo aspecto físico-químico. Devido ao comportamento não newtoniano dessas soluções, muitos pesquisadores têm levado ao limite do conhecimento a reologia e a mecânica dos fluidos, pela necessidade de desenvolvimento de modelos mecanicistas que pudessem simular esse comportamento, e a química, pelo aprofundamento dos estudos de interações intermoleculares e intramoleculares de macromoléculas que explicassem o comportamento desses aditivos em diferentes fluidos (PEREIRA *et al.*, 2013).

O interesse crescente neste fenômeno encontra suporte no ramo industrial, pela necessidade de reduzir o consumo de energia em diversas aplicações envolvendo o escoamento de fluidos (ZHANG *et al.*, 2018), desde a mineração, pela aplicação no hidrotransporte de sólidos, passando pela indústria de petróleo, para auxílio na perfuração de poços, em processos de fraturamento de reservatórios com baixa permeabilidade e no escoamento da produção tanto de petróleo quanto de derivados, até a agricultura, pelo uso em sistemas de irrigação, a construção civil, pelo uso em sistemas de esgoto, e serviços urbanos, pelo uso dos bombeiros em suas mangueiras de água (BROSTOW *et al.*, 2007, KIM *et al.*, 2005, KULICKE *et al.*, 1989; SAMANTA *et al.*, 2013, SELLIN *et al.*, 1982).

Particularmente, trabalho no suporte técnico à produção de petróleo e já apliquei alguns produtos redutores de arrasto existentes no mercado para reduzir a pressão necessária no escoamento de petróleo entre plataformas. O objetivo sempre foi o de aumentar a capacidade de escoar o petróleo por um oleoduto que tenha atingido sua capacidade máxima. Em todos os casos, tendo o suporte do fabricante, obtivemos considerável sucesso. A capacidade de evitar lucros cessantes pela utilização dessa tecnologia nesses cenários limítrofes, a redução do custo energético e de manutenção pela redução do número de bombas num sistema ou pela redução da pressão de trabalho promovendo a redução da vibração e do desgaste e, mais ainda, a possibilidade de redução considerável no custo de investimento, se sua aplicação contínua for prevista no projeto, são vantagens significativas à indústria de petróleo. Sou testemunha desse interesse no desenvolvimento da tecnologia de aditivos redutores do arrasto e temos incentivado os

fabricantes de produtos químicos a investir na sua produção local. Mas por enquanto, a produção em território brasileiro não existe e os custos com a importação e a manutenção de estoques tornam o uso muito limitado pelas empresas sediadas no Brasil. Pelo que observo o avanço dos fabricantes ainda é tímido e a dificuldade de se realizar a produção aqui no Brasil ainda é um obstáculo à promoção de avanços práticos.

A literatura atual apresenta muitos avanços no conhecimento do fenômeno, através de modelos clássicos (VIRK *et al.*, 1967, LUMLEY, 1969, GENNES, 1990), assim como na área de simulação computacional, traduzindo consideravelmente bem o fenômeno com soluções inteligentes para resolver o amortecimento na subcamada limite viscosa (CRUZ & PINHO, 2003, IACCARINO *et al.*, 2010) e observações pertinentes quanto ao comportamento do fluido viscoelástico em meio ao complexo fenômeno da turbulência (PEREIRA *et al.*, 2013, SAMANTA *et al.*, 2013).

Há também um consenso sobre as características principais que as macromoléculas redutoras de arrasto precisam apresentar para que o fenômeno seja observado. Para uma dada condição térmica, as principais características dos polímeros redutores de arrasto são possuir uma cadeia molecular altamente linear e de muito alta massa molar, da  $10^6$ g/mol, ter significativo comportamento viscoelástico, afinidade com o meio (solvente) para obter maior mobilidade e espectro de tempo de relaxação na ordem do inverso da frequência dos vórtices antes de atingirem a escala de dissipação de energia cinética na cascata de Kolmogorov (MORGAN & MCCORMICK, 1990, RODRIGUEZ *et al.*, 2015, ROUSE, 1953, ZIMM, 1956).

Modelos cada vez mais complexos para prever o comportamento das tensões de fluidos não newtonianos são descritos na literatura (CRUZ & PINHO, 2003, IACCARINO *et al.*, 2010, MORGAN & MCCORMICK, 1990, SAMANTA *et al.*, 2013, ZHANG *et al.*, 2018). DNS tem sido utilizado para identificar as características estatísticas das camadas limite turbulentas na presença de concentrações uniformes de polímero e as discussões destas observações sob a luz dos resultados experimentais têm auxiliado os pesquisadores a entender como ocorre o mecanismo de transferência de energia entre o polímero e a turbulência (IACCARINO *et al.*, 2010, SAMANTA *et al.*, 2013). Foi com base em estudos numéricos que se sabe atualmente, por exemplo, que as estruturas turbulentas levam algum tempo para se rearranjarem e alcançarem sua forma final após interagirem com uma considerável deformação do polímero. Ainda assim, considera-se um enorme obstáculo à modelagem da redução do arrasto promovido por polímeros a degradação mecânica que esses aditivos sofrem durante o escoamento

turbulento, devido a forte conexão interdisciplinar entre a química e a mecânica dos fluidos (PEREIRA *et al.*, 2013). Esta degradação inclui novas variáveis a um problema que já é muito complexo, tais como a polidispersão e a concentração que se alteram com o tempo e que também são afetadas pela temperatura, pela taxa de cisalhamento, etc..

Há muito que se estudar a fim de aliar todo o conhecimento num modelo de predição completo, unindo as características do fluido e suas interações moleculares com os modelos mecânicos do comportamento viscoelástico do fluido no escoamento turbulento, sem se esquecer da necessidade do modelo consumir tempo e recurso computacional razoável, o que também é, por si só, um grande desafio à modelagem.

A linha de pesquisa a qual este trabalho está inserido está focada no avanço de modelos de turbulência no escoamento de fluidos aditivados com substâncias redutoras do atrito hidrodinâmico. O desenvolvimento desses modelos e sua validação dependem da observação do fenômeno sob condições bem controladas em experimentos utilizando substâncias de reconhecido efeito na literatura, como o Carboximetilcelulose (CMC) na água e o poliisobutileno (PIB) no óleo.

A proposta do presente estudo experimental é avaliar o comportamento reológico de misturas de PIB de alta massa molar em diferentes concentrações utilizando técnicas de reometria rotacional para entender como as características reológicas podem impactar no fenômeno de redução de arrasto. Além dos efeitos de concentração e massa molar, também será investigado o uso de solvente na dispersão prévia desses polímeros e, num circuito fechado de escoamento, será avaliado o potencial de redução de arrasto e a degradação mecânica induzida pela turbulência. Os PIB foram selecionados neste trabalho por serem macromoléculas de reconhecida capacidade viscoelástica e produção do fenômeno no escoamento em meio oleoso.

O projeto foi desenvolvido nos ambientes: Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos (NIDF) e Laboratório de Instrumentação Aplicada a Petróleo (LIAP) da COPPE, e Laboratório do Departamento de Engenharia Química (LADEQ) da Escola de Química.

# 2 Objetivo

## 2.1 Objetivos gerais

Avaliar experimentalmente o fenômeno de redução de arrasto e os efeitos da degradação de soluções poliméricas, produzidas com poliisobutileno (PIB) durante o escoamento turbulento. Adicionalmente, analisar os efeitos da pré-dispersão do PIB em solventes escolhidos através do parâmetro de solubilidade de Hildebrand.

## 2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o comportamento reológico das soluções poliméricas preparadas com duas diferentes massas molares de PIB;
- Estudar o efeito da pré-dispersão do PIB em alguns solventes verificando, principalmente:
  - O tempo de preparação da dispersão do PIB nos solventes estudados;
  - A solubilização da pré-dispersão do PIB produzida com os solventes estudados em óleo mineral básico;
- Comparar o efeito da presença de PIB no comportamento reológico das misturas sobre os módulos elástico e viscoso em testes oscilatórios;
- Avaliar em circuito experimental de escoamento a redução de arrasto utilizando soluções poliméricas produzidas pelo método de dispersão de PIB em óleo mineral que se apresentar mais eficiente;
- Verificar a existência de degradação mecânica sobre as amostras estudadas no circuito fechado de escoamento.



### 3 Levantamento bibliográfico

Em 1948 o químico britânico B. A. Toms publicou um artigo onde foram relatadas suas observações sobre um fenômeno de redução do atrito, em que uma solução de poli(metil metacrilato) – PMMA – diluído em cloreto de fenila produziu menor resistência ao escoamento turbulento do que o solvente puro (LEUCHTAG, 1978; SHENOY, 1984). Posteriormente, Mysels (1949 *apud*: KULICKE *et al.*, 1989) publicou um artigo em que relatou que também na época da segunda guerra mundial observou este mesmo fenômeno quando aplicou um sabão de alumínio no bombeamento de gasolina (KULICKE *et al.*, 1989).

No entanto, somente a partir de 1959 as primeiras teses sobre o fenômeno começaram a ser publicadas, incluindo observações com soluções não-newtonianas como as de carboximetilcelulose (CMC) em água. No mesmo período, publicações da área do petróleo relatam o “efeito Toms”, assim denominada a descoberta de Toms, em soluções de goma Xantana muito utilizadas em operações de perfuração de poços e fraturamento de reservatórios de petróleo (KULICKE *et al.*, 1989; SHENOY, 1984).

Muitos processos de escoamento de fluidos e de materiais em suspensão são utilizados na indústria, com altos consumos de energia, de modo que este fenômeno de redução do arrasto ganhou importância e passou a ser estudado para aplicação em vários cenários tais como no hidrotransporte de minérios, de sólidos na perfuração de poços, em sistemas hidráulicos como os de manejo de águas pluviais, de irrigação de campo, e sistemas de esgoto, e em recobrimento de cascos de navios, submarinos e torpedos (SELLIN *et al.*, 1982, BROSTOW *et al.*, 2007).

Destas aplicações práticas, há sempre duas muito relatadas. Uma foi um trabalho realizado com bombeiros de Nova York – FDNY – em que foi demonstrado num experimento bem prático e visual que o jato de água contendo uma pequena quantidade de polióxido de etileno (PEO) possui maior alcance, atinge uma maior distância, do que o jato de água comum. O experimento era bastante visual, pois foi montado utilizando uma única bomba alimentando duas mangueiras idênticas, de mesmo material e formato, comprimento e diâmetro, sendo a única diferença um ponto de injeção do PEO em uma das mangueiras a jusante da bomba. A Figura 1 é a foto histórica feita da apresentação desse experimento.



**Figura 1:** Foto histórica do experimento da FDNY de redução do atrito no jato d'água com a adição de Polióxido de Etileno (BAYLEY & KOLESKE, 1976).

A outra aplicação prática trata do uso de polióxido de butileno em pequenas doses no bombeio de cargas de petróleo no oleoduto de 1287km de extensão desde a Baía de Prudhoe até Valdez no Alasca. Este caso é notório por relatar a redução do atrito no escoamento da ordem de 28% e por informar que existe uma perda de eficiência devido à degradação das macromoléculas, sendo necessária a reaplicação do produto redutor de arrasto a cada 100km (HOYT, 1972 *apud*: KULICKE *et al.*, 1989).

Logo, ficou caracterizado que o fenômeno de redução do arrasto ocorre quando grandes mudanças no escoamento são causadas pela presença ínfima (da ordem de partes por milhão) de aditivos (SHENOY, 1984). E essa diminuição do coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach pode produzir tanto uma diminuição da taxa de perda de pressão ao longo de um tubo como a redução da energia necessária para se deslocar um fluido ou impulsionar um objeto através do meio aditivado (VIRK *et al.*, 1967 e MORGAN & MCCORMICK, 1990). Do ponto de vista hidrodinâmico, o fenômeno deve influenciar a estabilidade da região laminar na camada limite do escoamento, afetando a transição para a região turbulenta e alterando a formação e quebra de vórtices, o transporte turbulento de calor, massa e momento, e as flutuações de pressão de superfície (SREENIVASAN & WHITE, 2000). Desta forma, a partir de uma condição limite de transição do regime de escoamento, quando as instabilidades das camadas de fluido começam a se tornar importantes, ocorre alguma interação dessas substâncias com o escoamento intercedendo

na formação e dissipação da energia através dos vórtices comuns ao regime turbulento (HERSHEY & ZAKIN, 1967).

Diversos sistemas fluidos aditivados com diferentes classes de substâncias capazes de apresentar redução do arrasto são reportados, sendo que os mais utilizados são os polímeros, os surfactantes e sistemas micelares (que podem conter outros materiais de ação redutora de arrasto), mas também suspensões de partículas insolúveis, tais como fibras e grãos finos (MORGAN & MCCORMICK, 1990). Alguns têm origens naturais, tais como os polissacarídeos produzidos por algas (SHENOY, 1984), o DNA e o colágeno (BERMAN, 1978), e algumas gomas (gomas guar e xantana, por exemplo), porém para se obter alguma eficiência relevante com esses materiais naturais é preciso maior concentração do que os polímeros sintéticos (SELLIN *et al.*, 1982).

Estes agentes redutores de arrasto são utilizados em diversas concentrações para acelerar significativamente o escoamento (BROSTOW *et al.*, 2007), contudo a maioria dos estudos são desenvolvidos com polímeros em pequenas quantidades, da ordem de partes por milhão, e normalmente apresentam cadeia molecular altamente linear e de elevada massa molar, da ordem de  $10^6$ g/mol, tanto para sistemas aquosos como para sistemas oleosos (SHENOY, 1984).

**Tabela 1:** Principais polímeros redutores de arrasto (TRUONG, 2001).

Polímeros para soluções polares	Polímeros para soluções oleosas
Poli(óxido de etileno)	Poliisobutileno
Poliacrilamida	Poliestireno
Goma Guar	Poli(metil-metacrilato)
Goma Xantana	Poli(dimetilsiloxano)
Carboximetilcelulose	Poli(cis-isopreno)
Hidroxietilcelulose	

Típicos polímeros que produzem redução de arrasto em solução diluída são apresentados na Tabela 1, sendo que a Poliacrilamida (PAM) e o Polióxido de etileno (PEO ou PEG) são os que produzem os melhores índices de redução do arrasto em sistemas aquosos, sendo por isso os mais estudados (LITTLE & WIEGARD, 1970; KENIS, 1971), enquanto que os polímeros poliisobutileno (PIB) e poliestireno (PS) são normalmente estudados em sistemas oleosos devido a sua importância nos sistemas de

bombeamento de petróleo e derivados (KIM *et al.*, 2005). Dependendo das condições do escoamento, podem ser observados até 80% de redução do atrito hidrodinâmico em laboratório (KENIS, 1971; BAILEY & KOLESVE, 1976). No entanto, a eficiência dos polímeros na redução do arrasto também depende de outras variáveis importantes do sistema, tais como a qualidade do solvente e a temperatura, uma vez que estas alteram a conformação macromolecular e, conseqüentemente, a interação das cadeias com a turbulência. Com isso, KIM *et al.* (2005) observaram que a eficiência na redução do atrito hidrodinâmico é maior quanto melhor for a solubilidade do polímero no meio.

Modelos baseados em mecânica dos fluidos não levam em conta as interações polímero-solvente e por isso não obtêm sucesso. ZAKIN & HUNSTON reportaram que solventes ruins para polímeros requerem maiores concentrações de DRA e também que a degradação mecânica nesses solventes é mais rápida (ZAKIN & HUNSTON, 1978 *apud*. BROSTOW *et al.*, 2007).

Em 1980, um modelo mecânico estatístico descreveu a existência de dois tipos de sequências poliméricas: uma boa, orientada às linhas de corrente e fortemente solvatada e outra pobre, mal orientada e pouco solvatada. O modelo conseguiu explicar os fenômenos observáveis, e em 1999 foram realizadas medições acústicas de solvatação e as eficiências na redução do arrasto mostraram que, de fato, o grau de solvatação acompanhava a tendência da eficiência (BROSTOW *et al.*, 2007).

Simulações computacionais de dinâmica Browniana de soluções diluídas de polímeros mostraram a existência de grandes faixas de heterogeneidades, em que as cadeias poliméricas sob altas taxas de cisalhamento e em curtos períodos de tempo se tornavam menos emaranhadas e entrelaçadas, aumentando desta forma o volume de permeação do solvente no polímero, estando em acordo com os experimentos realizados por KULICKE *et al.* (1989 *apud*. BROSTOW *et al.*, 2007).

Muitos são os estudos que focam no tamanho de cadeia dos polímeros devido aos seus efeitos sobre a eficiência na redução do arrasto, o qual ocorre somente a partir de uma massa molecular mínima e então cresce até atingir uma eficiência máxima. Por isso, também são muito estudados os efeitos da degradação mecânica durante o cisalhamento, pois provoca a diminuição da massa molecular e, com isso, a perda da eficiência (MORGAN & MCCORMICK, 1990).

Aumentar a concentração de aditivo polimérico permite aumentar a eficiência, mas tem um limite em que ocorrem sobreposições significativas de cadeias poliméricas,

fenômeno observado e explicado por simulações computacionais de dinâmica Browniana (BROSTOW *et al.*, 2007).

Na busca por um aditivo polimérico mais resistente à degradação mecânica, BROSTOW *et al.* (2007) decidiram enxertar sobre a Amilopectina, um polissacarídeo com ação redutora de arrasto, a Poli(acrilamida a fim de se melhorar o volume de solvente permeado no aditivo, de modo a aumentar sua eficiência e sua resistência à degradação mecânica. A contribuição das cadeias laterais enxertadas melhora a solvatação do polímero como um todo e também aumentam a resistência da cadeia principal à cisão causada pela turbulência. BROSTOW *et al.* (2007) clamam terem conseguido diminuir significativamente a taxa de degradação através desse processo de enxertamento, porém os resultados são todos relativos e não são apresentados os resultados de redução do arrasto medidos para cada aditivo aplicado à água.

Outrossim, na busca por soluções redutoras de arrasto imunes à degradação mecânica, se destacam os sistemas micelares do tipo *worm-like*, que são estruturas macromoleculares em formato de tubos flexíveis constituídos por surfactantes catiônicos em associação a alguns co-solutos e que apresentam bons resultados de redução do arrasto na literatura, podendo atingir até 60%. Sua virtual invulnerabilidade à degradação mecânica ocorre devido à capacidade dessas estruturas micelares gigantes se reconstruírem naturalmente no meio após sofrerem o cisalhamento devido ao escoamento turbulento, e assim recuperam sua eficiência redutora de atrito no momento seguinte (COOPER-WHITE *et al.*, 2002).

A degradação mecânica desses diversos aditivos químicos pode ser avaliada em função do tempo, temperatura, taxa de cisalhamento, concentração e massa molecular, fatores que devem ser considerados no estudo e simulação da perda de eficiência devido à degradação (ZHANG *et al.*, 2018).

Num recente estudo, ZHANG *et al.* (2018) propõe que a degradação é uma reação química de primeira ordem baseada na massa molecular e uma equação de Arrhenius modificada é utilizada para prever a constante de reação. Apesar de ser considerada uma equação mais empírica do que mecanicista, ela se utiliza do artifício da simplificação macroscópica  $R.T$  para a constante de Boltzmann, que define a média relativa da energia cinética das partículas em função da temperatura no meio gasoso, e foi verificada experimentalmente, respondendo muito bem em sistemas que podem ser termodinamicamente simplificados à equação de estado dos gases ideais  $PV = nRT$ .

Nesta abordagem e considerando vários estudos envolvendo taxas de degradação polimérica, o modelo de ZHANG *et al.* (2018) parte do relacionamento clássico  $DR_{(t)} = DR_{(0)}e^{-\kappa t}$ , onde define  $\kappa$  sendo, exatamente, a constante de reação da degradação. A fim de apresentar um modelo que considera todas as variáveis pertinentes, o  $\kappa$  pode compreender todos os parâmetros através de um modelo de interação estendido, equação 1, e aplicado sobre a equação de Arrhenius,  $\kappa = ae^{-\frac{E_A}{RT}}$ . Os novos parâmetros, então, são assim relacionados:

$$\kappa_0 = (a_0 + a_1\dot{\gamma} + a_2C + a_3\dot{\gamma}^2 + a_4C^2 + a_5C\dot{\gamma})e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (1)$$

considerando  $C$  a concentração e  $\dot{\gamma}$  a taxa de cisalhamento. A temperatura está contida na equação original de Arrhenius. O parâmetro de massa molecular entra numa correlação para  $DR_{(0)}$ , que é desdobrada como o produto de suas variáveis dependentes,  $C, \dot{\gamma}, T$  e  $Mw$ , onde todos os coeficientes precisam ser determinados experimentalmente.

Teorias sobre como o fenômeno de redução do arrasto ocorre tem sido propostas, mas nenhuma é aceita integralmente. Algumas delas consideram que as moléculas desses aditivos interferem ou na produção ou no desenvolvimento e transporte da turbulência, e a maioria considera efeitos de parede, pois foram desenvolvidos em sistemas tubulares (MORGAN & MCCORMICK, 1990). Mas de modo geral, essas teorias podem ser classificadas em termos das escalas consideradas nos trabalhos:

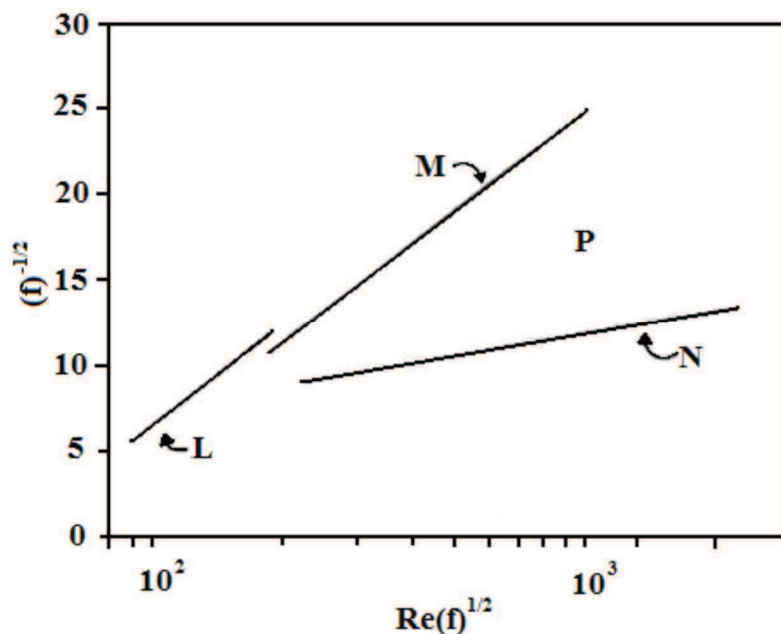
- Escala espacial: relacionam o fenômeno com o comprimento, o raio de giro ou raio hidrodinâmico das moléculas poliméricas;
- Escala temporal: relacionam o fenômeno com o tempo de relaxação da molécula ou com a frequência com que elas se estiram e contraem;
- Escala energética: relacionam o fenômeno à possibilidade das moléculas interagirem com a escala de frequências vorticiais da turbulência, alterando o fluxo de energia (MORGAN & MCCORMICK, 1990).

Um dos primeiros modelos, e focado na escala espacial, foi o proposto por VIRK *et al.* (1967). Nesse trabalho foram definidas quatro regiões distintas para o comportamento de soluções poliméricas redutoras de atrito hidrodinâmico em tubos num diagrama de Prandl-von Karman (Figura 2).

No início, na região de baixo Reynolds, apresenta-se o regime laminar do escoamento (L), em que a solução polimérica apresenta comportamento similar ao comportamento do solvente puro (MORGAN & MCCORMICK, 1990; PERLIN & CECCIO, 2014):

$$(f_F)^{-1/2} = \frac{Re(f_F)^{1/2}}{16} \quad (2)$$

onde  $f_F$  é o coeficiente de atrito de Fanning.



**Figura 2:** Regimes de escoamento em tubulações cilíndricas segundo Virk (MORGAN & MCCORMICK, 1990). L-regime laminar, N-regime turbulento, M-regime de máxima redução de atrito, P-região em que uma curva de comportamento para um fluido aditivado com polímero ocupa e varia em função das propriedades das soluções poliméricas.

A segunda é uma curva que descreve o comportamento para o solvente puro (N) onde o comportamento do fluido já sofre alterações devido à rugosidade, geometria e perturbações do escoamento, obedecendo a seguinte relação:

$$(f_F)^{-1/2} = 4,0 \log_{10} Re(f_F)^{1/2} - 0,4 \quad (3)$$

A terceira curva definida por Virk *et al.* (1967 *apud*: PERLIN & CECCIO, 2014) é o regime de máxima redução de atrito (M), assíntota onde as mudanças nos parâmetros da solução polimérica já não podem mais aumentar a eficiência da redução de atrito. A curva é descrita por:

$$(f_F)^{-1/2} = 19,0 \log_{10} Re(f_F)^{1/2} - 32,4 \quad (4)$$

Por sinal, a quarta região define o comportamento para o fluido composto por solvente com polímero (P) e varia em função das propriedades das soluções poliméricas, como concentração, solvatação e massa molar, e deve se apresentar como uma curva entre as curvas N e M, segundo a relação (MORGAN & MCCORMICK, 1990; PERLIN & CECCIO, 2014):



$$(f_F)^{-1/2} = (4,0 + \delta) \log_{10} Re(f_F)^{1/2} - 0,4 - \delta \log_{10} \sqrt{2}dW^* \quad (5)$$

onde  $\delta$  é uma medida da quantidade de redução de atrito e é definida por:

$$\delta = \left( \frac{\partial^2 \sqrt{f_F}}{\partial \log_{10} Re^2 \sqrt{f_F}} \right)_p - 4,0 \quad (6)$$

e  $W^*$  é o número de onda em que os efeitos de redução do arrasto se inicia, denominado como número de onda de dissipação de energia ( $W^*$ ), um parâmetro adimensional característico da turbulência e definida por uma função da tensão de cisalhamento crítica na parede do tubo (PERLIN & CECCIO, 2014):

$$W^* \equiv \frac{1}{\mu_s} \sqrt[2]{\frac{\tau_w^*}{\rho}} \quad (7)$$

onde  $\tau_w^*$  é a tensão de cisalhamento crítica na parede,  $\rho$  é a massa específica do polímero,  $\mu_s$  é a viscosidade do solvente.

Como dito acima, a quarta região depende também das propriedades das soluções poliméricas. VIRK (1975) sugeriu o relacionamento entre o raio de giro ( $R_g$ ) da molécula de polímero livre num solvente e a tensão de cisalhamento crítica na parede do tubo:

$$R_g^3 \tau_w^* = \Omega_t \quad (8)$$

onde  $\Omega_t$  é uma constante que é única para cada par polímero/solvente.

Neste trabalho, Virk também sugere uma previsão qualitativa do início da redução do arrasto relacionando o raio de giro da molécula, que é uma medida relativa do comprimento da molécula e sua interação com o solvente, com o comprimento característico do vórtice turbulento com o qual ele interage,  $\Gamma$ :

$$\Gamma = \left( \frac{2R_g}{\mu_p} \right) \left( \frac{\tau_w^*}{\rho} \right) \cong 0,015 \quad (9)$$

onde  $\mu_p$  é a viscosidade do polímero.

Esta relação é útil para a previsão qualitativa do início de redução do arrasto para diferentes tipos de soluções poliméricas (MORGAN & MCCORMICK, 1990).

Na escala temporal, há o modelo proposto por LUMLEY (1969), que sugere que o início da redução do atrito hidrodinâmico ocorre quando a relação entre o tempo de relaxação da molécula polimérica reductora do arrasto e a frequência do vórtice com que ela interage satisfaz a igualdade:

$$\lambda_1 \tau_w^* = \frac{Mv \cdot \mu_s \cdot [\mu]}{2,367RT} = 1,0 \quad (10)$$

onde  $\lambda_1$  é o tempo de relaxação da macromolécula,  $Mv$  é a massa molecular viscosimétrica média do polímero,  $[\mu]$  é a viscosidade intrínseca do polímero,  $R$  é a constante dos gases e  $T$  é a temperatura.



Com isso, Lumley sugere uma taxa de cisalhamento crítica capaz de promover a expansão das moléculas e argumenta que deve ocorrer fora da camada limite laminar, em que abaixo desta condição os “novelos” da cadeia polimérica não se deformam muito e a viscosidade extensional não aumenta significativamente. No entanto, na região turbulenta as moléculas estão mais sujeitas à expansão macromolecular, produzindo uma considerável viscosidade elongacional que pode interagir com os vórtices turbulentos, preferencialmente com as de menor dimensão, e com isso reduzir o transporte energético da turbulência para as camadas viscosas dissipativas. Em outras palavras, há um espessamento da subcamada viscosa devido ao aumento da viscosidade efetiva da solução e, conseqüentemente ocorre a redução do arrasto (IACCARINO *et al.*, 2010). Desta forma, a turbulência remanescente seria composta por vórtices de maiores dimensões, cujo comprimento máximo estaria relacionado à expansão da camada limite turbulenta até o centro do tubo (LUMLEY, 1969).

Considerando a natureza transiente da extensão molecular e se utilizando dos princípios da viscosidade extensional, RYSKIN (1987) apresentou o modelo “iô-iô”, em que as macromoléculas, inicialmente numa conformação enovelada, se desenrolam quando submetidas a mudanças no escoamento com características extensionais. Nestas circunstâncias, a porção central da cadeia polimérica se alinha ao escoamento enquanto que as pontas permanecem enoveladas, promovendo uma redução significativa da viscosidade local. Da mesma forma, quando a molécula pode se contrair novamente ao seu estado inicial, de menor energia, ela volta a se enovelar, promovendo o aumento da viscosidade local.

Embora com uma visão bem mais simples do comportamento molecular, décadas antes ROUSE (1953) considerou os polímeros como constituídos por um par de esferas conectadas por molas hookeanas para o desenvolvimento de seu modelo. Desta forma, o escoamento seria a causa da deformação e alinhamento do polímero às linhas de corrente, com o armazenamento de energia nas molas e conseqüente diminuição da entropia no sistema. E a restituição da energia ao meio se daria pelo movimento browniano das esferas e retorno da mola à sua forma de menor energia, com aumento na entropia do sistema. A este modelo ZIMM (1956) contribuiu com as interações hidrodinâmicas intermoleculares, de modo que o cisalhamento sobre uma molécula pode afetar uma molécula vizinha, promovendo um comportamento macromolecular coordenado. Estes movimentos coordenados produzem um espectro de relaxação molecular correspondentes aos modos vibracionais moleculares, definido pela relação:

$$\lambda_i = \frac{Mv.\mu_s.[\mu]}{0,586RT\kappa_i} \quad (11)$$

onde  $\kappa_i$  é o autovalor do  $i$ -ésimo modo de relaxação coordenado da macromolécula.

De acordo com Zimm, a contribuição para o tempo de relaxação é maior quanto menor for modo vibracional  $i$  e diminui rapidamente para modos vibracionais maiores. Logo, o modo vibracional de maior contribuição é aquele que corresponde ao movimento coordenado de todos os segmentos envolvidos ( $i = 1$ ) e seu autovalor também se reduz a  $\kappa_i = 1$ . Podemos observar que existe grande semelhança entre a equação 11 e a equação 10 sugerida por Lumley, permitindo conhecer ainda mais sobre a taxa de cisalhamento crítica para início da redução do arrasto provocado por aditivos poliméricos.

Assim, para que o polímero interaja com os vórtices e se alinhe no escoamento turbulento promovendo a redução do atrito hidrodinâmico, é necessária uma taxa de cisalhamento que seja igual ou superior à frequência de estiramento molecular do polímero  $1/\lambda_1$  (GASON *et al.*, 2001).

Décadas depois do desenvolvimento da teoria de Rouse-Zimm, GENNES (1990) postulou sua teoria elástica do fenômeno de redução do arrasto a partir do modelo de Lumley, porém com uma visão da fluidodinâmica sem a presença de paredes nos limites do fluido, de modo que as flutuações de velocidade ocorrem num meio homogêneo e isotrópico. Assim, em escoamento turbulento, as flutuações de velocidade fluem tridimensionalmente e se dispersam por toda faixa de possibilidades de números de onda. Desta forma, a energia cinética do fluido é transportada desde as maiores escalas e a dissipação da energia ocorre nas menores escalas, onde a viscosidade é dominante.

Esta hierarquia de movimentos vorticais já foi descrita pela cascata de Kolmogorov, que diz respeito a escoamentos turbulentos plenamente desenvolvidos nestas mesmas condições de homogeneidade e isotropia. Ao longo do processo de transferência de energia para escalas menores, informações pertinentes ao comportamento não homogêneo e não isotrópico dos mecanismos geradores de energia nas grandes escalas se perdem e ao atingir as menores escalas, o fluido passa a ser dominado por forças viscosas e passa a ser independente da geometria do sistema e das forças que a geraram nas grandes escalas (SCHLICHTING, 1979). Esta teoria é válida para longe do bordo e em escalas muito pequenas, mas foi baseada em experimentos e observações.

Tabor & de Gennes (1986 *apud*: GENNES, 1990) propuseram existir uma relação entre a frequência de formação de vórtices dada por  $U(r)/r$ , e o inverso do tempo de relaxação macromolecular,  $1/\lambda_1$ , obtido pela teoria de Zimm (Equação 11), que descreve

a frequência de estiramento e contração da cadeia polimérica. Desta forma, se forem considerados vórtices de raios grandes as frequências  $U(r)/r$  serão menores do que  $1/\lambda_1$ , não ocorrendo contribuição significativa do polímero no meio. No entanto, deve existir uma condição crítica, numa escala de  $r^*$ , em que ambas as frequências estão na mesma escala ou mesmo se igualam.

Assim, pelas observações de Zimm os efeitos viscoelásticos responsáveis pela ocorrência do “efeito Toms” devem ocorrer em frequências maiores do que  $1/\lambda_1$ , o que pode ser traduzido por  $r < r^*$ .

Por outro lado, o intervalo da escala espacial em que é observado o fenômeno de redução do atrito hidrodinâmico deve estar limitado pelo tamanho dos vórtices dentro da cascata de Kolmogorov, isto é, acima da escala em que ocorre a dissipação da energia cinética e a partir da qual se inicia a deformação passiva da cadeia polimérica,  $r^* > r > r^{**}$ , podendo ser também denominada como região passiva. Logo, nas escalas em que os vórtices têm baixas frequências ( $r > r^*$ ) o polímero não será deformado, pois as frequências em que os estiramentos das cadeias ocorrem são maiores, e nas escalas que os vórtices têm altas frequências ( $r < r^{**}$ ) o limite elástico do polímero é atingido, apresentando assim um comportamento similar a um bastão rígido, podendo apenas apresentar efeitos de orientação no escoamento.

Portanto, segundo a teoria elástica de Tabor e de Gennes, haverá o truncamento da cascata, de modo que os vórtices, ao atingirem a escala dentro da região passiva, serão impedidos de se desenvolverem a vórtices menores, os quais são responsáveis pela dissipação da energia (SREENIVASAN & WHITE, 2000).

Muitas teorias atuais invocam modelos elásticos sobre as longas cadeias poliméricas, pois foi demonstrado que este processo inibe vórtices e suprime os mecanismos de sustentação da turbulência. Embora de Gennes tenha apresentado evidência de que é o comportamento elástico das cadeias poliméricas que inibem a produção de flutuações turbulentas nas menores escalas, não fica claro como se daria essa interação polímero/turbulência (SAMANTA *et al.*, 2013).

Simulação numérica direta (DNS) tem sido utilizada para identificar as características estatísticas das camadas limite turbulentas na presença de concentrações uniformes de polímero. Estas simulações apresentaram evidências de que o estiramento das cadeias poliméricas promove um mecanismo de atenuação do cisalhamento separando efetivamente a subcamada viscosa espessada do restante das camadas externas e suscitaram na comunidade científica discussões sobre como ocorre o mecanismo de

transferência de energia entre o polímero e a turbulência. Essas discussões sugerem que os polímeros são estirados ao consumir a energia que sustenta os vórtices na camada dissipadora enquanto que retorna parte da energia elástica ao se afastarem da parede, revigorando as estruturas de turbulência. O complexo mecanismo do ciclo da turbulência nas paredes gerado pela presença do polímero envolve um novo equilíbrio nas tensões de Reynolds: as tensões turbulentas normais à parede são atenuadas porque a maior parte da energia cinética flutuante é armazenada no estiramento das cadeias poliméricas e a liberação ocorre principalmente na direção da corrente, gerando fortes tensões anisotrópicas (IACCARINO *et al.*, 2010).

Recentemente, SAMANTA *et al.* (2013) apresentaram uma nova teoria, muito interessante, baseada num modelo para fluidos complexos que, sob altas taxas de cisalhamento, a turbulência não é apenas modificada, mas é suprimida e trocada por um tipo diferente de movimento desordenado, a turbulência elasto-inercial (EIT). Muitos investigadores reportam o efeito de atraso ou postergação da transição para a turbulência, porém alguns estudos reportam que a turbulência se inicia muito antes, um fenômeno denominado “turbulência precoce”. Observou-se que a EIT ocorre em números de Reynolds muito menores do que a turbulência Newtoniana e que as propriedades dinâmicas diferem significativamente, sendo controlada pelas tensões elásticas. Samanta e colegas demonstram em sua teoria que este estado suprime a turbulência Newtoniana e isso implica que a curva de máxima redução do arrasto (MDR) tem sua origem nesse mesmo fenômeno, onde a escala de atrito observada coincide com a denominada assíntota de máxima redução do arrasto, exibida por um grande número de fluidos viscoelásticos. Essas observações foram reproduzidas em DNS de escoamento de fluido viscoelástico e sugere que o novo tipo de instabilidade e a escala de atrito são características de fluidos viscoelásticos em escoamentos limitados por paredes e variam com a taxa de cisalhamento e não com o  $Re$ , de modo que em dutos de maior diâmetro as instabilidades ocorrerão em  $Re$  maiores.

## 4 Metodologia

O estudo aqui apresentado é experimental e busca observar o fenômeno da redução do arrasto provocado por aditivo polimérico em meio oleoso utilizando aparato próprio construído no laboratório e investigar os efeitos da alteração da massa molar do polímero, da alteração da concentração e da degradação do material ao longo do ensaio devido às suas características construtivas. Além disso, buscou-se verificar os efeitos de solubilidade do PIB no óleo relativamente à utilização de solventes mais afins ao polímero antes da solubilização no óleo, visto que o material polimérico é sólido nas condições ambiente e pretende-se verificar se a forma como ele é preparado para ser adicionado ao óleo pode afetar a sua efetividade como redutor de arrasto.

Na literatura existem, basicamente, dois métodos experimentais para pesquisas com redutores de arrasto: o primeiro é medindo a redução da perda de carga em tubulações sob diferentes condições e o segundo é através de aparatos de disco rotativo para investigar as características e os comportamentos dos aditivos químicos (PEREIRA *et al.*, 2013, ZHANG *et al.*, 2018). Neste trabalho utilizamos a primeira forma.

Para os estudos de solubilidade do material polimérico foi adotado o método reométrico, de cisalhamento rotacional e oscilatório, avaliando a variação de parâmetros reológicos diretamente relacionados aos efeitos do raio de giração das moléculas poliméricas no meio e os relacionados ao comportamento viscoelástico final das misturas. Com relação ao estudo do “fenômeno Toms”, o método adotado foi o de avaliação do escoamento turbulento em circuito fechado dotado de transdutores de pressão e temperatura e medidor de vazão, conforme adotado originalmente por Toms na publicação de suas observações e reproduzido por demais autores na literatura (HOYT, 1966; LITTLE, 1971; KULIK, 2001, PEREIRA *et al.*, 2013). Este método foi escolhido em detrimento dos métodos reológicos de discos rotativos devido à sua maior simplicidade de construção e menor tempo requerido para obtenção do aparato disponível para trabalho.

### 4.1 Planejamento experimental

O trabalho pode ser separado em duas partes:

- Ensaio de pré-dispersão do PIB em solventes orgânicos: Correspondem ao trabalho inicial do projeto, em que foram avaliados por reometria dois óleos minerais, dois PIB de massas molares diferentes ( $1.10^6$  e  $4.10^6$ g/mol), duas

concentrações de PIB disperso em óleo mineral (0,1 e 0,2% em massa), dois solventes para pré-dispersão do PIB (ciclohexano e querosene) e duas técnicas reológicas (regimes permanente e oscilatório de cisalhamento);

- Ensaio de escoamento turbulento: É o estudo do comportamento do fluido no circuito fechado de escoamento, envolvendo as atividades de coleta de parâmetros de controle (pressões, temperaturas e vazões) durante o escoamento no circuito e as atividades de avaliação reológica das amostras obtidas no circuito no início, no meio e no final do ensaio. Nesta parte, inclui-se também a avaliação da degradação sofrida pelo fluido, determinado através de um ensaio específico.

Para os ensaios propostos, foram planejadas as preparações de amostras conforme demonstra a Tabela 2.

**Tabela 2:** Soluções preparadas e avaliadas ao longo do projeto, correspondendo às siglas utilizadas nas figuras.

<b>Descrição das amostras</b>	<b>Sigla</b>
Vaselina	VAS
Vaselina + 0,1% m/m de PIB 1MM	V01PIB1MM
Vaselina + 0,2% m/m de PIB 1MM	V02PIB1MM
Vaselina + 0,1% m/m de PIB 4MM	V01PIB4MM
Vaselina + 0,2% m/m de PIB 4MM	V02PIB4MM
Vaselina + 2% m/m de Ciclohexano	VAS_2%C
Vaselina + 4% m/m de Ciclohexano	VAS_4%C
Vaselina + 0,1% m/m de PIB 1MM (pré-disperso em Ciclohexano)	V01PIB1MMC
Vaselina + 0,2% m/m de PIB 1MM (pré-disperso em Ciclohexano)	V02PIB1MMC
Vaselina + 0,1% m/m de PIB 4MM (pré-disperso em Ciclohexano)	V01PIB4MMC
Vaselina + 0,2% m/m de PIB 4MM (pré-disperso em Ciclohexano)	V02PIB4MMC
Óleo Mineral	OMB
Óleo Mineral + 0,1% m/m de PIB 1MM	O01PIB1MM
Óleo Mineral + 0,2% m/m de PIB 1MM	O02PIB1MM
Óleo Mineral + 0,1% m/m de PIB 4MM	O01PIB4MM
Óleo Mineral + 0,2% m/m de PIB 4MM	O02PIB4MM
Óleo Mineral + 1% m/m de Ciclohexano	OMB_1%C

<b>Descrição das amostras (continuação da tabela 2)</b>	<b>Sigla</b>
Óleo Mineral + 2% m/m de Ciclohexano	OMB_2%C
Óleo Mineral + 4% m/m de Ciclohexano	OMB_4%C
Óleo Mineral + 0,05% m/m de PIB 1MM (pré-disperso em Ciclohexano)	O005PIB1MMC
Óleo Mineral + 0,1% m/m de PIB 1MM (pré-disperso em Ciclohexano)	O01PIB1MMC
Óleo Mineral + 0,2% m/m de PIB 1MM (pré-disperso em Ciclohexano)	O02PIB1MMC
Óleo Mineral + 0,05% m/m de PIB 4MM (pré-disperso em Ciclohexano)	O005PIB4MMC
Óleo Mineral + 0,1% m/m de PIB 4MM (pré-disperso em Ciclohexano)	O01PIB4MMC
Óleo Mineral + 0,2% m/m de PIB 4MM (pré-disperso em Ciclohexano)	O02PIB4MMC
Óleo Mineral + 1% m/m de Querosene	OMB_1%Q
Óleo Mineral + 2% m/m de Querosene	OMB_2%Q
Óleo Mineral + 4% m/m de Querosene	OMB_4%Q
Óleo Mineral + 0,05% m/m de PIB 1MM (pré-disperso em Querosene)	O005PIB1MMQ
Óleo Mineral + 0,1% m/m de PIB 1MM (pré-disperso em Querosene)	O01PIB1MMQ
Óleo Mineral + 0,2% m/m de PIB 1MM (pré-disperso em Querosene)	O02PIB1MMQ
Óleo Mineral + 0,05% m/m de PIB 4MM (pré-disperso em Querosene)	O005PIB4MMQ
Óleo Mineral + 0,1% m/m de PIB 4MM (pré-disperso em Querosene)	O01PIB4MMQ
Óleo Mineral + 0,2% m/m de PIB 4MM (pré-disperso em Querosene)	O02PIB4MMQ

## 4.2 Materiais

Os materiais consumidos no desenvolvimento deste trabalho foram:

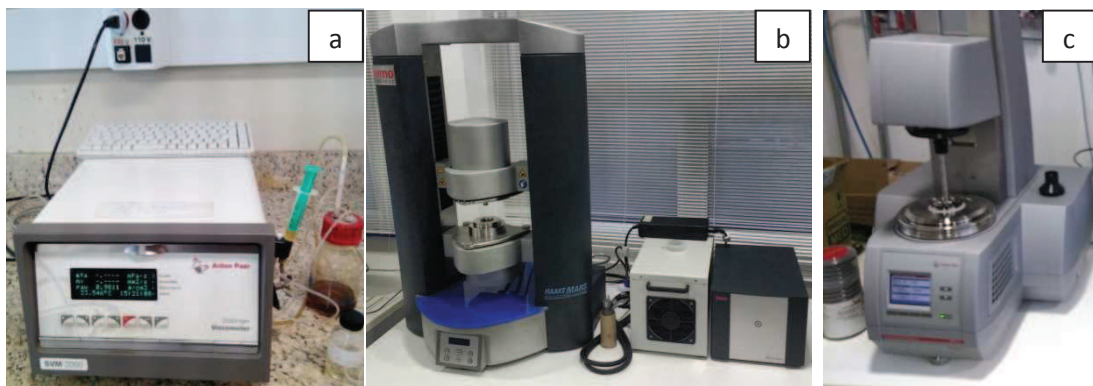
- Água com grau de qualidade tipo 2, produzida pelo LRAP/COPPE/UFRJ através de um purificador de água marca GEHAKA, modelo OS10LXE, que utiliza os recursos da osmose reversa, deionização e ultrafiltração.
- Dois polímeros Poliisobutileno, PIB, de massas moleculares médias ( $M_w$ , mássica) de 1,0 e  $4,2 \cdot 10^6 \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ , da marca Sigma-Aldrich, cujos grau de polidispersividade são, respectivamente, 1,667 ( $M_n = 0,6 \cdot 10^6 \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) e 1,355 ( $M_n = 3,1 \cdot 10^6 \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). Os polímeros foram utilizados tal qual foram recebidos e foram cortados em finos pedaços a fim de serem dispersos no óleo mineral ou solventes considerados neste trabalho.
- Vaselina Líquida (CAS 8020-83-5) da marca Dinâmica cuja densidade a  $25^\circ\text{C}$  é de  $839,6 \text{kg}/\text{m}^3$  e a viscosidade é de  $11,93 \text{mPa}\cdot\text{s}$  a  $40^\circ\text{C}$  utilizada para o estudo envolvendo os diferentes solventes para avaliação da pré-dissolução do PIB antes de incorporá-lo ao óleo.
- Óleo mineral básico, comercial, Lubrax OB 10 OBT onde a densidade a  $25^\circ\text{C}$  é de  $841,5 \text{kg}/\text{m}^3$  e a viscosidade é de  $11,85 \text{mPa}\cdot\text{s}$  a  $40^\circ\text{C}$ , utilizado para os ensaios no circuito fechado de escoamento.
- Solventes para a pré-dispersão do PIB: ciclo-hexano PA (CAS 110-82-7, Vetec), querosene (CAS 8008-20-6, Sigma-Aldrich) e diesel S10 obtido em posto de gasolina.

## 4.3 Equipamentos

- Capela, balanças, agitadores mecânicos e magnéticos, placas aquecedoras e demais facilidades laboratoriais, tais como béqueres, pipetas e vidros de relógio, utilizadas no LADEQ/EQ/UFRJ.
- Viscosímetro Anton Paar, modelo SVM 3000. Utilizado para realizar as medições de densidade das amostras, Figura 3.a, do LADEQ/EQ/UFRJ.
- Reômetro Thermo Fisher Scientific HAAKE MARS III do LIAP/COPPE/UFRJ com banho termostático TMTC acoplado, Figura 3.b, cujo controle é realizado pelo próprio reômetro. Utilizado nos ensaios reológicos rotativos, com geometrias do tipo cone e placa e cilindros concêntricos:
  - C60/1°TiL: cone tem 6cm de diâmetro e ângulo de  $1^\circ$ , placa lisa;



- CC25DIN Ti: Diâmetro interno do Becker de 27,198mm e diâmetro externo do spindle de 25,081mm.
- Reômetro Anton Paar MCR 502 do LIAP/COPPE/UFRJ com controle de temperatura próprio por célula Peltier e circulação forçada de ar, Figura 3.c. Utilizado nos ensaios reológicos oscilatórios com geometria do tipo cone e placa:
  - CP50-1: cone tem 5cm de diâmetro e ângulo de 1°, placa lisa.
- Circuito Fechado de Escoamento: Aparato experimental construído no piso térreo do NIDF/COPPE/UFRJ, Figura 4, para realização dos ensaios de redução de arrasto está descrito na seção 4.6 adiante.



**Figura 3:** a) Viscosímetro Anton Paar, modelo SVM 3000, b) Reômetro Thermo Fisher Scientific HAAKE MARS III com banho termostático TMTC e c) Reômetro Anton Paar MCR 502.

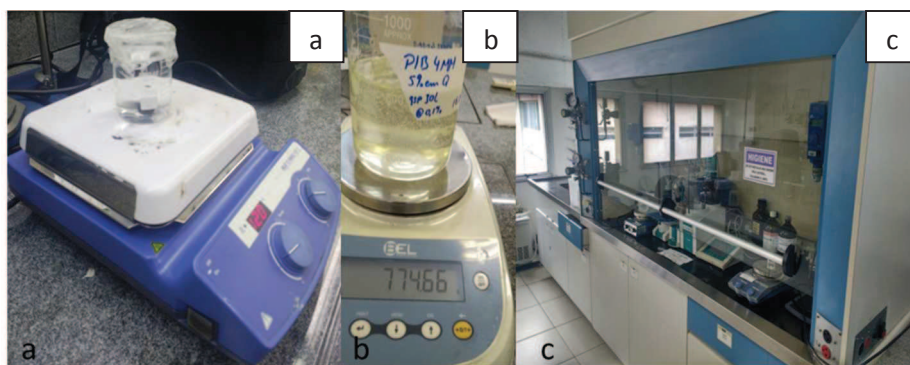


**Figura 4:** Vista da seção final do trecho em acrílico do circuito experimental. Ao fundo se vê o tanque de 70 litros e pela lateral esquerda se vê os capilares de transmissão de pressão até os transdutores, em catenária livre até a bancada.

#### 4.4 Preparação das soluções

O poliisobutileno de alta massa molar é um polímero comercializado em barras uniformes e para retirar a massa necessária à produção das soluções é necessário cortar as barras em pequenos pedaços sobre um vidro de relógio. Um frasco de vidro é pesado contendo uma barra magnética no seu interior, a fim de se conhecer a massa do conjunto e, então, diretamente nele são colocados alguns pedaços do polímero pesando-o antes de preparar a solução. Alternativamente, quando o volume das soluções era maior que 500mL, foi utilizado um agitador mecânico com hélice caudal axial de 4 pás com rotor ajustado na velocidade angular mínima.

Para a solução de polímero em óleo mineral, são preparadas as amostras de 1000 e 2000ppm em massa de PIB em óleo mineral pesando o volume de óleo necessário a partir da massa conhecida de polímero no frasco. Então, o frasco é levado para aquecimento a 60°C e deixado sob agitação por 8 a 24 horas, como ilustra a Figura 5.a.



**Figura 5:** Sistema de agitação magnética (a); balança analítica (b); Capela com sistema de exaustão (c).

Para a solução de polímero em solvente orgânico, volátil, preparou-se uma solução 5% em massa pesando o volume de solvente necessário a partir da massa conhecida de polímero no frasco, como ilustra a Figura 5.b. Então, o frasco é levado para aquecimento a 40°C e deixado sob agitação por 4 a 16 horas no interior de uma capela com exaustor, Figura 5.c. Observa-se que o processo de dissolução ainda é lento, porém mais rápido que no óleo mineral direto, e que o solvente vai evaporando durante o processo. Por isso, após a completa dissolução do polímero no solvente remanescente, o conjunto é novamente pesado. Conhecendo-se a massa do frasco com barra magnética e a massa inicial do polímero, pode-se obter a massa de solvente e realizar o ajuste da concentração para 5%

em massa. A partir dessa solução, foram preparadas as amostras de 500, 1000 e 2000ppm em massa de PIB em óleo mineral, agora por simples diluição.

Para referência de resultados sem a presença do polímero no caso das amostras preparadas a partir de PIB em solvente volátil, foram preparadas amostras de solvente em óleo mineral (1, 2 e 4% em massa), sem o polímero, para serem avaliados como contraprova das amostras contendo o polímero e o solvente e também para se avaliar algum possível efeito do solvente em relação ao óleo mineral puro.

#### **4.5 Medidas reológicas**

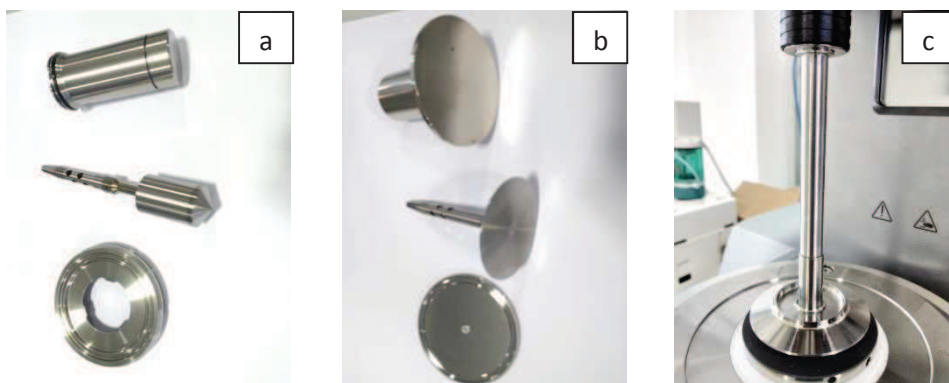
Nos estudos de dissolução do PIB em óleo mineral com ou sem o uso de solventes, foram adotadas condições de rotina em função do equipamento e software proprietário, da geometria e da técnica reológica utilizada, justificando a subdivisão desta seção.

##### **4.5.1 Cilindros concêntricos no reômetro HAAKE MARS III:**

Sistema de cilindros concêntricos composto por cilindro externo fixo (também denominado de Becker) modelo CCB25DIN Ti, cujo diâmetro interno tem 27,198mm, e cilindro interno acoplado ao motor do reômetro (também denominado de rotor ou *spindle*) modelo CC25DIN Ti com anilha, cujo diâmetro externo possui 25,081mm, altura de 37,630mm e possui um cone, conforme desenho de Mooney–Ewart, cujo ângulo é de 120°, Figura 6.a. Por padrão do reômetro Thermo Fisher Scientific HAAKE MARS III, o *gap* desta geometria, em relação ao fundo do Becker, é o de 5,300mm e o volume de trabalho é o de 16,1mL de amostra, inseridos através de seringa de 20mL sem agulha. Como a distância entre as superfícies cisalhantes,  $h$ , da geometria é maior que 2mm, os efeitos inerciais do fluido podem ser considerados muito pouco relevantes (CHHABRA & RICHARDSON, 2008).

O procedimento utilizado para a realização das curvas reológicas isotérmicas de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) versus taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) consistiu numa etapa de cisalhamento da amostra a  $100\text{s}^{-1}$  por 3 minutos para estabilização da temperatura do teste seguido da etapa de degraus de medição da tensão resultante em função da taxa de cisalhamento definida pelo reômetro. Durante a medição nesta segunda etapa, o reômetro realiza a leitura durante 30 segundos e verifica a variação da tensão, que foi ajustado como aceitável se for de  $\pm 0,05\%$ . Sendo aceitável, ele realiza algo em torno de 1000 leituras durante 3 segundos e integra os dados num único resultado. A taxa de cisalhamento a ser aplicada sobre a amostra era definida automaticamente considerando

o número de pontos solicitados e se a dispersão dos pontos seguia uma distribuição linear ou logarítmica. A temperatura era controlada diretamente pelo reômetro através de aquecimento por meio de célula Peltier e refrigeração por circulação forçada de água. As temperaturas adotadas para ensaios isotérmicos variaram de 20 a 60°C e eram realizadas sobre a amostra em sequência crescente. As substituições de amostra para realização das triplicatas apenas ocorreram após serem produzidas todas as curvas isotérmicas.



**Figura 6:** a) Cilindros concêntricos do reômetro HAAKE MARS III, b) Cone/placa do reômetro HAAKE MARS III e c) Cone/placa no reômetro Anton Paar MCR 502.

#### 4.5.2 Cone/placa no reômetro HAAKE MARS III:

Sistema de cone e placa composto por uma placa plana de superfície lisa fixa modelo CP60 Ti, cujo diâmetro efetivo tem 60,003mm, e um cone acoplado ao motor do reômetro modelo C60/1° Ti L, cujo diâmetro possui 60,003 mm, ângulo de 0,992° e ponta truncada aos 0,0520mm, Figura 6.b. Por padrão do reômetro Thermo Fisher Scientific HAAKE MARS III, o *gap* desta geometria é o de 0,0520mm e o volume de trabalho é o de 1,00mL de amostra, inseridos através de micropipeta de 1000μL.

O procedimento utilizado é similar ao aplicado sobre os cilindros concêntricos e, diferentemente do conjunto da Anton Paar, dispensa a necessidade de limpeza do excesso de material sobre a placa devido à existência de um poço coletor na placa após o seu diâmetro efetivo. Desta forma, o cone é ajustado sobre a amostra direto no *gap* de trabalho.

#### 4.5.3 Cone/placa no reômetro Anton Paar MCR 502:

Sistema de cone e placa composto por uma placa plana de superfície lisa fixa modelo CP50-1, cujo diâmetro é de 50,003mm, e um cone acoplado ao motor do reômetro modelo CP50-1, cujo diâmetro possui 50,003mm, ângulo de 0,992° e ponta truncada aos

0,102mm, Figura 6.c. Por padrão do reômetro Anton Paar MCR 502, o *gap* desta geometria é o de 0,102mm e o volume de trabalho é o de 0,57mL de amostra, inseridos através de micropipeta de 1000 $\mu$ L.

Os procedimentos dos ensaios oscilatórios realizados neste equipamento são dois: um para determinação da região de linearidade visco-elástica (LVER) das amostras e outro para ensaio de varredura de frequências. Em ambos procedimentos foi adotada a temperatura de 25°C. Foi também realizada uma etapa prévia de preparo das amostras, em que ela é colocada sobre a placa através da micropipeta, o cone é ajustado muito próximo do *gap* de ensaio e o excesso de material é removido utilizando-se uma espátula apropriada, fornecida com o reômetro. Então, o cone é movido até o *gap* e a amostra é cisalhada a 628s<sup>-1</sup> (2Hz) por 3 minutos na temperatura do teste seguido por um período de descanso da amostra, também de 3 minutos. Esta etapa é necessária para estabilização da temperatura sobre a amostra, destruição por cisalhamento do histórico de tensões extensionais provocada pela ponta da micropipeta e repouso para que as interações intermoleculares se restabeleçam no meio amostral.

#### **4.5.3.1 Varredura de amplitude/tensão para determinação da LVER:**

O primeiro procedimento é o de varredura de amplitude/tensão, para determinar a LVER, região ou faixa em que a deformação varia linearmente com a tensão de cisalhamento. Para isso, fixou-se a frequência em 0,1Hz a fim de se obter valores mais significativos de  $G'$  e, conseqüentemente, maior sensibilidade. Uma série de ensaios de varredura de amplitude foi realizada, variando a deformação desde 0,05 a 10%, e uma vez determinadas as LVER de cada amostra verificou-se qual seria a amplitude adequada à maioria das amostras.

#### **4.5.3.2 Varredura de frequência:**

O segundo procedimento é o de varredura de frequência e tem o objetivo de determinar a frequência angular tal que  $G' = G''$ , ou seja, a frequência a partir da qual o comportamento da amostra deixa de ser predominantemente elástico ( $G' > G''$ ) e passa a ser predominantemente viscoso ( $G' < G''$ ). Estima-se que a avaliação relativa dos resultados lidos permita inferir e classificar as amostras quanto ao seu caráter elástico e relacioná-los em função de suas características, tais como concentração, massa molar e presença de bons solventes para o PIB no meio amostral. Adotou-se o valor de 1,0% para a deformação máxima sobre as amostras, resultado do procedimento anterior, e variou-se a frequência de 0,05 a 100Hz. As substituições de amostra para realização das triplicatas



apenas ocorreram caso os resultados não se apresentassem reprodutivos, pois o procedimento garantia a destruição de históricos de tensão sobre a amostra.

#### **4.6 Circuito fechado de escoamento**

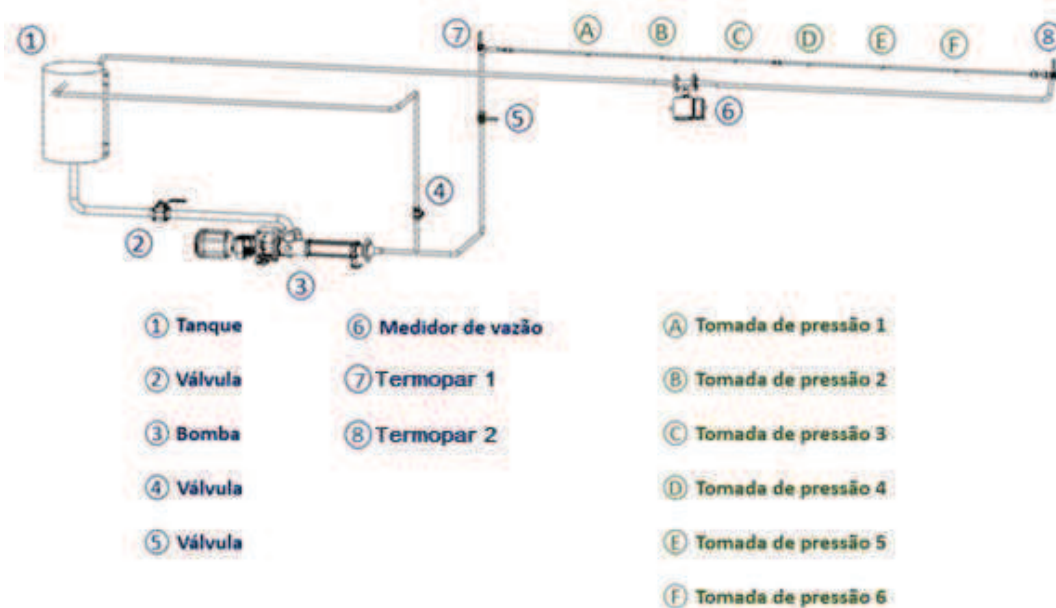
Um circuito fechado de escoamento foi planejado para o presente projeto pelo funcionário Alex Rodrigues de Andrade, do LADEQ/EQ/UFRJ e anteriormente no LIAP/COPPE/UFRJ, e foi construído, testado e certificado pelos alunos da Eng. Mecânica da UFRJ, Thiago Fulton e André Caffé, e pelo técnico mecânico do NIDF/COPPE/UFRJ, Alexandre Faustino. Este projeto de construção e montagem está detalhado na monografia de graduação do André CAFFÉ (2018) e contém todo o detalhamento de calibrações de equipamentos e tubulações realizadas.

O circuito foi montado no andar térreo do NIDF e é constituído por um tanque de óleo de até 70 litros, uma bomba de cavidades progressivas (BCP) NETZSCH NEMO® modelo NM031-BY de 2cv a jusante do tanque, um trecho linear de tubos de acrílico, onde estão instalados os pontos de controle de pressão acoplados a um sistema de mangueiras que os ligam a transdutores de pressão, e uma tubulação de aço no circuito de retorno ao tanque, no qual foi instalado um medidor de vazão do tipo engrenagens elípticas. Nos joelhos de aço à montante e à jusante da tubulação de acrílico foram instalados pequenos capilares de aço de modo intrusivo, porém colados à parede interna do material e com as pontas internas seladas. No joelho à montante introduziu-se o termopar responsável pela leitura da temperatura inicial, ou de entrada, do fluido na tubulação de acrílico, enquanto no joelho à jusante introduziu-se o termopar responsável pela leitura da temperatura final, ou de saída.

O tanque possui uma proveta vertical métrica com precisão de milímetros para controle do volume de solução por meio de uma curva de calibração previamente realizada com água. A saída da solução ocorre pelo fundo cônico do tanque, evitando pontos de estagnação de fluido, e a tubulação de retorno possui um trecho flexível no interior do tanque, para que o fluido retorne sem provocar espuma. Além disso, foram instaladas duas aletas no interior do tanque a fim de reduzir a formação de vórtices e absorção de ar sobre a saída cônica inferior do tanque.

A jusante do tanque, no ponto mais baixo a montante da BCP foi instalado um ponto de drenagem do tanque. Além desse ponto, existe apenas um ponto de alívio de pressão na BCP a jusante do pistão, cujo circuito de tubulação de aço retorna o fluido ao tanque

por uma tomada mais alta. Um desenho descritivo do circuito de teste pode ser observado na Figura 7, abaixo.



**Figura 7:** Desenho esquemático e isométrico do circuito fechado experimental para ensaios de escoamento de fluidos oleosos (CAFFÉ, 2018).

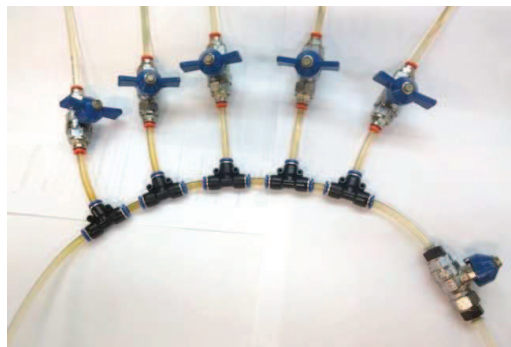
O trecho linear de tubos de acrílico é constituído por dois tubos com 11mm de diâmetro nominal e um comprimento total de 3,85m (considerando a luva de conexão central). As tomadas de pressão foram construídas com agulhas de 1/16in e mangueiras flexíveis. Ao longo da tubulação de acrílico foram instaladas 6 agulhas, conforme Tabela 3.

**Tabela 3:** Localização dos pontos de controle de pressão na tubulação de acrílico.

Pontos de pressão	Posição (m)	Posição relativa a P1 (m)
P1	0,721	0,000
P2	1,223	0,502
P3	1,725	1,004
P4	2,227	1,506
P5	2,733	2,012
P6	3,234	2,513

O sistema de controle de pressão foi construído de modo que fosse possível realizar a medida do diferencial de pressão no escoamento pela leitura direta da pressão no ponto P1 em relação à leitura de pressão nos demais pontos. Assim, são obtidos os diferenciais de pressão P12, P13, P14, P15 e P16. Para isso, foi instalado um transdutor de pressão para leitura direta de pressão no ponto P1 enquanto que os demais pontos foram ligados a um sistema de válvulas de modo que o transdutor ligado a esse sistema pudesse ler um ponto por vez, em função de qual válvula estivesse aberta a ele. A **Figura 8** apresenta uma foto do arranjo mencionado.

A vazão de fluido no sistema é controlada pelo circuito da BCP em função da frequência do rotor e medida por um medidor de vazão, que foi previamente calibrado com água.



**Figura 8:** Foto do arranjo de válvulas utilizado para isolar os pontos de leitura de pressão à medida que cada diferencial de pressão é lido.

#### 4.6.1 Sistema de medição, instrumentação, controle e aquisição de dados

O sistema de medição basicamente consiste em dois medidores de pressão, sendo um Endress+Hauser PMP71-45RH2/101, com MWP de 26,7bara e faixa de medição de  $\Delta P$  de 0 a 10bar, e outro manométrico Yokogawa EJA530A, com MWP de 20kgf/cm<sup>2</sup>, um medidor de vazão de deslocamento positivo do tipo engrenagens elípticas Metroval OI-105I MH/F14, e uma placa de aquisição de sinais de termopares com 8 canais, da Picotech modelo TC-08.

A instrumentação para os medidores de pressão e o de vazão consiste basicamente de um módulo condicionador de sinais analógicos, construído pelo eng. Laert F. da Silva Neto do NIDF, e uma placa de aquisição de dados, marca ômega de 14 bits de resolução modelo OM-USB-1408FS, que controla a interface de comunicação entre os sinais



fornecidos pelo módulo condicionador dos medidores e o sinal de entrada para o computador.

O módulo de condicionamento de sinais analógicos dos medidores de vazão e pressão consiste em uma caixa onde se encontra o circuito analógico com dois painéis de interfaces, sendo um painel onde se encontram as conexões de entrada dos medidores do circuito experimental de escoamento e as interfaces de comunicação com a placa de aquisição de dados e o outro com as respectivas chaves comutadoras. Este último painel do módulo, o frontal, pode ser visto na Figura 9, abaixo.



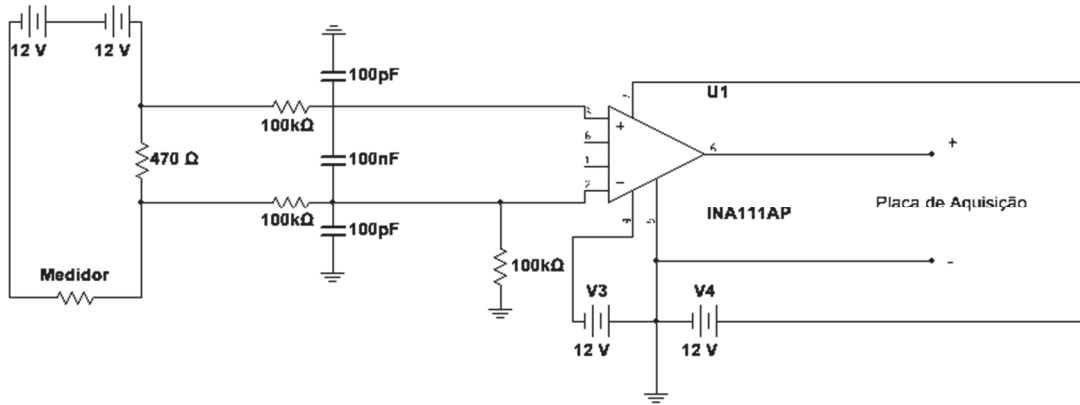
**Figura 9:** Painel frontal do módulo de condicionamento de sinal.

Para os medidores de pressão, cuja saída de sinal segue o protocolo HART (saída em corrente de 4 a 20mA), foi aplicado um circuito para conversão corrente/tensão, filtragem e eliminação de ruído de modo comum, através do uso de um amplificador de instrumentação.

O circuito da Figura 10 e a relação corrente por pressão do medidor são lineares, logo a relação da tensão pela pressão do medidor também é linear. Desta forma, é necessário fazer uma calibração eletrônica dos medidores de pressão a fim de se obter os coeficientes angular e linear desta reta. A calibração foi realizada variando-se ponto a ponto com uma pressão estável na entrada do medidor (coluna estática de água no tanque do circuito experimental), efetuando a leitura pontual do seu indicador e obtendo sua correspondente correlação em Volts, através do software de aquisição de dados.

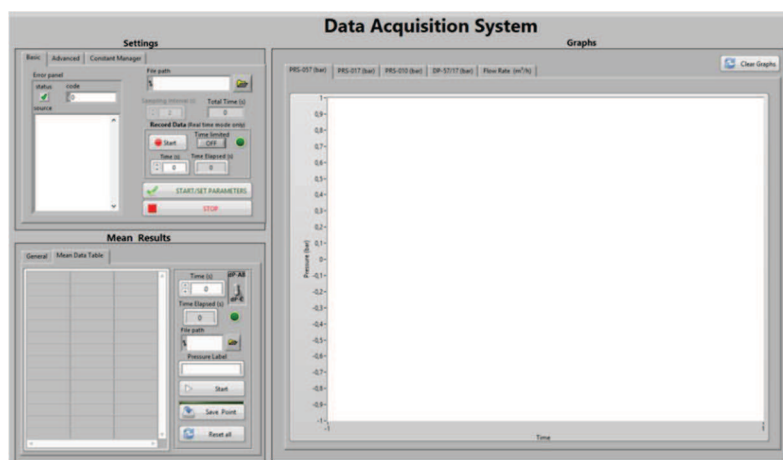
Para o medidor de vazão, cuja saída é em pulsos de 24v por volume totalizado, foi utilizado um circuito simples, resistivo, e de alta impedância de entrada para adequação da amplitude do sinal do medidor aos limites da placa de aquisição de dados (que é de 10v). Neste tipo de sinal cada pulso enviado representa uma quantidade de volume

totalizado pelo medidor, denominado fator  $k_f$ . Cada medidor de vazão possui um fator  $k_f$  que lhe é característico, desta forma, podemos obter informações do volume totalizado ao longo do experimento e da vazão, que é proporcional a frequência de emissão destes pulsos.



**Figura 10:** Circuito de condicionamento de sinal para cada medidor de pressão.

O programa supervisor utilizado para aquisição de dados foi desenvolvido utilizando o software Labview 11.0, 32-bit, da National Instruments. Neste programa o usuário pode monitorar em tempo real as variáveis de processo (pressões e vazão) na forma de gráfico e salvar os dados em arquivos texto. A estrutura gráfica das janelas são muito intuitivas, como pode ser visto na Figura 11, facilitando sua utilização. Porém é necessário ter cuidado na execução dos comandos, pois algumas falhas podem ocorrer. O procedimento adequado para uso encontra-se no apêndice 1.



**Figura 11:** Programa de aquisição de dados.

A medição de temperatura ficou por conta de um sistema proprietário, da Pico Technology, que consiste numa placa de aquisição com programa supervisorio próprio, o PicoLog 5.25.3 for Windows, que conta com interface amigável para visualização dos dados e exportação para arquivo do tipo texto, facilitando sua utilização em outras ferramentas computacionais.

#### 4.7 Tratamento de dados dos ensaios de redução do arrasto

Foi desenvolvido em planilha de cálculos todo o tratamento dos dados brutos obtidos e registrados através dos programas supervisorios PicoLog e Labview. A planilha desenvolvida conta com uma aba para cada ponto de frequência da bomba do circuito fechado de escoamento contendo as mesmas seis tabelas que serão detalhadas a seguir e uma aba em particular, para capturar os resultados de fator de atrito obtido no experimento em cada aba que, após os cálculos, correspondem também a um ponto na escala do número de Reynolds segundo METZNER & REED (1955).

Cada aba de frequência da bomba BCP conta com uma tabela que contém os cinco pontos de fator de correção obtidos na calibração do medidor de vazão, Figura 12.a. Foram considerados, pelo menos, 28 experimentos de vazão fixa por ensaio de redução do arrasto. Conhecendo-se a vazão medida, um cálculo de interpolação linear entre os dois pontos mais próximos desta tabela de calibração é realizado, de modo a diminuir o erro na leitura da vazão.

Uma segunda tabela foi utilizada para receber os dados médios de pressão nos pontos lidos, o resultado do diferencial de pressão correspondente e a vazão média do período de leitura, Figura 12.b. Particularmente, foi utilizado o mesmo formato de tabela fornecido pelo arquivo de exportação de dados do software supervisorio criado no LabView, de modo a facilitar sua utilização na planilha de tratamento de dados.

a		b				
Q (L/min)	fator de correção	Label	P-57/17 (bar)	Q (m3/h)	PRS-057 (bar)	PRS-017 (bar)
10,0	0,99866	P12				
32,5	0,99959	P13				
55,0	0,99942	P14				
77,5	0,99952	P15				
100,0	0,99938	P16				

**Figura 12:** a) Tabela de controle do fator de correção para a vazão obtida pelo medidor e b) Tabela de dados médios dos parâmetros de controle do escoamento.

A mesma conveniência foi considerada ao se criar a tabela para receber os dados de temperatura extraídos do PicoLog, Figura 13.a. Esta é uma tabela extensa, contendo a leitura de um valor a cada 2 segundos, durante todo o experimento numa vazão fixa, que tem uma média de execução da ordem de 20 minutos, portanto pode ter até 1200s, o que equivale a 600 pontos para cada canal de termopar lido.

a			b		
Time Seconds	Channel 4 °C	Channel 6 °C	Tomadas pressão	Posição (m)	Delta P (mbar)
0			P1	0,721	
2			P2	0,502	
4			P3	1,004	
6			P4	1,506	
8			P5	2,012	
10			P6	2,513	

**Figura 13:** a) Tabela de temperaturas inicial e final e b) Tabela de variação de comprimento e variação de pressão em função da tomada de pressão lida.

A quarta tabela conta com uma simples cópia da leitura de variação de pressão da segunda tabela, alocada convenientemente ao lado de uma coluna contendo a distância, em metros, entre os pontos de pressão lidos, vide Figura 13.b. Desta forma, pôde-se implementar o cálculo do coeficiente angular da reta obtida a partir dos 5 diferenciais de pressão lidos em função do comprimento para definir o  $\frac{\partial p}{\partial x}$  do experimento.

A quinta tabela, diferentemente, conta com três colunas dinâmicas que definem as curvas isotérmicas de reologia do fluido a partir da temperatura média lida no experimento com o auxílio de uma planilha externa produzida com os dados do documento de exportação do reômetro, contendo todas as isotermas produzidas para uma determinada amostra, Figura 14. Assim, as colunas à esquerda referem-se à isoterma reológica de menor temperatura mais próxima da temperatura do experimento e as colunas à direita referem-se à isoterma reológica de maior temperatura mais próxima da temperatura do experimento. Logo, as colunas no meio geram pontos de tensão de cisalhamento e de taxa de cisalhamento ( $\tau \times \dot{\gamma}$ ) pela interpolação linear dos pontos à direita e à esquerda para reproduzir uma curva mais próxima daquela que deve existir para a condição térmica do experimento. Considerando o modelo de Ostwald-de Waele para o comportamento reológico das amostras, utilizou-se a tabela interpolada e com a base ajustada de linear para logarítmica para se calcular o índice de comportamento  $k$  e o

índice de consistência  $n$  do fluido a partir do coeficiente angular da reta (para obter o  $n$ ) e do coeficiente linear (para obter o  $k$ ).

20 °C		interpolado		30 °C	
$\dot{\gamma}$ in 1/s	$\tau$ in Pa	$\dot{\gamma}$ in 1/s	$\tau$ in Pa	$\dot{\gamma}$ in 1/s	$\tau$ in Pa

**Figura 14:** Representação da tabela de pontos de tensão e taxa de cisalhamento com colunas resultantes da interpolação em função da temperatura do experimento.

T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n

Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>MR</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR

**Figura 15:** Compilação dos dados do experimento numa determinada vazão.

A última tabela, ilustrada pela Figura 15, acima, compila os dados do ensaio. Inicia fornecendo a temperatura média do experimento, obtida pelo cálculo da média aritmética de todos os pontos de temperatura importados, em seguida apresenta a vazão média corrigida pelo fator de correção obtido na primeira tabela. O diâmetro interno do tubo de acrílico sofre uma correção em função da temperatura média, considerando a dilatação linear do perímetro da seção transversal do tubo:

$$D = \alpha D_0 \Delta T + D_0 \quad (12)$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente de expansão linear do acrílico e  $D_0$  é o diâmetro nominal do tubo à temperatura de 25°C.

Com o diâmetro calcula-se a área da seção transversal do tubo, que permite o cálculo da velocidade média do escoamento relativa à vazão medida. A perda de carga no segmento,  $\frac{\partial p}{\partial x}$ , foi obtida a partir da quarta tabela enquanto que os índices de consistência e de comportamento do fluido são obtidos da quinta tabela. A massa específica do fluido também é corrigida pela temperatura média do experimento, a partir da equação da reta de massa específica em função da temperatura ( $\rho \times T$ ).

Com estas informações o fator de atrito experimental já pode ser calculado a partir da equação de Darcy–Weisbach modificada:

$$f = \frac{2}{\rho v^2} D \frac{\partial p}{\partial x} \quad (13)$$

onde  $f$  é o fator de atrito de Darcy–Weisbach e  $v$  é a velocidade média do escoamento.

Como o interesse é verificar o desvio do fator de atrito com relação ao fator de atrito teórico para tubos lisos, foram implementados dois cálculos: um para o regime laminar, considerado quando  $Re_{MR} \leq 2300$ , utilizando a equação  $f = 64/Re_{MR}$ , e outro com base na correlação explícita de HAALAND (1983), que possui um desvio máximo da ordem de 2% em relação à equação implícita de Coolebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[ \left( \frac{\varepsilon}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \quad (14)$$

onde  $\varepsilon$  é a rugosidade relativa, dada por  $K/D$ , em que  $K$  é a rugosidade equivalente. Como neste trabalho a tubulação de ensaio é de acrílico, altamente liso, considerou-se a simplificação desta equação considerando  $\varepsilon = 0$ .

A tensão de cisalhamento máxima do escoamento ocorre na parede do tubo,  $\tau_w$ , e pode ser calculada conforme a equação:

$$\tau_w = \frac{D}{4} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\rho v^2}{8} f \quad (15)$$

A taxa de cisalhamento, por conseguinte, é obtida pela equação de Ostwald-de Waele, também conhecida por modelo lei de potência, rearranjada:

$$\dot{\gamma} = \left( \frac{\tau_w}{k} \right)^{1/n} \quad (16)$$

O numero de Reynolds segundo METZNER & REED (1955) pode ser calculado:

$$Re_{MR} = 8 \left( \frac{n}{6n+2} \right)^n \frac{\rho v^{(2-n)} D^n}{k} \quad (17)$$

Para conferir o comprimento de entrada e o ponto da tubulação em que o escoamento encontra-se desenvolvido, aplicou-se o cálculo:

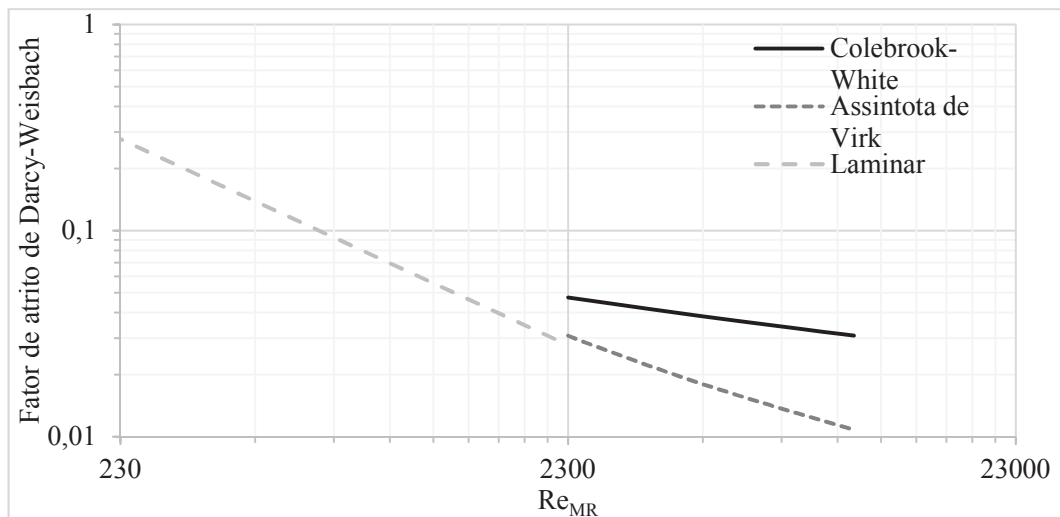
$$\begin{cases} Re_{MR} \leq 2300 & L_e = 0,06D \cdot Re_{MR} \\ Re_{MR} > 2300 & L_e = 4,4D \sqrt[6]{Re_{MR}} \end{cases} \quad (18)$$

Finalmente, a redução do arrasto pode ser obtida pela diferença entre os fatores de atrito experimental e teórico para tubos lisos, desta forma:

$$\%DR = \frac{(f_{tl} - f_{exp})}{f_{tl}} \cdot 100\% \quad (19)$$

onde  $f_{tl}$  é o fator de atrito de Darcy-Weisbach para o tubo liso e  $f_{exp}$  é o fator de atrito de Darcy-Weisbach obtido experimentalmente.

Após realizar o ensaio sobre toda a faixa de vazão (ou frequência de bomba) prevista, pode-se observar a última aba, que captura todos os resultados de  $f_{exp}$  e  $Re_{MR}$  e aplica num diagrama de Moody, Figura 16, contendo previamente as curvas para o regime de escoamento laminar, para o regime de escoamento turbulento segundo Colebrook-White e a assintota de Virk, para a máxima redução do arrasto.

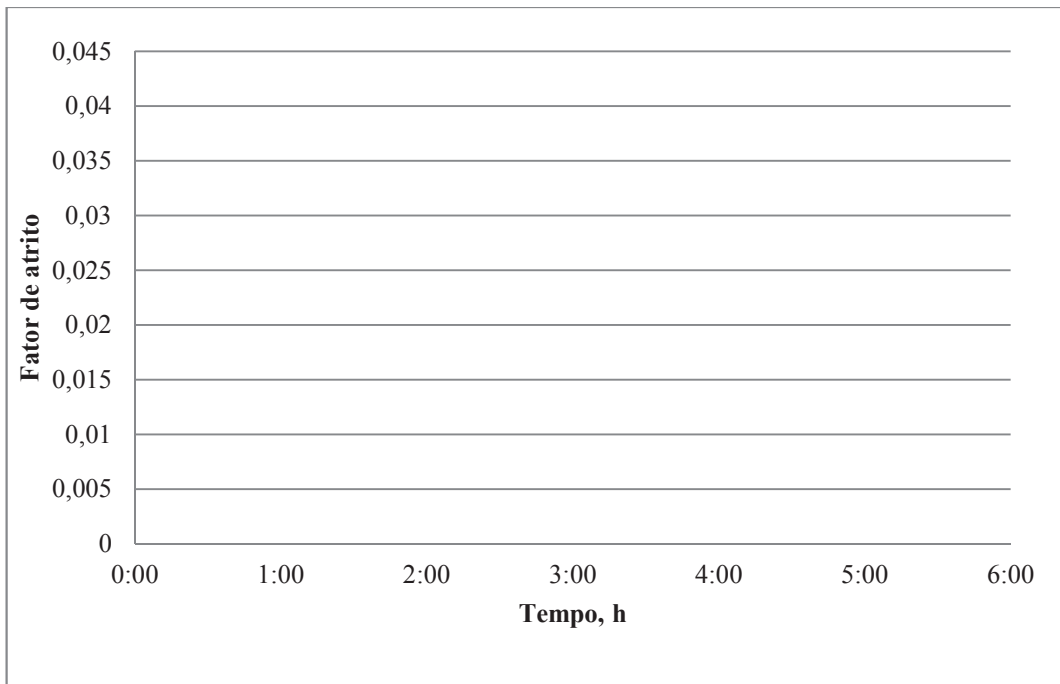


**Figura 16:** Diagrama de Moody dos regimes de escoamento em tubo liso.

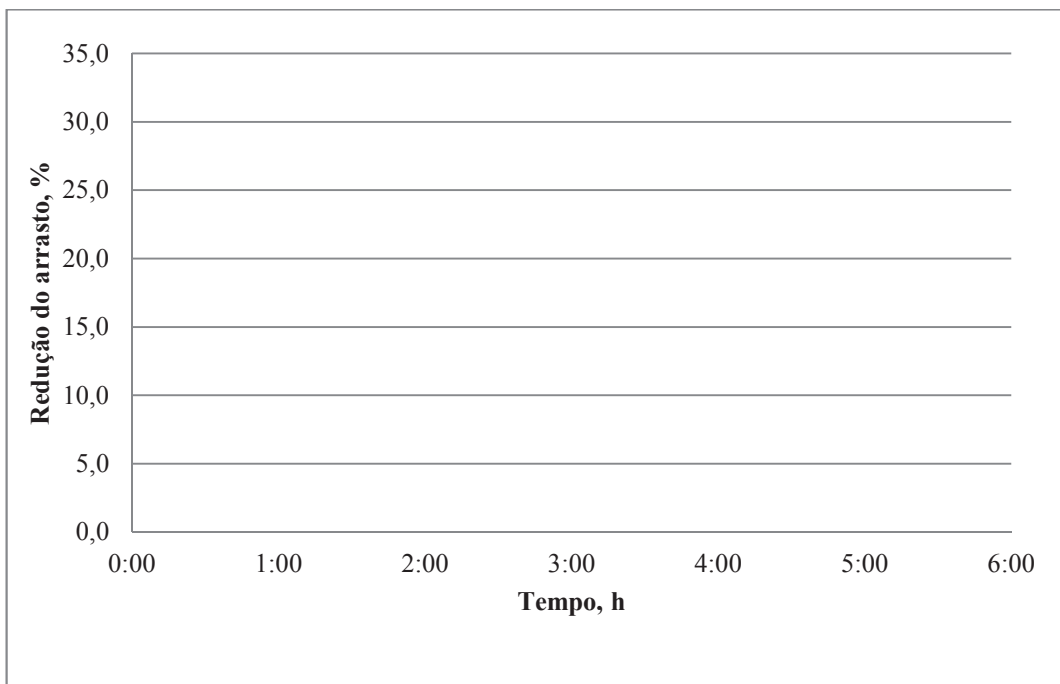
#### 4.8 Tratamento de dados dos ensaios de degradação mecânica do fluido

Para o tratamento dos dados dos ensaios de degradação mecânica pode-se utilizar a mesma planilha de cálculos descrita no item 4.7, porém como a vazão média é aproximadamente a mesma (salvo as mudanças produzidas pelo aquecimento do fluido durante o ensaio), pois a vazão é mantida o mais estável possível (pode exigir algum ajuste fino na frequência da bomba), as abas são numeradas sequencialmente, para acompanhar a evolução temporal. Por isso, inseriu-se um controle de horário de início e de fim de cada experimento que, como anteriormente, significa a realização de uma sequência de medidas de pressão entre os pontos P2 a P6, com tempo médio da ordem de 13 minutos, por se realizar a coleta de parâmetros médios por 2 minutos a cada leitura mais o tempo de abertura e fechamento de válvulas.

Neste caso, além do clássico diagrama de Moody para se comparar os resultados obtidos em cada ensaio de degradação, também são incluídos: um gráfico para avaliação temporal do fator de atrito obtido experimentalmente, Figura 17, e um gráfico de redução do arrasto em função do tempo, para verificar sua variação pela degradação mecânica observada, Figura 18.



**Figura 17:** Imagem representativa do gráfico de fator de atrito de Darcy-Weisbach em função do tempo.



**Figura 18:** Imagem representativa do gráfico de redução percentual do arrasto em função do tempo.



# 5 Resultados e Discussões

## 5.1 Efeito da Pré-dispersão do PIB em Solventes Orgânicos

A interação polímero/solvente é um dos fatores que influenciam na eficiência do aditivo na função de redutor do arrasto. MARTIN & SHAPELLA (2003) relatam que obtiveram maior eficiência na redução do arrasto envolvendo PIB quando utilizaram solvente com parâmetros de solubilidade próximos aos do polímero, quando em regime de escoamento equivalente a  $Re$  de 20.000, enquanto que CHOI *et al.* (1999) obtiveram uma relação linear entre a concentração do polímero ( $C$ ) e a relação  $C/DR$  (onde  $DR$  significa *drag reduction*) para diferentes massas molares de PIB e verificaram que a curva é característica para cada par polímero/solvente.

No presente trabalho, a proposta foi diferente daquela normalmente encontrada na literatura: Utilizar um solvente prévio, i.e. antes da sua adição ao meio oleoso, na preparação do aditivo polimérico. Como na realidade as características dos óleos produzidos são diferentes ao longo do tempo, ou por serem produzidos de reservatórios com características diferentes e pela mistura deles na plataforma poder variar em função das condições operacionais, ou pelas alterações termodinâmicas impostas pela produção resultarem em mudanças nas composições dos fluidos e, com isso, afetando suas características, considerou-se que não se escolhe o meio solvente onde se deseja a máxima eficiência. Por isso, nesse trabalho foram considerados dois óleos minerais muito semelhantes entre si em termos de características de densidade e reologia que, por conseguinte, são características equivalentes a um óleo médio nacional. Poderia se considerar uma linha de pesquisa de desenvolvimento de diferentes aditivos químicos, buscando aqueles que melhor atuam sobre o meio oleoso, num trabalho direcionado que muitos laboratórios realizam. No entanto, em muitos artigos se verifica a grande preferência pelo PIB quando se deseja trabalhar em meios oleosos, particularmente com petróleo e derivados. Por isso, neste trabalho decidiu-se por trabalhar apenas com o PIB, considerando-se apenas a variação de sua massa molar. Devido à característica desses materiais serem sólidos quando *in natura*, um desafio da indústria é como dispersar esses polímeros em soluções estáveis para serem administrados adequadamente sobre o fluido de interesse. Logo, uma característica deste trabalho está na escolha de um pré-solvente para o PIB com diferentes massas molares e estudar os efeitos da escolha desses solventes no mesmo meio oleoso.

Pode ser denominado solvente qualquer fluido que possuir a capacidade de vencer as forças de coesão intermoleculares que unem as moléculas de uma substância inicialmente pura, desagregando-a e se misturando a ela.

Portanto, para haver solubilização de uma substância num solvente, a variação da energia livre deve ser negativa ( $\Delta G < 0$ ). Porém, lembrando um pouco da termodinâmica,  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$  e as variações de entalpia ( $\Delta H$ ) e entropia ( $\Delta S$ ) são positivas, de modo que, para ocorrer a solubilização, é necessário que a variação da entalpia seja a menor possível. Isto significa que a diferença entre a densidade de energia coesiva do polímero e a do solvente deve ser a menor possível. Além disso, é necessário que exista semelhança química e estrutural entre as duas substâncias (RODRIGUEZ *et. al.*, 2015).

Uma maneira prática de se avaliar este poder de solvência é medir, de certa forma, a densidade de energia coesiva, proposto por Hildebrand, que é nos dias de hoje o parâmetro de solubilidade mais conhecido e aplicado devido, principalmente, à sua simplicidade e alta eficiência (CANEVAROLO JR., 2006; RODRIGUEZ *et. al.*, 2015).

Existem na literatura várias tabelas de parâmetros de solubilidade de Hildebrand para diversos polímeros e solventes, de modo que se pode obter o parâmetro de solubilidade das substâncias de interesse ou, ainda, pode-se estimar o valor do parâmetro através de avaliação da similaridade química e estrutural, facilitando o trabalho do pesquisador na hora de relacionar bons solventes para uma nova substância recém-sintetizada, por exemplo (CANEVAROLO JR., 2006; STRATE & LOHSE, 1999; RODRIGUEZ *et. al.*, 2015).

Abaixo, a tabela 4 apresenta os parâmetros de solubilidade de Hildebrand obtidos na literatura para o PIB, para os óleos minerais destilados, que vão representar os óleos utilizados, e para os demais solventes escolhidos, sendo todos considerados bons solventes para o PIB devido à proximidade entre os valores dos parâmetros de solubilidade e à similaridade química.

Foram produzidas dispersões de PIB com massas molares (ponderal,  $M_w$ ) da ordem de  $1.10^6$ g/mol e  $4.10^6$ g/mol a 5% em massa em cada um dos solventes escolhidos e também uma diretamente sobre o óleo mineral. A rapidez com que a dispersão ocorre aparentemente foi independente da massa molar do polímero utilizado, em procedimento conforme relatado na seção 4.4.

**Tabela 4:** Parâmetros de solubilidade a 25°C e pressão atmosférica, segundo Hildebrand, para os fluidos utilizados (BATISTA *et al.*, 2015; BRANDRUP *et al.*, 1999; CHOI *et al.*, 1999; STRATE & LOHSE, 1999; RODRIGUEZ *et al.*, 2015).

Fluido	$\delta$ (MPa) <sup>1/2</sup>	$\delta$ (cal/cm <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup>
Ciclohexano	16,8	8,2
Diesel S10	16,0	7,8*
Poliisobutileno	16,5	8,1*
Óleos minerais destilados	14,1	6,9
Querosene	17,0	8,3*

\* Calculados a partir da informação em (MPa)<sup>1/2</sup> da literatura.

A tabela 5, a seguir, resume os tempos médios de preparação de cada dispersão e pode-se concluir que os melhores solventes para o PIB foram o ciclohexano e o querosene.

**Tabela 5:** Tempo médio de preparação das dispersões de PIB, 1.10<sup>6</sup> e 4.10<sup>6</sup>g/mol, a 5% em massa nos solventes escolhidos.

Dispersão a 40°C de PIB 1.10 <sup>6</sup> e 4.10 <sup>6</sup> g/mol a 5% em:	Tempo sob agitação (h)	Tempo em repouso (h)	Tempo total (h)
Ciclohexano	8	16	24
Diesel S10	16	32	48
Óleos minerais destilados <sup>1</sup>	20	32	56
Querosene	4	16	20

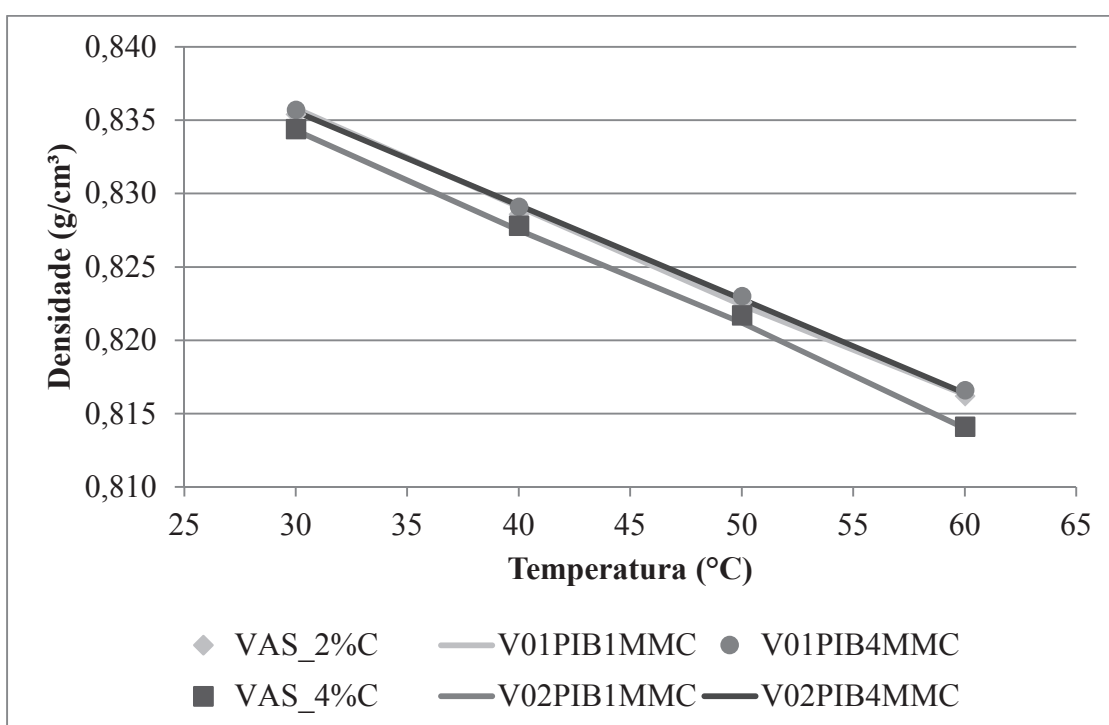
<sup>1</sup> Neste caso a temperatura mantida sobre a placa de aquecimento foi de 60°C.

Havia alguma expectativa de que o Diesel também se apresentasse um eficiente solvente devido às similaridades de polaridade e interações intermoleculares, no entanto o produto adquirido em posto de gasolina, comercial, possui adição de biodiesel por força de lei, causando aumento das interações polares, inclusive podendo absorver água da atmosfera, alterando ainda mais as características do diesel como solvente alifático.

Pelos resultados apresentados e pelas disponibilidades de material, seguiu-se o trabalho realizando os estudos preliminares com ciclohexano enquanto que os trabalhos envolvendo maiores volumes, como no circuito de escoamento, foram realizados com

querosene como pré-solvente do PIB devido à maior toxicidade do ciclohexano, uma vez que o tanque do circuito experimental não é estanque.

O próximo passo foi verificar as densidades das soluções e as variações em função da presença de pré-solventes e presença de poliisobutileno. As figuras 19 e 20 resumem os resultados de densidade obtidos pela leitura indireta do viscosímetro capilar Anton Paar SVM 3000, com leituras pontuais de densidade nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C, sobre algumas amostras de vaselina contendo ciclohexano como pré-solvente e de óleo mineral LUBRAX OB 10 OBT (OMB) contendo querosene como pré-solvente.

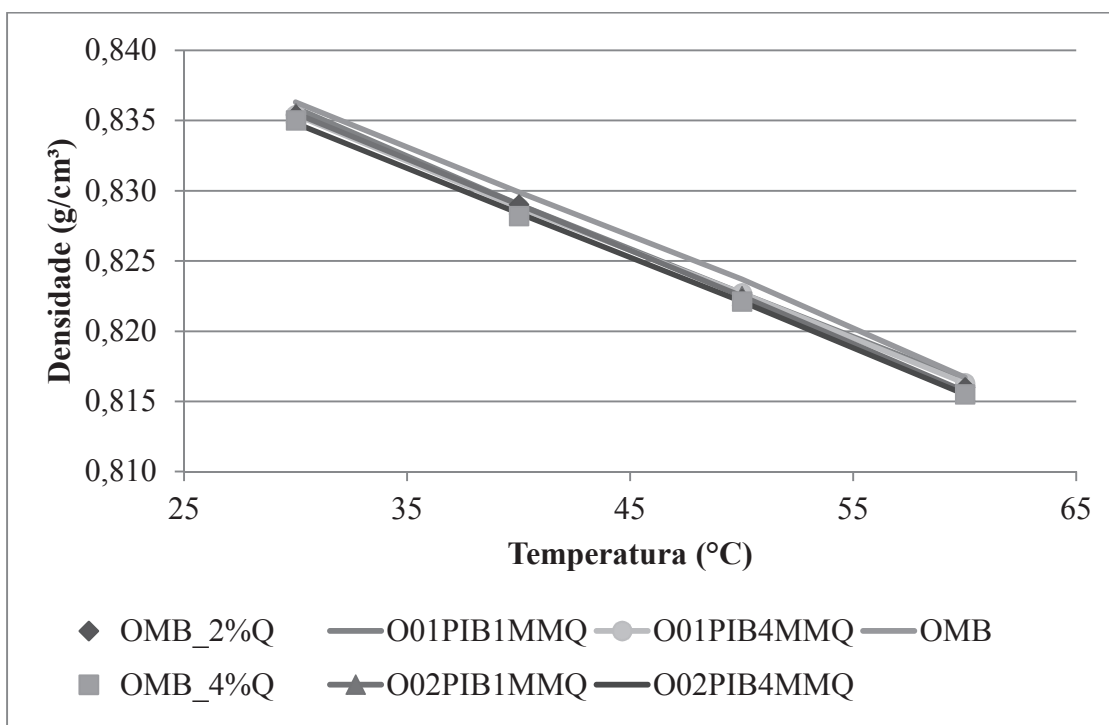


**Figura 19:** Gráficos de densidade em função da temperatura das amostras de vaselina contendo 2 e 4% de ciclohexano, com e sem PIB de  $1 \cdot 10^6$  e  $4 \cdot 10^6$  g/mol.

Pelas figuras 19 e 20 percebe-se que a densidade varia muito pouco tanto em função da presença de pré-solventes quanto pela presença de polímero e independentemente da massa molar, embora nas soluções de vaselina tenha se observado alguma variação maior, de até 0,3%.

Para verificar a diferença de comportamento das soluções produzidas com a pré-dispersão do PIB em ciclohexano em relação à dispersão direta dos polímeros em óleo mineral, foram obtidas as curvas de fluxo no reômetro HAAKE MARS III a 40°C com geometria cone/placa, conforme seção 4.5.2, fixando-se a taxa de cisalhamento em passos

crecentes desde 10 a 100 por segundo. Os resultados reológicos destas soluções são apresentados na Tabela 6 e Figuras 21 a 23.



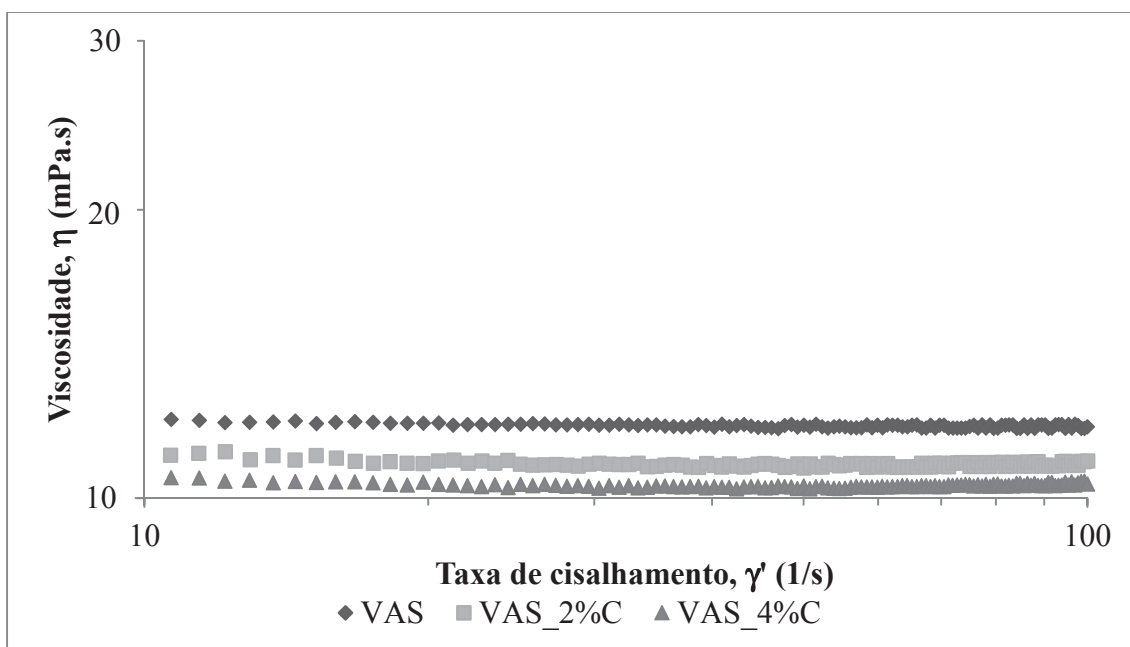
**Figura 20:** Gráficos de densidade em função da temperatura das amostras de óleo mineral contendo 0, 2 e 4% de querosene, com e sem PIB de  $1.10^6$  e  $4.10^6$  g/mol.

A Tabela 6 resume os resultados de índice de consistência  $k$ , índice de comportamento  $n$  e o coeficiente de determinação  $R^2$  observados nas curvas de tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento aplicada sobre os fluidos.

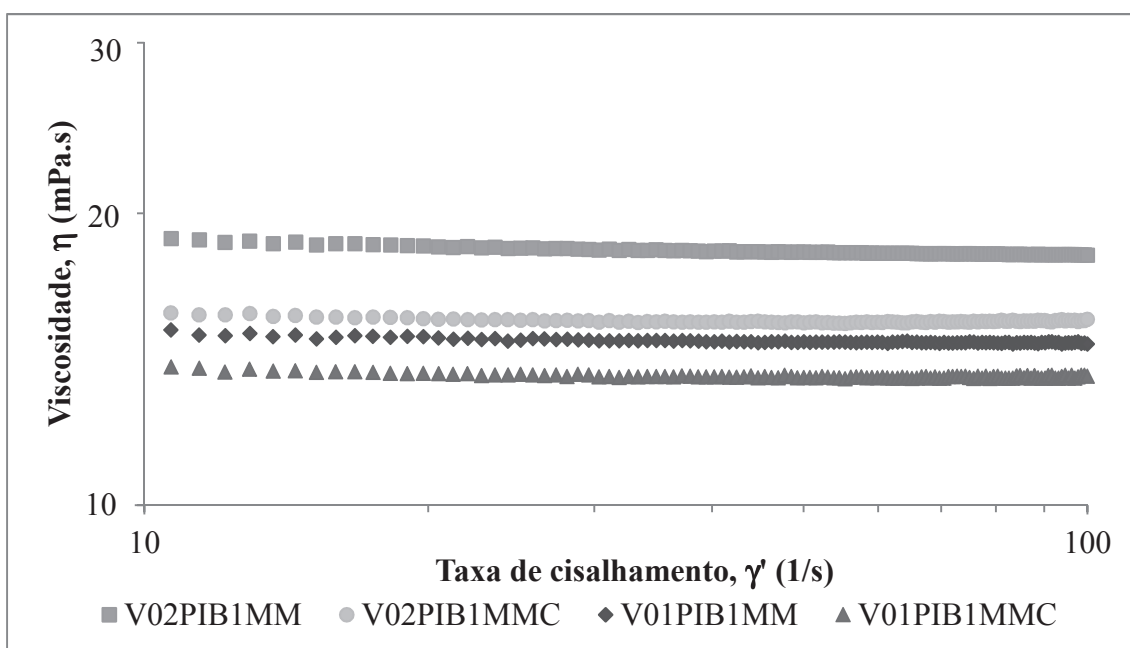
**Tabela 6:** Registros de  $k$ ,  $n$  e  $R^2$  das soluções estudadas a  $40^\circ\text{C}$ .

Soluções	$k$	$n$	$R^2$
VAS	0,0128	0,9816	0,9997
VAS_2%C	0,0119	0,9762	0,9997
VAS_4%C	0,0113	0,9765	0,9995
V01PIB1MM	0,0161	0,978	0,9998
V02PIB1MM	0,0204	0,9723	0,9998
V01PIB4MM	0,0203	0,9714	1,0000
V02PIB4MM	0,0284	0,9590	0,9999
V01PIB1MMC	0,0173	0,9725	0,9996
V02PIB1MMC	0,0147	0,9789	0,9998
V01PIB4MMC	0,0219	0,9563	0,9999
V02PIB4MMC	0,0207	0,9714	0,9998

As Figuras de 21 a 23 apresentam curvas de viscosidade versus taxa de cisalhamento obtidas no reômetro. Pode-se observar na Figura 21 que o comportamento é o de redução da viscosidade com a adição de 2% de ciclohexano e subsequente redução da viscosidade com o aumento da concentração para 4% de ciclohexano.



**Figura 21:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento a 40°C das soluções solvente, vaselina com 2 e 4% de ciclohexano e vaselina sem ciclohexano.

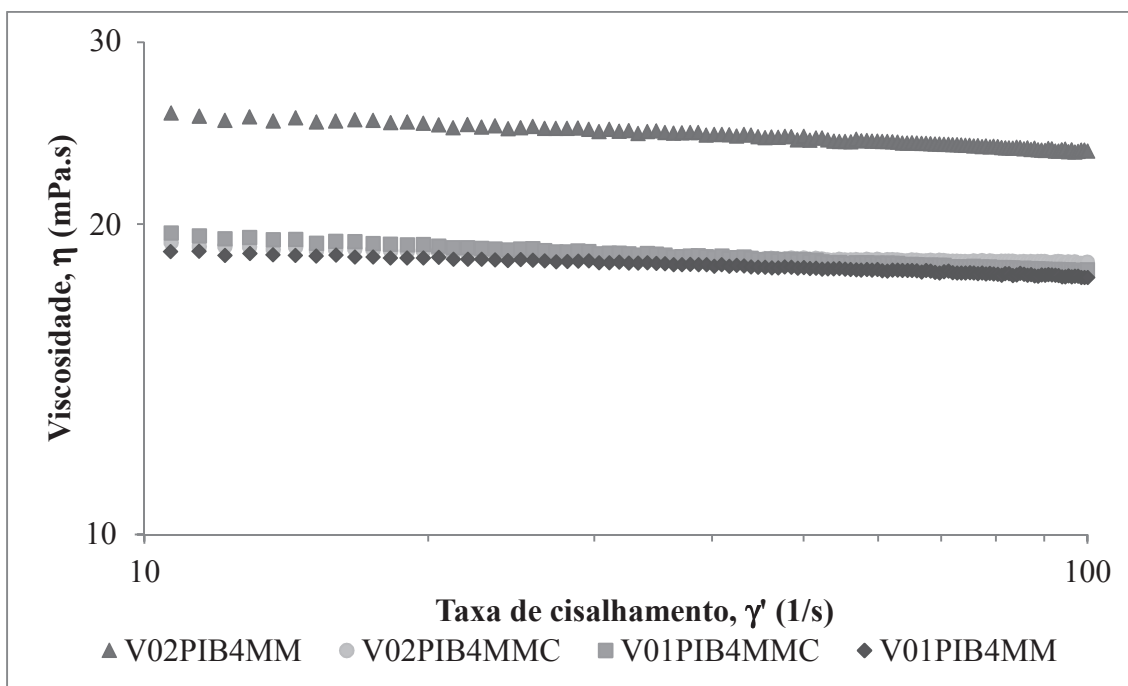


**Figura 22:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento a 40°C das soluções de PIB 1.10<sup>6</sup>g/mol em vaselina com e sem ciclohexano.

A Figura 22 reúne os dados obtidos na reologia de soluções de PIB  $1.10^6$ g/mol em vaselina com e sem a presença de ciclohexano. Comparadas à reologia da vaselina sem polímero, figura 21, percebe-se que as soluções apresentaram aumento da viscosidade enquanto que mantiveram a característica newtoniana, ou seja, sem ocorrer significativa mudança na viscosidade em função da taxa de cisalhamento. Comparando-se a reologia das soluções poliméricas da figura 22, observa-se que as soluções mais concentradas apresentaram maior viscosidade, mas também que o efeito de redução da viscosidade pela presença do ciclohexano se manteve.

A Figura 23 reúne os dados obtidos na reologia de soluções de PIB  $4.10^6$ g/mol em vaselina com e sem a presença de ciclohexano. Como observado na figura 22, os efeitos de viscosidade por concentração e presença de ciclohexano ocorrem, porém este último efeito parece ter sido insignificante para a solução com menor concentração. Se observamos o efeito de redução da viscosidade na amostra de 0,2% de PIB, provavelmente este resultado mostra que a preparação da amostra de 0,1% em ciclohexano foi falha, por não solvatar o polímero no meio o suficiente.

Outro ponto, observou-se que no caso do polímero de maior massa molar, o comportamento reológico deixa de ser newtoniano e passa a apresentar comportamento pseudoplástico, i.e. a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento.



**Figura 23:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento a  $40^{\circ}\text{C}$  das soluções de PIB  $4.10^6$ g/mol em vaselina com e sem ciclohexano.

Portanto a presença do pré-solvente, neste caso o ciclohexano, não produziu alterações além da redução da viscosidade, mas foi muito útil na pré-dispersão do polímero e na sua homogeneização final no meio oleoso. Também se conclui que a presença do polímero disperso no meio em baixas concentrações (0,1 e 0,2% em massa) somente influencia o comportamento viscoso do fluido quando a massa molar do polímero é maior, que no caso testado foi com o polímero de  $4.10^6$ g/mol, tornando-o não newtoniano, sendo que este efeito aumenta com o aumento da concentração.

## 5.2 Caracterização Reológica

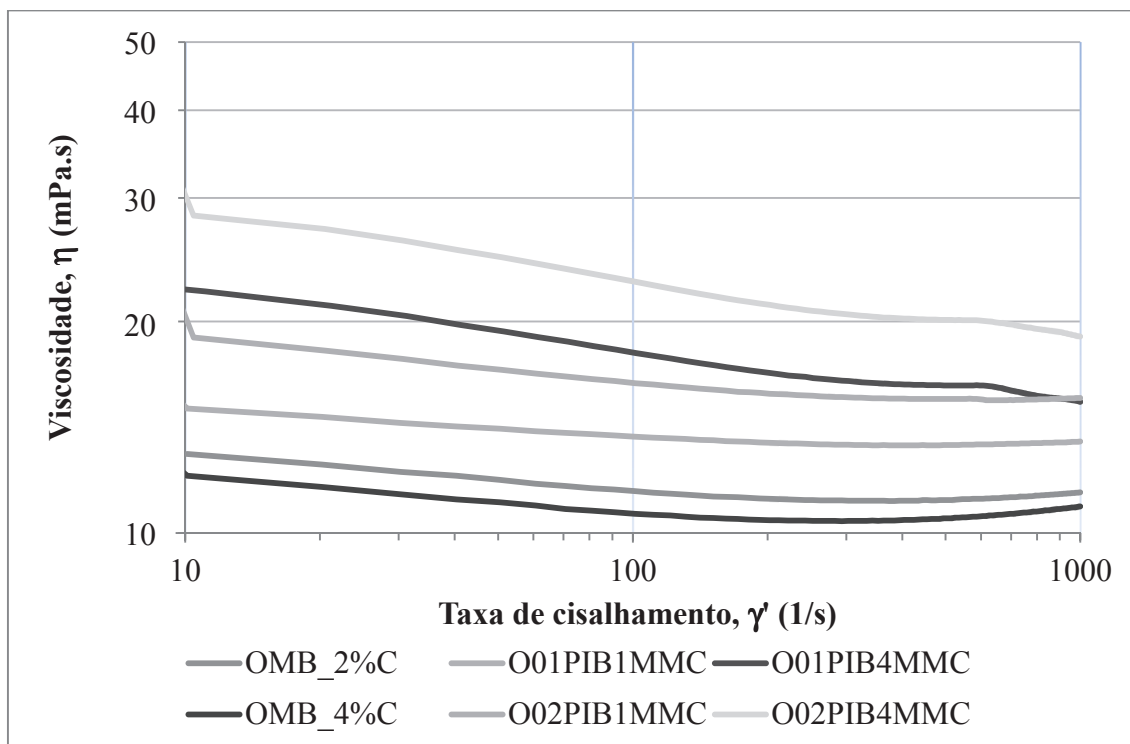
Nesta altura do trabalho alterou-se o óleo mineral em uso, para um adquirido em volume maior, 400 litros de LUBRAX OB 10 OBT fornecido pela PETROBRAS DISTRIBUIDORA, um óleo refinado para uso em turbinas, de boa qualidade, transparente e com características reológicas altamente similares às da vaselina em uso e, portanto, considerado equivalente para as condições de trabalho e avaliações consideradas. Esta alteração é importante, pois é necessário um grande volume de óleo para ser utilizado no circuito fechado de escoamento, projetado para o presente estudo de redução do arrasto. Vimos anteriormente, comparando as figuras 19 e 20, que a mudança do óleo não afetou significativamente a densidade das soluções. Agora, alguns ensaios reológicos foram repetidos com o novo óleo, mas focando nas soluções preparadas a partir de solução de PIB em ciclohexano. Manteve-se a temperatura dos ensaios a  $40^{\circ}\text{C}$  e a taxa de cisalhamento em passos crescentes desde 10 até 1000 por segundo no reômetro HAAKE MARS III, conforme seção 4.5.2. Os resultados reológicos obtidos são apresentados na Tabela 7 e Figura 24.

**Tabela 7:** Registros de  $k$ ,  $n$  e  $R^2$  das soluções de óleo mineral com ciclohexano e de PIB  $1.10^6$  e  $4.10^6$ g/mol em óleo mineral e com ciclohexano, estudadas a  $40^{\circ}\text{C}$ .

Soluções	$k$	$n$	$R^2$
OMB_2%C	0,0113	1,0000	0,9997
OMB_4%C	0,0107	1,0000	0,9993
O01PIB1MMC	0,0134	1,0000	0,9999
O02PIB1MMC	0,0203	0,9574	0,9997
O01PIB4MMC	0,0254	0,9276	0,9998
O02PIB4MMC	0,0321	0,9250	0,9998



A Tabela 7 resume os resultados de índice de consistência  $k$ , índice de comportamento  $n$  e o coeficiente de determinação  $R^2$  observados nas curvas de tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento aplicada sobre as misturas na faixa de 60 a 600/s. A principal mudança observada tem relação com a faixa de taxa de cisalhamento empregada, que retornou resultados de índice de comportamento  $n$  mais condizentes com o perfil pseudoplástico esperado.

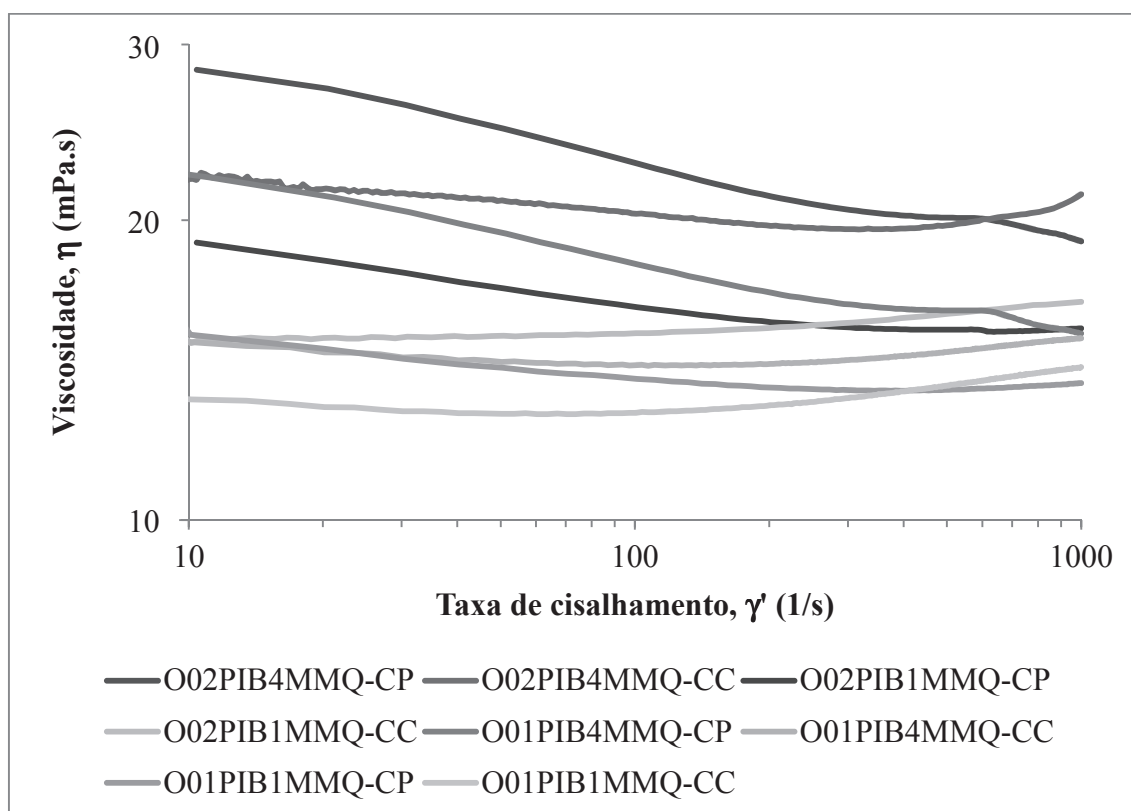


**Figura 24:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento a 40°C das soluções de OMB com ciclohexano e de PIB 1.10<sup>6</sup>g/mol e 4.10<sup>6</sup>g/mol em OMB com ciclohexano como pré-solvente.

A Figura 24 apresenta as curvas de viscosidade versus taxa de cisalhamento obtidas no reômetro para as seis soluções preparadas com o óleo mineral novo e os dois PIB pré-dispersos em ciclohexano. Pode-se observar que o comportamento anteriormente observado se mantém: viscosidade maior com aumento da concentração do PIB e viscosidade maior com o aumento da massa molar do PIB. A novidade fica por conta do comportamento pseudoplástico em todas as soluções, inclusive nas soluções ausentes de PIB, o que significa que o comportamento observado está relacionado ao novo óleo e não à presença do polímero. Além disso, observou-se que em taxas de cisalhamento mais altas ocorre uma repentina redução da viscosidade que deve estar relacionada à perda de

material por centrifugação, uma vez que as amostras são muito pouco viscosas e possuem caráter lubrificante, o que nos leva a considerar uma nova geometria.

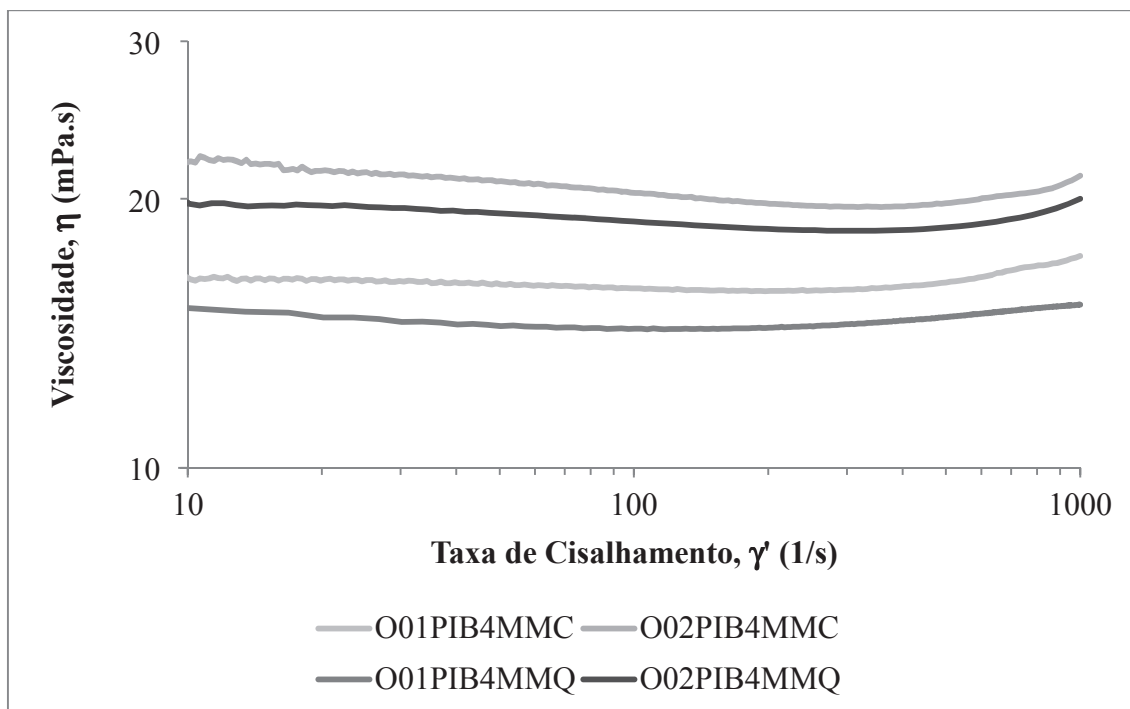
No reômetro HAAKE MARS III à temperatura de 40°C e a taxa de cisalhamento em passos crescentes desde 10 até 1000 por segundo foi aplicada a rotina de ensaios reológicos aplicada segundo a seção 4.5.1. A figura 25 compara as respostas das amostras nas duas geometrias com o objetivo de avaliar especialmente o comportamento na região de taxas de cisalhamento mais altas e expurgar o comportamento aleatório observado.



**Figura 25:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento das soluções de PIB  $4 \cdot 10^6$ g/mol a 0,1% e a 0,2% em OMB com querosene a 40°C, onde CP designa ensaios com geometria cone-placa e CC designa ensaios com geometria cilindros concêntricos.

Observando as figuras 24 e 25, percebe-se que os ensaios com geometria cone-placa são os que apresentaram desvios na trajetória a partir de 600/s, relacionados ou à perda de material por centrifugação à alta velocidade angular do rotor, justificando a repentina diminuição da viscosidade, ou à característica do óleo mineral utilizado, que passa a se comportar de modo dilatante (ou *shear thickening*). Ainda que tenham sido realizadas triplicatas (ou mais), não foi possível evitar completamente a perda de material por

centrifugação devido a muito baixa viscosidade e alta lubricidade das amostras. Quanto ao comportamento dilatante, é possível que tenha sido resultante da perda de fração do solvente orgânico, tanto de ciclohexano como de querosene, pois as determinações foram realizadas a 40°C provocando aumento da pressão de vapor e sem o apoio de campânula para evitar a decomposição das amostras durante o ensaio. Com a geometria de cilindros concêntricos foi possível obter resultados muito mais coerentes, no entanto o comportamento pseudoplástico observado nas amostras utilizando o cone-placa passou a ser descrito como newtoniano pela geometria de cilindros concêntricos e, conseqüentemente, apresentando uma tendência ainda maior de comportamento dilatante a partir da taxa de cisalhamento de 300/s.

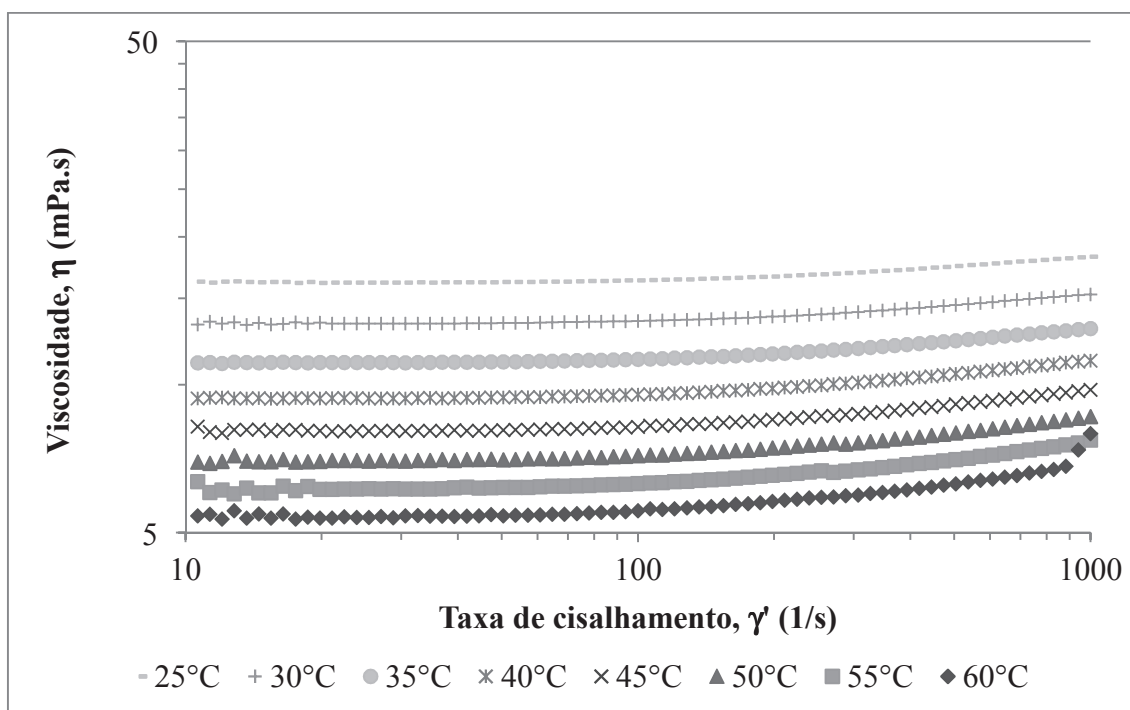


**Figura 26:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento a 40°C das soluções de PIB 1.10<sup>6</sup>g/mol e 4.10<sup>6</sup>g/mol a 0,1% e a 0,2% em OMB e pré-solventes ciclohexano ou querosene, obtidos em ensaios com geometria cilindros concêntricos.

Posteriormente, decidiu-se por experimentar a eficiência da pré-dissolução do PIB em querosene comercial, também a 5%, apesar de apresentar um índice de solubilidade um pouco mais afastado do PIB do que o ciclohexano. Observou-se que a eficiência na preparação das soluções, tanto na preparação da solução de PIB a 5% em querosene como na posterior dispersão no óleo mineral, foi ainda maior, reduzindo o tempo de preparo para aproximadamente 20 horas. Atribuiu-se esta eficiência à presença de substâncias

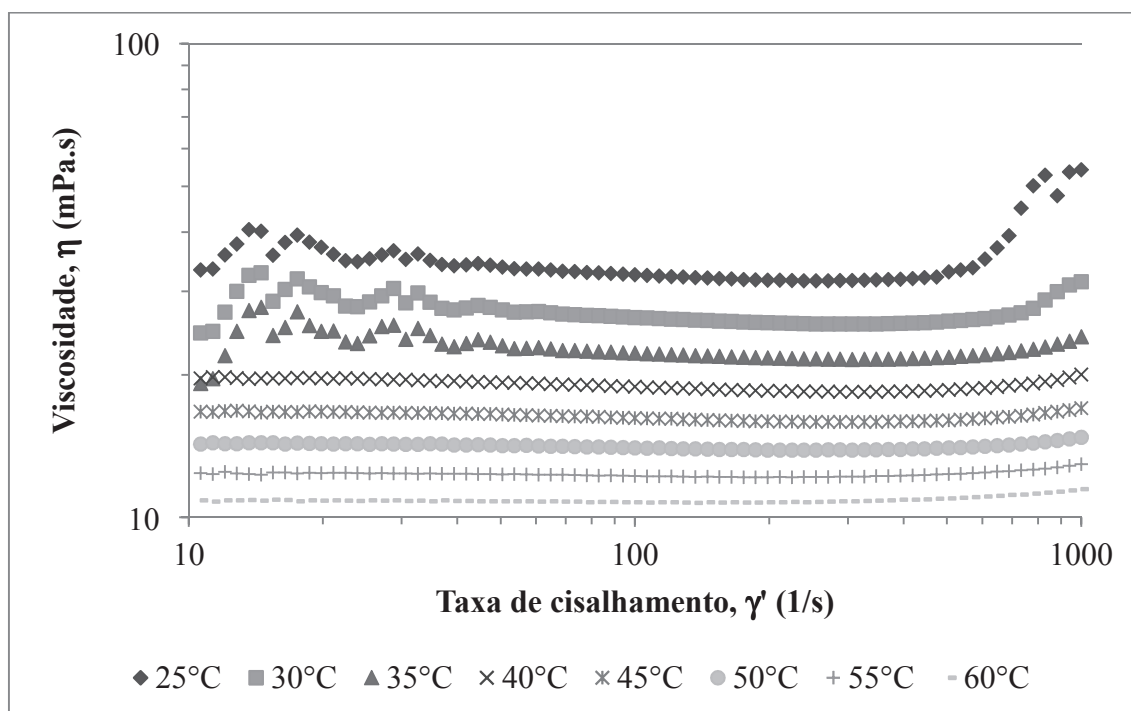
aromáticas presentes no querosene na ordem de 50% e à baixa quantidade de polímero que precisa ser solvatado. A comparação das respostas do reômetro HAAKE MARS III pela alteração do pré-solvente do PIB é apresentada na Figura 26 e com esse resultado, entende-se que a influência da mudança do pré-solvente existe, porém é pequena. Assim se decidiu por continuar investindo nas soluções com querosene devido à sua melhor influência na dispersão do polímero no óleo mineral.

Tendo-se em vista a preparação do circuito fechado de escoamento turbulento construído no laboratório para avaliação do fenômeno de redução do arrasto, e devido à influência da bomba de cavidades progressivas em aumentar a temperatura do fluido durante os testes, iniciou-se um estudo mais abrangente envolvendo a variação da temperatura. Assim, entrou no trabalho reológico a produção das isotermas de 25°C até 60°C mantendo-se a taxa de cisalhamento fixa por ponto e em passos crescentes desde 10 até 1000 por segundo no reômetro HAAKE MARS III e geometria de cilindros concêntricos. Os resultados reológicos obtidos são apresentados no apêndice 2. Para ilustrar as principais observações e demais considerações pertinentes, destacaram-se as figuras 27, para a mistura de OMB com 4% de querosene, e 28, para a mistura de PIB 4.10<sup>6</sup>g/mol a 0,2% em OMB contendo 4% de querosene.



**Figura 27:** Curvas isotérmicas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento das soluções de OMB contendo 4% de querosene, obtidos em ensaios com geometria cilindros concêntricos.

Pode-se notar nas Figuras 27 e 28 como a temperatura influencia no comportamento das soluções tornando-as sistematicamente menos viscosas.



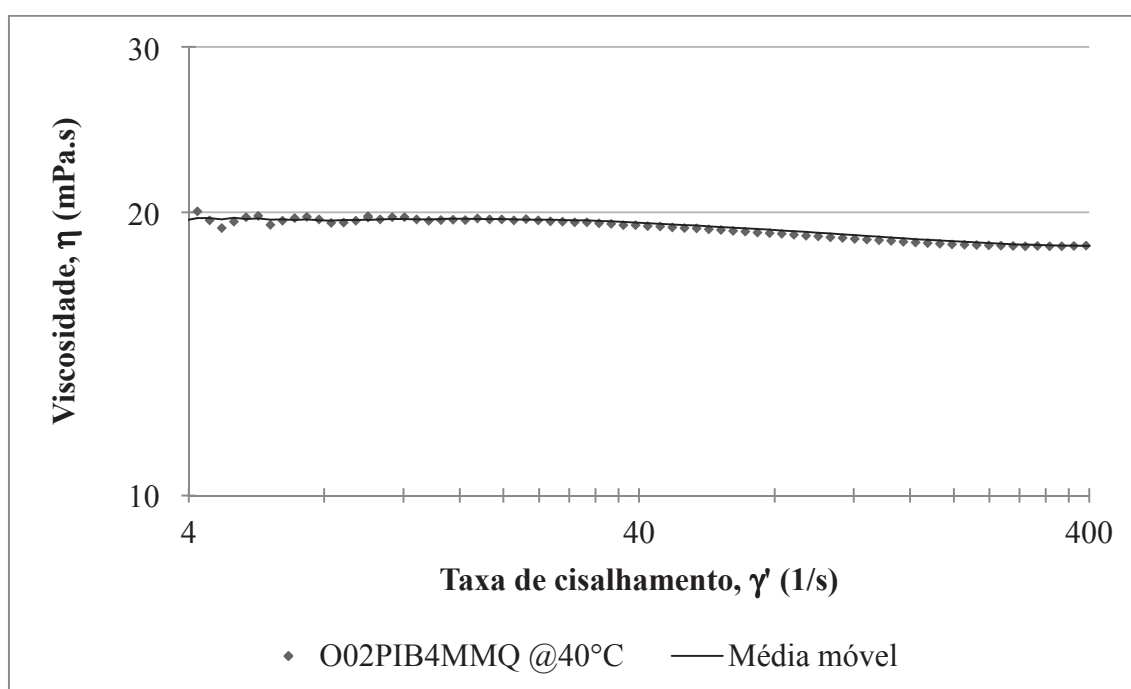
**Figura 28:** Curvas isotérmicas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento da solução de PIB  $4 \cdot 10^6$ g/mol a 0,2% em OMB e querosene (4%), obtidos em ensaios com geometria cilindros concêntricos.

Na figura 27 as isotermas de viscosidade apresentam um comportamento que parte do newtoniano nas temperaturas mais baixas até um comportamento levemente dilatante nas temperaturas mais altas, excluindo-se o fenômeno observado na curva a 60°C a partir da taxa de 900/s, relacionado às instabilidades de Taylor-Couette que ocorrem sob relativamente alta velocidade angular e muito baixa viscosidade dinâmica no modelo de escoamento em placas paralelas.

Diferentemente se observa na Figura 28 o comportamento da solução de PIB  $4 \cdot 10^6$ g/mol a 0,2% em OMB e querosene. Neste caso, a mistura se apresenta pseudoplástica a baixas temperaturas e tende a um comportamento próximo do newtoniano a temperaturas mais elevadas. Observam-se também duas anomalias nas curvas de baixas temperaturas: uma maior flutuação dos dados sob taxa de cisalhamento menor que 30/s e outra sob taxa de cisalhamento maior que 500/s. Estas anomalias podem estar relacionadas a limitações no reômetro devido há dificuldades com a manutenção e calibração periódica ou poderia ser resultado de um comportamento de partículas em

suspensão, justificado pela menor solubilidade do material de maior massa molar em condições de temperaturas menores que 30°C e maior necessidade de tempo para se homogeneizar esse PIB no querosene.

A Figura 29, a seguir, apresenta um corte da curva de viscosidade a 40°C na faixa de 4 a 400/s da taxa de cisalhamento a fim de se destacar o comportamento pseudoplástico da solução de PIB 4.10<sup>6</sup>g/mol a 0,2% em OMB e querosene e evidenciando o patamar de viscosidade no início, a variação da viscosidade em função da taxa e, novamente atingindo uma assíntota.

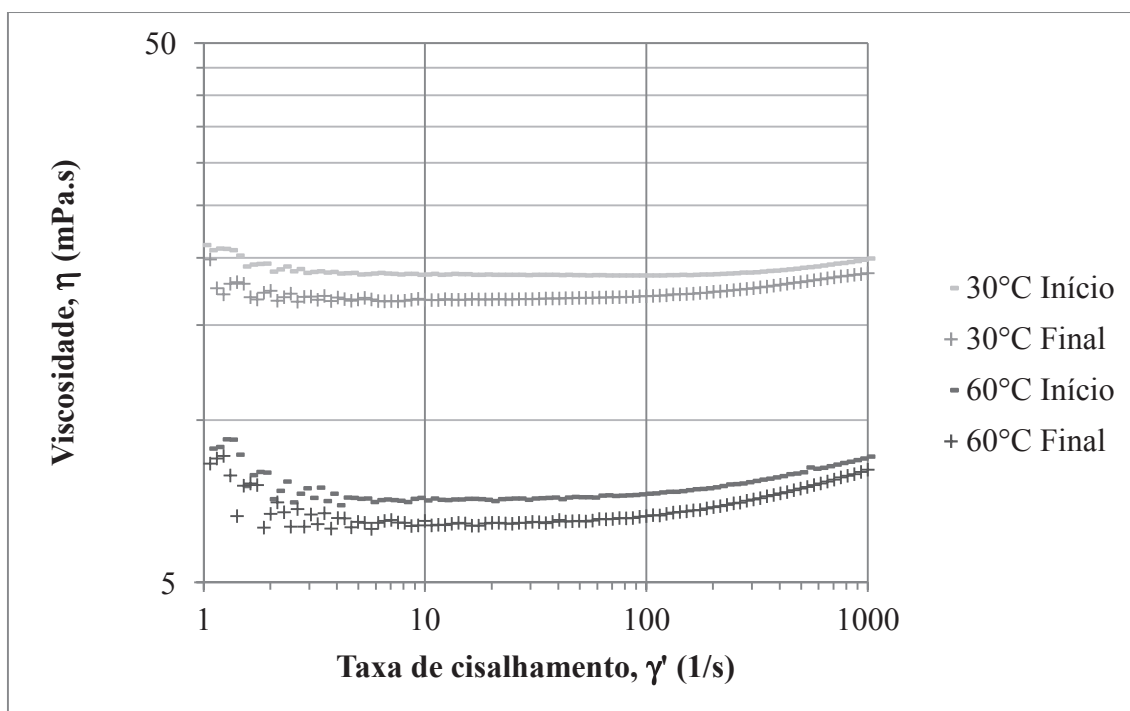


**Figura 29:** Corte da curva viscosidade em função da taxa de cisalhamento da solução de PIB 4.10<sup>6</sup>g/mol a 0,2% em OMB e querosene (4%), a 40°C e obtido em ensaio com geometria cilindros concêntricos, destacando o comportamento pseudoplástico da solução, ainda que bastante diluída.

Inicialmente, as curvas isotérmicas produzidas eram espaçadas de 5 em 5°C, afinal a variação da reologia em função da temperatura não é linear. No entanto, percebeu-se ao longo do tempo que a variação da viscosidade não era muito significativa e que a interpolação linear poderia ser utilizada com muito pouco impacto no erro total do experimento. Vimos, na verdade, que o erro experimental estava muito mais sensível ao diâmetro interno da tubulação de acrílico. Dito isso, foi realizado um mapeamento completo das isotermas de todas as amostras de OMB produzidas em laboratório a partir

dos PIB de  $1.10^6\text{g/mol}$  e  $4.10^6\text{g/mol}$  pré-dispersos em querosene, espaçadas de 10 em  $10^\circ\text{C}$  desde 20 até  $60^\circ\text{C}$ . Todas as curvas produzidas encontram-se reunidas para consulta no apêndice 2, onde se poderá observar que o comportamento reológico é sempre equivalente ao já demonstrado acima: que a viscosidade diminui com o aumento da concentração de querosene e o aumento da temperatura, mas aumenta com a concentração de polímero e com o aumento da massa molar.

A caracterização reológica das amostras serviu ao propósito de se confirmar o comportamento dos fluidos produzidos e verificar que se comporta de modo previsível, ainda que não-newtoniano, mas de maneira que se pôde simplificar através do modelo de potência, segundo Ostwald-de Waele, para o qual a correlação de Metzner & Reed para a determinação do número de Reynolds do regime de escoamento do fluido não-newtoniano pode ser adequadamente aplicada. Além disso, serviu para a prática de realização da reologia para as amostras coletadas durante os ensaios no circuito de escoamento turbulento.

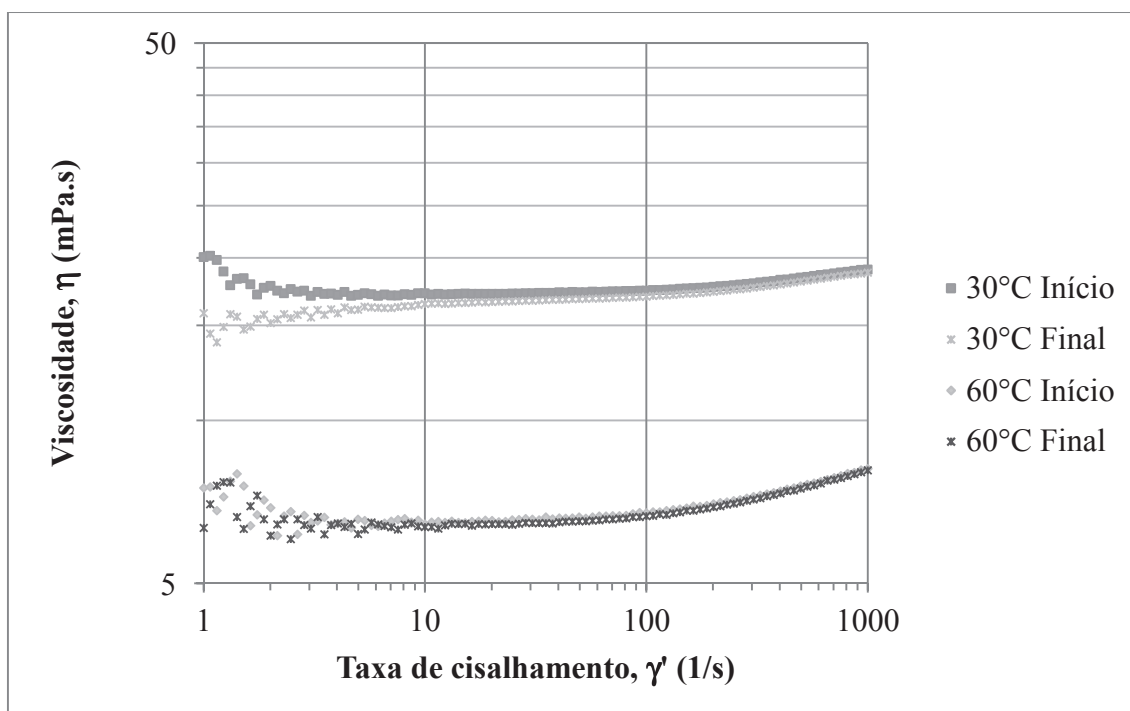


**Figura 30:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas a 30 e a  $60^\circ\text{C}$  para as amostras de solução de 500ppm de PIB  $4.10^6\text{g/mol}$  coletadas no início e no final do ensaio de redução do arrasto no circuito fechado de escoamento.

Outro aspecto avaliado nos ensaios reológicos foi o relacionado à degradação da solução polimérica durante os ensaios. Um gráfico representando os resultados das curvas

reológicas obtidos com as amostras da solução de 500ppm de PIB  $4 \cdot 10^6$ g/mol, coletadas no início do experimento e ao final, pode ser observado a seguir, pela figura 30. São apresentados os resultados obtidos apenas em duas temperaturas, 30 e 60°C, para simplificação.

Comparando as curvas formadas por sinal de “+” com aquelas formadas por sinal de “-”, i.e., comparando as curvas nas mesmas temperaturas, pode ser observado uma diminuição na viscosidade, característico de um processo de degradação da solução polimérica. Esse comportamento também foi observado na figura 31, onde são apresentados os resultados reológicos das amostras coletadas nos ensaios utilizando as soluções de PIB  $1 \cdot 10^6$ g/mol a 500ppm, no entanto, desta vez a variação da viscosidade foi consideravelmente menor. É possível que, sendo o PIB de  $4 \cdot 10^6$ g/mol um material que ao se partir num processo de degradação mecânica produza duas a quatro vezes mais material com massa molar ainda da ordem de  $10^6$ g/mol, este altere mais significativamente a concentração e o comportamento reológico do fluido.



**Figura 31:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas a 30 e a 60°C para as amostras de solução de 500ppm de PIB  $1 \cdot 10^6$ g/mol coletadas no início e no final do ensaio de redução do arrasto no circuito fechado de escoamento.

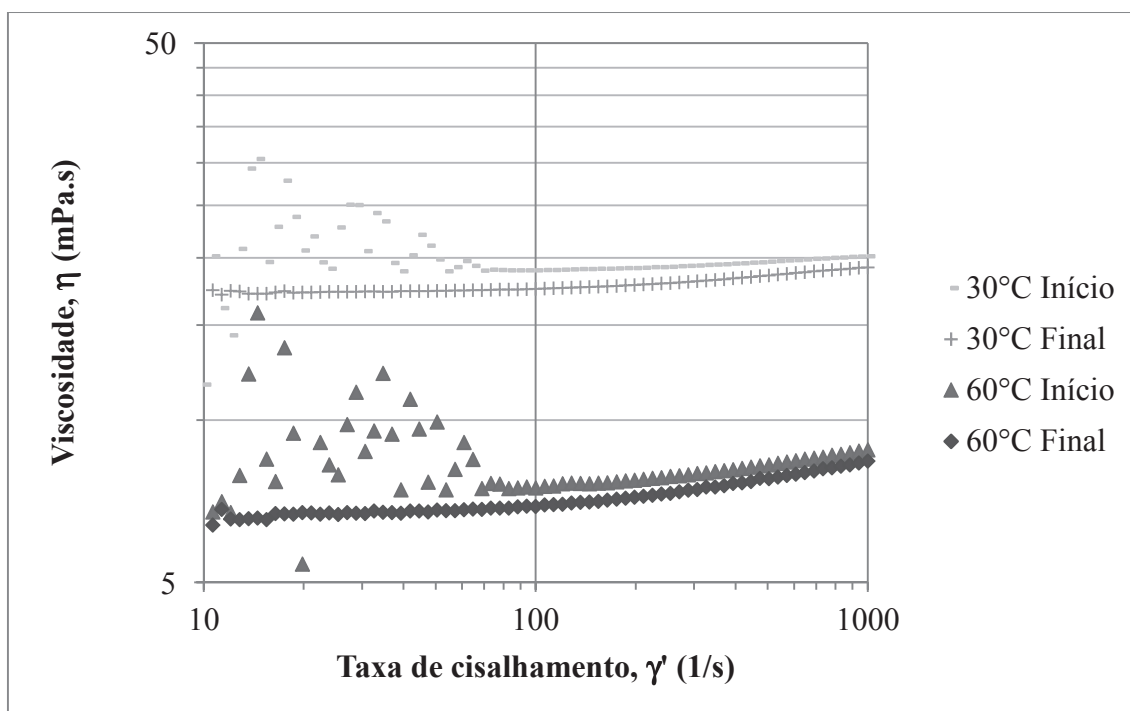
Estas mesmas curvas foram produzidas para as soluções de PIB  $1 \cdot 10^6$ g/mol e  $4 \cdot 10^6$ g/mol, ambas a 1000ppm, e são apresentadas nas figuras 32 e 33 adiante. Observa-



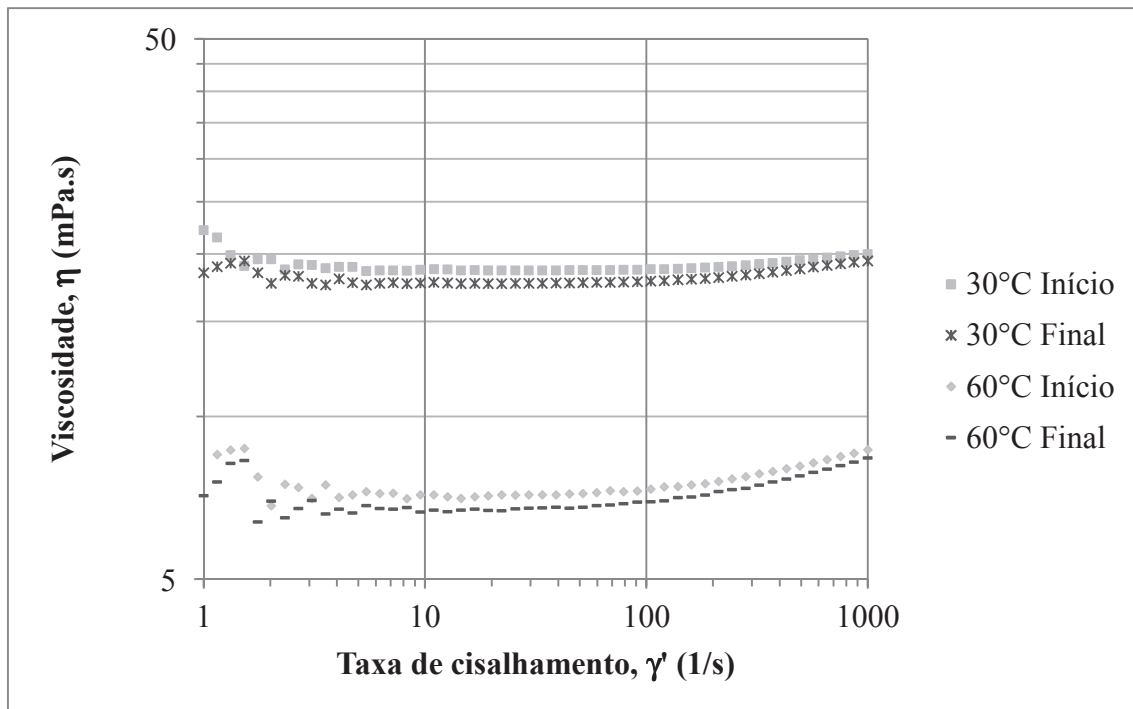
se que apresentam o mesmo comportamento reportado acima, reforçando a hipótese do processo de degradação ocorrendo ao longo do ensaio.

Outra observação é que para as soluções de PIB  $4 \cdot 10^6$ g/mol a 1000ppm a variação na viscosidade foi menor, figura 32. É possível que por ser mais concentrada, mas cisalhada na mesma frequência acabe por produzir solução muito mais concentrada em moléculas de menor massa molar, porém ainda na escala de  $10^6$ g/mol, onde a diminuição da viscosidade esperada pela diminuição da cadeia polimérica sofre a concorrência do grande aumento da concentração.

Por fim, se faz necessário relembrar as anomalias observadas na figura 28, acima, que podem justificar a dispersão dos dados nas curvas de viscosidade das figuras 32 e 33 por problemas de resolução do reômetro ou devido à uma dispersão ineficiente do polímero na solução. Esta segunda hipótese é reforçada por esses ensaios, uma vez que as amostras coletadas no final dos ensaios de escoamento no circuito fechado se mostraram bem coerentes.



**Figura 32:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas a 30 e a 60°C para as amostras de solução de 1000ppm de PIB  $4 \cdot 10^6$ g/mol coletadas no início e no final do ensaio de redução do arrasto no circuito fechado de escoamento.



**Figura 33:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas a 30 e a 60°C para as amostras de solução de 1000ppm de PIB 1.10<sup>6</sup>g/mol coletadas no início e no final do ensaio de redução do arrasto no circuito fechado de escoamento.

### 5.2.1 Reologia por cisalhamento oscilatório

O método escolhido para a avaliação do comportamento viscoelástico dos fluidos produzidos foi o SAOS – do inglês *Small Amplitude Oscillatory Shear* – que consiste basicamente em se trabalhar dentro da região em que existe correspondência linear entre a tensão de cisalhamento aplicada ao material e a deformação sofrida, de forma que a relação 20 é válida:

$$\tau = G\gamma_m \sin \omega t = \mu\gamma_m\omega \cos \omega t \quad (20)$$

onde  $\tau$  é a tensão cisalhante,  $G$  é o módulo de Young,  $\gamma_m$  é a amplitude da deformação,  $\omega$  é a frequência angular e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica.

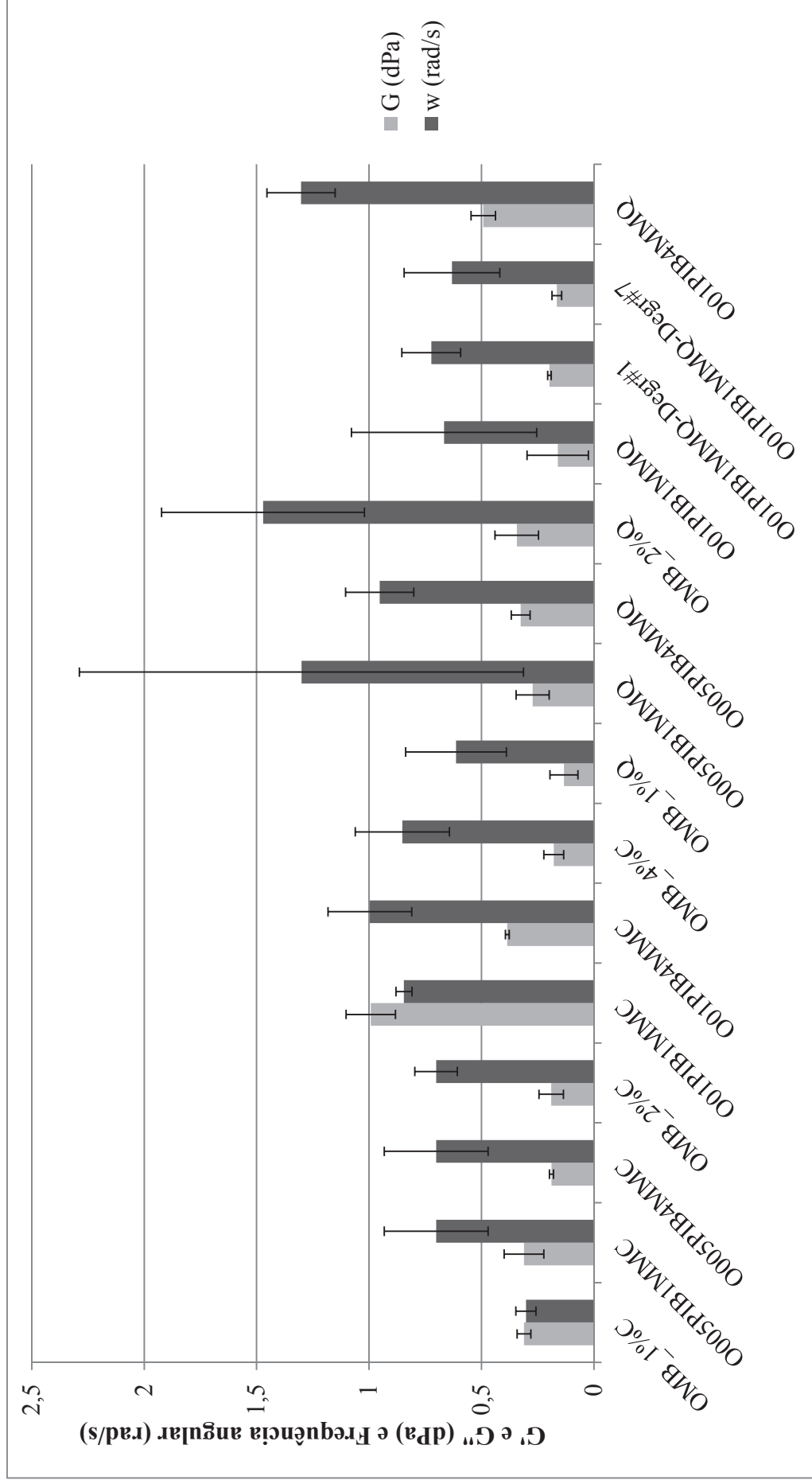
Na região de comportamento visco-elástico linear, a frequência angular imposta pelo reômetro produz uma tensão sobre o fluido que resulta em uma tensão harmônica de amplitude proporcional, que gera um atraso de fase sinusoidal,  $\delta_f$ , em relação à tensão, independente da amplitude de tensão aplicada (CHHABRA & RICHARDSON, 2008).

Estes relacionamentos harmônicos podem ser mais convenientemente expressos em termos de números complexos, definindo-se o módulo de cisalhamento complexo segundo a equação 21:

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} = G' + iG'' \quad (21)$$

onde  $\tau^*$  e  $\gamma^*$  são as respectivas tensão e deformação complexas,  $G'$  é denominado o módulo de armazenamento ou rigidez dinâmica, que por extensão reflete o comportamento elástico do material, e  $G''$  é o módulo de perda, que é uma medida da energia dissipada por ciclo e que por extensão reflete o comportamento viscoso (CHHABRA & RICHARDSON, 2008).

Considerou-se que a avaliação relativa dos resultados de frequência angular quando  $G' = G''$  permitiria inferir e classificar as amostras quanto ao seu caráter visco-elástico e relacioná-los em função de suas características, tais como concentração, massa molar e presença de bons solventes para o PIB no meio amostral. Os resultados reológicos foram obtidos no reômetro ANTON PAAR MCR502, conforme seção 4.5.3, e são apresentados na figura 34. Cada amostra foi analisada no mínimo em triplicata, porém os resultados muitas vezes se mostraram com desvios muito altos, por isso algumas amostras foram analisadas quatro ou mais vezes. Ainda assim, o desvio padrão obtido utilizando os dados das amostras com resultados mais coerentes produziram desvios de até 13,6% no valor dos módulos  $G'$  e  $G''$  e de até 98,8% no valor de  $\omega$ .

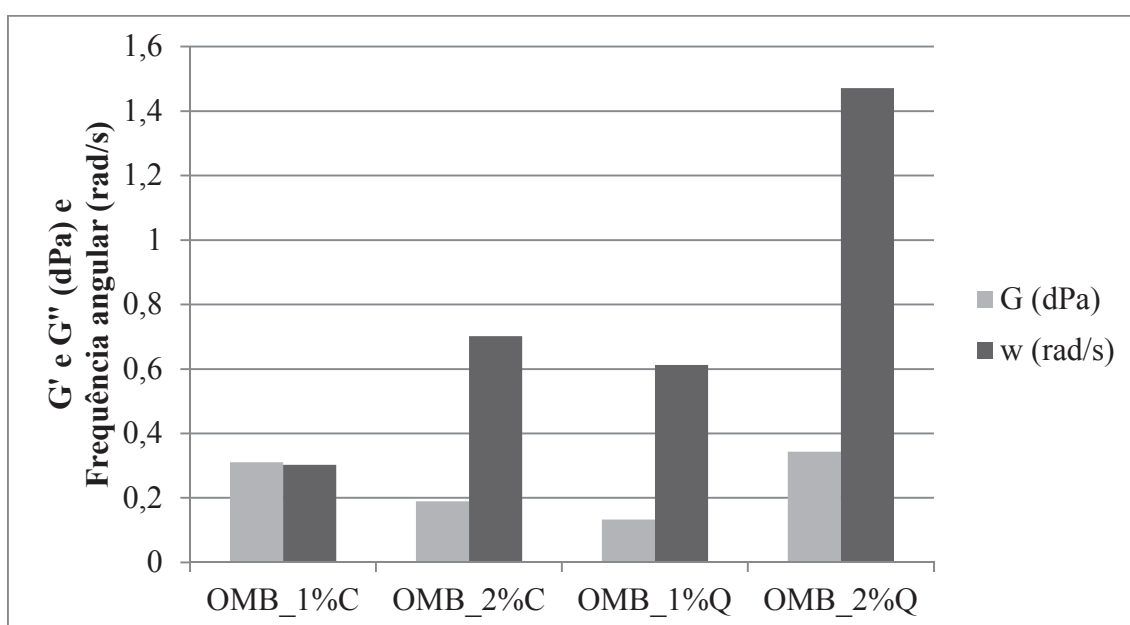


**Figura 34:** Histograma dos resultados de cruzamento entre as curvas dos módulos  $G'$  e  $G''$  em função da frequência angular, cada qual com uma barra de erro simbolizando o desvio padrão das triplicatas.

Apesar dos altos desvios, analisaram-se os padrões dos resultados obtidos.

Em função do procedimento adotado, a baixas frequências angulares o módulo de armazenamento  $G'$  é maior que o módulo viscoso  $G''$  definindo um comportamento predominantemente elástico, mas conforme a frequência aumenta o  $G'$  acompanha o  $G''$  até que ocorre o cruzamento e o comportamento viscoso prevalece. As curvas das amostras apresentadas na figura 34 podem ser encontradas no apêndice 3.

A primeira questão a se verificar tem relação aos solventes utilizados. Pode-se perceber pela figura 35 que o cruzamento das curvas dos módulos  $G'$  e  $G''$  ocorreu numa condição de maior frequência quando houve o aumento da concentração de solvente no meio, seja ele o ciclohexano ou o querosene, ilustrando que a maior concentração desses solventes sustenta o comportamento elástico para condições de maior frequência.

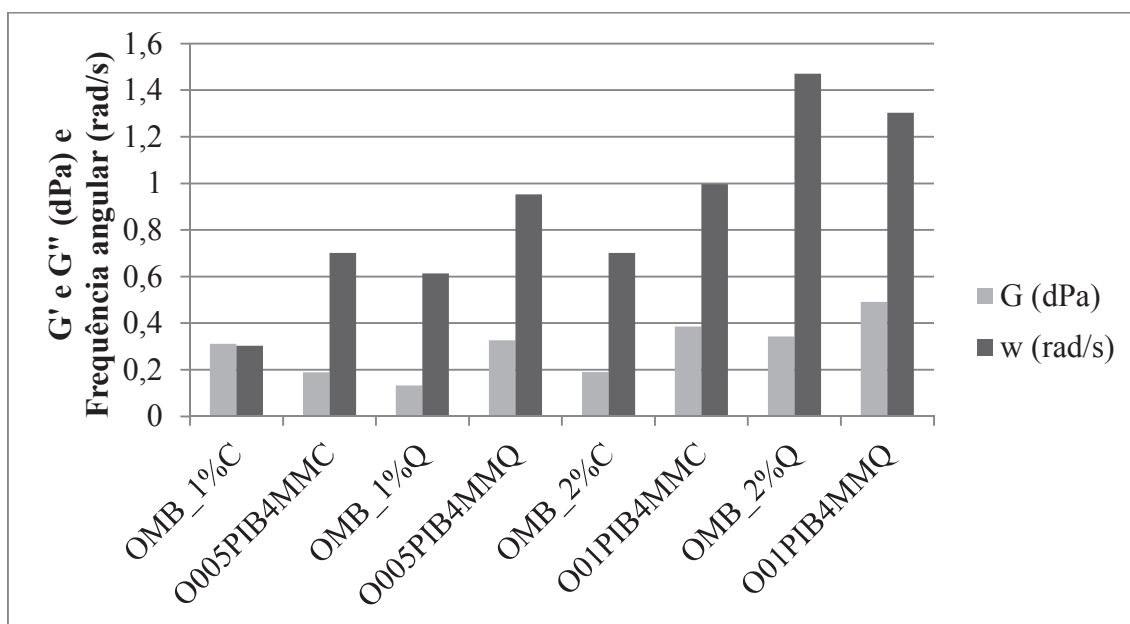


**Figura 35:** Destaque do histograma da figura 34, das bases oleosas (com solvente e sem PIB).

Como pode ser visto na figura 34, embora os desvios padrão dos resultados sejam menores do que os obtidos nas leituras de frequência, pouco se pode dizer sobre o comportamento da amostra em função apenas do valor do módulo.

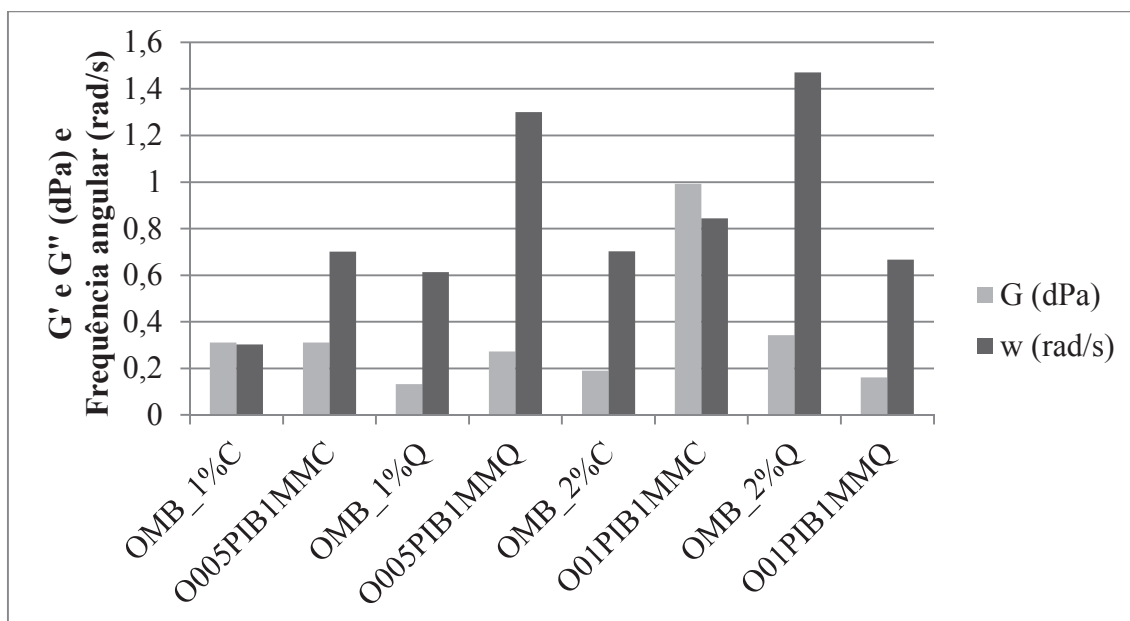
Como a figura 35 mostrou que o resultado depende muito da composição, a interpretação dos dados seguintes deve ser sempre aos pares, comparando-se a amostra aditivada com o PIB com a sua respectiva base sem aditivo. A figura 36 resume os

resultados obtidos sobre as amostras com o poliisobutileno de massa molar  $4.10^6$ g/mol com sua respectiva base oleosa do lado esquerdo.



**Figura 36:** Destaque do histograma da figura 34, das amostras com PIB de  $4.10^6$ g/mol do lado direito de suas respectivas bases oleosas (com solvente e sem PIB).

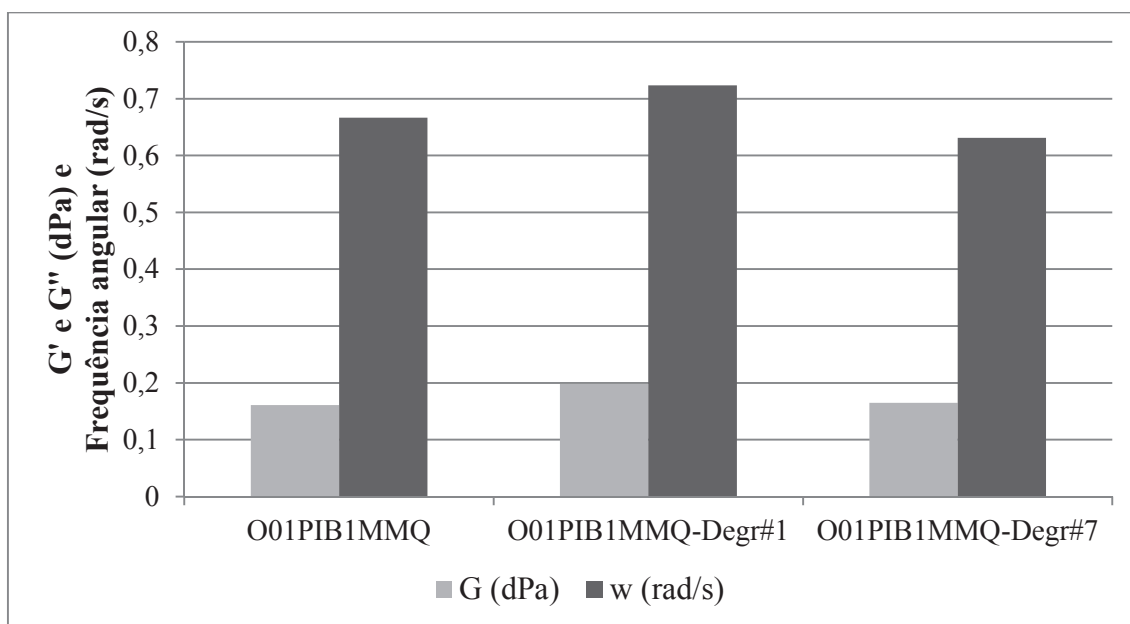
Da mesma forma, a figura 37 reúne os resultados obtidos sobre as amostras com o poliisobutileno de massa molar  $1.10^6$ g/mol.



**Figura 37:** Destaque do histograma da figura 34, das amostras com PIB de  $1.10^6$ g/mol do lado direito de suas respectivas bases oleosas (com solvente e sem PIB).

Se observados os resultados dois a dois, dos pares base e amostra aditivada, poderá perceber que as amostras aditivadas com o polímero sempre apresentam o cruzamento entre os módulos  $G'$  e  $G''$  numa condição de maior frequência, sugerindo que o comportamento delas é elástico sob condições mais severas de cisalhamento. Porém, estranhamente, as amostras de PIB de  $1.10^6\text{g/mol}$  e  $4.10^6\text{g/mol}$  a 1000ppm na base de óleo contendo querosene apresentou o comportamento inverso. Este efeito pode ter ocorrido devido à baixa temperatura em que a análise foi realizada, favorecendo uma contração da molécula no meio, promovendo um menor raio de giração, o que se traduz em menor solvatação e maior comportamento de partículas em suspensão.

Por fim, observando a figura 38, que foca nas amostras inicial e final obtidas no ensaio de avaliação da degradação mecânica dos fluidos e as compara com a amostra produzida no laboratório, à esquerda, pouco se pode aproveitar para descrever que houve degradação com estes dados, pois a amostra final do ensaio se assemelha muito com a amostra produzida no laboratório, tornando muito difícil justificar alguma perda de elasticidade da amostra quando comparada à amostra inicial do circuito experimental.



**Figura 38:** Destaque do histograma da figura 34, das amostras com PIB de  $1.10^6\text{g/mol}$  do ensaio de degradação comparadas à amostra produzida no laboratório.

Considerando as condições experimentais dos ensaios oscilatórios da técnica SAOS, o polímero, que deve se encontrar numa conformação enovelada e distribuída devido à entropia do meio, não obtém energia suficiente para se estirar no escoamento devido à

baixa amplitude, ou seja, não é provocado a alongar-se no sentido do cisalhamento, de modo que os efeitos viscoelásticos que se desejavam observar não podem ocorrer. Desta forma, é possível que utilizando técnicas de reometria extensional ou de LAOS (do inglês *Large Amplitude Oscillatory Shear*) o polímero possa ser forçado a se alongar no meio, produzindo os efeitos viscoelásticos esperados.

### 5.3 Determinação da Redução do Arrasto

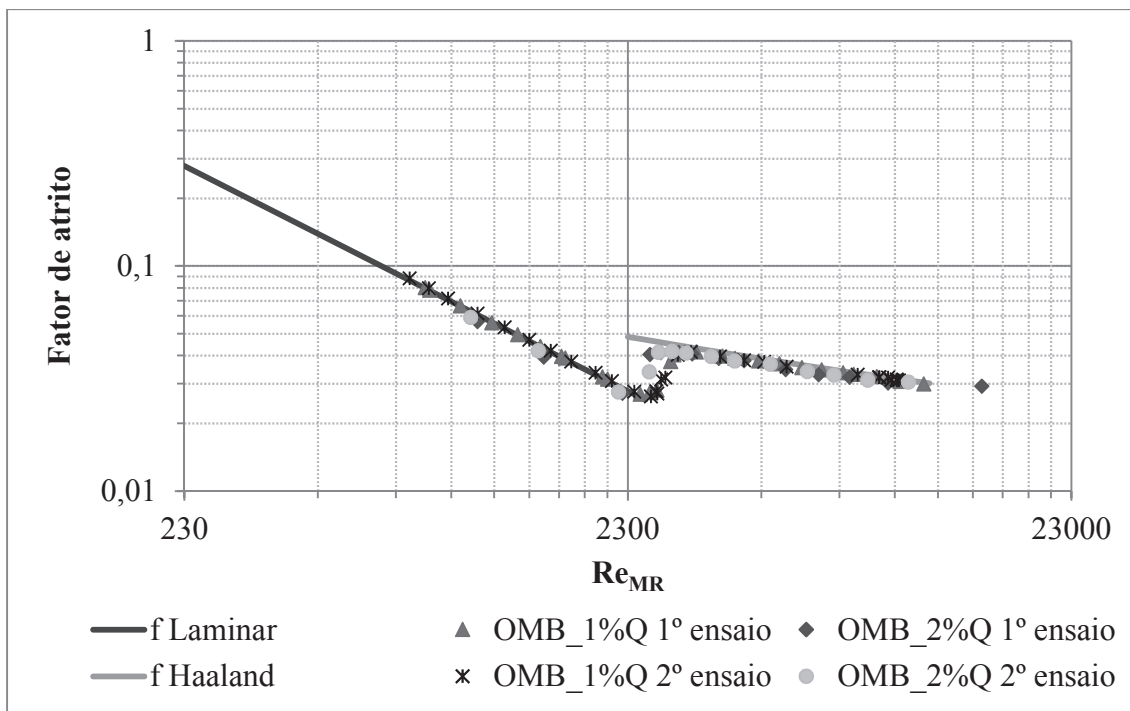
Em meios orgânicos, variáveis como qualidade do solvente, massa molar, raio de giro, concentração e temperatura afetam diretamente a eficiência dos polímeros na capacidade de reduzir o atrito hidrodinâmico. Neste trabalho o fenômeno de redução de arrasto foi determinado variando-se a concentração e a massa molar do polímero Poliisobutileno.

A obtenção do grau de redução de arrasto das soluções poliméricas avaliadas foi realizada em um circuito fechado de escoamento (*flow loop*) descrito na seção 4.6 variando-se a frequência da bomba (e com isso a vazão resultante) de 7 até 60 Hz e as medições de fator de atrito foram obtidas desde o regime laminar até  $Re_{MR}$  da ordem de  $10^4$ . Ao longo dos testes, algumas amostras de fluido foram coletadas e as medições das propriedades reológicas foram avaliadas. Os resultados de redução de arrasto apresentados neste trabalho foram obtidos para soluções de PIB com massa molar de  $1.10^6$ g/mol e  $4.10^6$ g/mol, produzidas nas concentrações de 500 e 1000ppm e as tabelas de tratamento dos dados podem ser lidas no apêndice 4.

Os resultados experimentais de fatores de atrito obtidos nos testes com óleo mineral contendo querosene industrial a 1 e 2%, figura 39, foram tomados como base para o cálculo da redução do arrasto obtido pelo circuito e sempre que havia a troca do inventário de fluido no circuito fechado de escoamento, uma rodada de ensaios com óleo puro era realizada para verificar a limpeza do sistema, avaliada através da conformidade dos fatores de atrito obtidos com os fatores de atrito da literatura, segundo as correlações para os regimes laminar e turbulento, com erro de até 10%, sem considerar os resultados obtidos na região de transição, por conta da descontinuidade existente entre as duas equações que definem cada regime de escoamento.

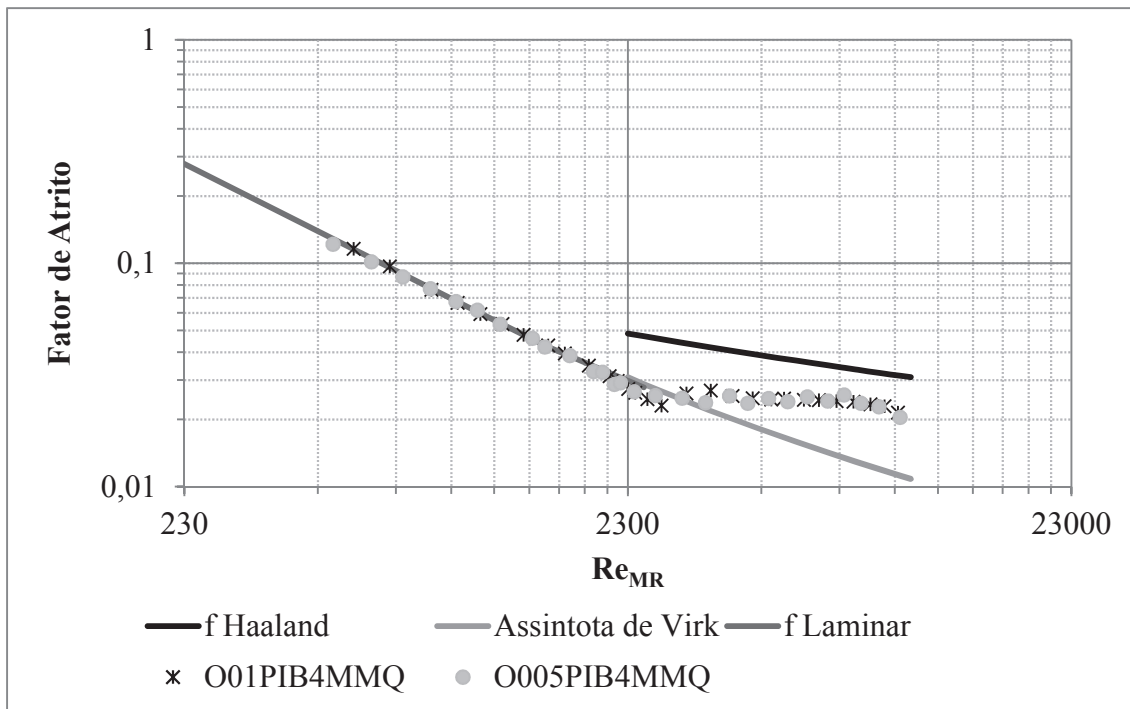
Como os resultados de fatores de atrito obtidos com as soluções aditivadas com o PIB descolam da curva do regime turbulento segundo Haaland, uma nova curva é adicionada ao diagrama de Moody contendo a correlação de Virk para a assíntota de máxima redução do arrasto, auxiliando na visualização do fenômeno e também do seu desenvolvimento ao longo do ensaio, figuras 40 e 41.



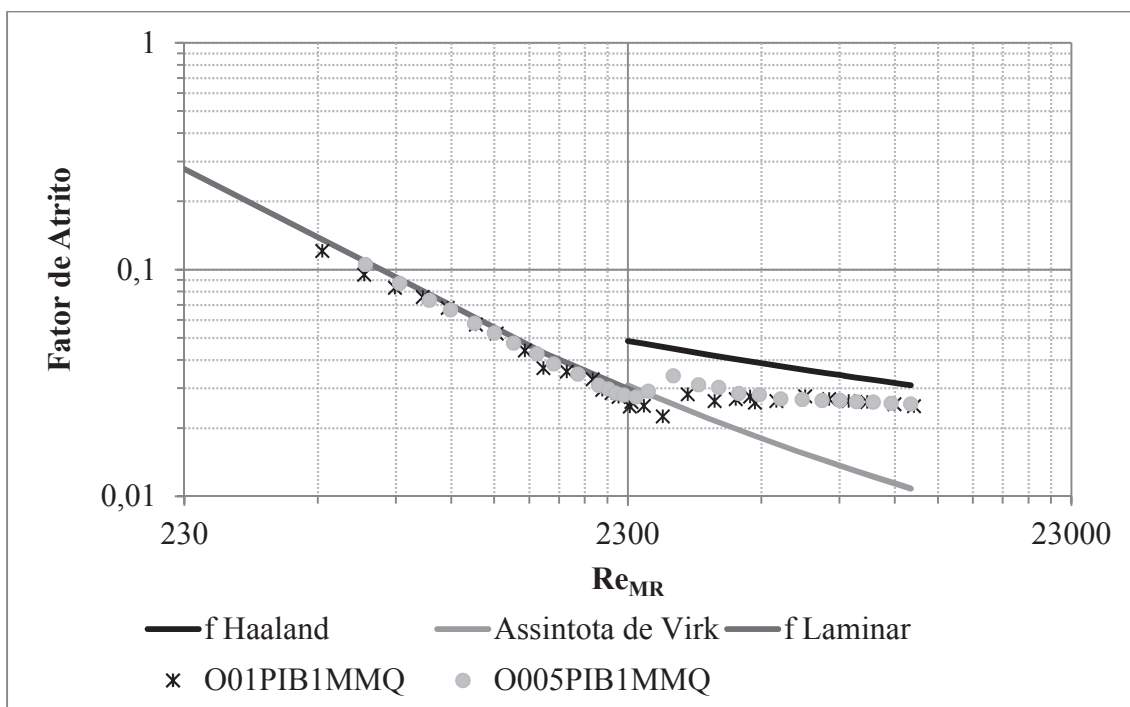


**Figura 39:** Avaliação do fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, para o escoamento do óleo mineral com 1 e 2% de querosene no circuito fechado de escoamento frente às curvas teóricas de regime de escoamento.

Pode-se perceber na figura 40 que os comportamentos dos fluidos foram muito próximos, não sendo possível perceber qualquer alteração na eficiência da redução do arrasto em função da concentração de polímero utilizada. A figura 41, onde se avalia o polímero de menor massa molar, corrobora esta observação, exceto por alguma mudança de comportamento na região inicial da assíntota de Virk, até que as duas curvas voltam a coincidir a partir de  $Re_{MR} > 5000$ . Este pode ser um reflexo da alta concentração trabalhada, pois como reportou CHOI *et al.* (1999), o fenômeno apresenta um comportamento logarítmico em que, a partir de uma concentração crítica, o aumento da concentração não resulta em significativo aumento de eficiência.

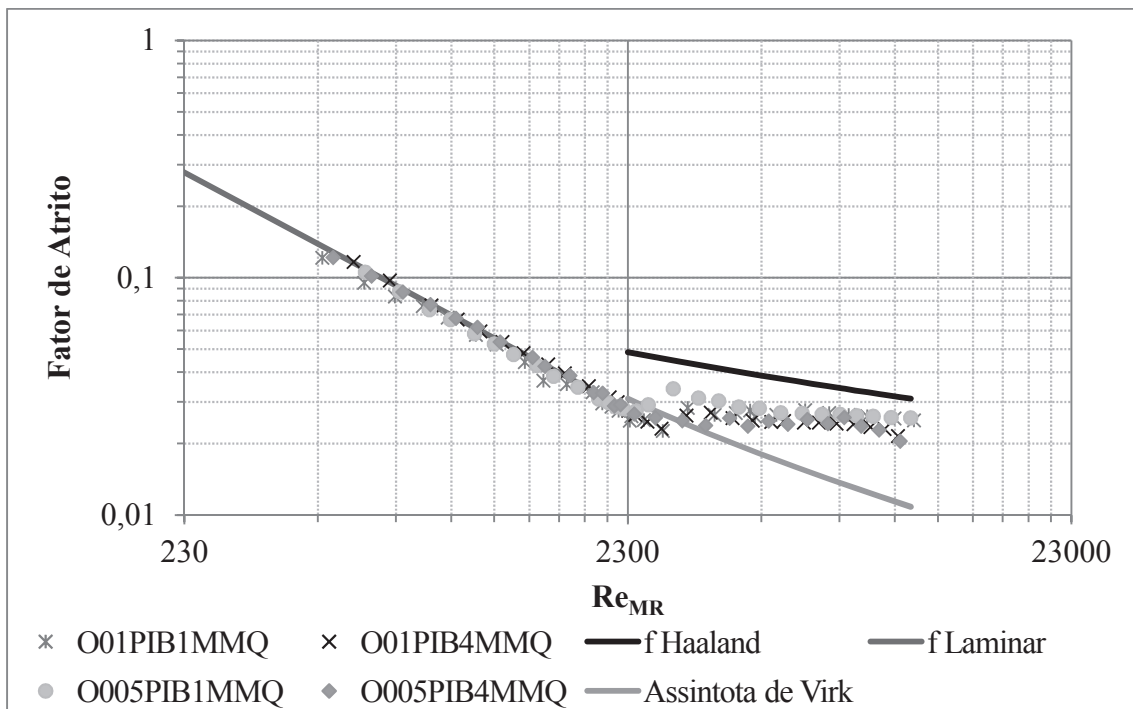


**Figura 40:** Avaliação comparativa dos resultados de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, obtidos com as soluções de PIB 4.10<sup>6</sup>g/mol a 500 e 1000ppm frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR.



**Figura 41:** Avaliação comparativa dos resultados de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, obtidos com as soluções de PIB 1.10<sup>6</sup>g/mol a 500 e 1000ppm frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR.

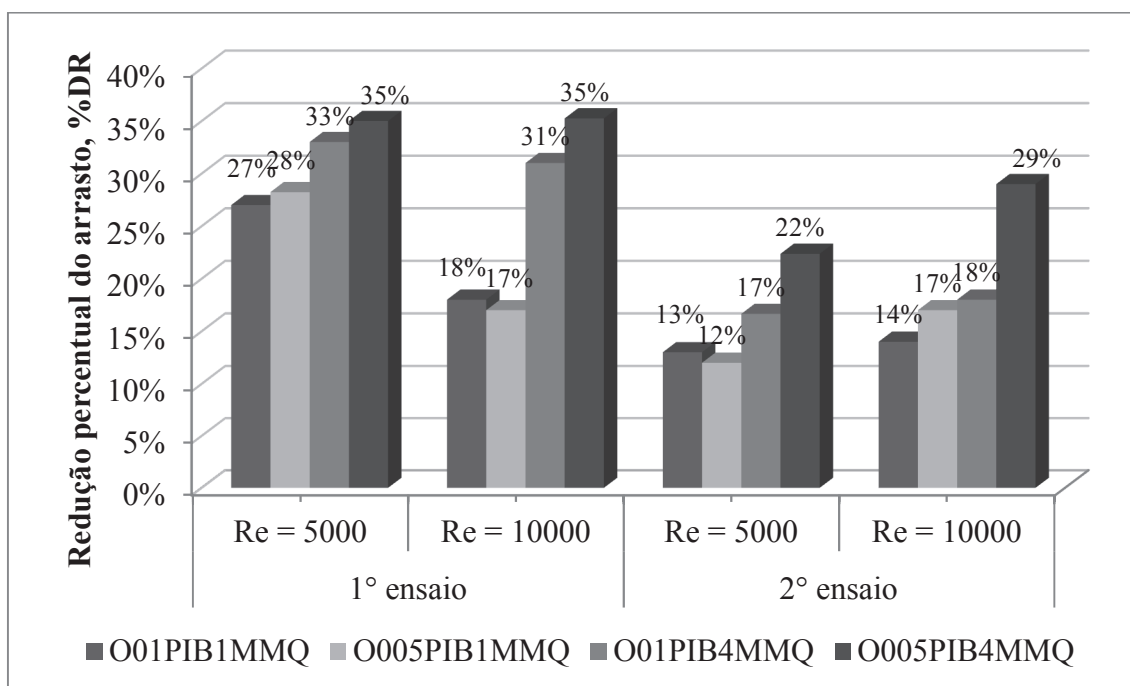
A figura 42 reúne as curvas experimentais das quatro soluções de PIB, sendo as duas massas molares,  $1.10^6\text{g/mol}$  e  $4.10^6\text{g/mol}$ , cada qual nas duas concentrações trabalhadas, 500 e 1000ppm. Neste gráfico, verifica-se que existe um efeito de maior eficiência de redução do arrasto associado à massa molar do polímero. Com auxílio da figura 43 pode-se notar que a solução contendo a maior massa molar de polímero redutor de arrasto foi o que trouxe resultados de redução de arrasto mais expressivos no circuito experimental de escoamento.



**Figura 42:** Curvas experimentais de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, obtidas com as soluções de PIB de  $1.10^6\text{g/mol}$  e de  $4.10^6\text{g/mol}$  nas concentrações de 500 e 1000ppm, cada, frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR.

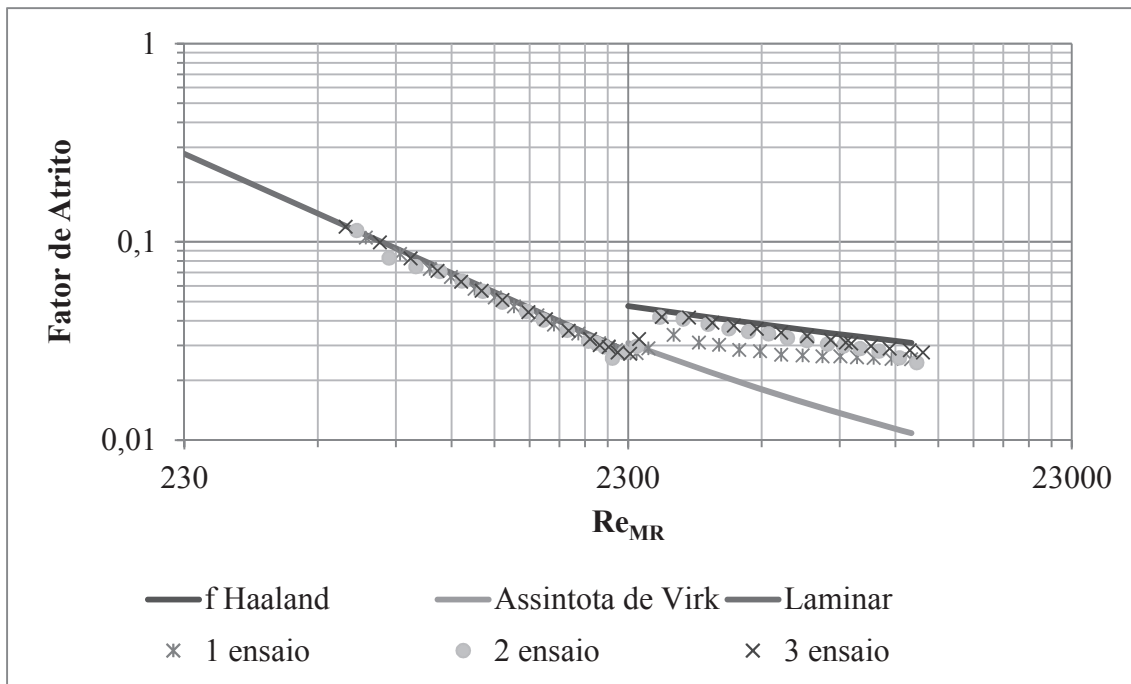
No entanto, há uma inversão de comportamentos envolvendo as concentrações estudadas. Quando o aditivo polimérico é o PIB de massa molar  $1.10^6\text{g/mol}$ , a redução na concentração resultou em uma pequena variação da eficiência, da ordem de 1%, enquanto que para PIB de massa molar  $4.10^6\text{g/mol}$ , a redução na concentração resultou em um pequeno aumento da eficiência, da ordem de 2 a 4%. Como essas diferenças estão dentro da margem de erro experimental do circuito construído, não é possível estabelecer uma evidência de que o parâmetro concentração foi significativo de alguma forma, e a

interpretação possível é de que para esses altos níveis de dosagem, o parâmetro concentração se apresentou não significativo.



**Figura 43:** Histograma comparativo dos resultados de redução de arrasto obtidos com as soluções de 500 e 1000 ppm de PIB  $1.10^6$  e  $4.10^6$  g/mol e em ensaios consecutivos.

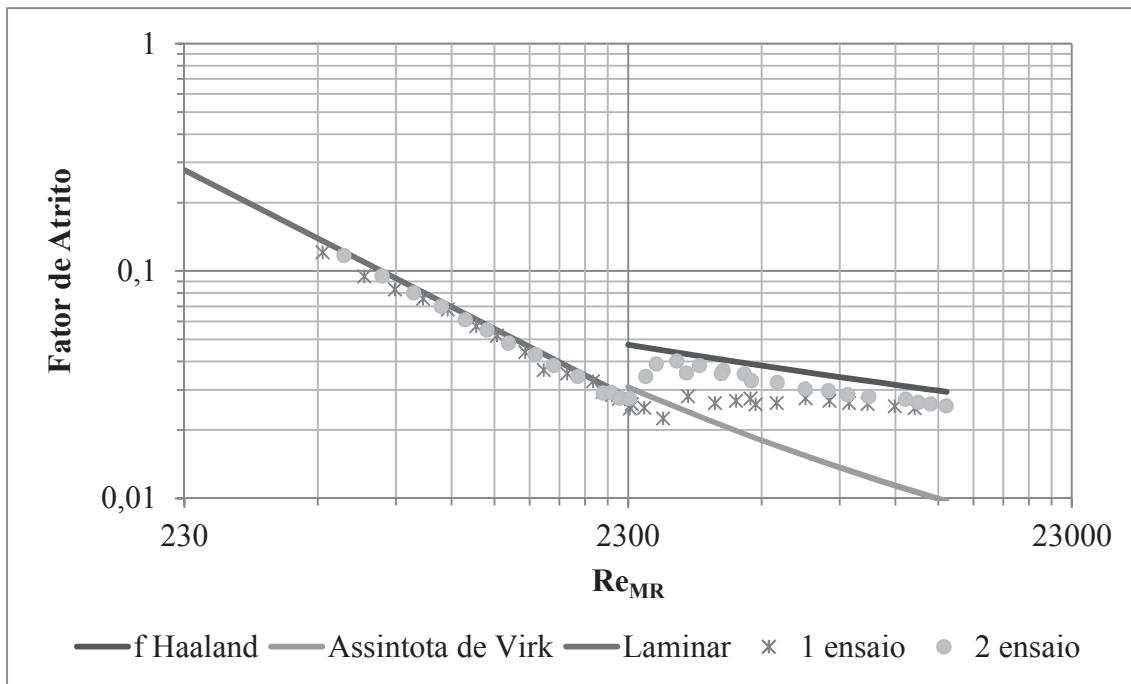
Verifica-se também nas figuras 41 a 43 que as soluções se degradaram de alguma maneira ao longo do ensaio, pois a redução do arrasto obtida não é constante e tende para a curva base do regime turbulento, ao longo do ensaio. Para auxiliar na investigação sobre se houve alteração do fluido por uma possível degradação mecânica, a solução utilizada no primeiro ensaio foi novamente homogeneizada a baixa vazão e avaliada num segundo ensaio. O histograma da figura 43, acima, e as figuras 44 a 47 apresentam os resultados dos ensaios realizados em sequência, para cada solução.



**Figura 44:** Avaliação de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, da solução polimérica de PIB  $1.10^6$ g/mol a 500ppm em 3 ensaios consecutivos, frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR.

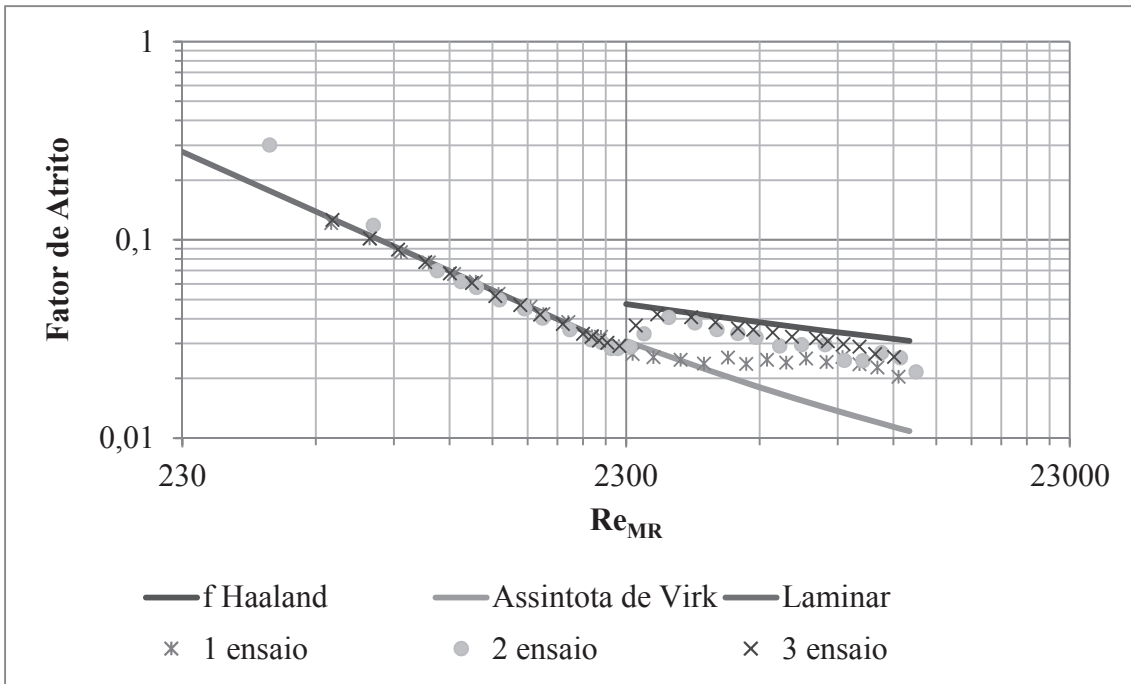
Nas figuras 44 a 47 pode-se perceber que existe uma evidente perda de eficiência das soluções, não sendo possível reproduzir os resultados obtidos no primeiro ensaio, demonstrando que existe mudança ocorrendo no fluido.

Como visto na seção anterior, foram apresentados nas figuras 30 a 33 os resultados obtidos com a caracterização reológica dos fluidos destes ensaios, confirmando que houve alguma alteração significativa da composição do fluido, sendo que não deve ser por perda de voláteis, como os hidrocarbonetos que compõem o querosene, visto que isso faria aumentar a viscosidade ao invés de diminuir como observado. Portanto, esta diminuição de viscosidade deve estar relacionada à diminuição da massa molar do polímero de tal forma que a redução do arrasto não foi suficientemente compensada pelo aumento da concentração dos polímeros de menor massa molar.

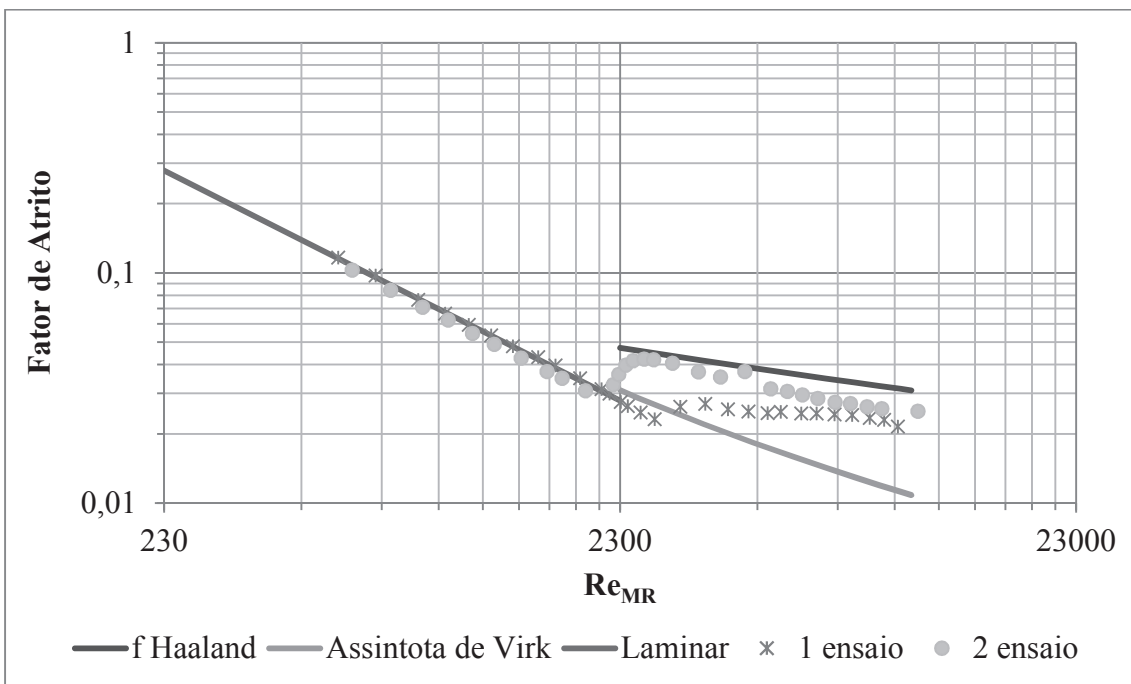


**Figura 45:** Avaliação de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, da solução polimérica de PIB  $1.10^6$ g/mol a 1000ppm em 2 ensaios consecutivos, frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR.

Os ensaios foram realizados quase sem interrupções durante as aproximadamente seis horas de execução necessárias. Quase sem interrupções, pois sempre que se observava algum vazamento no sistema hidráulico de medição da pressão, ou quando ocorria alguma leitura espúria devido à presença de bolhas no sistema, o ensaio era interrompido temporariamente para as devidas correções. Sendo assim, em geral, o circuito de escoamento tende a se aquecer ao longo do dia devido ao atrito e à falta de um sistema de arrefecimento. Segundo a literatura (LEE *et. al.*, 2002), essas moléculas podem ficar mais susceptíveis à degradação mecânica em ambiente mais quente.



**Figura 46:** Avaliação de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, das soluções poliméricas preparadas com 500ppm de PIB  $4 \cdot 10^6$ g/mol em 3 ensaios consecutivos, frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR.



**Figura 47:** Avaliação de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, das soluções poliméricas preparadas com 1000ppm de PIB  $4 \cdot 10^6$ g/mol em 2 ensaios consecutivos, frente às curvas teóricas de regime de escoamento e MDR.

Além disso, se considerarmos o artigo de EL-HAKIM *et al.* (2009), onde se afirma com base nas orientações do fornecedor do produto comercial que as moléculas de polímeros para redução do arrasto são susceptíveis à degradação mecânica quando em escoamentos com velocidades médias a partir de 4,6m/s, é possível que a degradação mecânica no circuito construído no NIDF fosse intensa, uma vez que se atingiu essa velocidade a partir de  $Re = 2300$ .

Com base nessas observações, um novo método de estudos foi considerado para se verificar o comportamento das soluções no circuito fechado de escoamento em função do tempo e com isso obter a taxa de perda de eficiência do aditivo polimérico como redutor de atrito hidrodinâmico.

#### **5.4 Degradação Mecânica do Polímero Redutor de Atrito Hidrodinâmico**

Um processo de degradação mecânica do fluido ao longo dos ensaios de perda de carga no escoamento turbulento foi identificado pela observação das alterações nas curvas reológicas obtidas das amostras coletadas durante os ensaios, tanto para as soluções de 500ppm quanto para as soluções de 1000ppm, independentemente da massa molar do PIB, no entanto estas alterações foram significativamente menores sobre as soluções de PIB de  $1.10^6$ g/mol. A degradação do aditivo polimérico já foi observada no oleoduto que corta o Alasca, que liga a Baía de Prudhoe a Valdez, onde cerca de 28% de redução da perda de carga foi atingida, porém a cada 100km era necessária a reaplicação do produto devido à perda de eficiência (HOYT, 1972 *apud*: KULICKE *et al.*, 1989).

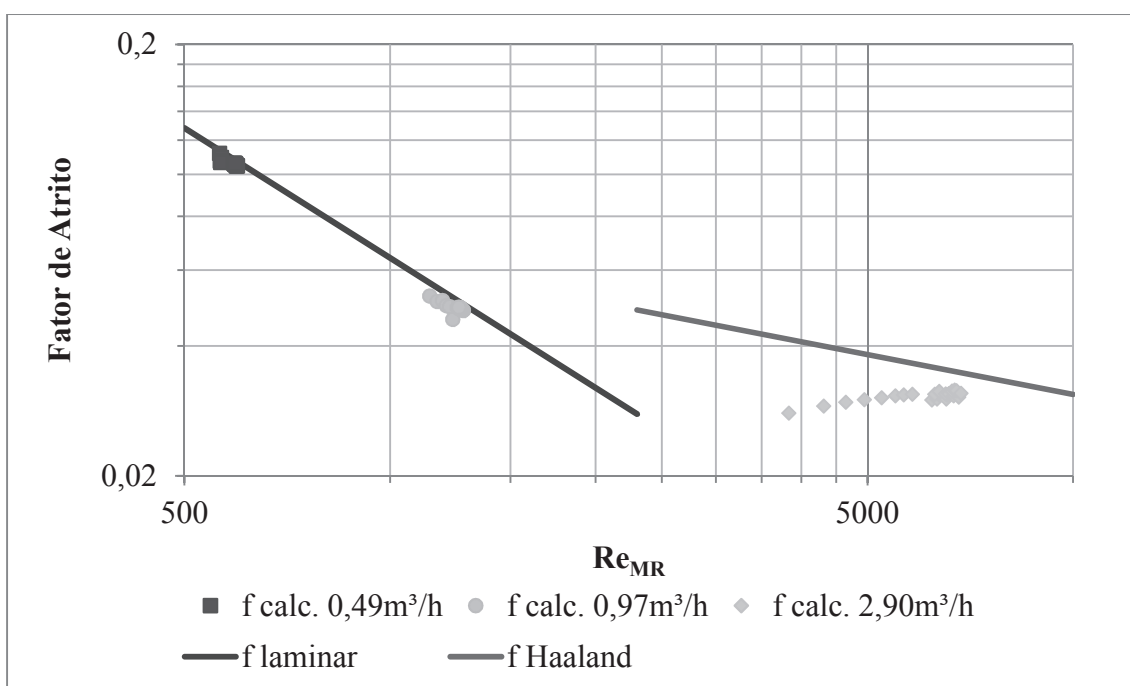
Os efeitos de tamanho de cadeia dos polímeros e sua degradação devido ao cisalhamento são aspectos bastante estudados. A redução de atrito ocorre somente a partir de uma massa molar mínima do polímero, e atinge uma redução máxima com uma massa molar mais alta, a partir da qual não se observa maior benefício. Portanto, o problema da degradação mecânica é a diminuição da massa molar por cisalhamento da molécula durante o escoamento turbulento e, com isso, a diminuição da eficiência na redução de atrito hidrodinâmico (CHOI *et al.*, 1999, MORGAN & MCCORMICK, 1990).

A degradação da solução polimérica durante os ensaios no circuito experimental construído no NIDF é algo que deve ser levado em conta e para poder verificar o quanto esse efeito pode ter afetado os ensaios de perda de carga realizados, uma modificação no procedimento foi realizada e detalhada na seção 4.8, de modo que foram realizados ensaios com vazões definidas e controladas e o comportamento do fluido e do escoamento



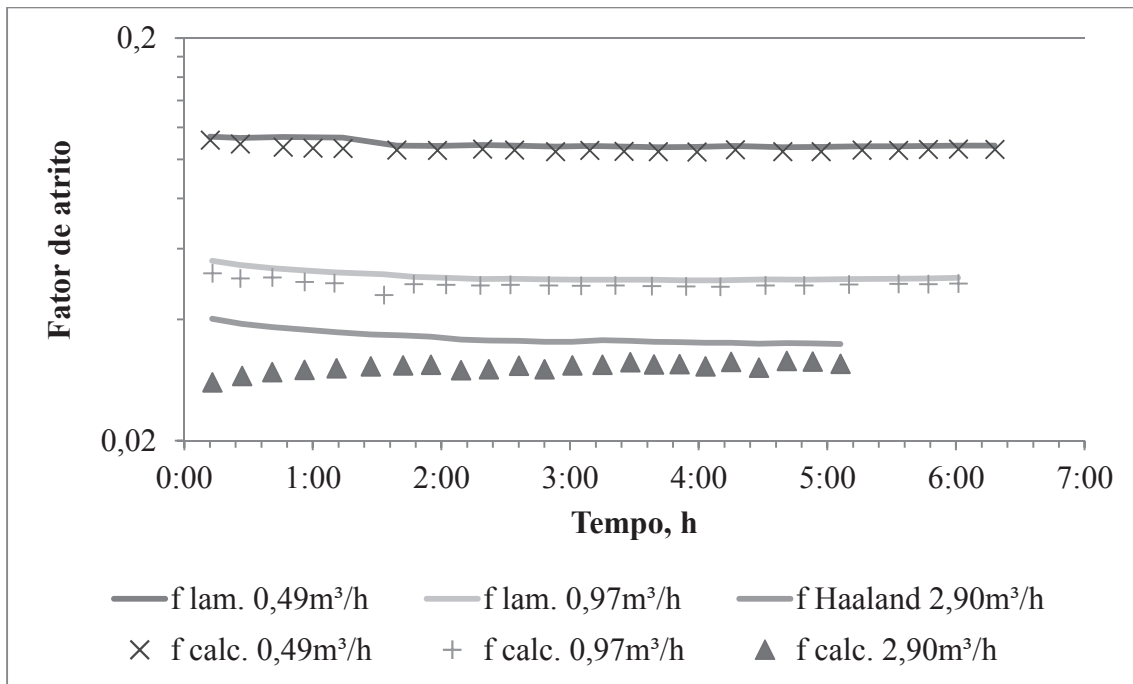
foram registrados ao longo do tempo. Os resultados obtidos e registrados nas tabelas de tratamento dos dados podem ser lidos no apêndice 5.

Na figura 48 são apresentados os dados de três ensaios de degradação utilizando soluções de PIB  $1.10^6\text{g/mol}$  na concentração de 500ppm. As vazões escolhidas foram de aproximadamente 8 e 16L/min, propositadamente dentro da região laminar, e de 48L/min, propositadamente dentro da região turbulenta. Pode-se ver que na região laminar do escoamento os dados são bem consistentes, se dispersando um pouco mais sobre a curva de Darcy no ensaio com maior vazão devido à mudança de viscosidade do fluido em função do aumento da temperatura provocado pelo trabalho da bomba e pelo atrito do fluido no escoamento. Porém é nítida a mudança no comportamento durante o ensaio na maior vazão, com o número de Reynolds aumentando ao longo do tempo numa faixa ampla até atingir uma condição estável. No entanto, os pontos não seguem paralelos à nenhuma curva base, laminar ou turbulenta, portanto deve existir mais algum outro fenômeno acontecendo no tempo além do aumento da temperatura.



**Figura 48:** Resultados experimentais de fator de atrito em função do número de Reynolds, segundo Metzner&Reed, obtidos com as soluções de PIB de  $1.10^6\text{g/mol}$  na concentração de 500ppm em 3 ensaios de degradação a vazão constante, frente às curvas teóricas de regime de escoamento.

Destaca-se também que o ensaio atingiu uma condição estável, demonstrando que atingiu o equilíbrio de troca térmica do cenário em teste e que, se existe degradação mecânica do fluido, ela virtualmente cessa, como pode ser percebido pela figura 49, que ilustra a variação do fator de atrito em função do tempo, mantendo-se ainda 10% de redução do arrasto, calculado relativamente ao fator de atrito para tubos lisos.

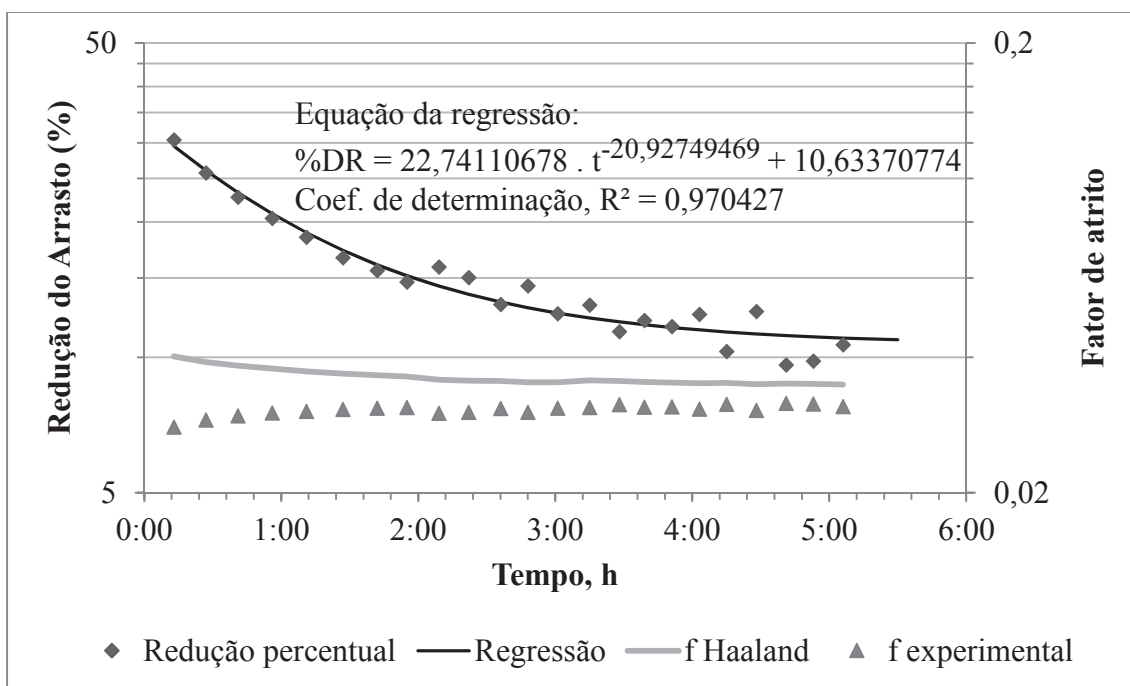


**Figura 49:** Resultados experimentais de  $n^\circ$  de Re obtidos com as soluções de PIB de  $1.10^6$ g/mol na concentração de 500ppm em 3 ensaios de degradação a vazão constante frente às curvas teóricas de regime de escoamento.

A figura 50 mostra o resultado do cálculo do fator relativo de redução do arrasto que, ao trazer os dados para uma escala mais sensível, mostra que o processo de alteração comportamental do escoamento ainda estava em desenvolvimento, segundo uma curva de decaimento logarítmico e ainda não havia atingido uma assíntota que, segundo a equação de regressão, ocorre em torno de 10,6%.

Conforme visto no modelo de Lumley na equação 10, o início da redução de atrito ocorre quando há um relacionamento entre a frequência de relaxação da molécula e a frequência do vórtice. Este é um modelo muito interessante, pois consegue relacionar o comportamento redutor de arrasto desses aditivos poliméricos à sua massa molar, de modo que evidencia uma condição mínima para que o fenômeno ocorra. E se considerar que existe um cisalhamento da molécula, alterando sua massa molar e sua viscosidade

intrínseca, a equação 10 nos diz que ocorrerá aumento do tempo de relaxação e/ou aumento da taxa de cisalhamento crítica, de modo que a atuação desses aditivos será sobre os vórtices da turbulência de menor frequência e/ou o fenômeno ocorrerá em condições de taxa de cisalhamento significativamente maior (LUMLEY, 1969, SAMANTA, 2013).



**Figura 50:** Resultado experimental de redução percentual do arrasto em função do tempo com a solução de PIB de  $1.10^6$ g/mol na concentração de 500ppm a vazão constante de 48L/min ( $2,90\text{m}^3/\text{h}$ ), frente à curva teórica de regime de escoamento turbulento.

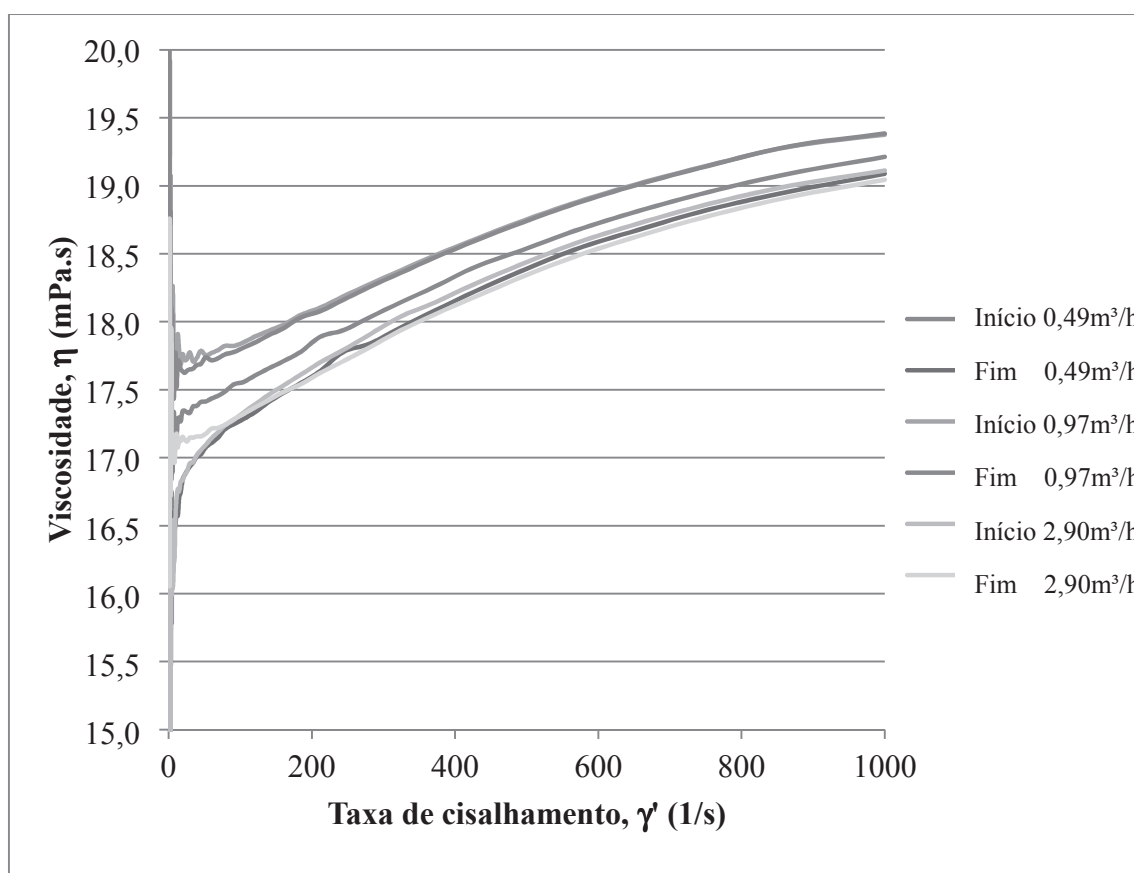
Se associar esta conclusão à teoria elástica de GENNES (1990), se o polímero atua sobre frequências cada vez menores da turbulência conforme vai sendo degradado, logo o relacionamento entre o tempo de relaxação da molécula e a cascata de transferência de energia cinética já não estarão mais em sintonia e, então, nenhuma contribuição importante do polímero poderá ser observada.

Por outro lado, observa-se que resiste no ensaio uma redução do arrasto residual de 10,6%, que significa que durante o ensaio ou aproximava-se um estágio de equilíbrio entre a taxa de degradação da molécula com a taxa de crescimento da concentração de moléculas de menor massa molar, ou que, simplesmente, aproximava-se a condição de existir no meio uma maior polidispersão da massa molar do polímero, que resistiriam ao cisalhamento nas condições do experimento por exigirem uma energia maior para sua

degradação, e assim poderiam manter indefinidamente a redução do arrasto (Lee *et al.*, 2002, PEREIRA *et al.*, 2013).

Durante os ensaios de degradação foram coletadas amostras no início do ensaio, após 3 horas e no final do ensaio. Essas amostras foram levadas para caracterização reológica de cisalhamento rotacional conforme método descrito na seção 4.5.1, de modo que foram produzidas curvas isotérmicas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para cada amostra, tanto para correção dos cálculos dos fatores de atrito em função da temperatura do ensaio, como para o cálculo do número de Reynolds segundo Metzner & Reed registrados no apêndice 5.

Observando os dados reológicos dos fluidos ensaiados, na figura 51, que apresenta seis curvas obtidas durante os três ensaios de degradação (início e fim de cada ensaio), observa-se que em todos os casos existe uma pequena variação da viscosidade, sendo a maior variação no primeiro ensaio e a menor no segundo, ambos realizados em regime laminar de escoamento, porém esta variação fica dentro do erro experimental da análise.

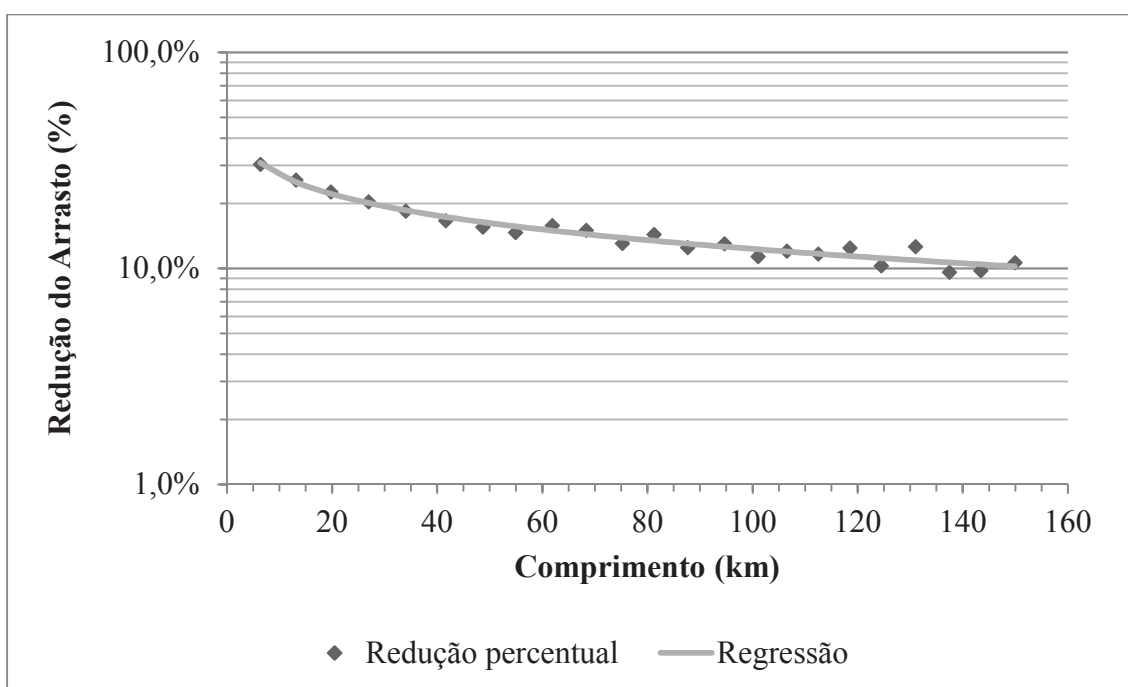


**Figura 51:** Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas para as amostras de solução de 500ppm de PIB  $1.10^6$ g/mol coletadas no início e no fim de cada ensaio de degradação (de vazão fixa) realizados no circuito fechado de escoamento.

Em todo caso, pode-se destacar que, nos três casos, o fluido novo, no início do ensaio, é sempre mais viscoso que o fluido amostrado ao final do ensaio de degradação. No entanto, cabe lembrar que as variações nas viscosidades obtidas durante os ensaios de perda de carga, onde os dados são coletados numa escala de vazões ao longo do tempo, foram maiores, permitindo concluir que existe uma degradação mecânica ocorrendo sobre o fluido.

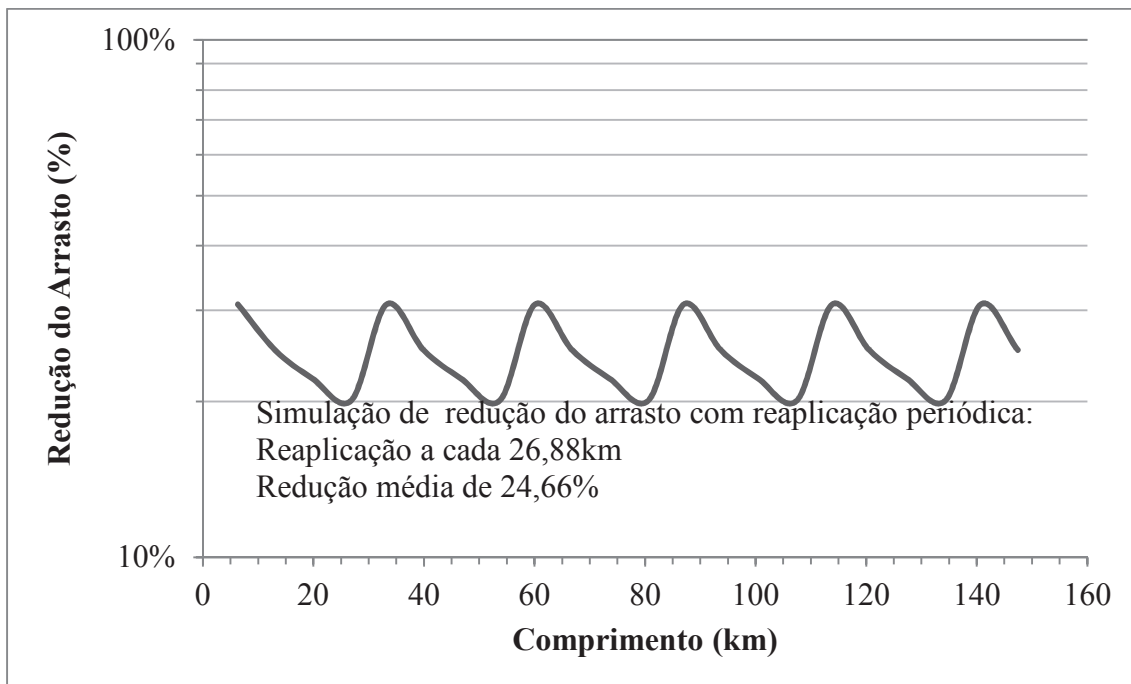
Outras formas de verificar se há um processo de diminuição da massa molar seria por análise viscosimétrica, pois, segundo CANEVAROLO JR. (2006), medidas da viscosidade de soluções poliméricas diluídas sucessivamente permitem obter uma massa molar média viscosimétrica através do cálculo das viscosidades reduzidas e inerentes de cada solução para se obter a viscosidade intrínseca  $[\mu]$ , ou por cromatografia de exclusão por tamanho (SEC – *Size Exclusion Chromatography*), que é uma técnica que fraciona a amostra em toda sua extensão de tamanhos de cadeia.

Agora, do ponto de vista prático, considerando apenas a velocidade média do fluido no trecho em acrílico, o tempo experimental e os fatores de atrito calculados na presença do aditivo polimérico, obtém-se o gráfico da figura 52.



**Figura 52:** Curva de eficiência do PIB  $1 \cdot 10^6$ g/mol (5% em querosene) a 500ppm no óleo mineral em função do comprimento de tubulação de acrílico com 11mm de diâmetro interno simulado com base nos dados experimentais.

Este é um perfil clássico da perda de eficiência devido à degradação do aditivo e se assemelha ao fenômeno observado no oleoduto do Alaska que tinha uma estação de rebombeio a cada (aprox.) 100km, onde o produto era reaplicado. Da mesma forma, pode-se realizar uma simulação de cenário com um sistema de bombeio similar ao utilizado neste trabalho, com 150km de tubo de acrílico de 11mm de diâmetro interno e vazão de 48L/min, e reaplicação de produto a cada 26,88km. A figura 53, abaixo, apresenta o resultado dessa simulação.



**Figura 53:** Curva de eficiência de redução do arrasto simulada para um cenário de reinjeção periódica de PIB  $1.10^6\text{g/mol}$  (5% em querosene) em quantidade suficiente para 500ppm no óleo mineral a cada 26,88km numa tubulação de 11mm de diâmetro interno similar à utilizada no circuito fechado de escoamento.

Esta simulação indicaria que haveria uma DR% mínima de 20% e uma DR% média da ordem de 24,66% com reaplicações periódicas a cada 26,88km.

Se considerar oleodutos sob condições dinâmicas similares, pode-se estimar que oleodutos lisos com escoamento na ordem de  $Re=6700$  irão produzir resultados equivalentes com o PIB de  $1.10^6\text{g/mol}$  @ 500ppm. No entanto, existem relatos na literatura (LANGSHOLT, 2012, SAMANTA *et al.*, 2013) sobre efeitos de diâmetro tanto na eficiência desses produtos como também na degradação, de modo que os resultados

aqui apresentados devem ser considerados válidos apenas para tubulações lisas com 11mm de diâmetro interno.

## 6 Conclusões

Considerando os estudos reológicos realizados, concluiu-se que a presença do pré-solvente não produziu outras alterações no comportamento do fluido além da redução da viscosidade, tendo sido muito útil na pré-dispersão do polímero e na sua homogeneização final no meio oleoso. Determinou-se o tempo de preparo das soluções do polímero puro disperso diretamente no óleo mineral e o tempo de preparo de pré-soluções do polímero em solventes orgânicos de maior afinidade, onde as soluções produzidas a partir das pré-soluções de PIB em ciclohexano e em querosene se mostraram mais eficientes, com tempos de preparo total de 24 e 20 horas, respectivamente.

A caracterização reológica dos fluidos mostrou que a presença dos polímeros nos fluidos altera a viscosidade da seguinte forma: o aumento da massa molar e da concentração do polímero aumenta a viscosidade e o aumento da temperatura diminui a viscosidade. Verificou-se que o comportamento reológico do fluido é afetado pela presença do polímero, pois quando as soluções foram produzidas com Vaselina, o comportamento newtoniano passou a ter característica pseudoplástica, principalmente quando utilizada a geometria de cone-placa, e quando as soluções foram produzidas com o óleo mineral LUBRAX OB 10 OBT observou-se que a atenuação do perfil da curva original do tipo dilatante para uma característica levemente pseudoplástica, no entanto manteve a alteração de comportamento nas taxas de cisalhamento maiores que 600/s, sendo que as soluções com polímero tenderam a apresentar um comportamento menos dilatante.

Foi escolhido o método SAOS para a determinação dos módulos elástico e viscoso dos fluidos produzidos e se percebeu que as soluções de óleo mineral preparadas com querosene apresentaram comportamento elástico numa faixa maior de frequências do que as soluções contendo ciclohexano. Este comportamento também foi observado nas soluções contendo o PIB, sendo que o polímero promoveu um aumento adicional da faixa de frequência em que o comportamento se mantém predominantemente elástico, com exceção das soluções contendo querosene e PIB na concentração de 0,2%, independentemente da massa molar.

No circuito fechado de escoamento foi possível obter a medição da redução do arrasto provocada pelas quatro soluções contendo poliisobutileno estudadas. Para as soluções aditivadas com o PIB de massa molar  $1.10^6$ g/mol observou-se uma leve diminuição da eficiência com a diminuição da concentração de 1000 para 500ppm, com uma redução do



arrasto da ordem de 18%. Para as soluções aditivadas com PIB de massa molar  $4.10^6$ g/mol observou-se um leve aumento da eficiência com a diminuição da concentração de 1000 para 500ppm, com uma redução do arrasto da ordem de 33%. Em ambos os casos, deve ser considerado que os resultados de variação da concentração foram equivalentes, com uma margem de erro da ordem de 2% e, portanto, para a faixa de concentração estudada, esta variável não foi relevante. Diferentemente, observou-se que a eficiência foi significativamente maior nas soluções contendo o polímero de maior massa molar, evidenciando que esta é uma característica pertinente à redução do arrasto.

Os ensaios de redução do arrasto foram afetados pela existência de um mecanismo de degradação mecânica, evidenciado pela caracterização reológica do fluido e também pelos segundos ensaios realizados. Os ensaios reológicos com temperatura controlada mostraram que houve redução da viscosidade do fluido, evidenciando que houve alguma modificação significativa e em sintonia com os resultados de redução do arrasto inferiores, sugerindo o cisalhamento das moléculas poliméricas.

Os ensaios de avaliação da perda de eficiência devido à degradação mecânica em função do tempo evidenciaram que a degradação ocorre desde o momento em que o fluido inicia sua transição de regime de escoamento, seguindo uma queda de eficiência com perfil parabólico, em que o fator de atrito se aproxima rapidamente da curva base, segundo a correlação de Haaland simplificada para o caso do tubo liso, e tende a uma assíntota de fator de atrito residual mais para o final do ensaio, firmando uma redução do arrasto residual da ordem de 10,6%. Particularmente, as amostras coletadas durante os ensaios de degradação mecânica não apresentaram mudança significativa, onde se pode concluir, apenas, que as condições do escoamento a velocidade constante foram mais brandas que aquelas realizadas nos ensaios de redução do arrasto, onde se variou a velocidade até atingir altos números de Reynolds.

## 7 Recomendações

A complexidade da redução do arrasto promovido por polímeros flexíveis e susceptíveis ao cisalhamento é muito grande e altamente interdisciplinar. Muitos pesquisadores vêm contribuindo com artigos relevantes, porém não há consenso quanto ao mecanismo da redução do arrasto principalmente quando envolve polímeros flexíveis devido a mecanismos adicionais como o da degradação mecânica e o de alteração estrutural, como a provocada pela desagregação intermolecular (PEREIRA *et al.*, 2013).

Nesta dissertação foram avaliados alguns aspectos dessa tecnologia focando na observação do fenômeno sobre o PIB e seus efeitos envolvendo os parâmetros de massa molar, concentração e solubilidade em óleo mineral contendo ou não solventes auxiliares para a dispersão.

A linha de pesquisa pode seguir avançando por muitos caminhos, sendo alguns aqui recomendados:

- Estudar o comportamento viscoelástico das soluções poliméricas diluídas utilizando um reômetro extensional capilar e capturar o tempo de relaxação;
- Avaliar o comportamento reológico das soluções utilizando geometrias cone-placa e placa-placa para definir as primeira ( $N_1$ ) e segunda ( $N_2$ ) tensões normais;
- Avaliar o comportamento relativo das amostras sobre geometrias aplicando placas texturizadas;
- Realizar a medição da massa molar pela técnica de SEC das amostras antes e após ensaios no circuito de escoamento, estudando a taxa de degradação e seus efeitos na distribuição de massa molecular;
- Comparar os resultados obtidos com o PIB, um polímero muito bem conhecido, com os obtidos por produtos comerciais disponíveis no mercado.

## 8 Referências Bibliográficas

- BAILEY, F. E., KOLESKE, J. V. “Solution properties of poly(ethylene oxide)”. In: *Poly(ethylene Oxide)*. EUA: Academic Press Inc., pp. 29–86, 1976.
- BATISTA, M. M., GUIRARDELLO, R., KRÄHENBÜHL, M. A. “Determination of the Hansen Solubility Parameters of Vegetable Oils, Biodiesel, Diesel, and Biodiesel–Diesel Blends”. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, v. 92, pp. 95–109, 2015.
- BERMAN, N. S. “Drag reduction by polymers”, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, v. 10, n. 1, pp. 47-64, 1978.
- BRANDRUP, J., IMMERGUT, E.H., GRULKE, E.A. *et al.*, *Polymer Handbook*. 4 ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- BROSTOW, W., LOBLAND, H. E. H., REDDY, T. “Lowering mechanical degradation of drag reducers in turbulent flow”, *J. Mater. Res.*, v. 22, n. 1, pp. 56-60, Jan. 2007.
- CAFFÉ, A. P. B. *Construção e montagem de um aparato experimental para estudo de perda de carga em óleo*. Projeto de Graduação, Poli/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- CANEVAROLO JR., S.V., *Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 2 ed. São Paulo, SP, Brasil, Artliber Editora, 2006.
- CHHABRA, R.P., RICHARDSON, J.F. *Non-Newtonian flow and applied rheology: Engineering Applications*. 2 ed., cap. 2.7, Butterworth-Heinemann, pp. 100-101, Jul 2008. eBook ISBN: 9780080564937.
- CHOI, H. J., KIM, C. A., JHON, M. S. “Universal drag reduction characteristics of polyisobutylene in a rotating disk apparatus”, *Polymer*, v. 40, pp. 4527–4530, 1999.
- COOPER-WHITE, J. J., CROOKS, R. C., BOGER, D. V. “A drop impact study of wormlike viscoelastic surfactant solutions”, *Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, v. 210, pp. 105, 2002.
- CRUZ, D.O.A., PINHO, F.T. “Turbulent pipe flow predictions with a low Reynolds number  $k-\epsilon$  model for drag reducing fluids”, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, v. 114, pp. 109–148, 2003.
- EL-HAKIM, M. H., FATHY, H. M., BERTOLDI, L. “Successful drag reducer agent application at agiba petroleum company: two case histories”. *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*, 2009-052, Ravenna, Italy, 25-27 Mar 2009.
- GASON, S.J., COOPER-WHITE, J., DUNSTAN, D.E. *et al.* “A spectroscopic study of polyelectrolyte solutions under shear”, *Polymer*, V. 42, n. 16, pp. 6981-6989, 2001. ISSN 0032-3861.
- GENNES, P. G. “An elastic theory of drag reduction”. In: *Introduction to Polymer Dynamics*. Cap. 4, *Lezioni Lincee*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 34-54, 1990.
- HAALAND, S. E. "Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Flow", *Journal of Fluids Engineering*, v. 105, n. 1, pp. 89–90, 1983.

- HERSHEY, H. C., ZAKIN, J. L. "A molecular approach to predicting the onset of drag reduction in the turbulent flow of dilute polymer solutions", *Chem. Eng. Sci.*, v. 22, pp. 1847-1857, 1967.
- HOYT, J. W., "Turbulent-flow properties of deoxyribonucleic acid solutions", *Nature*, v. 211, pp. 170-171, Jul 1966.
- IACCARINO, G., SHAQFEH, E. S. G., DUBIEF, Y. "Reynolds-averaged modeling of polymer drag reduction in turbulent flows", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, v. 165, pp. 376-384, 2010.
- KENIS, P. R. "Turbulent flow friction reduction effectiveness and hydrodynamic degradation of polysaccharides and synthetic polymers", *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 15, pp. 607-618, 1971.
- KIM, C. A., CHOI, H. J., SUNG, J. H., *et al.* "Effect of solubility parameter of polymer-solvent pair on turbulent drag reduction", *Macromol. Symp.*, v. 222, pp. 169-174, 2005.
- KULICKE, W. M., KÖTTER, M., GRÄGER, H. "Drag reduction phenomenon with special emphasis on homogeneous polymer solutions". In: *Polymer Characterization/ Polymer Solutions*. Advances in Polymer Science. v. 89, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1-68, 1989.
- KULIK, V. M. "Drag reduction change of polyethyleneoxide solutions in pipe flow", *Experiments in Fluids*, v. 31, n. 5, pp. 558-566, 2001.
- LANGSHOLT, M. "An Experimental Study On Polymeric Type DRA Used In Single-And Multiphase Flow With Emphasis On Degradation, Diameter Scaling And the Effects In Three-phase Oil-water-gas Flow", *8th North American Conference on Multiphase Technology*, BHR-2012-A005, Banff, Alberta, Canada, 20-22 jun 2012.
- LEE K., KIM C. A., LIM S. T., *et al.* "Mechanical degradation of polyisobutylene under turbulent flow", *Colloid Polym Sci*, v.280, pp. 779-782, 2002.
- LEUCHTAG H. R.; "Polymer additives reduce fluid drag in turbulent flow", *Phys. Today*, v. 31, pp. 17, 1978.
- LITTLE, R. C. "Drag reduction in capillary tubes as a function of polymer concentration and molecular weight". *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 37, n. 4, pp. 811-818, 1971.
- LITTLE, R. C., WIEGARD, M. "Drag reduction and structural turbulence in flowing polyox solutions", *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 14, pp. 409-419, 1970.
- LUMLEY, J. L. "Drag reduction by additives", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, v. 1, pp. 367-384, 1969.
- MARTIN, J. R., SHAPELLA, B. D. "The effect of solvent solubility parameter on turbulent flow drag reduction in polyisobutylene solutions", *Experiments in Fluids*, v. 34, pp. 535-539, 2003.
- METZNER, A. B., REED, J. C. "Flow of non-newtonian fluids - correlation of the laminar, transition, and turbulent-flow regions", *AIChE J.*, v. 1, pp. 434-440, 1955.
- MORGAN, S. E., MCCORMICK, C. L. "Water-Soluble copolymers XXXII: Macromolecular drag reduction. A review of predictive theories and the effects of Polymer structure", *Prog. Polym. Sci.*, v. 15, pp. 507-549, 1990.

- PEREIRA, A. S., ANDRADE, R. M., SOARES E. J. “Drag reduction induced by flexible and rigid molecules in a turbulent flow into a rotating cylindrical double gap device: Comparison between Poly (ethylene oxide), Polyacrylamide, and Xanthan Gum”, *J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 202, pp. 72-87, 2013.
- PERLIN, M., CECCIO, S. *Mitigation Of Hydrodynamic Resistance: Methods To Reduce Hydrodynamic Drag*. Ed. World Scientific, pp. 10-14, 2014. ISBN 9814612278.
- RODRIGUEZ, F., COHEN, C., OBER, C. K., *et al. Principles of Polymer Systems*, 6 ed., Boca Raton, CRC Press, NY, EUA, 2015. ISBN: 978-1-4822-2379-8
- ROUSE JR., P. E. “A theory of the linear viscoelastic properties of dilute solutions of coiling polymers”, *J. Chem. Phys.*, v. 21, pp. 1272-1280, 1953.
- RYSKIN G.; “Turbulent drag reduction by polymers: a quantitative theory”, *Phys. Rev. Letters*, v. 59, pp. 2059, 1987.
- SAMANTA, D., DUBIEF, Y., HOLZNERA, M., *et al.* “Elasto-inertial turbulence”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 110, n. 26, pp. 10557–10562, Jun 2013.
- SCHLICHTING, H., *Boundary Layer Theory*. 7 ed., New York, McGraw-Hill Inc., 1979.
- SELLIN, R. H. J., HOYT, J. W., SCRIVENER, O. “The effect of drag-reducing additives on fluid flows and their industrial applications – Part 1: Basic Aspects”, *J. Hydraul. Res.*, v. 20, pp. 235-292, 1982.
- SHENOY, A. V. “A review on drag reduction with special reference to micellar systems”, *Colloid & Polymer Sci.*, v. 262, pp. 319-337, 1984.
- SREENIVASAN, K. R., WHITE, C. M. “The onset of drag reduction by polymer additives, and the maximum drag reduction asymptote”, *J. Fluid Mech.*, v. 409, pp. 149-164, 2000.
- STRATE, G. W. V., LOHSE, D. J. “Poly(isobutylene), butyl rubber, halobutyl rubber”. In: MARK, J. E. *Polymer Data Handbook*, Oxford University Press, Inc., pp. 600 – 606, 1999.
- TRUONG, V. T. *Drag reduction technologies*, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTO-GD-0290, Australia, 2001.
- VIRK P. S. “Drag reduction fundamentals”, *AICHE Journal*, v. 21, n. 4, pp. 625-656, Jul 1975.
- VIRK, P. S., MERRILL, E. W., MICKLEY, H. S., *et al.* “The Toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions”, *J. Fluid Mech.*, v. 30, n. 2, pp. 305-328, 1967.
- ZHANG, X., DUAN, X., MUZYCHKA, Y. “New mechanism and correlation for degradation of drag-reducing agents in turbulent flow with measured data from a double-gap rheometer”, *Colloid and Polymer Science*, v. 296, pp. 829–834, 2018.
- ZIMM, B. H. “Dynamics of polymer molecules in dilute solution: viscoelasticity, flow birefringence and dielectric loss”, *J. Chem. Phys.*, v. 24, pp. 269-278, 1956.

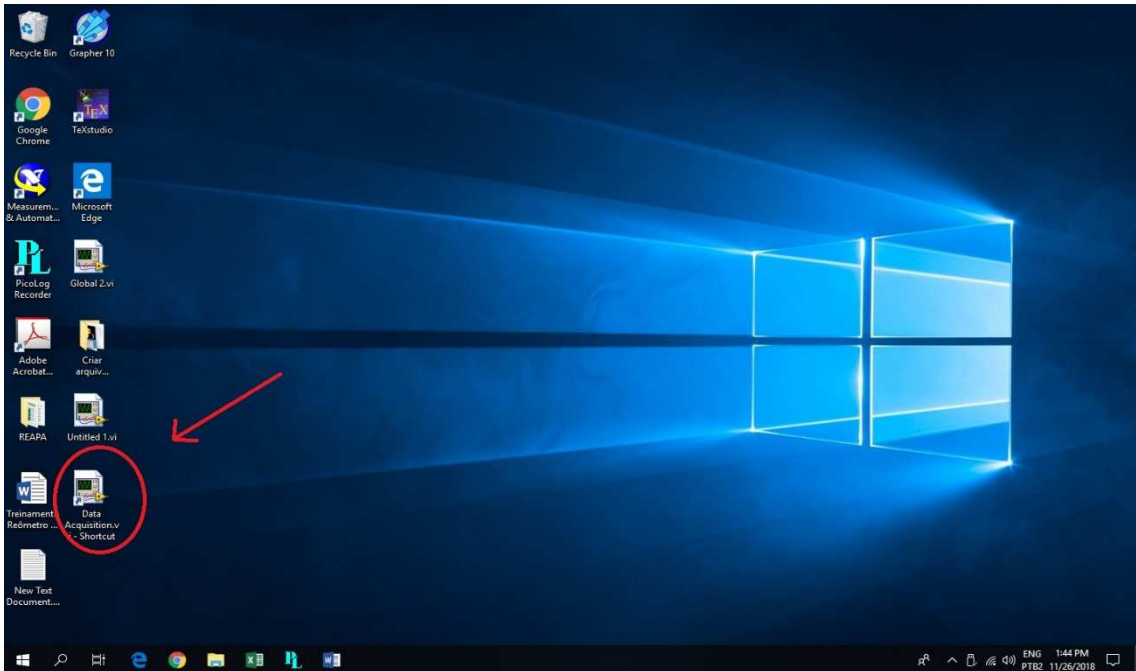
## **9 Apêndices**

## **Apêndice 1**

# **Procedimento operacional dos sistemas supervisórios DataAcquisition.vi (Labview) e PicoLog Recorder**

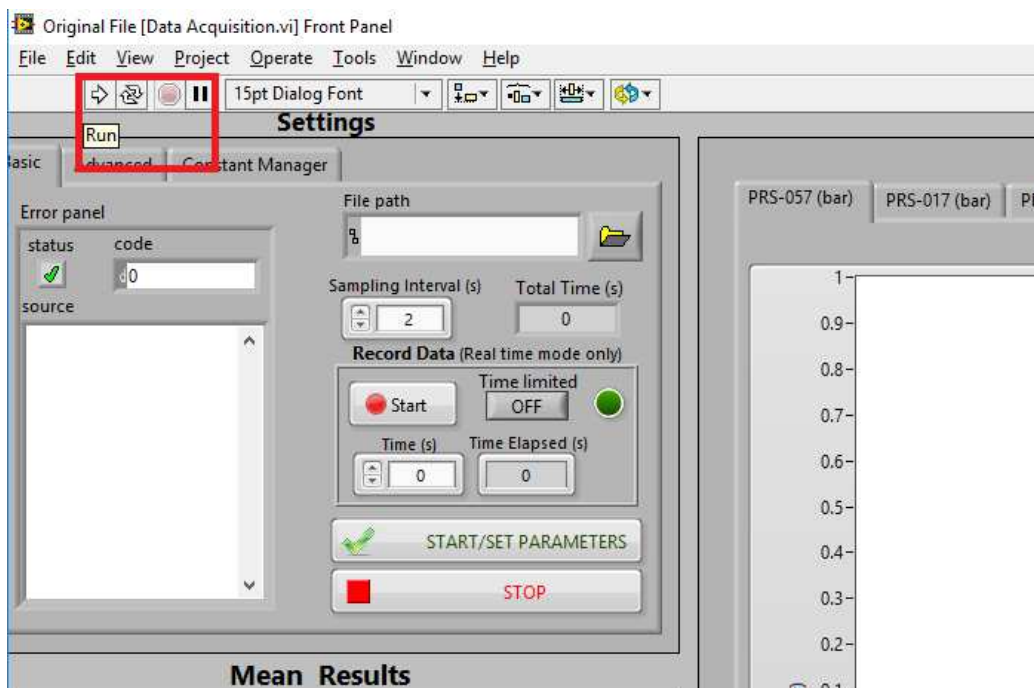
## 1. Como utilizar o “DataAquisition.vi”

- a. Abrir o aplicativo “DataAquisition.vi” que está na área de trabalho;



**Figura 1:** Imagem da área de trabalho do computador da bancada de ensaios do RIG destacando o local do atalho para o aplicativo “DataAquisition.vi”.

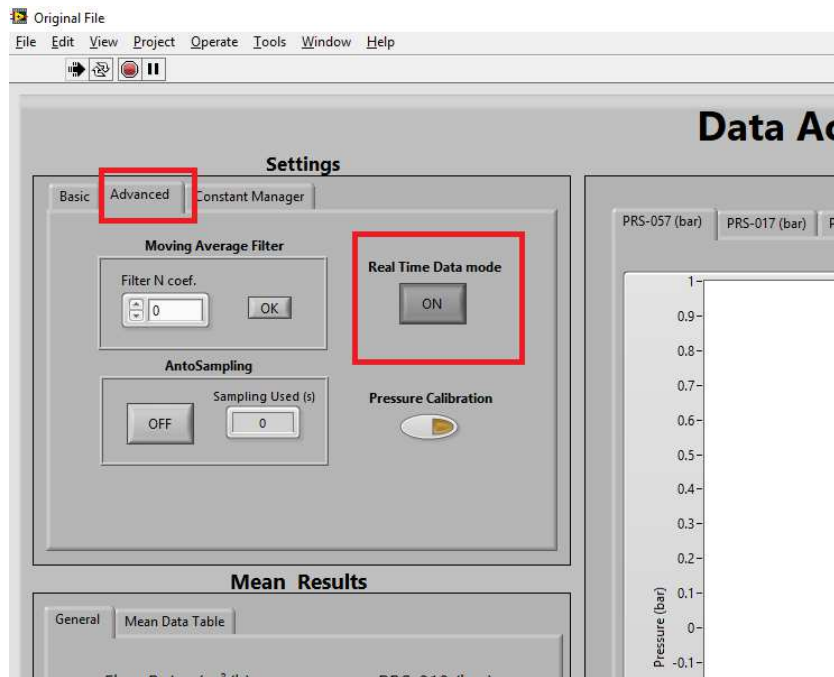
- b. Após a abertura da janela do programa, apertar o botão “Run”;



**Figura 2:** Imagem da janela do aplicativo aberta, com destaque para a posição do botão “Run”.

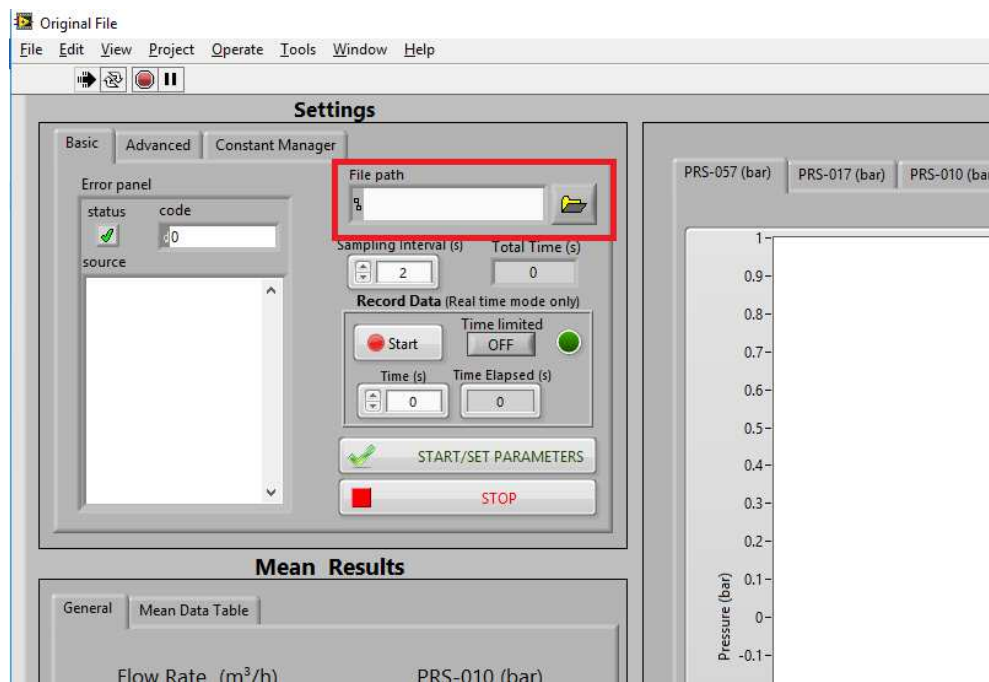


- c. Abrir a aba “Advanced” e clicar no botão “Real Time Data mode” e deixa-lo na posição On;



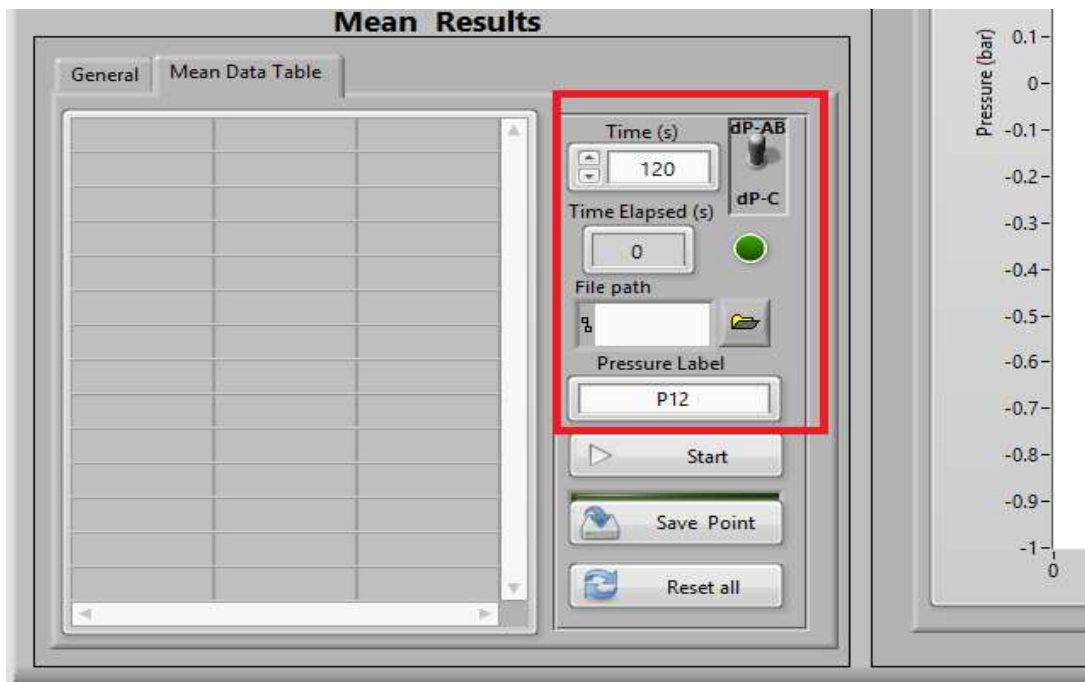
**Figura 3:** Janela do aplicativo, com destaques para a posição da aba “Advanced” e do botão “Real Time Data Mode”.

- d. Voltar à aba “Basic” e na área “Settings” adicionar o arquivo de texto para coletar os dados brutos em “File path”;



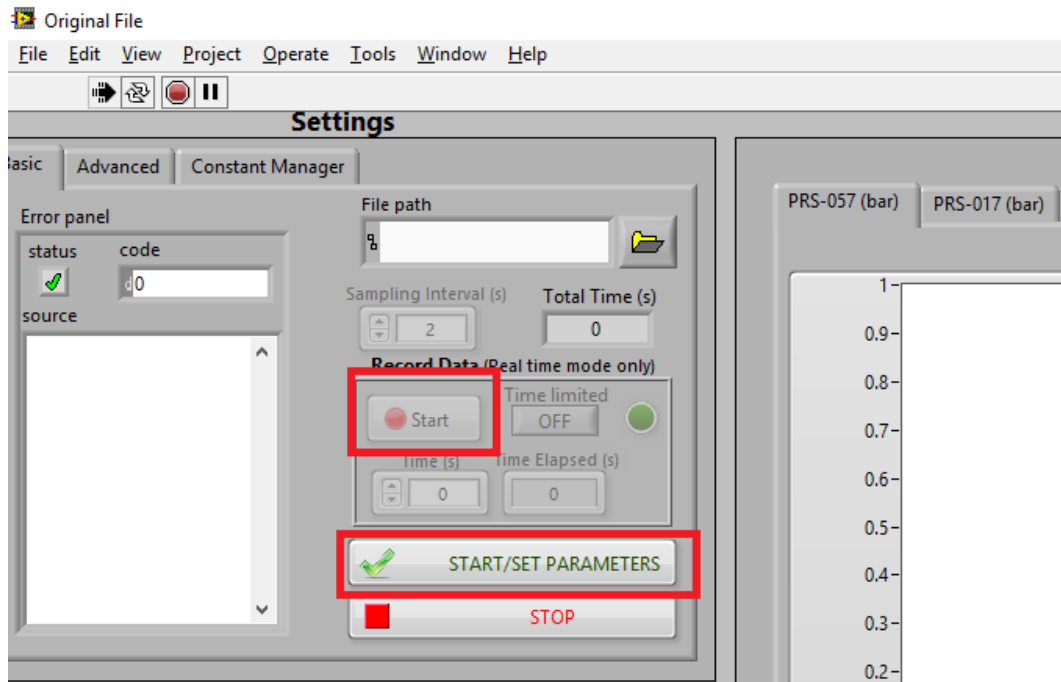
**Figura 4:** Janela do aplicativo na aba “Basic”, área “Settings”, com destaque para a posição onde o arquivo de texto deverá ser carregado.

- e. Em “Mean Results”, abrir a aba “Mean Data Table”, configurar o tempo de coleta de dados em “Time”, colocar a alavanca na posição “dP-AB”, adicionar o arquivo de coleta de dados médios em “File path” e definir a tomada de pressão que será utilizada para a coleta de dados (sendo P1 fixa, é necessário adicionar o número da outra tomada de pressão ao lado no número 1);



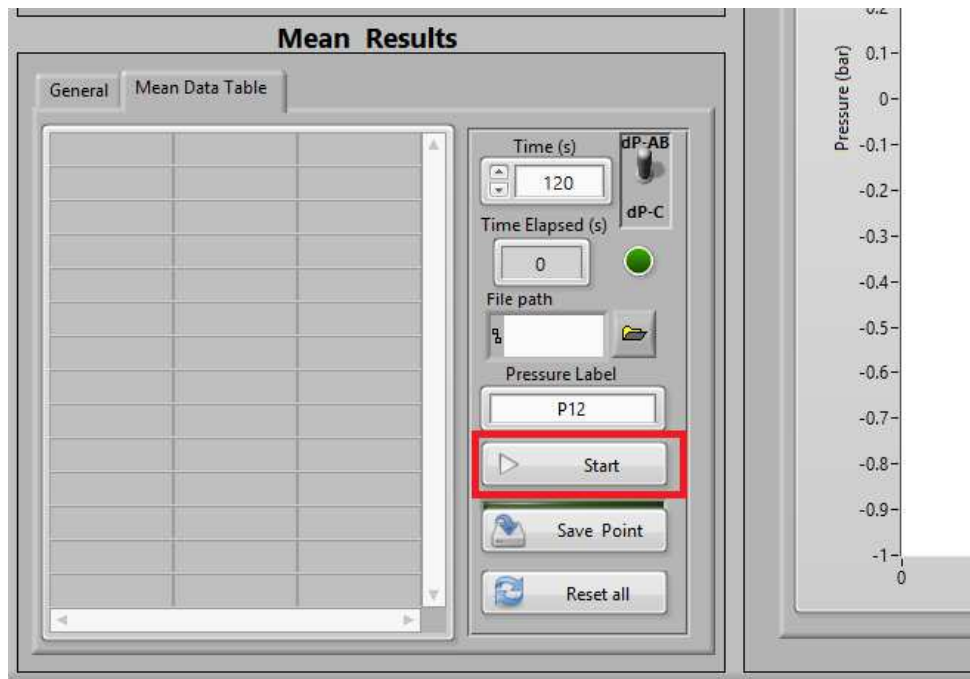
**Figura 5:** Janela do aplicativo na aba “Basic”, área “Mean Results”, com destaque para a posição onde os ajustes deverão ser realizados e o arquivo de texto deverá ser carregado.

- f. Para iniciar a coleta de dados brutos, pressionar “START/SET PARAMETERS” e depois, na caixa “Record Data”, clicar no botão “Start”;



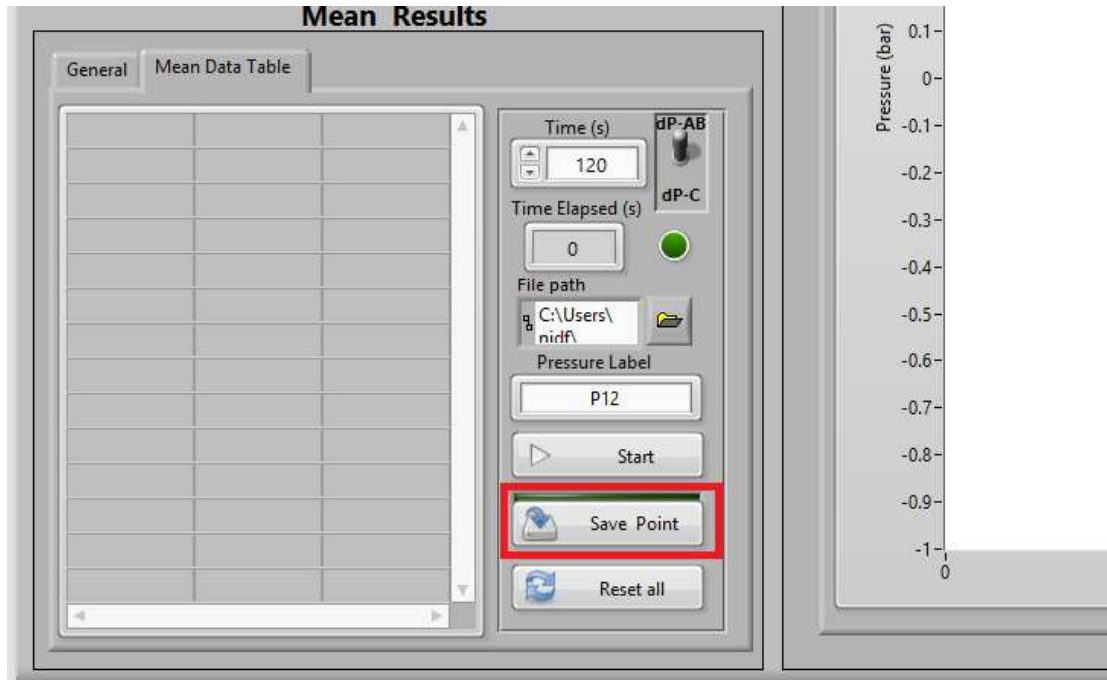
**Figura 6:** Janela do aplicativo na aba “Basic”, área “Settings”, com destaque para os botões.

- g. Em seguida iniciar a coleta de dados médios no botão “Start” na aba “Mean Data Table” da caixa “Mean Results”;



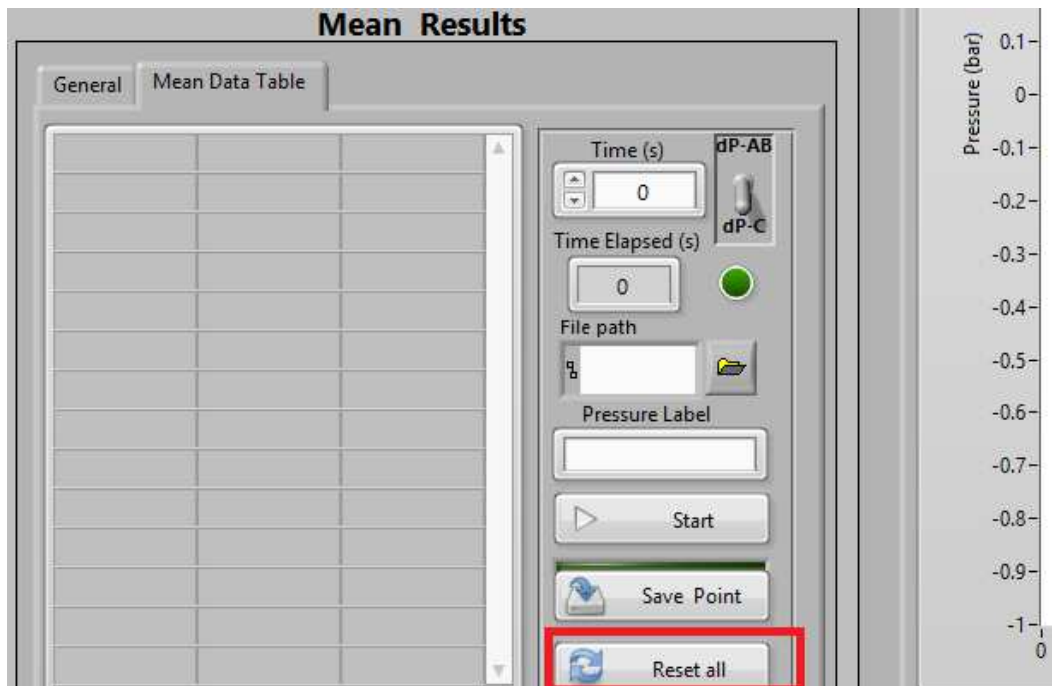
**Figura 7:** Janela do aplicativo na aba “Basic”, área “Mean Results”, com destaque para o botão “Start” na aba “Mean Data Table”.

- h. Durante a medição de dados o tempo vai ser contado na caixa “Time Elapsed (s)”. Quando terminar, a barra verde escura sobre o botão “Save Point” irá acender – ficará verde clara fluorescente. Clique no botão para salvar os dados obtidos;



**Figura 8:** Janela do aplicativo na aba “Basic”, área “Mean Results”, com destaque para o botão “Save Point” e sua barra verde escura na aba “Mean Data Table”.

- i. Após a coleta de todos os dados de uma rodada, deve ser iniciada uma nova. Pressionar o botão “Reset All” para apagar os dados médios coletados na rodada anterior, adicionar o novo arquivo de dados médios no campo “File Path” e iniciar a nova medição pressionando o botão “Start”;

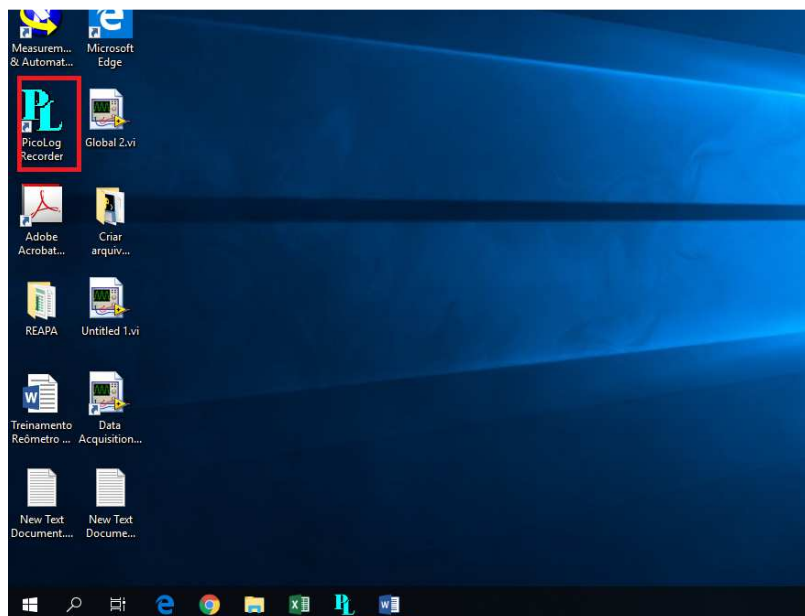


**Figura 9:** Janela do aplicativo na aba “Basic”, área “Mean Results”, com destaque para o botão “Reset all” na aba “Mean Data Table”.

- j. Se for necessário coletar novos dados brutos é só parar a medição e reconfigurar o aplicativo.

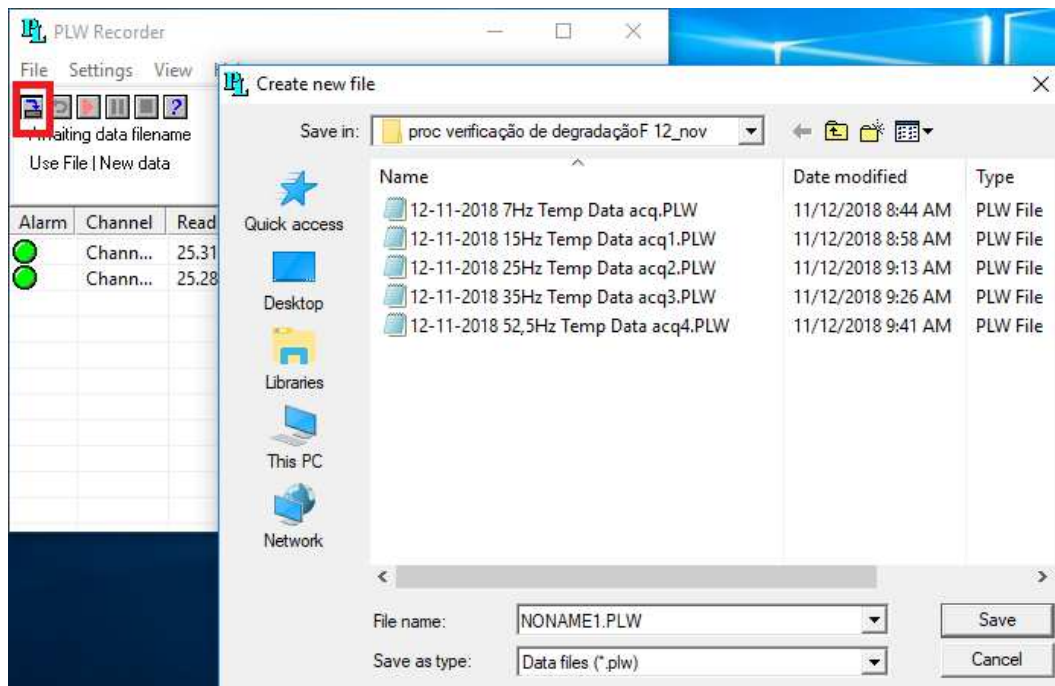
## 2. Como utilizar o “PicoLog Recorder”

- a. Abrir o aplicativo “PicoLog Recorder” na área de trabalho;



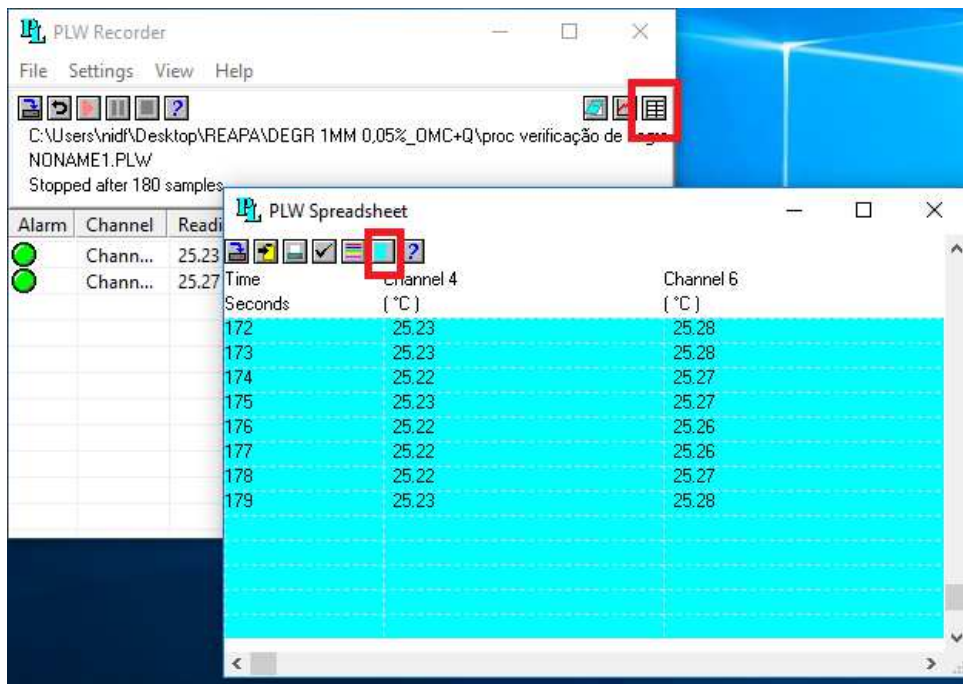
**Figura 10:** Área de trabalho do computador destacando o atalho para o aplicativo “PicoLog Recorder”.

- b. Criar um novo arquivo para a coleta de dados de temperatura, um para cada rodada;



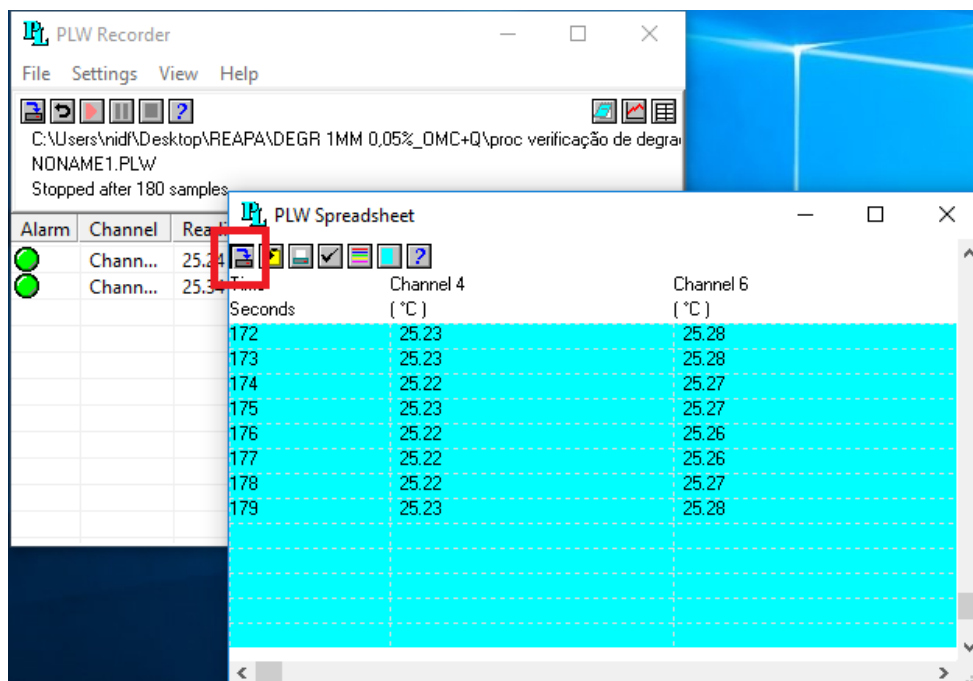
**Figura 11:** Imagem da janela do aplicativo PicoLog Recorder” aberta, com destaque para o botão para criar o novo arquivo de texto para a coleta de dados de temperatura.

- c. Iniciar a coleta de dados, clicando no botão “play”. Atentar para o tempo máximo de coleta de dados (1200 segundos);
- d. Quando terminar a coleta clicar no “stop”;
- e. Para salvar os dados abrir o “Spreadsheet” (último botão da tela principal), e depois se certificar de que todos estão selecionados clicando no botão de cor ciano;



**Figura 12:** Janela do aplicativo “PicoLog Recorder”, com destaque para os botões “Spreadsheet” e ciano.

- f. Clicar no botão destacado na figura 13 para gravar um arquivo de texto com os dados selecionados em cor ciano;



**Figura 13:** Janela da função “Spreadsheet” do aplicativo “PicoLog Recorder”, com destaque para o botão para gravar um arquivo de texto com os dados de temperatura coletados.

- g. Para a coleta de novos dados de uma nova rodada, repetir o processo a partir do item 7b.

### **3. Desligamento dos Sistemas supervisórios**

- a. Desligar a placa de aquisição;
- b. Encerrar os softwares;
- c. Desligar o computador e o *nobreak*.



## **Apêndice 2**

### **Isotermas reológicas das soluções preparadas no laboratório**

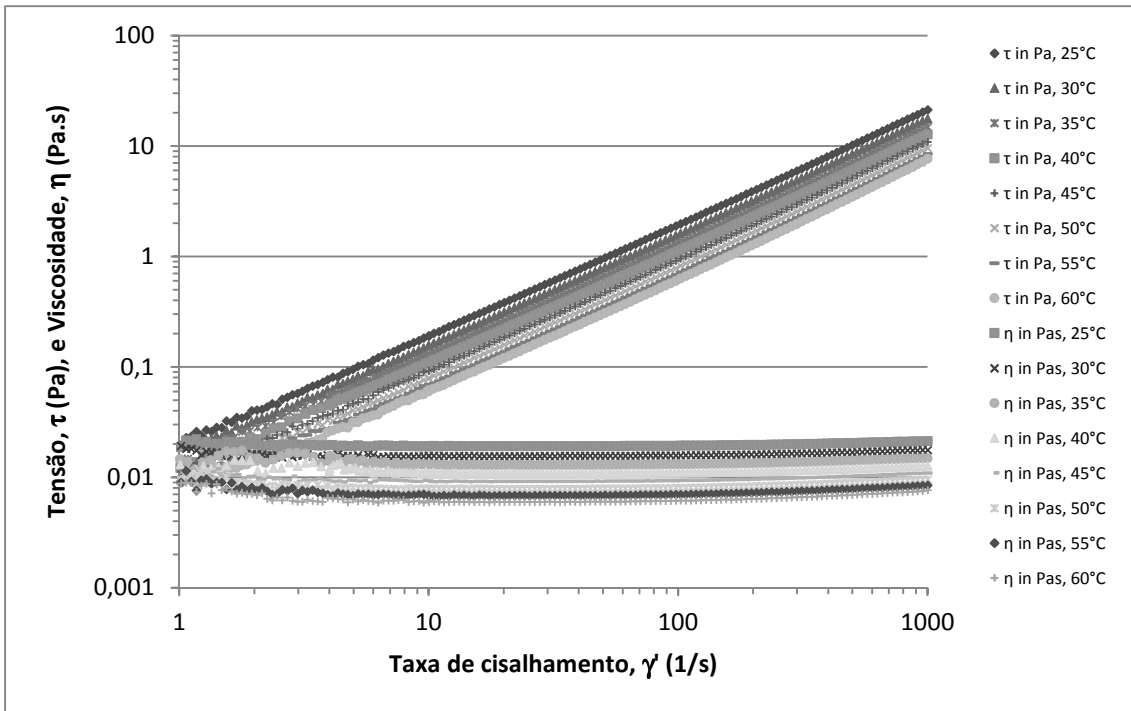


Figura A3.1: Curvas isotérmicas de tensão e viscosidade em função da taxa de cisalhamento do fluido OMB a pressão atmosférica, por cilindros concêntricos no reômetro HAAKE MARS III.

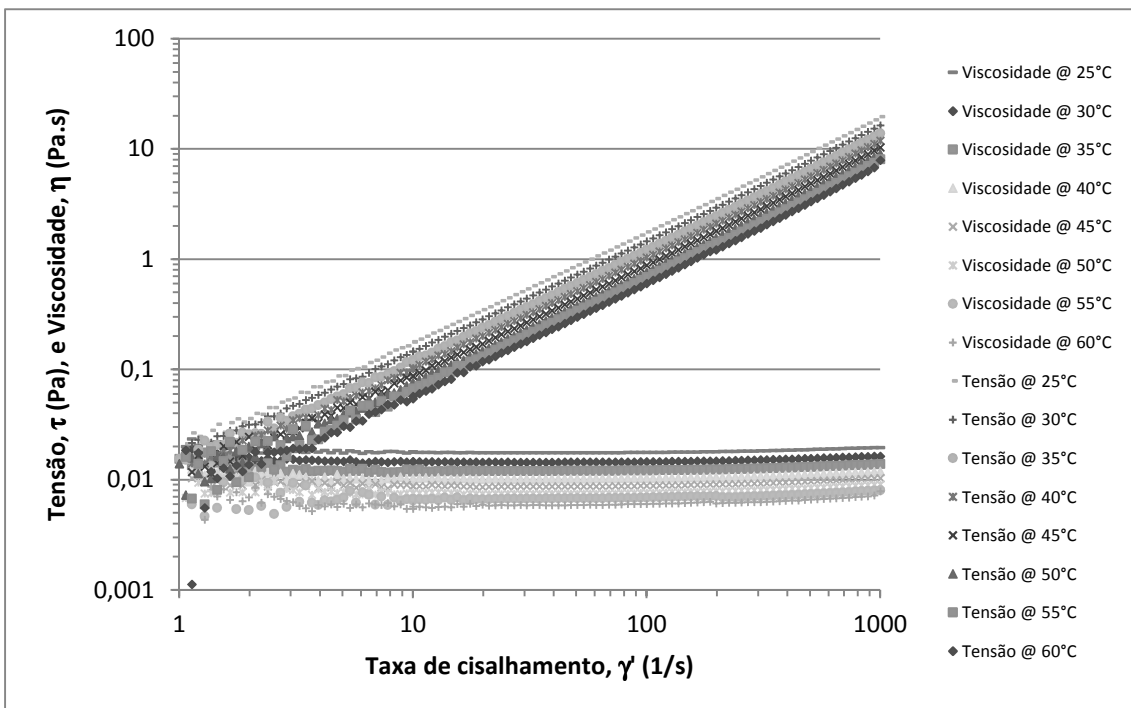


Figura A3.2: Curvas isotérmicas de tensão e viscosidade em função da taxa de cisalhamento do fluido OMB\_2%Q a pressão atmosférica, por cilindros concêntricos no reômetro HAAKE MARS III.

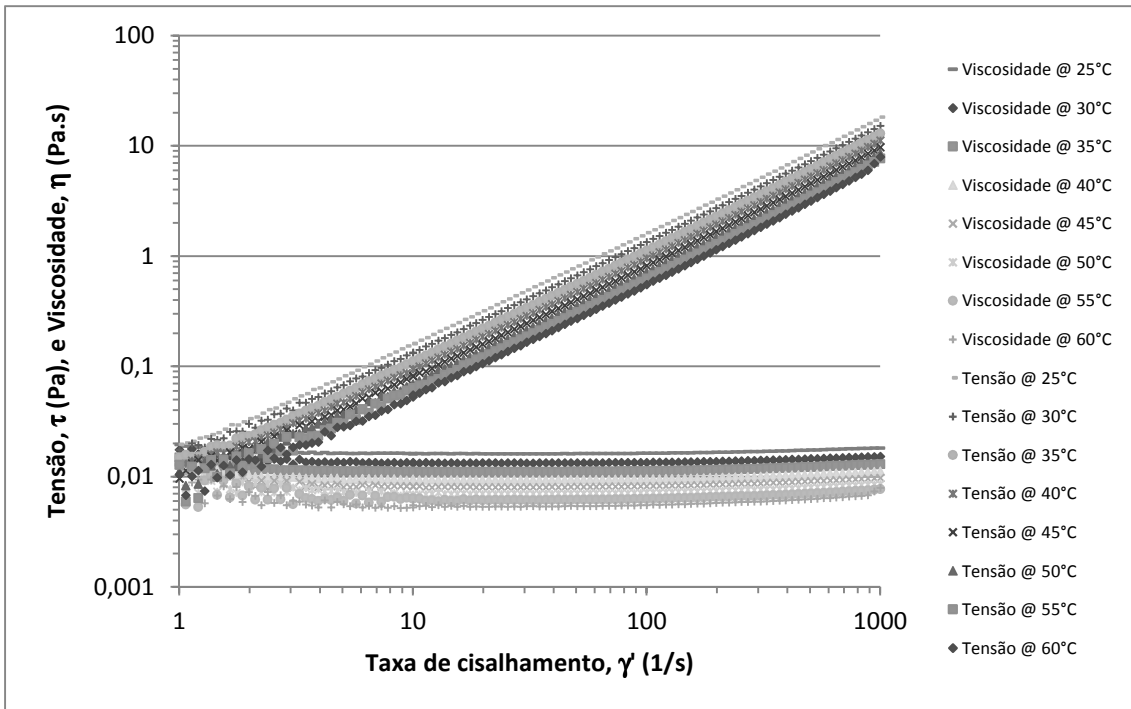


Figura A3.3: Curvas isotérmicas de tensão e viscosidade em função da taxa de cisalhamento do fluido OMB\_4%Q a pressão atmosférica, por cilindros concêntricos no reômetro HAAKE MARS III.

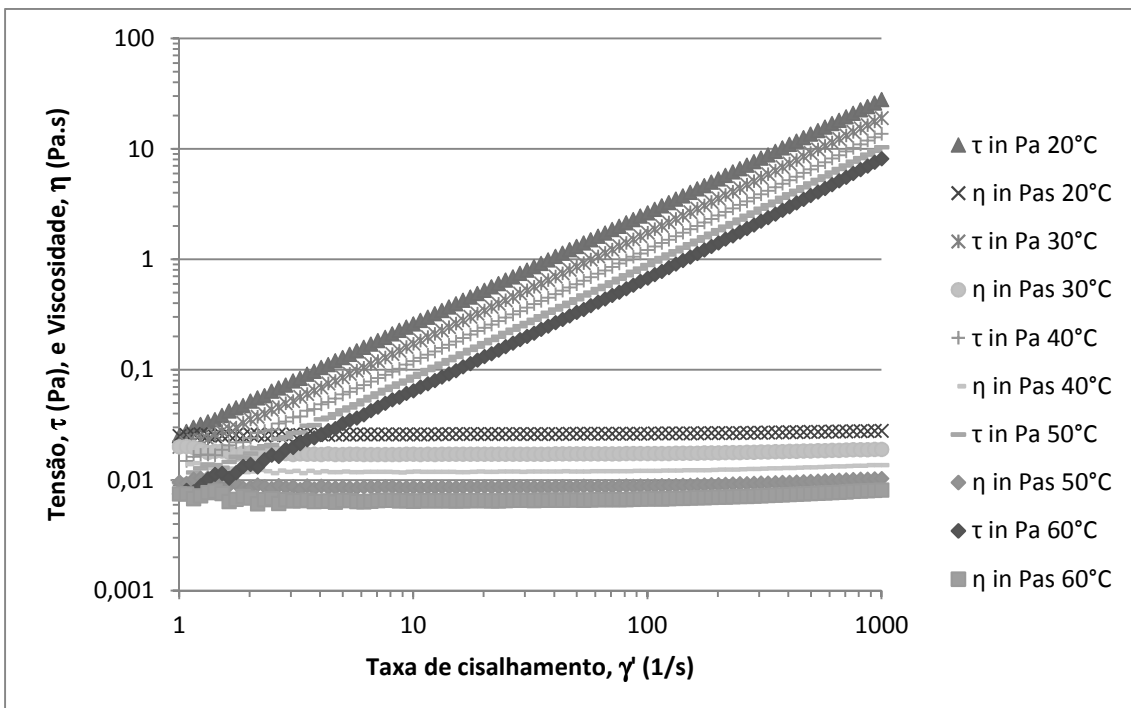


Figura A3.4: Curvas isotérmicas de tensão e viscosidade em função da taxa de cisalhamento do fluido O005PIB1MMQ a pressão atmosférica, por cilindros concêntricos no reômetro HAAKE MARS III.

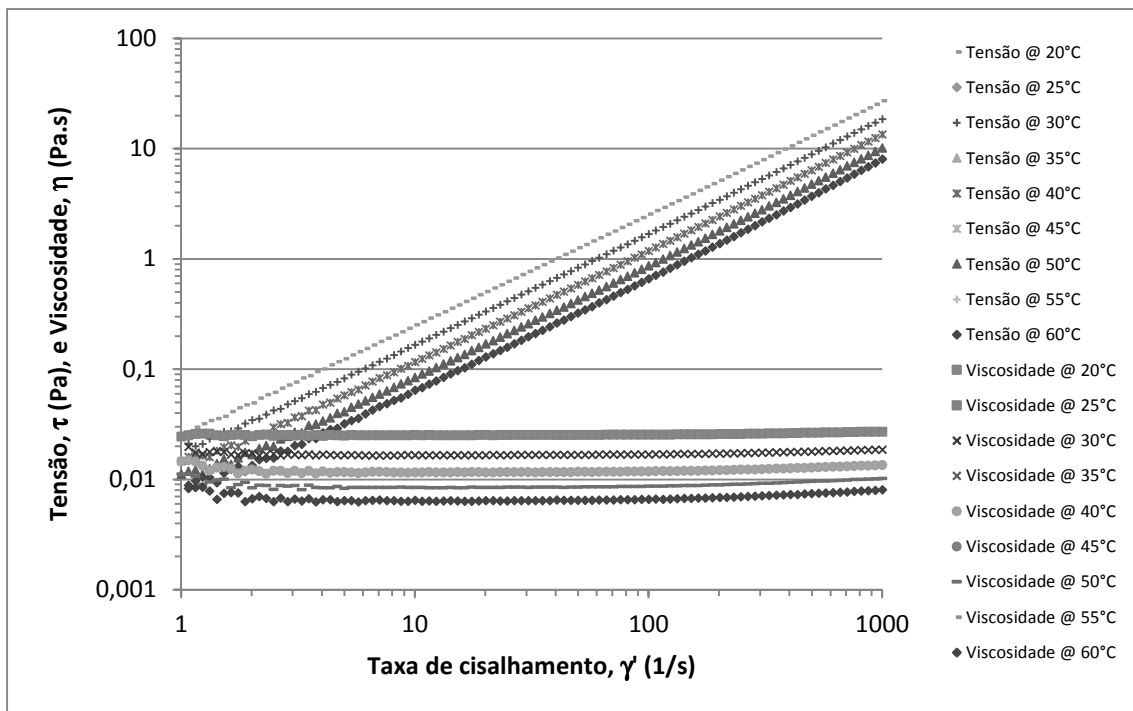


Figura A3.5: Curvas isotérmicas de tensão e viscosidade em função da taxa de cisalhamento do fluido O005PIB4MMQ a pressão atmosférica, por cilindros concêntricos no reômetro HAAKE MARS III.

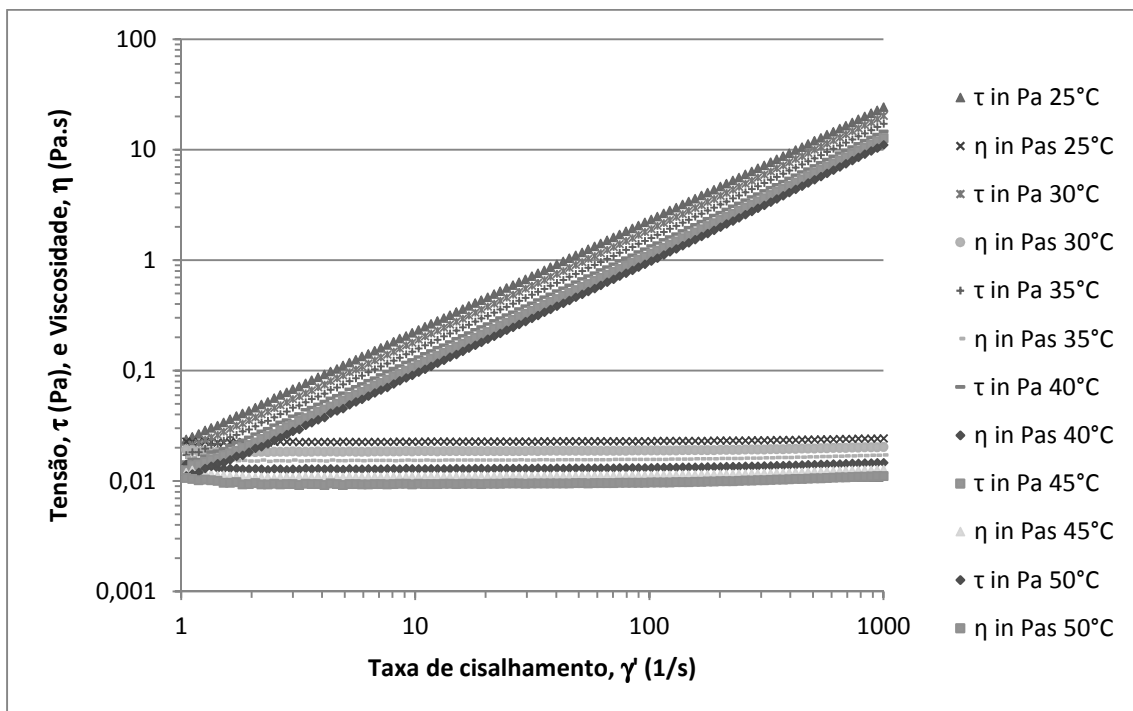


Figura A3.6: Curvas isotérmicas de tensão e viscosidade em função da taxa de cisalhamento do fluido O01PIB1MMQ a pressão atmosférica, por cilindros concêntricos no HAAKE MARS III.

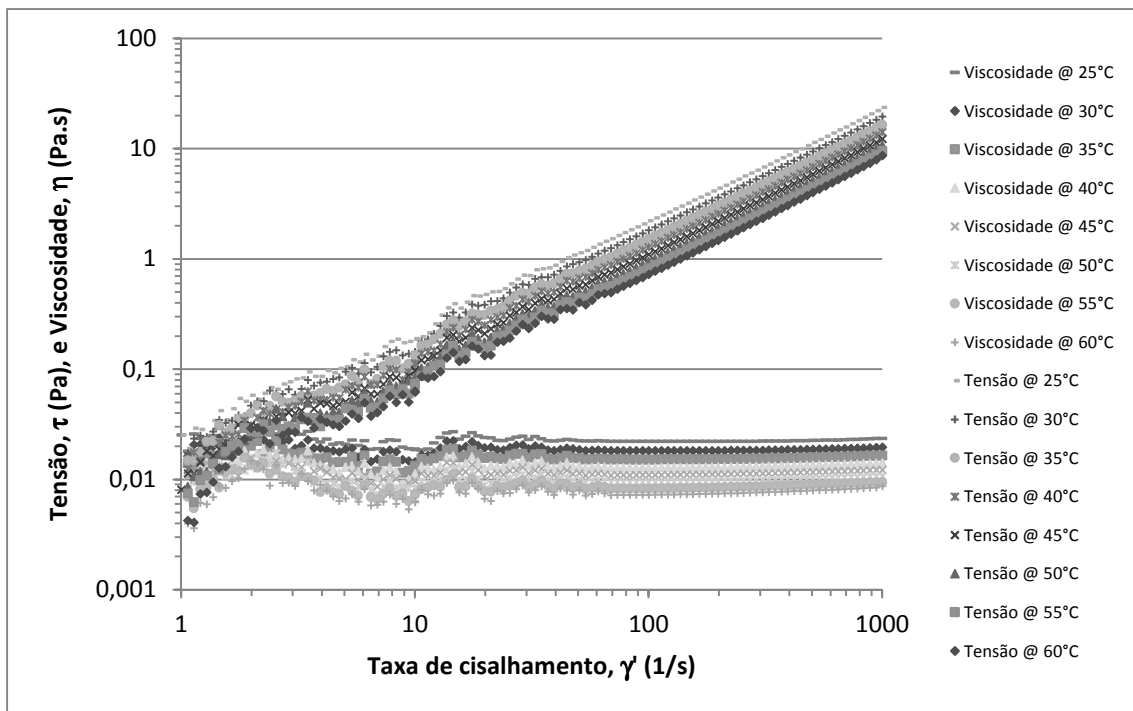


Figura A3.7: Curvas isotérmicas de tensão e viscosidade em função da taxa de cisalhamento do fluido O01PIB4MMQ a pressão atmosférica, por cilindros concêntricos no reômetro HAAKE MARS III.

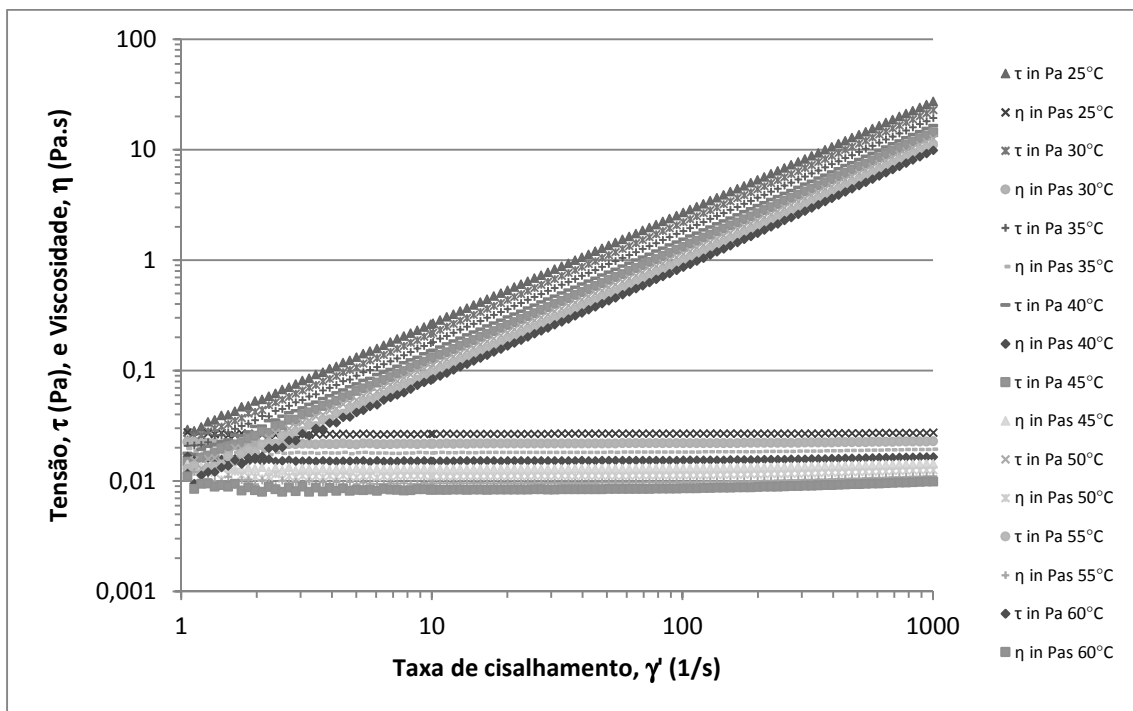


Figura A3.8: Curvas isotérmicas de tensão e viscosidade em função da taxa de cisalhamento do fluido O02PIB1MMQ a pressão atmosférica, por cilindros concêntricos no HAAKE MARS III.

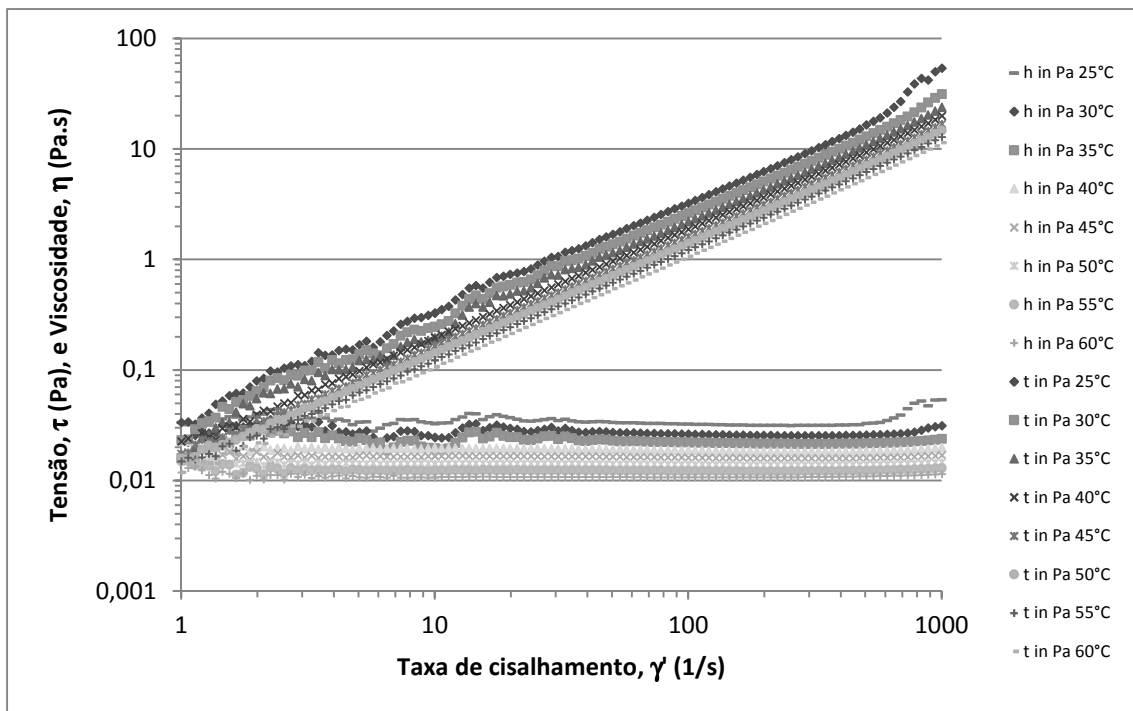


Figura A3.9: Curvas isotérmicas de tensão e viscosidade em função da taxa de cisalhamento do fluido O02PIB4MMQ a pressão atmosférica, por cilindros concêntricos no reômetro HAAKE MARS III.

## **Apêndice 3**

### **Curvas de reometria oscilatória**

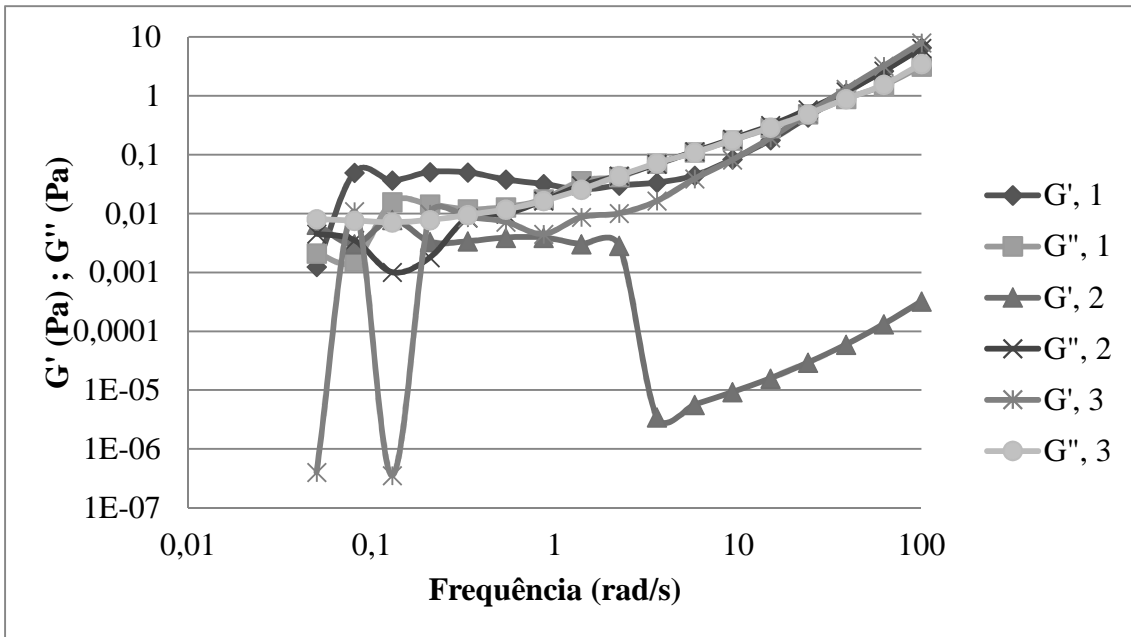


Figura A4.1: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de OMB\_1%C com  $\gamma$  a 1%.

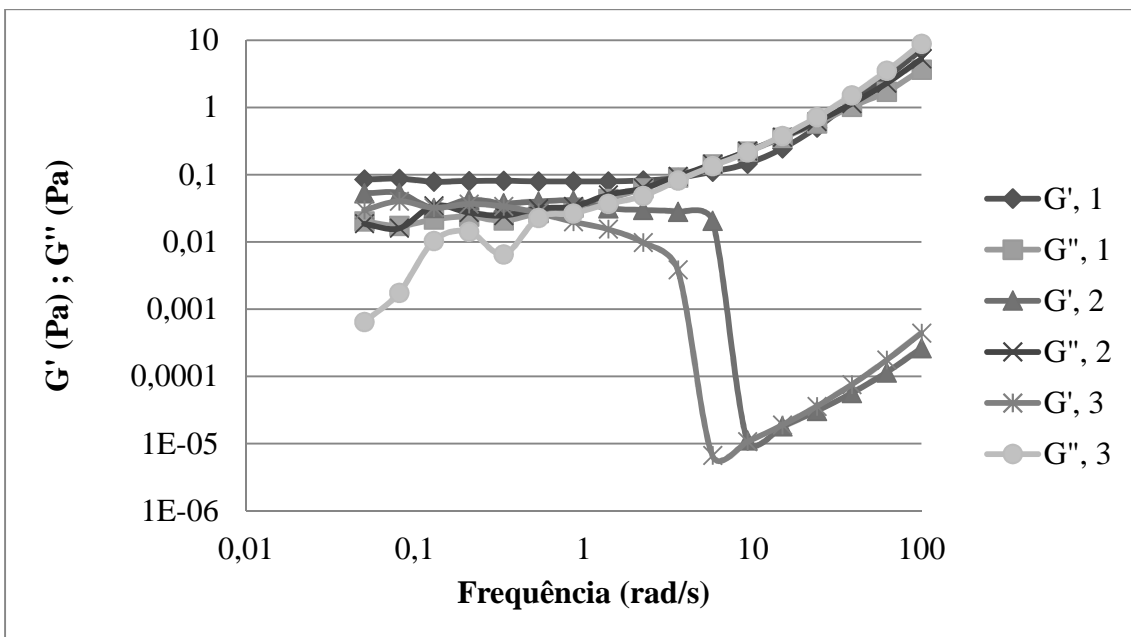


Figura A4.2: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de O005PIB1MMC com  $\gamma$  a 1%.



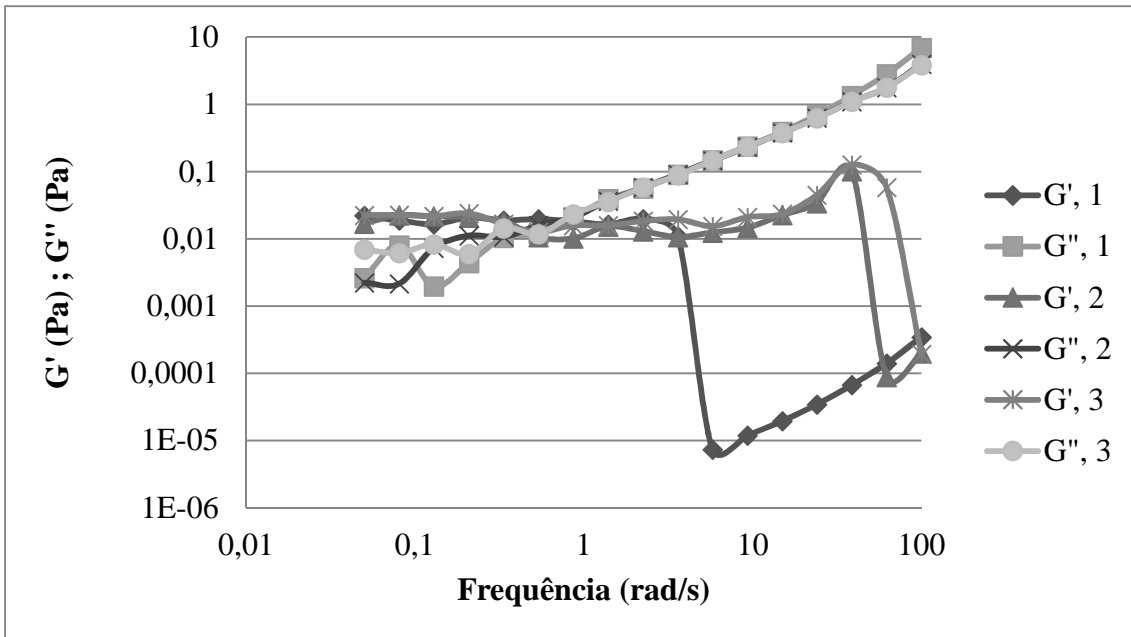


Figura A4.3: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de O005PIB4MMC com  $\gamma$  a 1%.

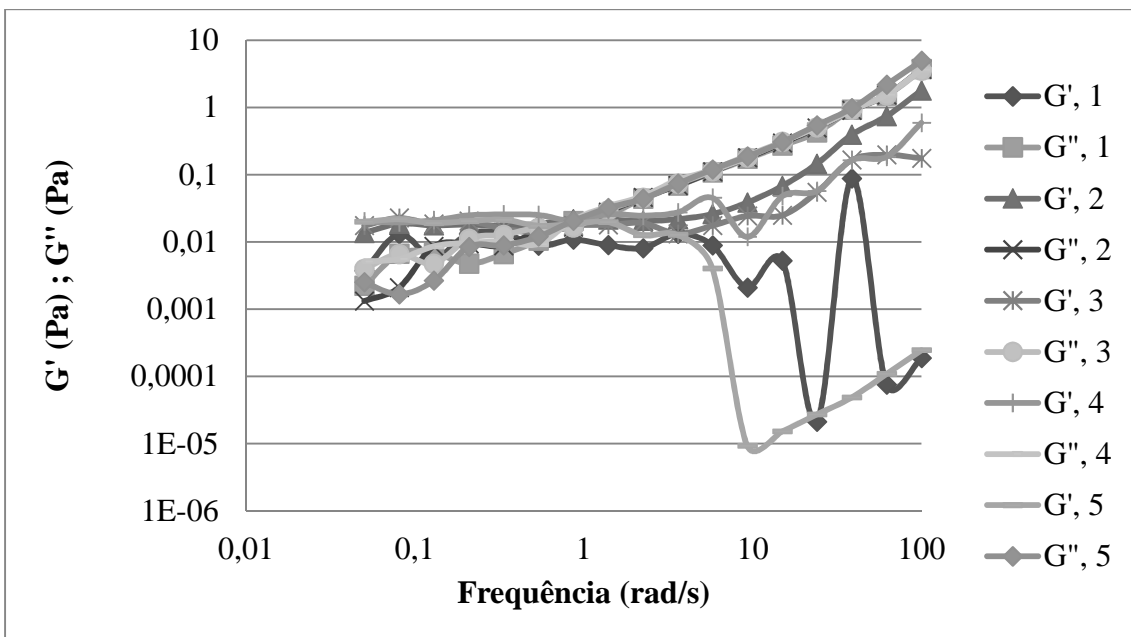


Figura A4.4: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de OMB\_2%C com  $\gamma$  a 1%.

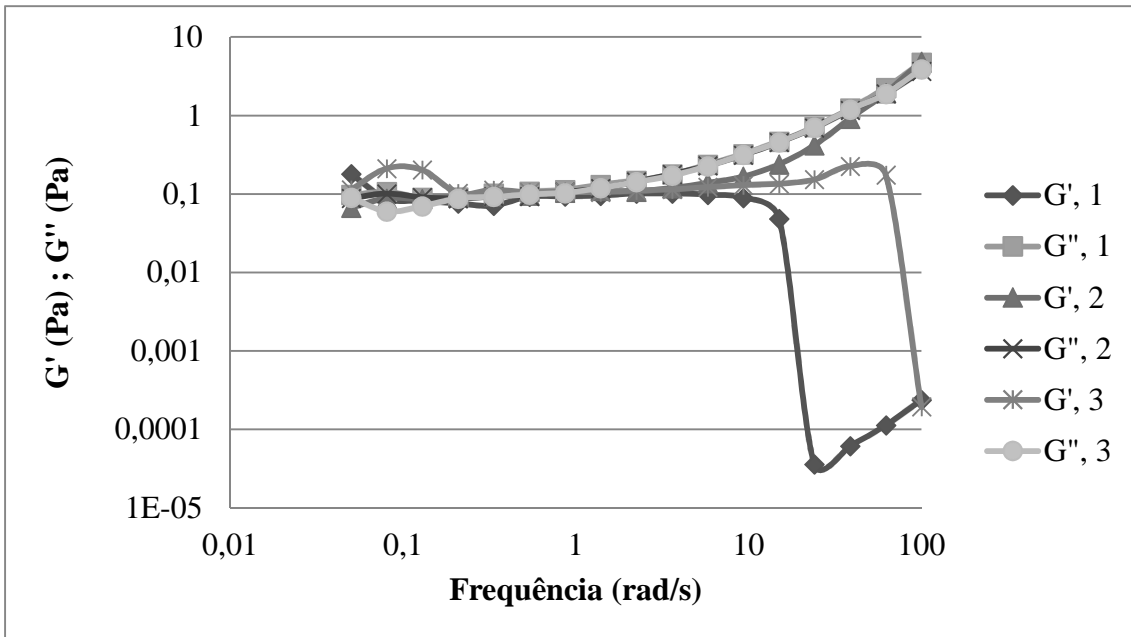


Figura A4.5: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de O01PIB1MMC com  $\gamma$  a 1%.

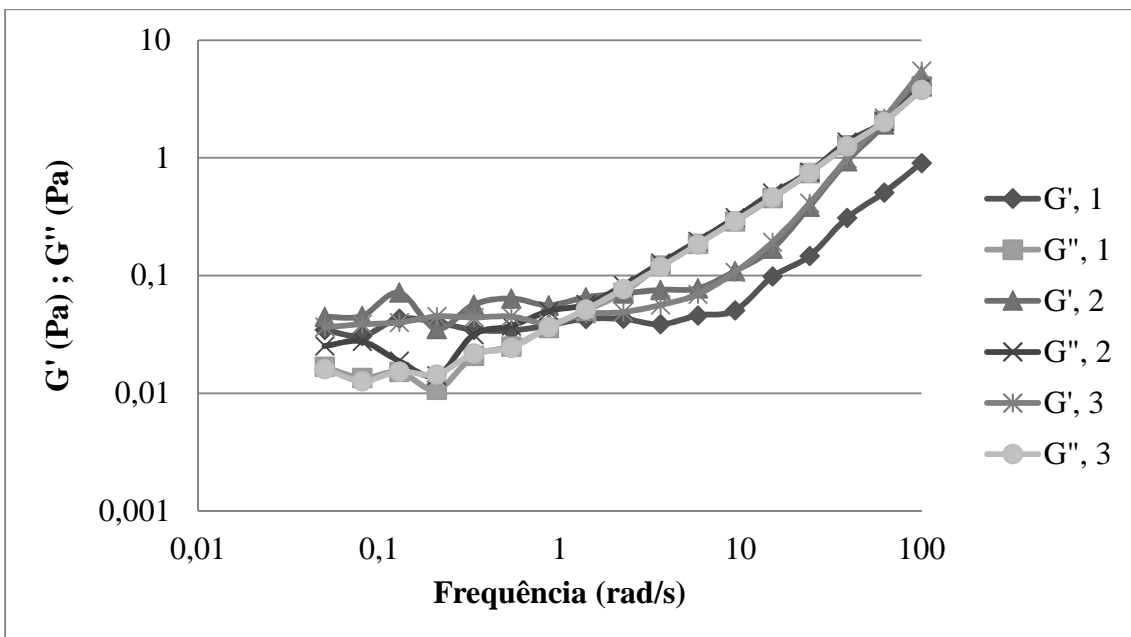


Figura A4.6: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de O01PIB4MMC com  $\gamma$  a 1%.

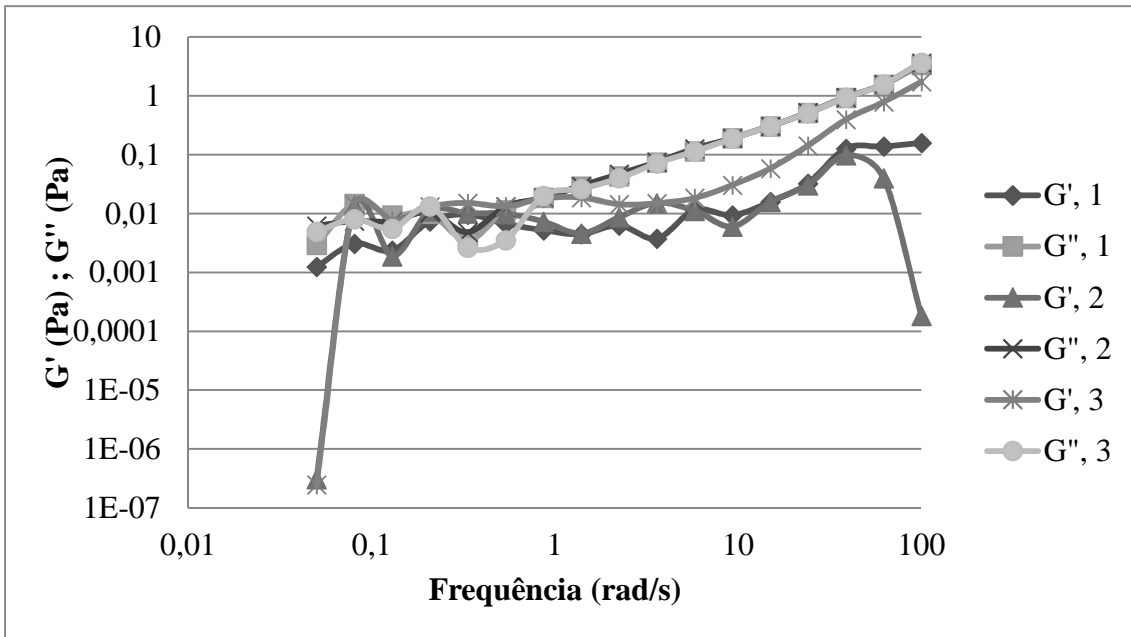


Figura A4.7: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de OMB\_1%Q com  $\gamma$  a 1%.

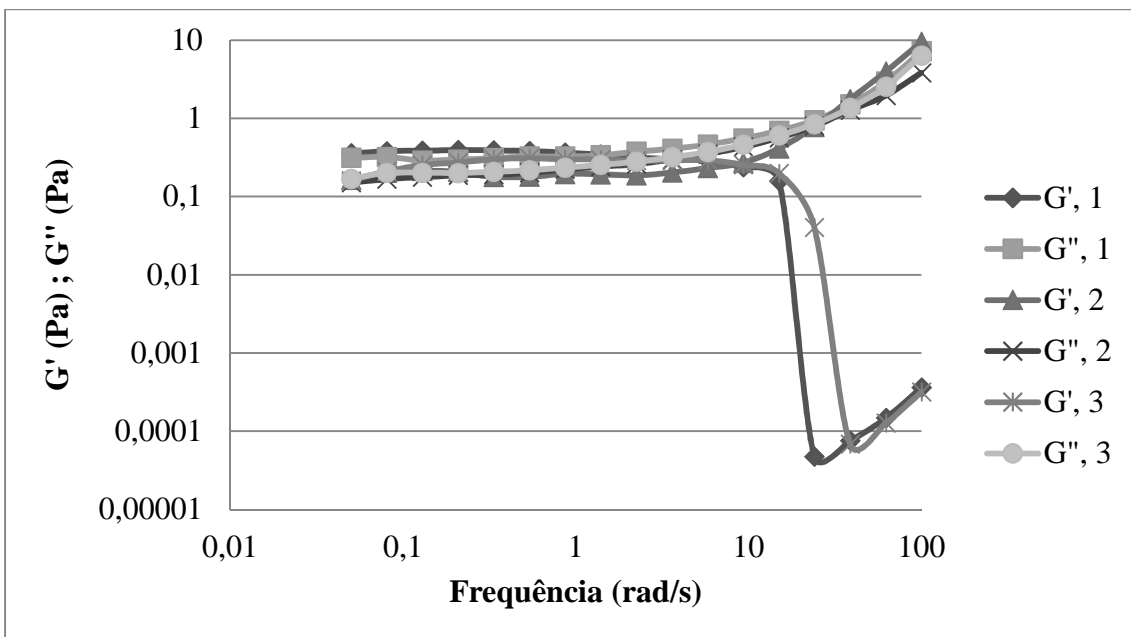


Figura A4.8: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de O005PIB1MMQ com  $\gamma$  a 1%.

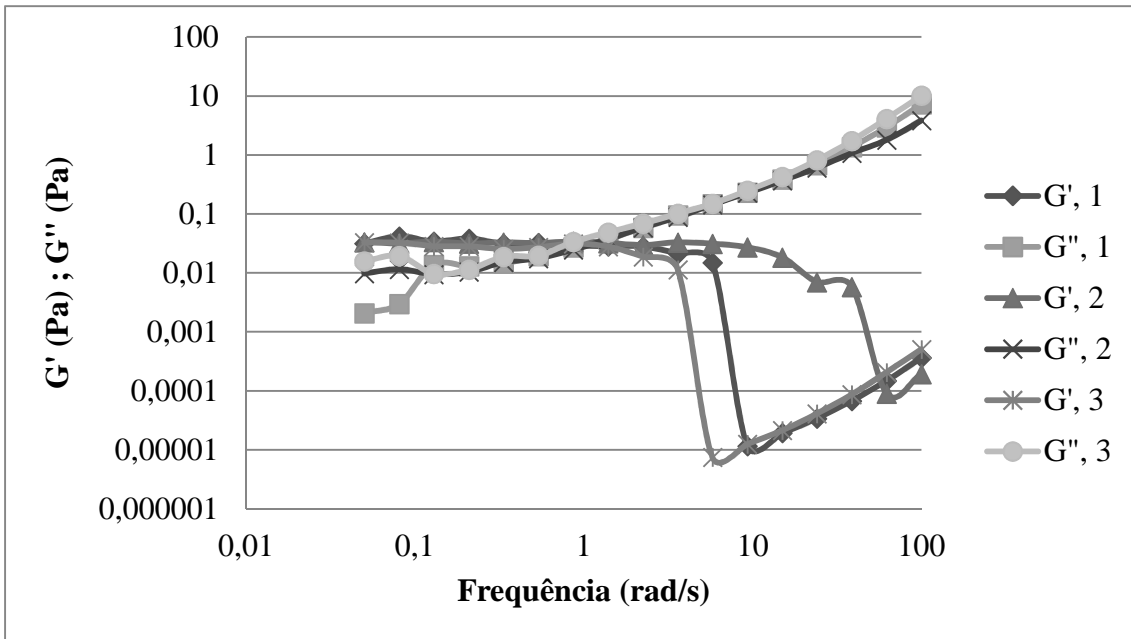


Figura A4.9: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de O005PIB4MMQ com  $\gamma$  a 1%.

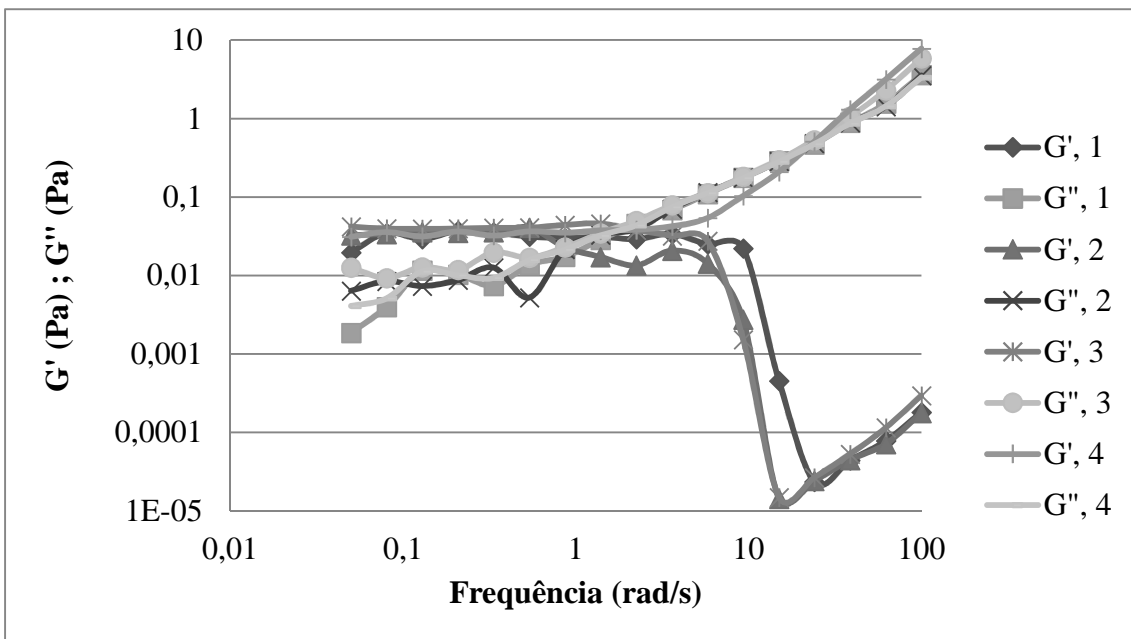


Figura A4.10: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de OMB\_2%Q com  $\gamma$  a 1%.

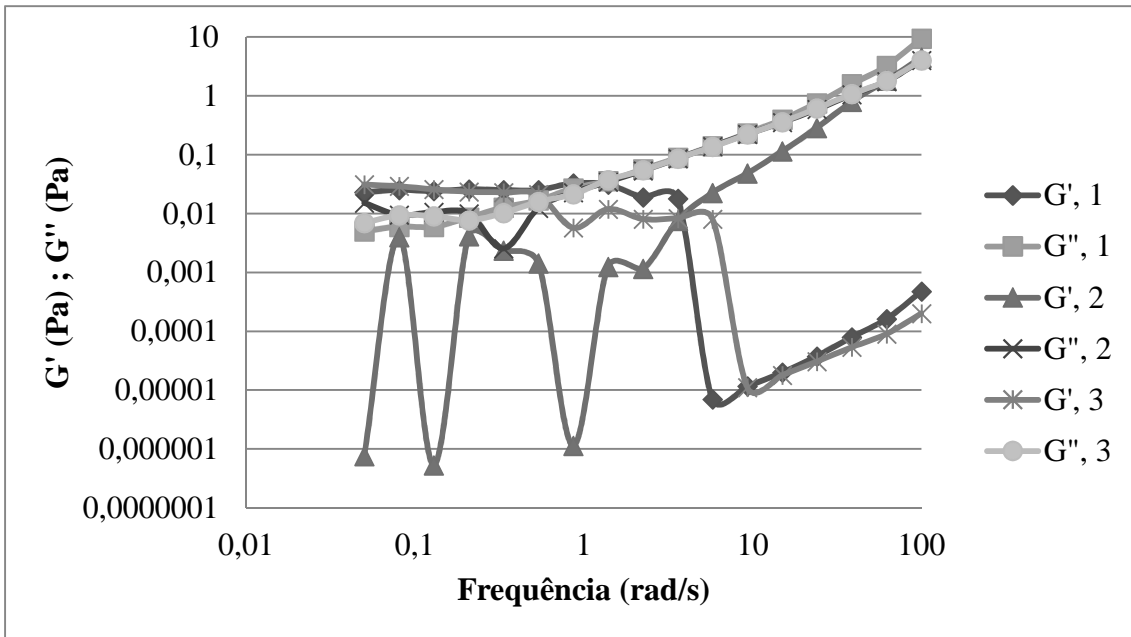


Figura A4.11: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de O01PIB1MMQ com  $\gamma$  a 1%.

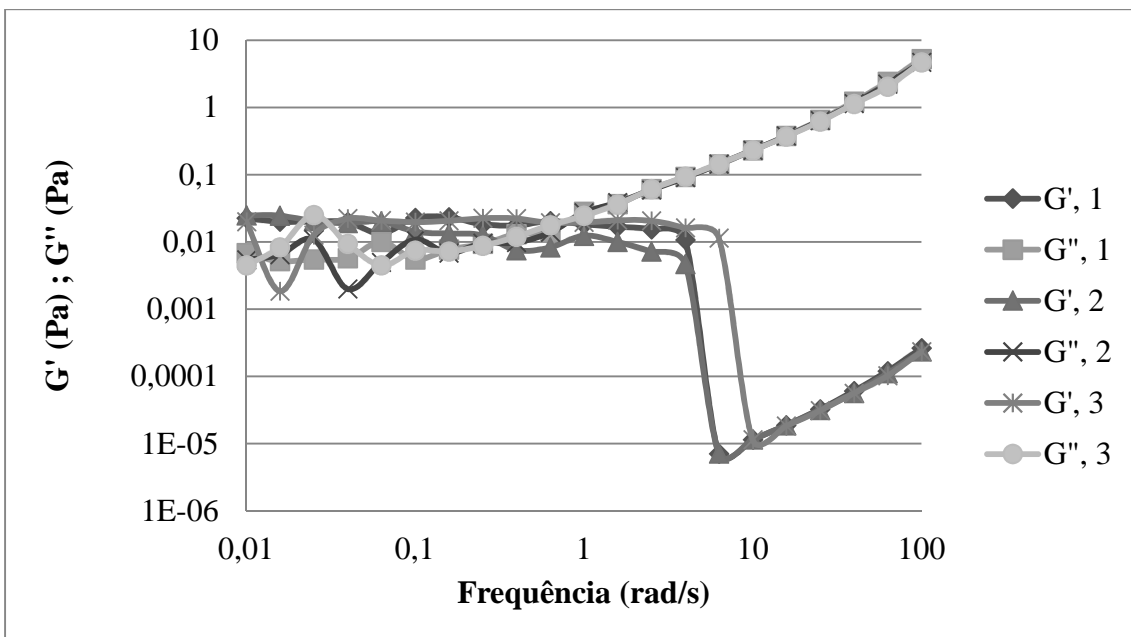


Figura A4.12: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de O01PIB1MMQ-Degr#1 com  $\gamma$  a 1%.

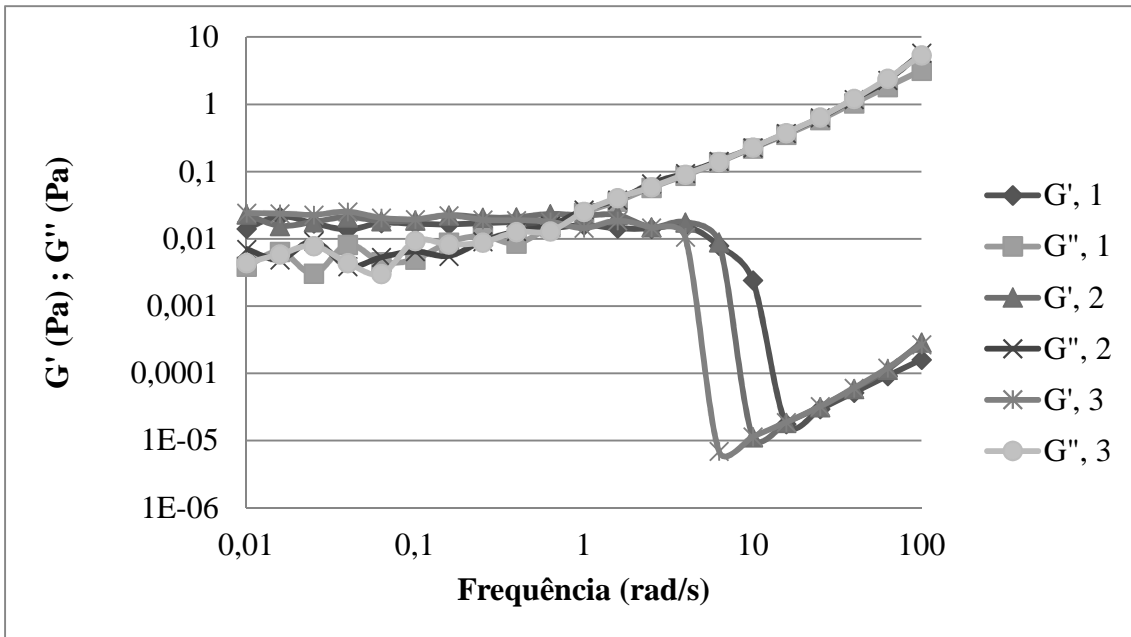


Figura A4.13: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de O01PIB1MMQ-Degr#7 com  $\gamma$  a 1%.

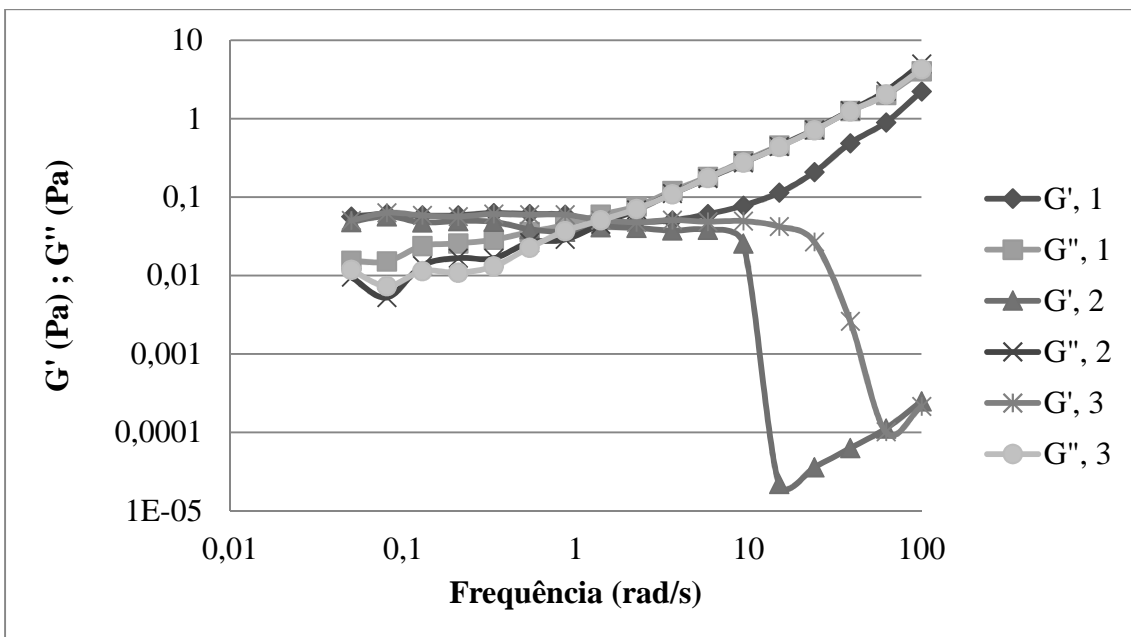


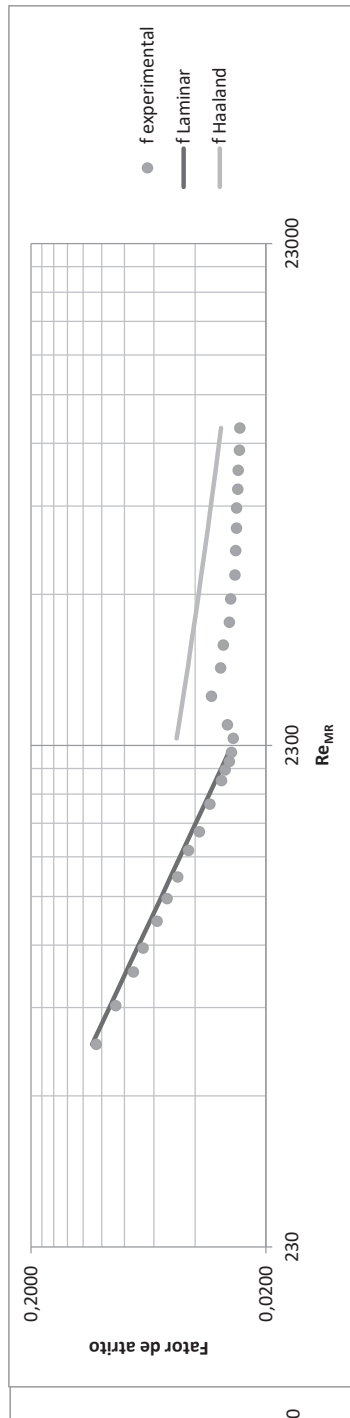
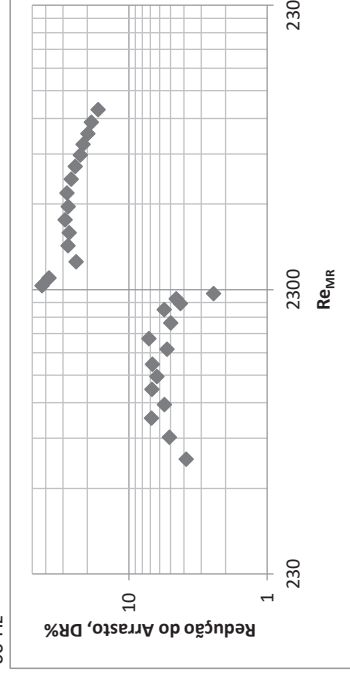
Figura A4.14: Ensaio de determinação dos módulos  $G'$  e  $G''$  por varredura de frequência em amostras de O01PIB4MMQ com  $\gamma$  a 1%.

## **Apêndice 4**

### **Planilhas de tratamento dos dados obtidos no circuito fechado de escoamento**

1º Ensaio de redução do arrasto com O005PIB1MMQ

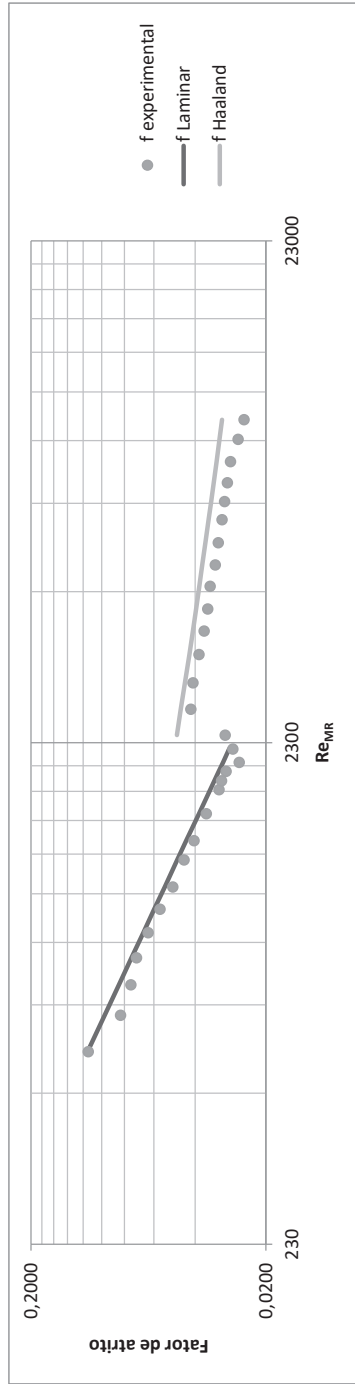
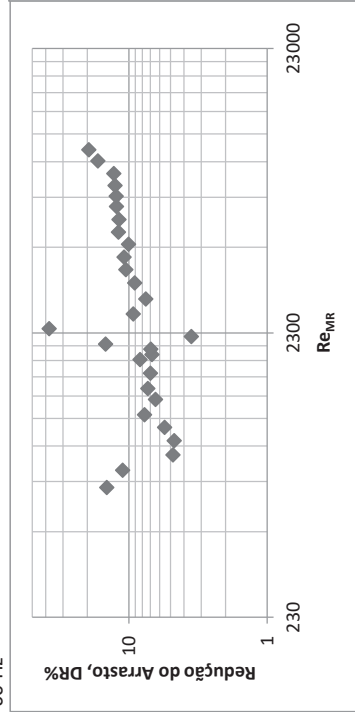
	T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>MR</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
5 Hz	26,7662285	0,463698	0,0111135	9,7004E-05	1,32782706	70,1054716	0,01930015	1,01416327	837,360211	0,10977604	0,1055	19,4779	916,2837	583,00516	0,388753499	3,854348831
6 Hz	26,4216393	0,563325	0,0111133	9,7001E-05	1,61317132	85,5389211	0,0196034	1,01400625	837,578681	0,09191088	0,0872	23,7655	1099,0620	696,326688	0,464309283	5,096264389
7 Hz	26,1819904	0,6655485	0,01111317	9,6999E-05	1,90595098	100,401881	0,0198143	1,01389974	837,730618	0,07874113	0,0733	27,8946	1274,6089	812,789982	0,541960197	6,872023181
8 Hz	26,0233116	0,74869177	0,01111308	9,6997E-05	2,14408535	115,50423	0,01995395	1,01383039	837,83122	0,07056184	0,0667	32,0902	1454,1302	907,005763	0,604777468	5,539207107
9 Hz	25,9589063	0,85063644	0,01111304	9,6996E-05	2,43604792	130,021259	0,02001063	1,0138025	837,872053	0,06237603	0,0581	36,1233	1630,0097	1026,03512	0,684142176	6,822695094
10 Hz	25,9866291	0,94396329	0,01111306	9,6997E-05	2,70330924	145,176999	0,01998623	1,01381448	837,854477	0,05622748	0,0527	40,3340	1819,3088	1138,23348	0,758955138	6,275606415
11 Hz	26,0442869	1,04131987	0,01111309	9,6997E-05	2,98210025	159,151295	0,01993549	1,0138395	837,817922	0,05092197	0,0475	44,2166	1996,5663	1256,82485	0,838032336	6,765724758
12,5 Hz	26,1757427	1,17198219	0,01111316	9,6999E-05	3,3562423	181,244485	0,0198198	1,01389699	837,734579	0,04508015	0,0427	50,3550	2281,7776	1419,69349	0,94663706	5,303479824
13,5 Hz	26,24425	1,27520938	0,0111132	9,6999E-05	3,65183189	192,994993	0,01975951	1,0139272	837,691146	0,04136521	0,0384	53,6198	2434,3677	1547,19385	1,031656578	7,172963437
15 Hz	26,8409545	1,41474751	0,01111354	9,7005E-05	4,05118374	214,065183	0,01923439	1,01419793	837,312835	0,03644059	0,0346	59,4755	2763,1168	1756,28337	1,171111236	4,985185442
16,5 Hz	27,1955974	1,55486168	0,01111374	9,7009E-05	4,45224594	230,648881	0,0189223	1,01436558	837,087991	0,03271478	0,0309	64,0843	3018,4805	1956,30225	1,304509721	5,55377167
17,0 Hz	27,5837253	1,60762218	0,01111396	9,7012E-05	4,60314109	237,88039	0,01858076	1,01455515	836,841918	0,03114096	0,0298	66,0948	3163,4321	2055,17081	1,370464637	4,242401088
17,5 Hz	27,9588813	1,64455121	0,01111417	9,7016E-05	4,70870171	238,670743	0,01825065	1,01474475	836,604069	0,0299645	0,0286	66,3157	3225,5545	2135,86102	1,424298967	4,549812984
18 Hz	28,2922428	1,69074941	0,01111435	9,7019E-05	4,84081342	247,187516	0,01795732	1,01491875	836,392718	0,02873624	0,0280	68,6832	3388,0274	2227,15299	1,48520212	2,441765173
19 Hz	28,6101478	1,77927389	0,01111453	9,7022E-05	5,09410519	268,833306	0,0176776	1,01508975	836,191166	0,04795849	0,0275	74,6989	3732,4201	2375,19286	0,178632474	42,57547002
20 Hz	28,9961168	1,86024999	0,01111475	9,7026E-05	5,32573338	310,970528	0,01755836	1,01502783	835,946462	0,04695255	0,0292	86,4090	4388,4813	2527,7281	0,180498733	37,90559014
22,5 Hz	29,6264615	2,06362079	0,01111511	9,7032E-05	5,90758869	447,170546	0,01681769	1,01530531	835,546823	0,044935	0,0341	124,2587	6460,1650	2881,75241	0,184491241	24,13511509
25 Hz	30,5054823	2,28074114	0,01111156	9,7041E-05	6,52856381	498,998333	0,01623473	1,01567857	834,989524	0,04305961	0,0312	138,6667	7427,4173	3281,86612	0,188540998	27,61048531
27,5 Hz	31,5282529	2,4640653	0,01111618	9,7051E-05	7,05259335	566,633157	0,01570353	1,01610333	834,341088	0,04162911	0,0304	157,4699	8665,4004	3645,28826	0,191880194	27,07959736
30 Hz	32,7119231	2,64587924	0,01111684	9,7063E-05	7,57206862	614,782118	0,01508883	1,01662991	833,590641	0,04027381	0,0286	170,8609	9720,1422	4047,32376	0,195267013	28,98859754
32,5 Hz	34,2367217	2,81404478	0,01111177	9,7078E-05	8,05208606	685,460198	0,01429708	1,01737058	832,623918	0,03895468	0,0282	190,5186	11330,9157	4504,53331	0,198796813	27,5227074
35 Hz	35,97573	2,97332632	0,01111868	9,7095E-05	8,50635368	732,673148	0,01339428	1,01831473	831,521387	0,03766618	0,0271	203,6590	12787,0333	5027,99761	0,202490367	28,10780709
37,5 Hz	37,8153896	3,12621455	0,01111972	9,7113E-05	8,94208257	802,61585	0,01243947	1,01945164	830,355043	0,03641801	0,0269	223,1216	14879,0852	5623,81633	0,206324939	26,17998215
40 Hz	39,7902226	3,22546271	0,01112083	9,7132E-05	9,2241215	846,019731	0,01141484	1,02086686	829,102999	0,03532511	0,0267	235,2111	16819,3291	6233,35468	0,209915076	24,48977551
42,5 Hz	41,9717506	3,34767754	0,01112206	9,7154E-05	9,57151351	908,517109	0,0106743	1,02192498	827,71991	0,03438284	0,0267	252,6146	19066,6450	6838,35169	0,213204594	22,48922505
45 Hz	44,1953863	3,44724358	0,01112331	9,7176E-05	9,85396775	949,694893	0,00996201	1,02305927	826,310125	0,03353999	0,0263	264,0939	21072,1928	7453,55007	0,216312076	21,49089653
47,5 Hz	46,311349	3,55064595	0,01112451	9,7197E-05	10,1473689	1001,51815	0,0092844	1,02428754	824,968605	0,03272007	0,0262	278,5349	23494,4779	8130,85019	0,21949406	19,83015471
50 Hz	48,5688088	3,64711687	0,01112578	9,7219E-05	10,4206896	1041,49608	0,00856171	1,02579431	823,537375	0,03188253	0,0259	289,6864	26029,9566	8916,92281	0,222921658	18,71900532
52,5 Hz	51,6229248	3,74003013	0,01111275	9,7249E-05	10,6828605	1087,58077	0,00736923	1,03389028	821,601066	0,03099706	0,0258	302,5514	28983,6891	9870,575	0,226763943	16,72156704
55 Hz																
57,5 Hz																
60 Hz																





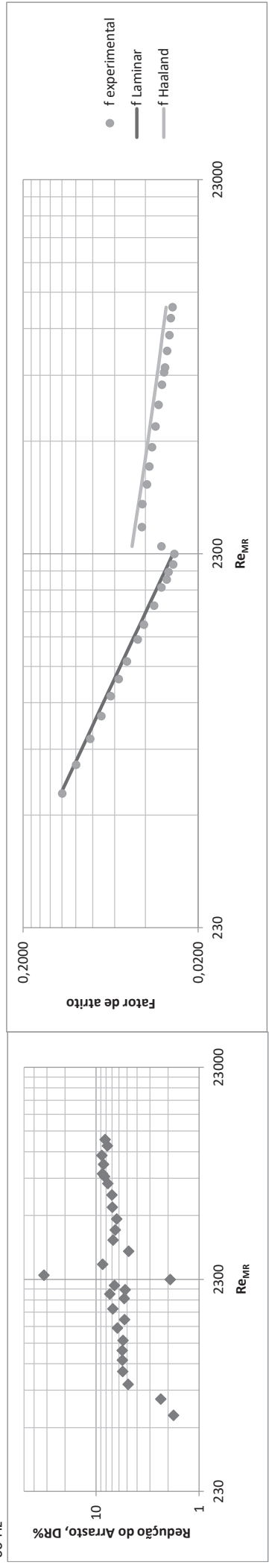
2º Ensaio de redução do arrasto com O0005PIB1MMQ

	T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>M/R</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
5 Hz	25,3989298	0,462814	0,01111272	9,6991E-05	1,32547942	75,6537522	0,0201534	1,01447553	838,227078	0,11495569	0,1142	21,0180	944,4424	556,736243	0,371211398	0,67858923
6 Hz	24,9076149	0,5591	0,01111245	9,6986E-05	1,60131817	80,4698104	0,02056116	1,0143976	838,538572	0,09725975	0,0832	22,3554	984,5543	658,03172	0,438740594	14,48126608
7 Hz	24,4504878	0,65578173	0,01111219	9,6982E-05	1,87831134	100,103663	0,02094053	1,01432793	838,828391	0,08457274	0,0752	27,8093	1199,7344	756,744992	0,504545666	11,11244961
8 Hz	24,2835275	0,74845395	0,0111121	9,698E-05	2,14378242	123,383033	0,02107908	1,01430314	838,934244	0,07470963	0,0711	34,2761	1465,0688	856,64995	0,571150606	4,804695813
9 Hz	24,2476738	0,84229333	0,01111208	9,698E-05	2,41257356	139,424189	0,02110884	1,01429786	838,956975	0,06658794	0,0635	38,7323	1650,4569	961,13505	0,640812351	4,705692663
10 Hz	24,2754604	0,93872068	0,01111209	9,698E-05	2,688762	154,127613	0,02108578	1,01430195	838,993958	0,05977831	0,0565	42,8170	1823,8460	1070,6225	0,71381133	5,522723051
11 Hz	24,3651212	1,03762305	0,01111214	9,6981E-05	2,97201941	166,074601	0,02101137	1,01431521	838,882513	0,05397608	0,0498	46,1361	1969,8185	1185,71032	0,790546908	7,716255054
12,5 Hz	24,427	1,1741409	0,01111218	9,6981E-05	3,36302053	190,434197	0,02096002	1,01432442	838,843282	0,04767364	0,0446	52,9035	2259,6835	1342,46102	0,895059882	6,425840866
13,5 Hz	24,8077851	1,2655444	0,01111239	9,6985E-05	3,62468207	200,552176	0,02064401	1,01438215	838,601864	0,04364292	0,0405	55,7154	2412,8636	1466,44622	0,977743491	7,305189306
15 Hz	25,0934758	1,41904737	0,01111255	9,6988E-05	4,06421662	223,483833	0,02040691	1,0144267	838,420736	0,03856044	0,0359	62,0869	2714,4758	1659,73222	1,1066631701	6,989434607
16,5 Hz	25,4658028	1,56390726	0,01111276	9,6992E-05	4,47893288	239,536483	0,0200979	1,0144864	838,184681	0,03453372	0,0317	66,5478	2949,3028	1853,26131	1,235691159	8,316422437
17,0 Hz	25,8596557	1,60446673	0,01111298	9,6995E-05	4,59490915	245,887615	0,019771	1,01455168	837,934978	0,03153302	0,0309	68,3136	3074,1593	1930,44236	1,287178541	6,82271761
17,5 Hz	26,2517107	1,65008707	0,01111321	9,6999E-05	4,72536992	248,584868	0,01944559	1,01461895	837,686415	0,03174562	0,0295	69,0644	3157,0191	2016,02588	1,344270558	6,951998336
18 Hz	26,60307	1,6926325	0,0111134	9,7003E-05	4,84703496	229,861988	0,01897867	1,01563133	837,463654	0,03046727	0,0260	63,8637	2969,6509	2100,61456	1,40069859	14,77002733
19 Hz	26,9043519	1,77944801	0,01111357	9,7006E-05	5,09548486	270,354693	0,01889595	1,0146355	837,272641	0,02865614	0,0276	75,1152	3527,2833	2233,37788	1,489248474	3,536744178
20 Hz	27,3260663	1,86409812	0,01111381	9,701E-05	5,33765391	319,730845	0,01836224	1,01594034	837,005274	0,04792403	0,0298	88,8357	4234,9535	2380,18451	0,178683357	37,81364041
22,5 Hz	27,9944068	2,0436684	0,01111419	9,7016E-05	5,8514385	537,918255	0,01779245	1,01624394	836,581546	0,0460297	0,0417	149,4631	7270,6149	2681,04651	0,182269682	9,311494719
25 Hz	28,8923898	2,22018347	0,01111469	9,7025E-05	6,35625836	621,057827	0,01702694	1,01668195	836,012225	0,04421438	0,0409	172,5717	8711,7287	3026,40831	0,185996484	7,555683299
27,5 Hz	30,0476294	2,40195363	0,01111534	9,7037E-05	6,87585063	684,463466	0,01605893	1,01729195	835,279803	0,04238442	0,0385	190,2012	10098,4615	3446,36429	0,190079717	9,089913771
30 Hz	31,3927703	2,57881446	0,0111161	9,705E-05	7,38112721	749,152746	0,01538365	1,01776011	834,426984	0,04095123	0,0366	208,1915	11463,3037	3838,62513	0,193538694	10,5351965
32,5 Hz	32,949827	2,72832979	0,01111698	9,7065E-05	7,8078402	808,144568	0,01460204	1,01835328	833,43981	0,03966998	0,0354	224,6032	12928,3168	4247,73543	0,196848618	10,85277381
35 Hz	34,8000849	2,86102543	0,01111802	9,7083E-05	8,1860487	866,380468	0,01367335	1,01914146	832,266746	0,03841355	0,0345	240,8109	14657,3906	4714,18372	0,20031552	10,0706158
37,5 Hz	36,3809858	2,99835635	0,01111891	9,7099E-05	8,57760951	903,270259	0,01287997	1,01989972	831,264455	0,03728485	0,0328	251,0846	16076,9278	5199,85437	0,20363238	11,91420452
40 Hz	38,0824549	3,13144056	0,01111987	9,7116E-05	8,95678843	955,053299	0,01202619	1,0208207	830,185724	0,03616352	0,0319	265,5017	18002,8019	5757,79992	0,207138984	11,81256035
42,5 Hz	39,9687143	3,24645312	0,01112093	9,7134E-05	9,28398161	987,445369	0,01107987	1,02199665	828,989835	0,03505343	0,0307	274,5329	19928,9953	6399,62547	0,210840001	12,31282278
45 Hz	41,9015534	3,36668632	0,01112202	9,7153E-05	9,62593094	1033,78047	0,01046551	1,02290447	827,764415	0,03421467	0,0300	287,4432	21847,4182	6955,13542	0,213806403	12,37307876
47,5 Hz	44,1408078	3,46689945	0,01112328	9,7175E-05	9,91020896	1063,97833	0,00976056	1,02408021	826,344728	0,03337516	0,0292	295,8733	23782,0926	7583,06813	0,216933453	12,61324921
50 Hz	46,6035806	3,57143579	0,01112467	9,72E-05	10,2064819	1092,43749	0,00898531	1,02557319	824,78333	0,03247089	0,0283	303,8252	26070,8776	8354,06208	0,220490301	12,87806147
52,5 Hz	49,0656036	3,67699446	0,01112606	9,7224E-05	10,5055284	1072,04673	0,00810303	1,0287281	823,222407	0,03155448	0,0263	298,1914	27437,3671	9254,36519	0,224311631	16,79085989
55 Hz	51,5868739	3,78188396	0,01112748	9,7249E-05	10,8024494	1067,07121	0,00749578	1,03020712	821,623922	0,03077794	0,0248	296,8453	29033,6712	10128,7265	0,227741376	19,52461429
57,5 Hz																
60 Hz																



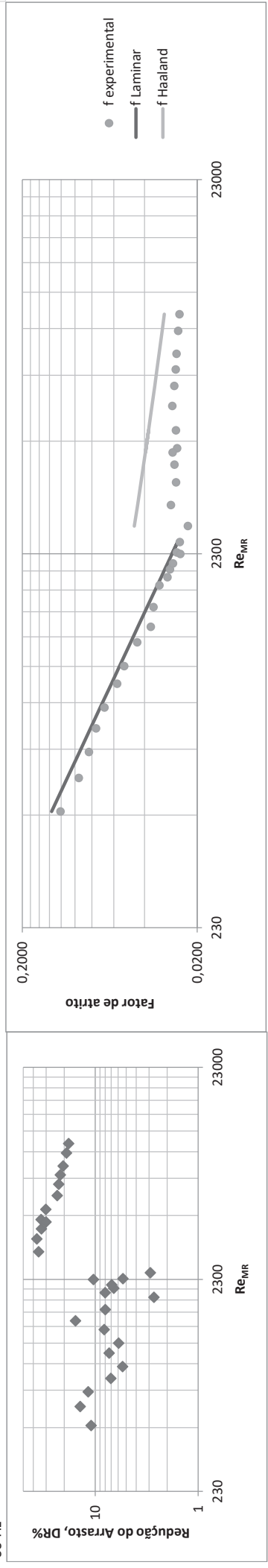
3º Ensaio de redução do arrasto com O005PIBIMMQ

	T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>MIR</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
5 Hz	23,7734815	0,461259	0,01111181	9,6975E-05	1,32124372	78,8446353	0,02134331	1,01418419	839,257613	0,12175326	0,1196	21,9027	931,3665	525,653266	0,350457521	1,769774606
6 Hz	23,6350552	0,554575	0,01111173	9,6974E-05	1,58856309	94,9739219	0,02146005	1,0141478	839,345375	0,10205009	0,0996	26,3831	1113,2503	627,142983	0,418118647	2,354318392
7 Hz	23,6235751	0,65236863	0,01111172	9,6973E-05	1,86869214	109,125915	0,02146973	1,0141448	839,352653	0,0869884	0,0827	30,3144	1276,1173	735,730319	0,490513957	4,883019076
8 Hz	23,6653373	0,75062338	0,01111175	9,6974E-05	2,15013104	124,777787	0,02143434	1,01415578	839,326049	0,07363559	0,0715	34,6625	1458,6839	846,162529	0,564140696	5,514988281
9 Hz	23,7999983	0,8460751	0,01111182	9,6975E-05	2,42351567	140,109406	0,02132096	1,0141912	839,240811	0,06688516	0,0632	38,9218	1643,4275	956,863956	0,637950227	5,55595102
10 Hz	23,9745529	0,93525528	0,01111192	9,6977E-05	2,67891785	154,041011	0,02117374	1,01423773	839,130133	0,06020406	0,0568	42,7923	1816,2050	1063,05131	0,708752608	5,576152572
11 Hz	24,1599151	1,0368523	0,01111203	9,6979E-05	2,96987357	169,996285	0,02101742	1,01428782	839,012614	0,05401113	0,0511	47,2251	2015,4910	1184,93727	0,790023273	5,477832121
12,5 Hz	24,457509	1,1756437	0,01111219	9,6982E-05	3,3673145	189,423119	0,02076646	1,01436976	838,823939	0,04719116	0,0443	52,6227	2267,7300	1356,18623	0,904212301	6,208390479
13,5 Hz	24,7694074	1,27438538	0,01111237	9,6985E-05	3,65001798	205,070164	0,02050343	1,01445771	838,626196	0,04307281	0,0408	56,9704	2481,1608	1485,85632	0,990683118	5,2939981378
15 Hz	25,1420429	1,41449146	0,01111258	9,6988E-05	4,05114833	220,869934	0,02018919	1,01456566	838,389945	0,03831275	0,0357	61,3609	2708,7691	1670,46197	1,113788539	6,881543622
16,5 Hz	25,5906942	1,55726862	0,01111283	9,6993E-05	4,45986374	243,147189	0,01981085	1,01469998	838,1055	0,03424411	0,0324	67,5514	3030,7638	1868,93427	1,246149243	5,333523533
17,0 Hz	26,0349619	1,60693286	0,01111308	9,6997E-05	4,60188992	241,239435	0,01943622	1,01483793	837,823834	0,0326202	0,0302	67,0228	3061,1720	1961,97433	1,3082215024	7,359467424
17,5 Hz	26,4709722	1,65426326	0,01111333	9,7001E-05	4,73722399	249,631324	0,01906855	1,01497836	837,547404	0,03114627	0,0295	69,3559	3222,6872	2054,82056	1,370153785	5,221478442
18 Hz	26,8796036	1,70511884	0,01111356	9,7005E-05	4,88265405	249,271941	0,01872398	1,01511475	837,288331	0,0297266	0,0278	69,2575	3272,9614	2152,95411	1,435618949	6,626336087
19 Hz	27,288646	1,78925293	0,01111379	9,7009E-05	5,12336182	270,212668	0,01837907	1,01525618	837,028998	0,02786774	0,0273	75,0772	3605,1169	2296,56225	1,531410558	1,905297386
20 Hz	27,7389583	1,86571945	0,01111404	9,7014E-05	5,34207277	348,233259	0,01765432	1,0195549	836,7435	0,04774559	0,0324	96,7570	4646,4494	2406,29373	0,179012295	32,10666312
22,5 Hz	28,4644983	2,04091428	0,01111445	9,7021E-05	5,84327437	538,300693	0,01706305	1,019902	836,283508	0,04586728	0,0419	149,5729	7342,7371	2709,4756	0,182594742	8,636242136
25 Hz	29,7597368	2,22384682	0,01111518	9,7034E-05	6,3661865	634,494426	0,01600769	1,02058108	835,462327	0,04377066	0,0417	176,3130	9129,4662	3120,94297	0,186960652	4,828762616
27,5 Hz	31,3288277	2,3970644	0,01111607	9,7049E-05	6,86096353	692,705483	0,01514789	1,0213248	834,467523	0,04208476	0,0392	192,5040	10432,6868	3523,31356	0,190792953	6,840923083
30 Hz	33,0565965	2,54943229	0,01111704	9,7066E-05	7,29579853	757,871625	0,01428467	1,02219371	833,372118	0,04063367	0,0380	210,6322	11971,4084	3934,43455	0,194351933	6,514542924
32,5 Hz	35,012827	2,70774329	0,01111814	9,7085E-05	7,74730638	823,959543	0,01330768	1,02330188	832,131868	0,03915289	0,0367	229,0225	13782,2993	4431,1468	0,198261119	6,306238528
35 Hz	37,3715017	2,84947465	0,01111947	9,7109E-05	8,15087491	869,39501	0,01213032	1,02485327	830,636468	0,03765326	0,0350	241,6803	15671,3605	5033,62863	0,202542873	6,951533531
37,5 Hz	39,8124625	2,98585084	0,01112085	9,7133E-05	8,53886447	914,278725	0,0109128	1,02677754	829,088899	0,03617768	0,0336	254,1888	17919,8918	5750,22328	0,207111683	7,016837477
40 Hz	43,1042169	3,11804533	0,0111227	9,7165E-05	8,91393773	951,085475	0,00981514	1,02930529	827,001926	0,03488007	0,0322	264,4660	20152,7176	6509,07576	0,211470335	7,692556914
42,5 Hz	44,7969501	3,22714706	0,01112365	9,7182E-05	9,22425831	988,34337	0,00926811	1,03078405	825,928734	0,03411117	0,0313	274,8497	21804,4904	7028,05774	0,21420981	8,277365821
45 Hz	44,7568987	3,33023828	0,01112363	9,7181E-05	9,5189659	1039,26766	0,00928105	1,03074731	825,954126	0,03382364	0,0309	289,0108	22870,7642	7237,96887	0,215262662	8,662701758
47,5 Hz	47,2374162	3,45278385	0,01112503	9,7206E-05	9,86676384	1084,66174	0,00848029	1,03320597	824,381478	0,03285253	0,0301	301,6723	25401,3699	8015,63981	0,218982888	8,466729601
50 Hz	49,6716414	3,54836863	0,0111264	9,723E-05	10,1374098	1108,03371	0,00769569	1,03604303	822,838179	0,03196792	0,0292	308,2107	27699,9954	8831,95749	0,222578654	8,787401301
52,5 Hz	51,6528015	3,64382581	0,01112752	9,7249E-05	10,4080351	1145,40185	0,0073181	1,03253964	821,582124	0,03105286	0,0286	318,6369	31096,1566	9806,31892	0,226517582	7,764931726
55 Hz	53,6433826	3,73878947	0,01112864	9,7269E-05	10,6771321	1176,14997	0,00694895	1,03338906	820,320095	0,03048218	0,0280	327,2237	33261,5215	10492,5424	0,229108643	8,167559753
57,5 Hz																
60 Hz																



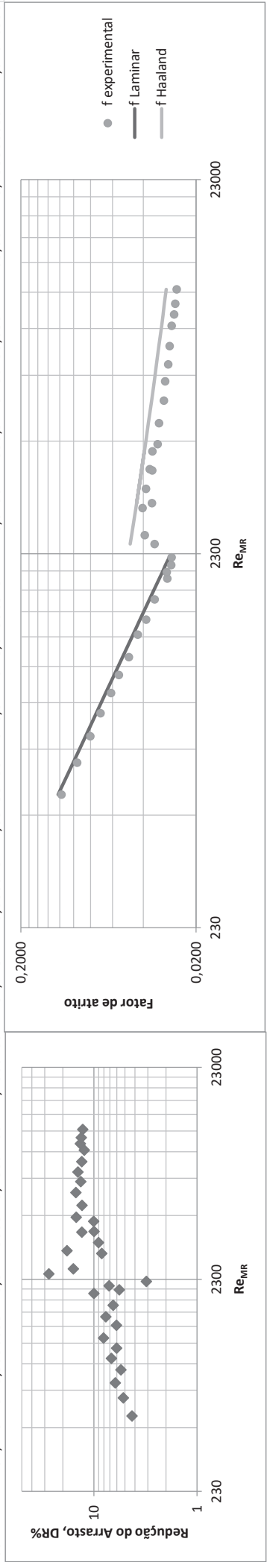
1º Ensaio de redução do arrasto com O01PIBIMMQ

	T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>M/R</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
5 Hz	23,0287394	0,453967	0,01111139	9,6968E-05	1,30045452	77,3835727	0,02423953	1,00939121	839,729779	0,13601456	0,1211	21,4960	832,5434	470,537874	0,313699772	10,97092494
6 Hz	23,2036084	0,555708	0,01111149	9,6969E-05	1,59187818	91,0974428	0,02407947	1,00946123	839,618912	0,11065683	0,0951	25,3057	984,5815	578,364679	0,385589528	14,0138876
7 Hz	23,4292961	0,64788448	0,01111162	9,6972E-05	1,85588896	108,335334	0,02387729	1,0095529	839,475826	0,09431301	0,0833	30,0945	1178,2648	678,591435	0,452414809	11,71317375
8 Hz	23,6725037	0,74395121	0,01111175	9,6974E-05	2,13101735	130,003253	0,0236503	1,00965337	839,321633	0,08155001	0,0758	36,1141	1423,6366	784,794538	0,523226541	7,051931591
9 Hz	23,9383241	0,8389743	0,0111119	9,6977E-05	2,40314228	147,924498	0,02340702	1,00976523	839,153103	0,07172591	0,0678	41,0931	1633,2260	892,285696	0,594899465	5,423708042
10 Hz	25,0186524	0,93539821	0,01111251	9,6987E-05	2,67904361	155,45021	0,02241836	1,01024323	838,468174	0,06195029	0,0574	43,1861	1784,1629	1033,08641	0,688811017	7,328963424
11 Hz	25,3887313	1,02926779	0,01111272	9,6991E-05	2,94778181	171,389091	0,02207972	1,01041618	838,233544	0,05559203	0,0523	47,6150	1992,4300	1151,24413	0,767607153	5,92694405
12,5 Hz	25,916798	1,17020344	0,01111302	9,6996E-05	3,35123641	186,602831	0,02159654	1,01067172	837,89875	0,04800341	0,0441	51,8430	2211,1248	1333,23867	0,888978205	8,18652217
13,5 Hz	26,3996634	1,2648014	0,01111329	9,7001E-05	3,62196936	182,158706	0,02115476	1,01091492	837,592613	0,04363838	0,0368	50,6096	2199,5969	1466,59901	0,977924283	15,56324199
15 Hz	26,8546	1,40480862	0,01111354	9,7005E-05	4,02271778	216,766499	0,02073856	1,01115288	837,304184	0,03864551	0,0356	60,2261	2659,5596	1656,07838	1,104294088	7,986131088
16,5 Hz	27,8805061	1,54336328	0,01111412	9,7015E-05	4,41901415	241,73919	0,01980014	1,01117256	836,653759	0,03379787	0,0329	67,1680	3087,3345	1893,61022	1,262749003	2,688018392
17,0 Hz	28,1821979	1,602867	0,01111429	9,7018E-05	4,58924699	234,429959	0,01952421	1,01191017	836,462487	0,03215651	0,0296	65,1381	3032,6624	1990,26569	1,327223748	8,01294932
17,5 Hz	28,5816481	1,65535984	0,01111452	9,7022E-05	4,7393499	241,741935	0,0191589	1,01214338	836,209235	0,03063425	0,0286	67,1711	3178,9418	2089,16489	1,393203635	6,60731576
18 Hz	28,9415239	1,69122568	0,01111472	9,7026E-05	4,84185832	242,406648	0,01882981	1,01236913	835,981074	0,02953845	0,0275	67,3571	3236,8318	2166,66761	1,444914314	6,918196274
19 Hz	29,3024392	1,78250916	0,01111492	9,7029E-05	5,10300968	255,780003	0,01849979	1,01260299	835,752254	0,02761186	0,0261	71,0744	3466,8302	2317,84486	0,177912543	5,381266578
20 Hz	29,7152978	1,87168235	0,01111516	9,7033E-05	5,35807254	271,266065	0,016588	1,02418994	835,490501	0,02589546	0,0251	75,3791	3724,5437	2471,47582	0,179829522	2,913521836
22,5 Hz	25,1268414	2,09132572	0,01111257	9,6988E-05	5,98963231	337,881427	0,02080637	1,01912084	838,399583	0,02786941	0,0250	93,8683	3852,6521	2296,42503	1,5311151233	10,41613397
25 Hz	27,0236268	2,31913356	0,01111364	9,7007E-05	6,64080488	375,422945	0,01906127	1,02097419	837,197021	0,04576217	0,0226	104,3079	4585,3343	2728,1133	0,182790129	50,61086892
27,5 Hz	28,4947162	2,49211916	0,01111447	9,7021E-05	7,13508233	541,277678	0,01770902	1,02226334	836,26435	0,04384884	0,0283	150,4003	6951,7587	3103,97001	0,186778828	35,54758703
30 Hz	30,3815007	2,66544491	0,01111553	9,704E-05	7,62396452	577,545543	0,01612672	1,02480581	835,068129	0,04191102	0,0264	160,4931	7964,1522	3569,09986	0,191194786	36,98228125
32,5 Hz	32,2364522	2,82961014	0,01111658	9,7058E-05	8,09826636	663,509415	0,0151549	1,02597976	833,892089	0,04048546	0,0270	184,3988	9588,7048	3980,3617	0,194720129	33,37225275
35 Hz	34,1044029	2,96910917	0,01111763	9,7077E-05	8,49590005	703,941656	0,01417682	1,02730758	832,707809	0,0392311	0,0260	195,6541	10711,8438	4402,66726	0,198039057	33,6200507
37,5 Hz	36,2965478	3,10316545	0,01111886	9,7098E-05	8,87752026	779,361903	0,01302983	1,02909162	831,317989	0,03792389	0,0265	216,6405	12632,2886	4916,40106	0,201737979	30,24646818
40 Hz	30,2162606	3,23320912	0,01111544	9,7038E-05	9,25525065	889,350437	0,01621331	1,02470742	835,172891	0,03954844	0,0276	247,1380	12083,8953	4289,82917	0,197145086	30,12088417
42,5 Hz	38,9753391	3,30387306	0,01112037	9,7124E-05	9,44913823	924,317972	0,01162977	1,0316908	829,619635	0,03624868	0,0278	256,9690	16250,3973	5712,45605	0,206875569	23,43767176
45 Hz	42,2175043	3,42042305	0,0111222	9,7156E-05	9,77926037	961,898679	0,01041782	1,03374671	827,564102	0,03495404	0,0270	267,4607	18430,4342	6462,04812	0,211205435	22,65379252
47,5 Hz	44,9879301	3,52905343	0,01112376	9,7184E-05	10,0870119	1001,58617	0,0095724	1,03504904	825,807652	0,03394114	0,0265	278,5351	20544,8606	7151,27795	0,214833307	21,86607452
50 Hz	47,5469189	3,62388451	0,0111252	9,7209E-05	10,3553809	1042,50898	0,00879192	1,03645379	824,185253	0,0330181	0,0262	289,9531	22873,3622	7874,87107	0,218340615	20,51069798
52,5 Hz	50,3204795	3,73209828	0,01112677	9,7236E-05	10,6616104	1079,13303	0,0079111	1,03534838	822,426816	0,03173184	0,0257	300,1815	26473,2873	9069,72424	0,223573657	19,046471
55 Hz	54,0833333	3,83044232	0,01112889	9,7273E-05	10,9383845	1112,97673	0,00708543	1,03878334	820,041167	0,03084675	0,0252	309,6548	29326,2359	10046,6382	0,227461457	18,15045431
57,5 Hz																
60 Hz																



2º Ensaio de redução do arrasto com O01PIBIMMQ

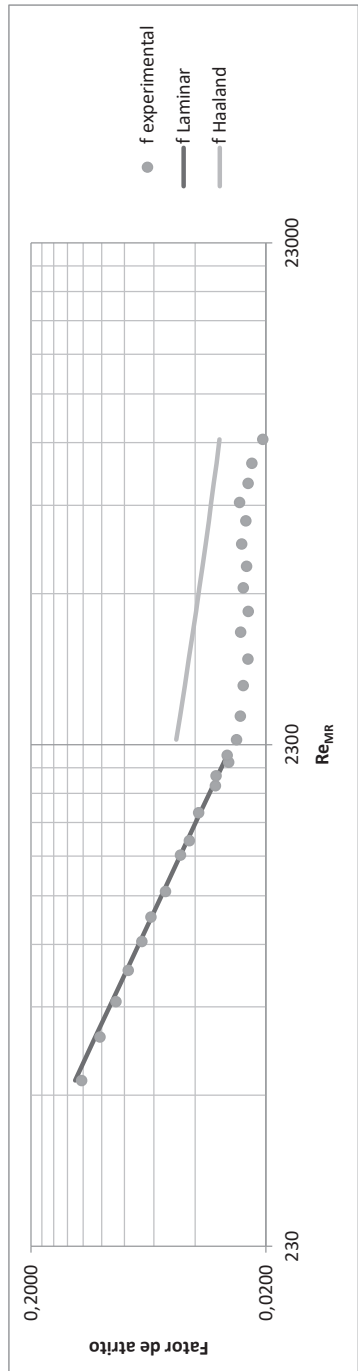
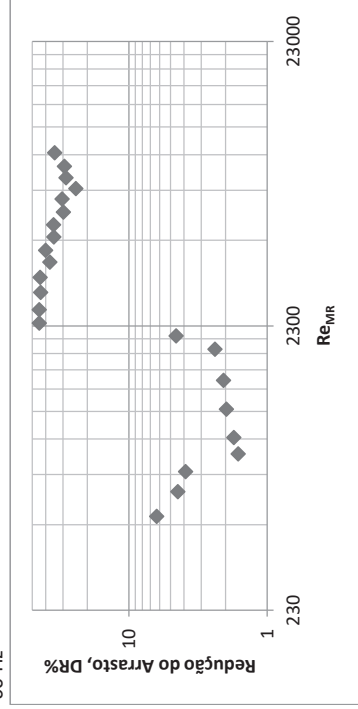
	T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>MIR</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
5 Hz	24,602341	0,45834	0,01111228	9,6983E-05	1,31277211	76,3346195	0,02065192	1,01917994	838,732116	0,12260462	0,1174	21,2063	901,2197	522,003154	0,348038586	4,270508057
6 Hz	24,7449446	0,557003	0,01111236	9,6984E-05	1,59533846	91,7266954	0,02051218	1,01938871	838,641705	0,10073519	0,0955	25,4825	1084,8636	635,329144	0,423600229	5,186849698
7 Hz	24,9402476	0,65256746	0,01111247	9,6986E-05	1,86901212	105,851389	0,02032081	1,01968112	838,517883	0,08562964	0,0803	29,4068	1257,4893	747,404715	0,498330584	6,205729334
8 Hz	25,1427114	0,74850691	0,01111258	9,6988E-05	2,14374734	121,755036	0,02012245	1,01998835	838,389521	0,07429896	0,0702	33,8253	1453,2853	861,384894	0,574332534	5,472953949
9 Hz	25,3971439	0,84176265	0,01111272	9,6991E-05	2,41077251	134,061213	0,01987321	1,02038205	838,228211	0,06560192	0,0612	37,2446	1612,2111	975,581275	0,650481913	6,768556488
10 Hz	25,5579099	0,93698948	0,01111281	9,6992E-05	2,68345436	149,829962	0,01971574	1,02063531	838,126285	0,05871188	0,0552	41,6258	1808,5629	1090,06908	0,726824117	6,021419687
11 Hz	25,8675092	1,0359206	0,01111299	9,6996E-05	2,96669117	160,454482	0,01941254	1,02113314	837,929999	0,05260346	0,0484	44,5782	1956,5058	1216,6501	0,811123713	8,072377485
12,5 Hz	26,298305	1,17376395	0,01111323	9,7E-05	3,361303	183,228172	0,01899074	1,02184889	837,656875	0,04579948	0,0430	50,9064	2264,2751	1397,39591	0,931775051	6,044844864
13,5 Hz	26,6984698	1,27019537	0,01111346	9,7004E-05	3,6373057	192,159315	0,01859905	1,02253904	837,40317	0,04175343	0,0386	53,3889	2408,4560	1532,80824	1,0220879	7,667572601
15 Hz	27,1630299	1,41636783	0,01111372	9,7008E-05	4,05569116	213,535611	0,01814446	1,02337266	837,108639	0,03686942	0,0345	59,3294	2718,0524	1735,85599	1,157508905	6,506407056
16,5 Hz	27,6397099	1,584855	0,01111399	9,7013E-05	4,53792554	226,227675	0,01767819	1,02426655	836,806424	0,0324263	0,0292	62,8573	2929,4823	1973,70648	1,316144914	10,00705234
17,0 Hz	28,3260077	1,60463781	0,01111437	9,702E-05	4,5942501	233,484113	0,01700718	1,0256276	836,371311	0,03116855	0,0294	64,8757	3104,2701	2053,35191	1,369303249	5,674883439
17,5 Hz	28,7206704	1,6503182	0,0111146	9,7024E-05	4,7248489	232,72554	0,01662149	1,02645301	836,121095	0,02984275	0,0277	64,6663	3144,0443	2144,57464	1,430164871	7,128193478
18 Hz	29,2270772	1,69571429	0,01111488	9,7029E-05	4,85456835	244,356721	0,01612681	1,02756159	835,800033	0,02845955	0,0276	67,8999	3365,9527	2248,80602	1,499712754	3,099164738
19 Hz	30,3565774	1,76553242	0,01111552	9,704E-05	5,05386815	330,982628	0,01520767	1,02944179	835,083393	0,04751191	0,0345	91,9761	4714,7528	2441,14279	0,179465612	27,3920071
20 Hz	30,9734401	1,83461367	0,01111587	9,7046E-05	5,25128611	406,382823	0,01492292	1,02956885	834,692839	0,04663938	0,0393	112,9324	5855,4784	2578,24329	0,181113132	15,841528
22,5 Hz	31,9195153	2,03540601	0,0111164	9,7055E-05	5,82546314	514,52224	0,01612421	1,01173123	834,093027	0,04411806	0,0404	142,9909	7980,9353	3046,56293	0,186230928	8,397690748
25 Hz	32,9584138	2,22651888	0,01111698	9,7065E-05	6,37176946	587,761301	0,01551975	1,01267504	833,434366	0,04245226	0,0386	163,3533	9373,4449	3429,28895	0,189950451	9,024260939
27,5 Hz	34,4478454	2,40687284	0,01111782	9,708E-05	6,88686004	652,932373	0,0146535	1,01414932	832,490066	0,04084526	0,0368	181,4797	10858,8280	3870,2101	0,19383321	9,976753022
30 Hz	35,8620934	2,5737256	0,01111862	9,7094E-05	7,36322557	719,665168	0,01383141	1,01570081	831,593433	0,03946476	0,0355	200,0421	12472,2635	4319,16799	0,197425647	10,05964555
32,5 Hz	24,9586191	2,76235564	0,01111248	9,6987E-05	7,91162115	843,207648	0,02100178	1,01327445	838,506235	0,04368404	0,0357	234,2531	9872,0120	3139,91056	0,187104006	18,26362387
35 Hz	28,7928299	2,87369518	0,01111464	9,7024E-05	8,22730806	905,835577	0,01814223	1,01101489	836,075346	0,04094596	0,0356	251,7008	12504,4728	3840,18647	0,193526306	13,10342898
37,5 Hz	32,3140738	2,99668888	0,01111662	9,7059E-05	8,57637364	914,316678	0,01589463	1,01208207	833,842877	0,03892762	0,0331	254,1028	14242,1422	4514,69065	0,198852078	14,85680733
40 Hz	35,4205456	3,1127094	0,01111837	9,7089E-05	8,90561412	965,382776	0,01408803	1,01519911	831,873374	0,03742219	0,0325	268,3371	16434,4328	5136,9656	0,20320994	13,05261299
42,5 Hz	38,4042515	3,24884876	0,01112005	9,7119E-05	9,29230542	983,572356	0,01235494	1,01894466	829,981705	0,03589767	0,0305	273,4344	18375,0306	5902,75057	0,208002506	14,97210486
45 Hz	41,2561103	3,35436634	0,01112166	9,7147E-05	9,59133321	1028,06089	0,01106522	1,02133573	828,173626	0,03466741	0,0300	285,8436	20892,8725	6647,05047	0,212191055	13,41999272
47,5 Hz	43,9667141	3,46783316	0,01112319	9,7174E-05	9,91305282	1052,43838	0,01027948	1,02130045	826,455103	0,03363821	0,0288	292,6617	22987,5674	7377,87697	0,215941994	14,29840065
50 Hz	46,8615982	3,57335922	0,01112482	9,7202E-05	10,2117118	1093,78548	0,00943966	1,02126857	824,619747	0,03257893	0,0283	304,2041	25961,0443	8256,22956	0,220060709	13,13047791
52,5 Hz	51,124842	3,67539291	0,01112722	9,7244E-05	10,498763	1121,78885	0,00754306	1,03549029	821,91685	0,0314598	0,0276	312,0598	28738,1038	9355,1156	0,224740236	12,40736399
55 Hz	52,890973	3,78433431	0,01112821	9,7261E-05	10,8080211	1149,20752	0,00726608	1,03482166	820,797123	0,03085821	0,0267	319,7157	30705,1781	10033,0613	0,22739647	13,55199499
57,5 Hz	54,6298262	3,87552189	0,01112919	9,7279E-05	11,0665034	1185,46542	0,00699273	1,03412708	819,69469	0,03030664	0,0263	329,8319	33068,2757	10717,2373	0,229930639	13,269498
60 Hz	57,275773	3,95366581	0,01113068	9,7305E-05	11,2866185	1207,21347	0,0065754	1,03299455	818,01716	0,02958915	0,0258	335,9278	36135,6954	11709,6071	0,233380695	12,84076998





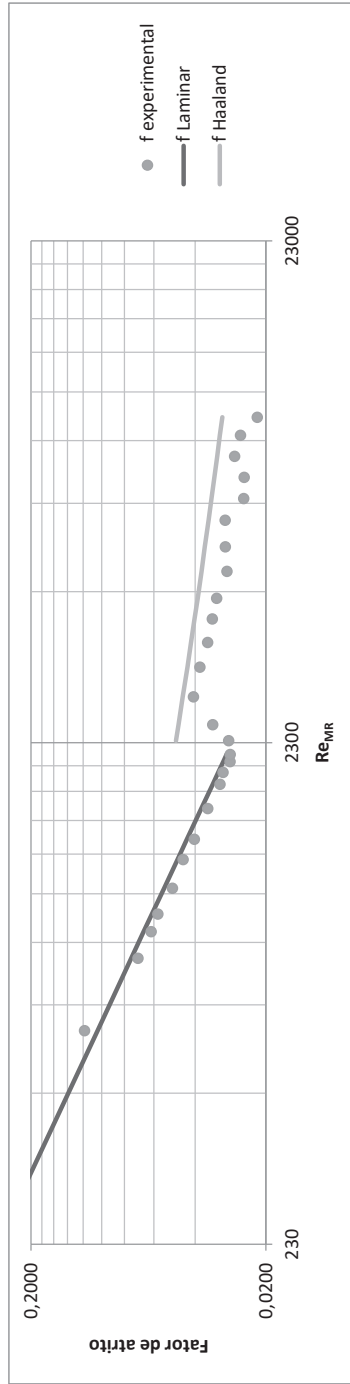
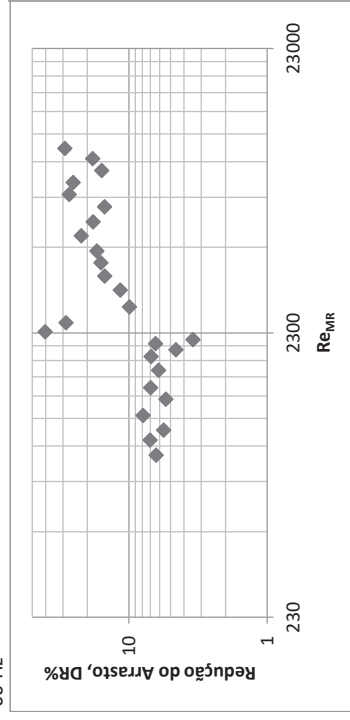
1º Ensaio de redução do arrasto com O005 PIB4MMQ

	T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>MIR</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
5 Hz	23,9464372	0,454116	0,01111191	9,6977E-05	1,30076029	77,8409744	0,0240455	1,00372805	839,147959	0,13003564	0,1218	21,6240	876,8627	492,172778	0,328138671	6,301774608
6 Hz	24,0726891	0,552411	0,01111198	9,6978E-05	1,58229416	96,1916836	0,02392647	1,0037605	839,067915	0,10648016	0,1018	26,7220	1087,8556	601,05091	0,400731853	4,430657671
7 Hz	24,2689341	0,64550553	0,01111209	9,698E-05	1,84891196	112,261911	0,02374145	1,00381156	838,943496	0,09051835	0,0870	31,1866	1278,2619	707,038942	0,471400741	3,892718789
8 Hz	24,4850706	0,73953643	0,01111221	9,6982E-05	2,11819687	130,640953	0,02353767	1,0038687	838,806465	0,07841692	0,0771	36,2927	1498,8914	816,150398	0,544154072	1,620280031
9 Hz	24,8154225	0,83426713	0,0111124	9,6985E-05	2,3894466	145,3965	0,02322622	1,0039579	838,597022	0,06868727	0,0675	40,3926	1688,6859	931,759266	0,621244677	1,742110584
10 Hz	25,0447839	0,92565679	0,01111253	9,6987E-05	2,6511365	163,705196	0,02300998	1,00402121	838,451607	0,06139442	0,0617	45,4795	1917,3379	1042,44005	0,695048484	-0,562059279
11 Hz	25,4185735	1,02640676	0,01111274	9,6991E-05	2,93957902	174,435692	0,02265757	1,00412688	838,214624	0,05460191	0,0535	48,4614	2072,5079	1172,12013	0,781527678	1,971360362
12,5 Hz	26,4416642	1,16576607	0,01111331	9,7001E-05	3,38335099	194,076503	0,02169304	1,00443307	837,565985	0,04619675	0,0462	53,9208	2401,3218	1385,37886	0,923768868	-0,035011944
13,5 Hz	26,1476935	1,26054845	0,01111315	9,6998E-05	3,60988256	208,008412	0,02197018	1,00434243	837,752362	0,04324385	0,0423	57,7907	2542,3617	1479,97919	0,986833543	2,068644892
15 Hz	26,6649533	1,40442755	0,01111344	9,7003E-05	4,0217039	235,633172	0,02148253	1,00450342	837,42442	0,03803306	0,0387	65,4674	2939,8158	1682,74633	1,122065826	-1,668807886
16,5 Hz	27,1198985	1,555702	0,01111374	9,7009E-05	4,45465022	245,141036	0,02097822	1,0046775	837,085267	0,03360443	0,0328	68,1108	3126,7936	1904,51088	1,269974259	2,385847045
17,0 Hz	27,7459098	1,59152591	0,01111405	9,7014E-05	4,55697733	254,810244	0,02046349	1,0048637	836,739093	0,03210645	0,0326	70,7993	3325,9823	1993,36886	1,329263716	-1,527339894
17,5 Hz	28,2320163	1,65890172	0,01111432	9,7019E-05	4,74965877	244,446702	0,02000524	1,00503723	836,430902	0,03017185	0,0288	67,9215	3259,6189	2121,18273	1,414530338	4,557824254
18 Hz	28,6951307	1,67836937	0,01111458	9,7023E-05	4,80517164	253,815451	0,01956867	1,00520982	836,137287	0,02922353	0,0292	70,5263	3454,2656	2190,01609	1,460466788	-0,003019038
19 Hz	29,1333919	1,76840838	0,01111483	9,7028E-05	5,06272839	256,962312	0,01915554	1,00538011	835,85943	0,04811577	0,0267	71,4023	3567,0243	2352,60591	0,178352958	44,58692609
20 Hz	29,6411034	1,86053622	0,01111511	9,7033E-05	5,32620456	273,875811	0,01688934	1,01384028	835,53754	0,04637693	0,0257	76,1040	4017,1288	2621,75678	0,181606768	44,61476878
22,5 Hz	30,3009561	2,09068416	0,01111549	9,7039E-05	5,98465459	335,996322	0,01643515	1,01402112	835,119194	0,04426181	0,0250	93,3691	5040,9898	3016,55783	0,185908722	43,57946757
25 Hz	31,1288797	2,31017426	0,01111595	9,7047E-05	6,6123975	391,353124	0,01600617	1,01434513	834,59429	0,04254387	0,0238	108,7566	5997,5320	3406,4314	0,189721254	43,95779502
27,5 Hz	32,7349533	2,49819134	0,01111686	9,7063E-05	7,1493936	490,78565	0,01517405	1,01502304	833,57604	0,04089767	0,0256	136,3999	7855,8778	3854,54316	0,193685399	37,37874754
30 Hz	33,5370428	2,68543614	0,01111731	9,7071E-05	7,68463121	525,885846	0,01475851	1,01538862	833,067515	0,03969326	0,0238	146,1609	8614,5156	4239,73928	0,196792666	40,12050384
32,5 Hz	35,0775658	2,85528551	0,01111818	9,7086E-05	8,16939573	623,294773	0,01396048	1,01614821	832,090823	0,03838707	0,0250	173,2476	10683,4215	4724,80816	0,20039351	34,9838043
35 Hz	36,6103383	2,99961819	0,01111904	9,7101E-05	8,58101989	664,882352	0,01316655	1,01698971	831,119046	0,03725236	0,0242	184,8214	11967,2964	5214,89183	0,203732777	35,144443414
37,5 Hz	38,2350958	3,14403652	0,01111996	9,7117E-05	8,99267726	765,144636	0,01232511	1,01799233	830,088949	0,03612738	0,0253	212,7094	14524,7898	5777,19843	0,207256736	29,83226537
40 Hz	40,1053846	3,27092298	0,01112101	9,7136E-05	9,35382928	793,525016	0,01137702	1,01928752	828,903186	0,03501277	0,0243	220,6200	16087,3237	6425,05377	0,210980857	30,49345822
42,5 Hz	42,1103204	3,39268291	0,01112214	9,7155E-05	9,70005446	906,041909	0,01072567	1,02030224	827,632057	0,03416358	0,0259	251,9281	19225,6050	6991,17411	0,213992912	24,24390835
45 Hz	44,2934345	3,504086	0,01112337	9,7177E-05	10,0163527	886,929112	0,01001664	1,02154467	826,247963	0,03331543	0,0238	246,6410	19894,2920	7630,79371	0,21716209	28,55361552
47,5 Hz	46,7037517	3,60018336	0,01112473	9,7201E-05	10,2885326	900,058838	0,00923413	1,02311821	824,719821	0,03245563	0,0229	250,3227	21524,5699	8368,01335	0,220552747	29,32157241
50 Hz	49,1552746	3,69715185	0,01112611	9,7225E-05	10,5630241	850,811176	0,00817612	1,0272322	823,165556	0,0314736	0,0206	236,6555	22044,0725	9340,33653	0,224658617	34,50678167



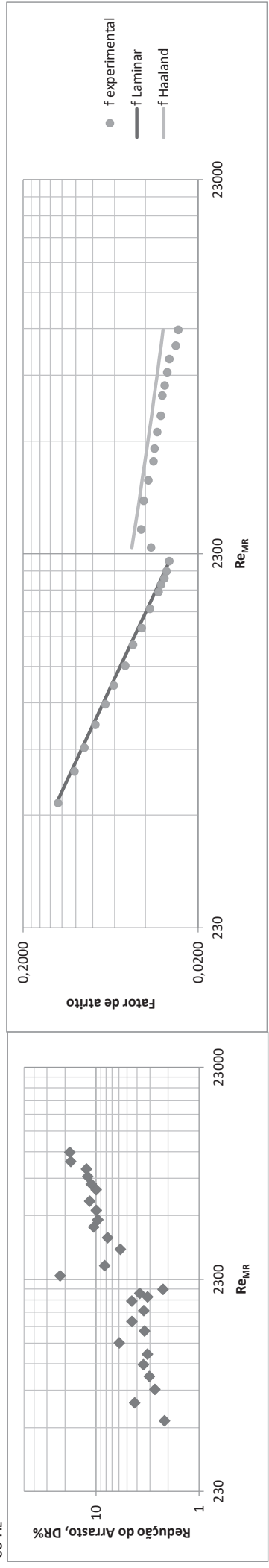
2º Ensaio de redução do arrasto com O005 PIB4MMQ

	T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>M/R</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
5 Hz	23,3109035	0,183796	0,01111155	9,697E-05	0,52649532	76,6570532	0,02174218	1,0136441	839,550887	0,30617325	0,7320	21,2945	892,6966	209,031975	0,139360134	-139,0855878
6 Hz	23,3468977	0,316414	0,01111157	9,6971E-05	0,90638469	93,4857208	0,02171216	1,01365378	839,528067	0,17893906	0,3012	25,9693	1087,1782	357,663673	0,238452267	-68,33916307
7 Hz	23,4519739	0,54437	0,01111163	9,6972E-05	1,55936013	108,78054	0,02162451	1,01368217	839,461449	0,10438727	0,1184	30,2182	1267,2685	613,101607	0,408753413	-13,45346513
8 Hz	23,5870231	0,7587376	0,0111117	9,6973E-05	2,17339119	125,083395	0,02151186	1,01371899	839,375827	0,07487133	0,0701	34,7472	1461,5851	854,799858	0,569896976	6,359759815
9 Hz	23,7729825	0,85290113	0,01111181	9,6975E-05	2,44307498	138,855503	0,02135675	1,01377029	839,257929	0,06626566	0,0616	38,5734	1631,2306	965,809505	0,643913427	7,034822446
10 Hz	23,2283363	0,94423217	0,0111115	9,697E-05	2,704833568	159,467539	0,02181105	1,013622	839,603235	0,06112183	0,0577	44,2981	1833,3963	1047,08903	0,698083898	5,610690065
11 Hz	23,6276588	1,04948233	0,01111173	9,6973E-05	3,00621222	170,653147	0,02147797	1,01373014	839,350064	0,05429129	0,0500	47,4063	1988,6258	1178,82639	0,785927807	7,909818732
12,5 Hz	24,0595102	1,18034709	0,01111197	9,6978E-05	3,38092255	194,310646	0,02111776	1,01385076	839,076271	0,04759891	0,0450	53,9794	2296,2917	1344,56867	0,896444814	5,409224184
13,5 Hz	24,487334	1,27690739	0,01111221	9,6982E-05	3,65734599	203,64183	0,02076092	1,01397421	838,80503	0,0433588	0,0403	56,5728	2443,5214	1476,05573	0,984134579	6,969119244
15 Hz	25,1812382	1,43465071	0,0111126	9,6989E-05	4,10886873	225,185026	0,02018215	1,0141833	838,365095	0,03765857	0,0354	62,5598	2770,1404	1699,48058	1,133139086	6,104716237
16,5 Hz	25,7479771	1,57117623	0,01111292	9,6994E-05	4,49962199	239,37192	0,01970947	1,01436277	838,005783	0,0336869	0,0314	66,5030	3007,5292	1899,84856	1,266772062	6,916785038
17,0 Hz	26,3205871	1,62305949	0,01111324	9,7E-05	4,6479383	247,816071	0,01923319	1,01455264	837,642748	0,03189703	0,0304	68,8510	3183,5488	2006,45665	1,337894543	4,573151948
17,5 Hz	26,7085125	1,67964108	0,01111346	9,7004E-05	4,80978122	247,613805	0,01890837	1,01468646	837,396803	0,03036068	0,0284	68,7962	3231,2447	2107,98989	1,405624005	6,424782195
18 Hz	27,1141295	1,70751728	0,01111369	9,7008E-05	4,88940577	255,439107	0,0185701	1,01483114	837,139642	0,02938104	0,0284	70,9718	3387,8078	2178,27569	1,452520989	3,439722491
19 Hz	27,5520817	1,7875167	0,01111394	9,7012E-05	5,11825356	284,085416	0,01820487	1,01499309	836,86198	0,04834199	0,0288	78,9327	3831,2806	2320,68612	0,177933085	40,41664195
20 Hz	28,2915981	1,86465157	0,01111435	9,7019E-05	5,33871602	361,166282	0,01731251	1,01722622	836,393127	0,04714486	0,0337	100,3533	5005,4590	2497,44456	0,180130075	28,56632062
22,5 Hz	28,9684248	2,06100558	0,01111474	9,7026E-05	5,90049567	532,637705	0,01671941	1,01782535	835,964019	0,04516337	0,0407	148,0032	7549,6122	2838,06279	0,184015958	9,92379091
25 Hz	29,876004	2,2711892	0,01111525	9,7035E-05	6,50163648	606,719145	0,01592425	1,01869335	835,388613	0,04318609	0,0382	168,5958	8931,6516	3252,35175	0,18825133	11,55790138
27,5 Hz	30,975462	2,464449	0,01111587	9,7046E-05	7,05408683	661,37801	0,01535306	1,01898985	834,691557	0,04163885	0,0354	183,7947	10049,3555	3642,61558	0,191851365	14,98085472
30 Hz	32,2870842	2,64615601	0,01111661	9,7059E-05	7,57318681	727,37932	0,0147311	1,01923701	833,859989	0,04024016	0,0338	202,1497	11464,3177	4058,12351	0,195349551	15,96640517
32,5 Hz	33,721992	2,78772071	0,01111741	9,7073E-05	7,97717871	772,395161	0,01405068	1,01953185	832,950257	0,03907031	0,0324	214,6759	12703,6568	4461,50808	0,19847439	17,07055191
35 Hz	35,6649913	2,96727085	0,01111851	9,7092E-05	8,48929701	789,500245	0,01312931	1,01997852	831,718396	0,03761885	0,0293	219,4516	13815,8767	5048,8251	0,202627135	22,14194291
37,5 Hz	37,8594853	3,08054481	0,01111975	9,7113E-05	8,81141155	862,658623	0,01208865	1,02056255	830,327086	0,03636705	0,0298	239,8136	16252,0795	5650,28328	0,206486919	18,16943874
40 Hz	40,1305267	3,20475491	0,01112102	9,7136E-05	9,1645857	933,106965	0,01103322	1,02128467	828,887246	0,03507882	0,0298	259,4276	19063,8707	6383,81693	0,210754836	15,0154178
42,5 Hz	42,6627139	3,32828293	0,01112245	9,7161E-05	9,51539529	836,817334	0,01025037	1,02233176	827,281839	0,03407798	0,0249	232,6865	18233,8598	7052,17532	0,214308981	27,0743653
45 Hz	45,2393762	3,42913129	0,0111239	9,7186E-05	9,80115706	881,944279	0,00945386	1,02356468	825,648236	0,03314018	0,0247	245,2666	20530,9398	7773,32838	0,217843382	25,35104063
47,5 Hz	47,6966834	3,52347611	0,01112529	9,721E-05	10,0683075	1020,04739	0,00869433	1,02493755	824,090303	0,03224934	0,0272	283,7080	25340,5032	8559,9259	0,221398963	15,75327329
50 Hz	49,8833278	3,63241806	0,01112652	9,7232E-05	10,37731	1020,98801	0,00801855	1,02636305	822,70397	0,03139332	0,0256	284,0011	27062,8345	9426,79861	0,225012188	18,31174703
52,5 Hz	51,9809645	3,75609381	0,0111277	9,7253E-05	10,7283551	924,181999	0,00748862	1,02826266	821,374069	0,03068603	0,0218	257,1005	25765,1999	10239,8532	0,228160479	29,10020686
55 Hz																
57,5 Hz																
60 Hz																



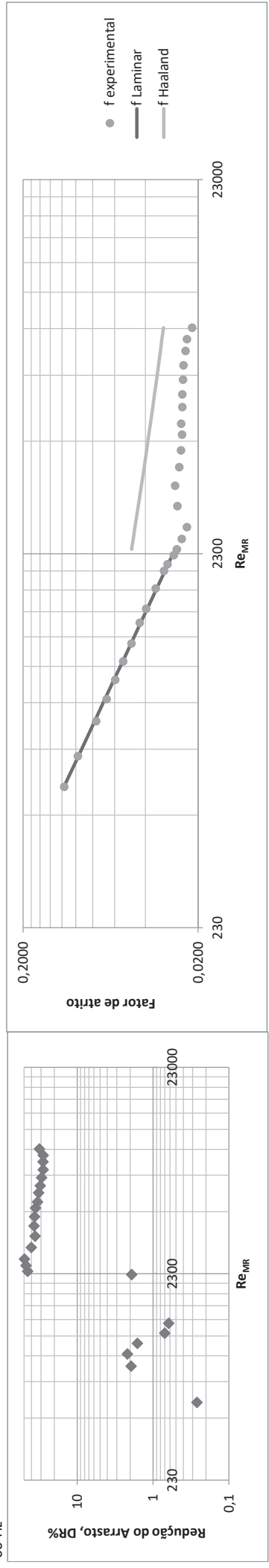
3º Ensaio de redução do arrasto com O005 PIB4MMQ

	T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>M/R</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
5 Hz	22,0296602	0,460226	0,01111083	9,6958E-05	1,31851792	83,0565619	0,02259477	1,01433529	840,363195	0,12912537	0,1263	23,0707	925,8197	495,642328	0,330419754	2,163788033
6 Hz	22,0634747	0,559768	0,01111085	9,6958E-05	1,60369385	99,0565938	0,02256678	1,01434237	840,341757	0,10633792	0,1019	27,5151	1102,7186	601,854933	0,401227032	4,220299738
7 Hz	22,173046	0,6469293	0,01111091	9,6959E-05	1,85338392	116,105041	0,0224761	1,01436542	840,272289	0,09185437	0,0894	32,2508	1294,5321	696,755067	0,464494857	2,684967362
8 Hz	22,3277267	0,74232339	0,01111099	9,6961E-05	2,12664454	132,27277	0,02234808	1,01439828	840,174221	0,07978036	0,0774	36,7421	1480,0507	802,20247	0,534796031	3,038743921
9 Hz	22,5448036	0,83808583	0,01111112	9,6963E-05	2,40093663	147,776173	0,02216843	1,01444501	840,036594	0,07025478	0,0678	41,0490	1663,5634	910,970096	0,607313705	3,471253004
10 Hz	22,7878321	0,93346011	0,01111125	9,6965E-05	2,67409762	163,911901	0,02196729	1,01449821	839,882514	0,06263832	0,0606	45,5317	1858,4051	1021,73881	0,681167946	3,174353627
11 Hz	23,1054247	1,04418897	0,01111143	9,6968E-05	2,99120795	176,324087	0,02170444	1,01456918	839,681161	0,0554593	0,0522	48,9803	2019,8415	1153,9994	0,769355193	5,956305419
12,5 Hz	23,4465485	1,17526475	0,01111162	9,6972E-05	3,36657421	201,680724	0,02142212	1,01464729	839,464888	0,048759	0,0471	56,0250	2334,4505	1312,57821	0,875092597	3,386402542
13,5 Hz	24,1497714	1,27141237	0,01111202	9,6979E-05	3,64173169	210,307194	0,02084012	1,01481482	839,019045	0,04397866	0,0420	58,4234	2496,6386	1455,25116	0,970246887	4,490307383
15 Hz	24,4135738	1,41973051	0,01111217	9,6981E-05	4,0664535	235,416762	0,0206218	1,01488003	838,851794	0,03906337	0,0377	65,3998	2817,8308	1638,36335	1,092346284	3,4443919079
16,5 Hz	24,7714542	1,55606115	0,01111237	9,6985E-05	4,45677586	252,047985	0,02032561	1,01497068	838,624898	0,03521207	0,0336	70,0213	3055,0153	1817,55845	1,211843054	4,496554422
17,0 Hz	25,1479175	1,60555523	0,01111258	9,6988E-05	4,59835826	259,955492	0,02001404	1,01506885	838,38622	0,03365536	0,0326	72,2194	3195,2901	1901,62891	1,267920587	3,163277709
17,5 Hz	25,4987315	1,64656325	0,01111278	9,6992E-05	4,71563871	261,362114	0,0197237	1,01516303	838,163804	0,03238655	0,0312	72,6115	3256,5138	1976,12917	1,317617438	3,767717
18 Hz	25,8677199	1,69587438	0,01111299	9,6996E-05	4,85668055	269,557689	0,01941833	1,01526505	837,929866	0,03100604	0,0303	74,8898	3406,3578	2064,11371	1,376308363	2,235879795
19 Hz	26,2443153	1,77994436	0,0111132	9,6999E-05	5,09724727	286,122338	0,01910665	1,01537243	837,691104	0,02912258	0,0292	79,4934	3667,3606	2197,6072	1,465347037	-0,33113392
20 Hz	27,0883333	1,86741083	0,01111368	9,7008E-05	5,34726839	400,084395	0,01841134	1,01532017	837,155997	0,04785469	0,0372	111,1602	5294,3715	2390,27992	0,178807291	22,36732725
22,5 Hz	27,6275954	2,04270006	0,01111398	9,7013E-05	5,84888345	544,551246	0,01796143	1,01552366	836,814105	0,04608832	0,0423	151,3033	7336,7013	2670,89701	0,182151112	8,257075244
25 Hz	29,6596422	2,23002733	0,01111513	9,7033E-05	6,38394418	627,175196	0,01626618	1,01638641	835,525787	0,04347013	0,0409	174,2783	9225,4107	3187,49125	0,187618303	5,810120958
27,5 Hz	31,2248666	2,40908513	0,01111601	9,7048E-05	6,89544238	687,455199	0,01534597	1,01728761	834,533435	0,04174494	0,0385	191,0439	10605,8846	3613,69542	0,191599079	7,731946519
30 Hz	32,5921954	2,60894979	0,01111678	9,7062E-05	7,46647325	752,191586	0,0146358	1,01818338	833,666548	0,04022577	0,0360	209,0487	12040,1298	4062,75632	0,195389723	10,54396472
32,5 Hz	33,8461897	2,72155357	0,01111748	9,7074E-05	7,78774065	806,003757	0,01398465	1,01907833	832,871516	0,03925377	0,0355	224,0183	13363,3847	4394,46213	0,197974905	9,616079256
35 Hz	35,4277754	2,87191376	0,01111838	9,709E-05	8,21668	865,343002	0,01316361	1,02032246	831,86879	0,03804833	0,0343	240,5302	15028,2897	4863,83018	0,201367972	9,951508759
37,5 Hz	37,2140188	2,99924153	0,01111938	9,7107E-05	8,57941752	897,731914	0,01232668	1,02190998	830,736312	0,03690719	0,0326	249,5556	16485,6852	5378,66188	0,204791697	11,53579918
40 Hz	39,5925	3,12722758	0,01112072	9,7131E-05	8,94336959	954,871429	0,01100313	1,02439762	829,228355	0,03556994	0,0310	265,4715	18972,5466	6088,79939	0,209093686	9,978082793
42,5 Hz	40,4987114	3,24151397	0,01112123	9,7139E-05	9,26933592	993,460332	0,0106413	1,02506801	828,653817	0,03492862	0,0300	276,2126	20244,0978	6478,15601	0,211274693	11,14548475
45 Hz	42,2558319	3,36932246	0,01112222	9,7157E-05	9,63312236	1035,74325	0,01011073	1,02579113	827,539803	0,03411435	0,0300	287,9942	22008,9746	7026,16409	0,214172621	12,05451969
47,5 Hz	44,374505	3,46298267	0,01112342	9,7178E-05	9,89877841	1062,27841	0,009471	1,02676598	826,196564	0,03332114	0,0292	295,4041	23816,0381	7626,2103	0,217141236	12,39275058
50 Hz	46,3127736	3,56388302	0,01112451	9,7197E-05	10,1851975	1031,63686	0,00888575	1,02777431	824,967702	0,03255998	0,0268	286,9113	24389,4508	8273,272	0,220130234	17,6283596
52,5 Hz	48,4390928	3,67120808	0,01112571	9,7218E-05	10,4896618	1057,47375	0,00827042	1,02782679	823,619615	0,0316744	0,0260	294,1285	26779,2400	9128,94732	0,22379499	18,02732235
55 Hz																
57,5 Hz																
60 Hz																



1º Ensaio de redução do arrasto com O01PIB4MMQ

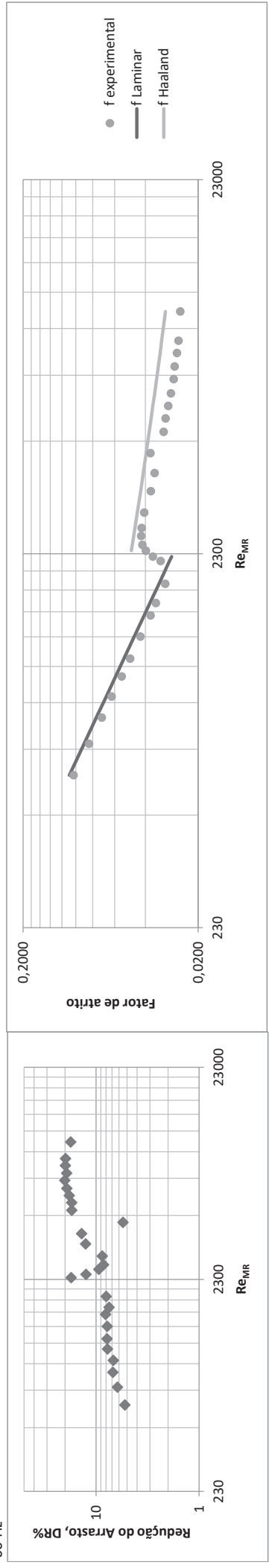
	T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>M/R</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
5 Hz	26,08031	0,470283	0,01111311	9,6998E-05	1,34677727	79,7078927	0,021113021	1,01215168	837,795083	0,11689205	0,1166	22,1451	964,0755	547,513715	0,365074764	0,263861236
6 Hz	26,3315842	0,564391	0,01111325	9,7E-05	1,61623874	95,8233774	0,02090685	1,0124318	837,635776	0,09678939	0,0973	26,6227	1166,3735	661,229479	0,440904519	-0,565392601
7 Hz	27,9278175	0,66365009	0,01111415	9,7016E-05	1,90017807	103,956178	0,01948915	1,01433782	836,623764	0,07801463	0,0765	28,8846	1336,7586	820,358904	0,547055492	1,946825641
8 Hz	27,9868865	0,75982583	0,01111418	9,7016E-05	2,17553763	118,711693	0,01943673	1,01441285	836,586314	0,06812813	0,0666	32,9846	1526,8637	939,406447	0,6264441	2,179328511
9 Hz	28,1447792	0,85234245	0,01111427	9,7018E-05	2,44039268	133,389245	0,01929662	1,01461512	836,48621	0,06049136	0,0595	37,0631	1722,5173	1058,00236	0,705535549	1,607889885
10 Hz	28,3573243	0,949085	0,01111439	9,702E-05	2,71732349	148,961245	0,01910807	1,01489134	836,351456	0,05399975	0,0536	41,3903	1935,2556	1185,24016	0,790393933	0,701231245
11 Hz	28,6000174	1,05211453	0,01111453	9,7022E-05	3,01223303	164,035262	0,01889282	1,01521242	836,197589	0,04835967	0,0481	45,5794	2146,7775	1323,4168	0,882549202	0,622315689
12,5 Hz	28,8956087	1,18446656	0,01111469	9,7025E-05	3,39163153	186,555789	0,01863073	1,01561119	836,010184	0,04256774	0,0431	51,8378	2463,0271	1503,48594	1,002647239	-1,304040494
13,5 Hz	29,2145886	1,2779654	0,01111487	9,7028E-05	3,65862237	199,396748	0,018348	1,01605372	835,807951	0,0390486	0,0396	55,4067	2660,6636	1638,98309	1,093025484	-1,462476937
15 Hz	29,6044255	1,42945756	0,01111509	9,7032E-05	4,09215988	219,988094	0,01800263	1,01660944	835,560794	0,03447349	0,0350	61,1297	2973,2272	1856,49877	1,23810952	-1,385015493
16,5 Hz	30,097401	1,56752573	0,01111537	9,7037E-05	4,48718836	237,04429	0,01759324	1,01723052	835,248248	0,03093154	0,0313	65,8703	3256,9893	2069,08558	1,37991934	-1,301093284
17,0 Hz	30,5873725	1,60951106	0,01111565	9,7042E-05	4,60714643	238,377043	0,01729384	1,01744493	834,937606	0,02968718	0,0299	66,2429	3325,1405	2155,81286	1,437795408	-0,726150986
17,5 Hz	31,3114563	1,66437566	0,01111606	9,7049E-05	4,76384399	234,615999	0,01685141	1,0177492	834,478537	0,02807985	0,0275	65,2001	3349,3172	2279,21457	1,520152593	1,912571771
18 Hz	31,6927924	1,70558512	0,01111627	9,7053E-05	4,88160669	236,514072	0,01661842	1,01795536	834,23677	0,04804131	0,0265	65,7289	3417,5692	2363,25828	0,178510455	44,94251756
19 Hz	32,2246292	1,7885084	0,01111657	9,7058E-05	5,11866796	243,638041	0,01629348	1,01821511	833,899585	0,04700683	0,0248	67,7105	3580,1998	2519,12485	0,18042572	47,25791359
20 Hz	32,7524476	1,880875	0,01111687	9,7063E-05	5,38273094	251,744109	0,01438843	1,03079951	833,564948	0,04587186	0,0232	69,9651	3773,1789	2708,6666	0,182625342	49,47799284
22,5 Hz	33,4464896	2,10728365	0,01111726	9,707E-05	6,03024815	357,917731	0,01401378	1,03159357	833,124926	0,04394504	0,0263	99,4766	5410,2832	3083,27272	0,186617506	40,22486557
25 Hz	34,8337584	2,30243204	0,01111804	9,7084E-05	6,58776266	439,629065	0,01326574	1,03329161	832,245397	0,04219092	0,0271	122,1953	6864,3080	3495,76415	0,190577347	35,84975433
27,5 Hz	35,7644088	2,51848116	0,01111856	9,7093E-05	7,20524693	497,629125	0,0127646	1,0345222	831,655365	0,04068455	0,0256	138,3230	7947,7162	3918,84793	0,19425005	37,00387788
30 Hz	36,9299062	2,70202414	0,01111922	9,7104E-05	7,72944106	558,955226	0,01213787	1,03617997	830,916439	0,03938915	0,0250	155,3787	9201,0535	4345,93289	0,197639716	36,43013971
32,5 Hz	38,1874102	2,86716298	0,01111993	9,7117E-05	8,20079404	620,104424	0,01146286	1,03813252	830,119182	0,03823081	0,0247	172,3879	10562,7530	4788,20721	0,200870832	35,38533533
35 Hz	38,6270881	3,0287722	0,01112018	9,7121E-05	8,66265041	699,529783	0,01122717	1,03885978	829,840426	0,03745973	0,0250	194,4724	12023,6988	5119,96719	0,203130714	33,30595048
37,5 Hz	40,5618852	3,17116045	0,01112127	9,714E-05	9,06811984	754,215965	0,01031585	1,0417556	828,613765	0,03632389	0,0246	209,6959	13658,6733	5672,83689	0,206652351	32,22009554
40 Hz	42,5097086	3,28298302	0,01112237	9,7159E-05	9,3860306	806,393408	0,00970367	1,04346052	827,378845	0,03549199	0,0246	224,2250	15205,3496	6134,29037	0,209384185	30,6613542
42,5 Hz	44,7080427	3,41276548	0,0111236	9,7181E-05	9,75490527	861,547775	0,00901389	1,04561588	825,985101	0,03456453	0,0244	239,5879	17042,2733	6715,31546	0,212589878	29,44855757
45 Hz	46,9397332	3,52512561	0,01112486	9,7203E-05	10,0737933	911,677756	0,00831512	1,0481043	824,570209	0,0336941	0,0242	253,5572	18984,4640	7335,30211	0,215766294	28,05536869
47,5 Hz	48,8490423	3,66350624	0,01112594	9,7222E-05	10,4672209	956,356473	0,00771867	1,05052363	823,359707	0,03285389	0,0236	266,0090	20851,4062	8014,46575	0,218995415	28,19624065
50 Hz	50,9757041	3,73788272	0,01112713	9,7243E-05	10,6774265	975,190873	0,00714874	1,05298941	822,011404	0,03218802	0,0232	271,2770	22322,6727	8618,17276	0,221686149	28,05548738
52,5 Hz	53,0723085	3,84639824	0,01112832	9,7263E-05	10,9850734	963,061121	0,00623698	1,06348012	820,682156	0,03156217	0,0216	267,9312	22724,6749	9246,24774	0,224324331	31,42505074
55 Hz																
57,5 Hz																
60 Hz																





2º Ensaio de redução do arrasto com O01P1B4MMQ

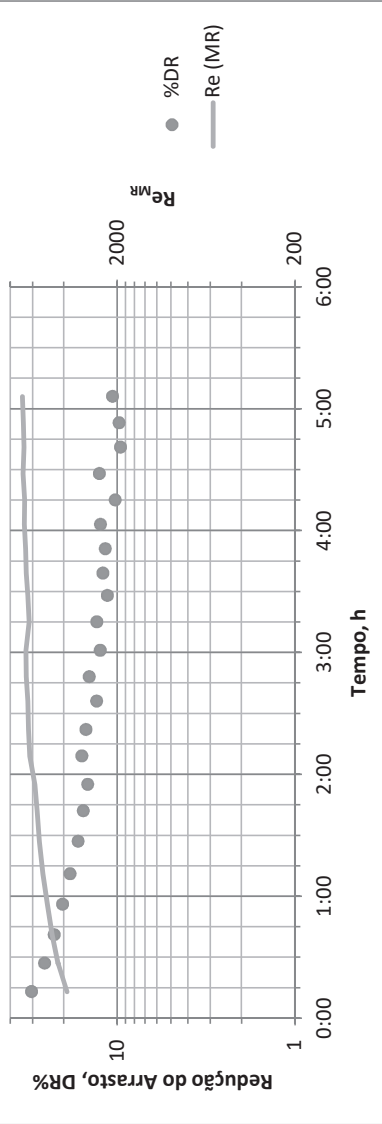
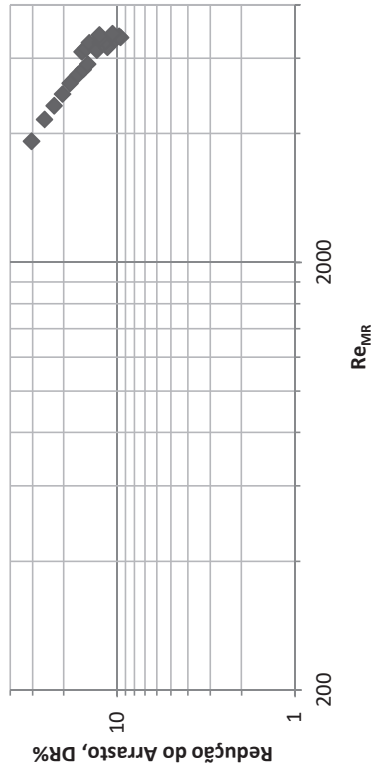
	T Média (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>MIR</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
5 Hz	26,726843	0,472662	0,01111347	9,7004E-05	1,35350142	71,1413148	0,01800599	1,02612534	837,385182	0,10879233	0,1031	19,7657	918,5086	588,27678	0,392267883	5,254038334
6 Hz	26,9484925	0,572238	0,01111336	9,7006E-05	1,63860759	85,0481255	0,01781056	1,02662538	837,244656	0,08965215	0,0841	23,6298	1101,0145	713,870249	0,476020009	6,203546359
7 Hz	27,2754545	0,66785357	0,01111378	9,7009E-05	1,91234007	97,8606048	0,01752225	1,02737834	837,037362	0,07630565	0,0711	27,1900	1275,7997	838,732158	0,559289181	6,874634151
8 Hz	27,3987824	0,75992776	0,01111385	9,7011E-05	2,17595921	111,365373	0,01741392	1,02766721	836,959172	0,0670249	0,0625	30,9425	1452,6794	954,868997	0,636736333	6,802812299
9 Hz	27,6407699	0,85571951	0,01111399	9,7013E-05	2,45018693	123,523535	0,01720099	1,02824198	836,805752	0,05924449	0,0547	34,3215	1619,4722	1080,26921	0,72036593	7,746068833
10 Hz	27,8755128	0,95070828	0,01111412	9,7015E-05	2,72210407	136,430001	0,01699458	1,02880984	836,656925	0,05307252	0,0489	37,9075	1797,4160	1205,89725	0,804149211	7,830244874
11 Hz	29,0566189	1,04965927	0,01111479	9,7027E-05	3,00506446	145,090535	0,01595844	1,03183135	835,908104	0,04633899	0,0427	40,3163	1983,9238	1381,1264	0,921055425	7,794357315
12,5 Hz	29,2094381	1,19440246	0,01111487	9,7028E-05	3,41939606	164,358918	0,01582469	1,03224361	835,811216	0,04068001	0,0374	45,6707	2250,1684	1573,25446	1,04919128	8,094879434
13,5 Hz	29,4376054	1,28215745	0,011115	9,7031E-05	3,67054059	176,608283	0,01562513	1,03286882	835,666558	0,03768966	0,0349	49,0750	2430,8119	1698,07857	1,132448617	7,480077703
15 Hz	29,7345948	1,4337105	0,01111517	9,7034E-05	4,10428076	195,105074	0,01536563	1,03370046	835,478267	0,03349057	0,0308	54,2156	2703,4425	1910,98595	1,274455732	7,979876813
16,5 Hz	31,6485106	1,56832205	0,01111625	9,7052E-05	4,48876206	247,63892	0,01429155	1,03587909	834,264844	0,02909826	0,0328	68,8204	3589,9188	2199,44412	1,466973688	-12,55968874
17,0 Hz	31,8518352	1,60346427	0,01111636	9,7054E-05	4,58924952	286,623375	0,0141877	1,03606407	834,135936	0,02832193	0,0363	79,6552	4157,1325	2259,73335	1,50720061	-28,07408526
17,5 Hz	32,3576506	1,64025402	0,01111665	9,7059E-05	4,69430418	328,678564	0,01392942	1,03653443	833,81525	0,0481843	0,0398	91,3451	4810,8753	2342,86575	1,578258806	17,46137308
18 Hz	32,660264	1,68737247	0,01111682	9,7062E-05	4,82900611	364,011043	0,01377495	1,03682202	833,623393	0,04759585	0,0416	101,1661	5353,5886	2428,53738	0,179331763	12,52771592
19 Hz	33,056934	1,76537731	0,01111704	9,7066E-05	5,05204111	404,869493	0,01357252	1,03720975	833,371904	0,04671631	0,0423	112,5238	5997,9796	2565,69286	0,180985005	9,407341063
20 Hz	33,4668566	1,83511706	0,01111727	9,707E-05	5,25139957	434,587322	0,01336634	1,03761986	833,112013	0,04594881	0,0421	120,7856	6496,3028	2695,1487	0,18247973	8,467056531
22,5 Hz	33,044608	2,05068563	0,01111703	9,7066E-05	5,86852509	524,672267	0,01357881	1,03719759	833,379719	0,04452515	0,0406	145,8200	7698,2293	2962,72389	0,185377381	8,714720375
25 Hz	34,4018587	2,25627516	0,0111178	9,7079E-05	6,45598032	581,455486	0,01288669	1,03859729	832,519222	0,04265126	0,0373	161,6126	8831,3667	3379,92117	0,189505803	12,63958767
27,5 Hz	35,5629681	2,44295984	0,01111845	9,7091E-05	6,98932693	647,965605	0,01229527	1,03989952	831,783078	0,04115361	0,0355	180,1093	10138,2301	3779,35088	0,19307817	13,83367692
30 Hz	37,3454541	2,61641863	0,01111946	9,7108E-05	7,48424182	783,092927	0,01138877	1,04211671	830,652982	0,03959984	0,0374	217,6892	12833,0744	4271,9513	0,197079104	5,481223894
32,5 Hz	39,3416231	2,7961304	0,01112058	9,7128E-05	7,99668801	750,585526	0,010376	1,04497517	829,387411	0,03803242	0,0315	208,6737	13128,6526	4870,50361	0,20145394	17,23897186
35 Hz	40,7004638	2,92669669	0,01112135	9,7141E-05	8,36894382	800,521531	0,00983694	1,04649693	828,525906	0,03708815	0,0307	222,5719	14492,0698	5291,88703	0,204273381	17,26718803
37,5 Hz	42,0332494	3,06918849	0,0111221	9,7155E-05	8,77521677	849,182301	0,00944561	1,04745611	827,68092	0,03624631	0,0296	236,1172	15799,6007	5713,71267	0,206915205	18,23354736
40 Hz	43,4722573	3,20888189	0,01112291	9,7169E-05	9,17328131	894,535661	0,0090234	1,04857222	826,768589	0,03542517	0,0286	248,7459	17167,1007	6173,68511	0,20961792	19,25778405
42,5 Hz	45,3603377	3,34478749	0,01112397	9,7187E-05	9,55996813	935,020836	0,00846999	1,05018089	825,571546	0,03453114	0,0276	260,0286	18738,2360	6737,6829	0,212714758	20,15778586
45 Hz	47,3019444	3,43841736	0,01112506	9,7206E-05	9,82564556	974,149882	0,00790166	1,05203421	824,340567	0,03376029	0,0272	270,9370	20456,8680	7285,33603	0,215524592	19,32791151
47,5 Hz	49,0512832	3,56250743	0,01112605	9,7224E-05	10,1784427	1012,49757	0,00739037	1,05399089	823,231486	0,03297067	0,0264	281,6275	22216,9157	7914,83129	0,218541532	19,87785318
50 Hz	50,988448	3,66681931	0,01112714	9,7243E-05	10,4744172	1048,71426	0,00688786	1,05628913	822,003324	0,03227518	0,0259	291,7298	24006,6300	8535,54668	0,221330635	19,81948453
52,5 Hz	52,9462812	3,77879278	0,01112825	9,7262E-05	10,7921341	1086,02681	0,00777705	1,02473921	820,762058	0,03070332	0,0253	302,1393	30102,0072	10218,8196	0,228093449	17,64689905
55 Hz																
57,5 Hz																
60 Hz																



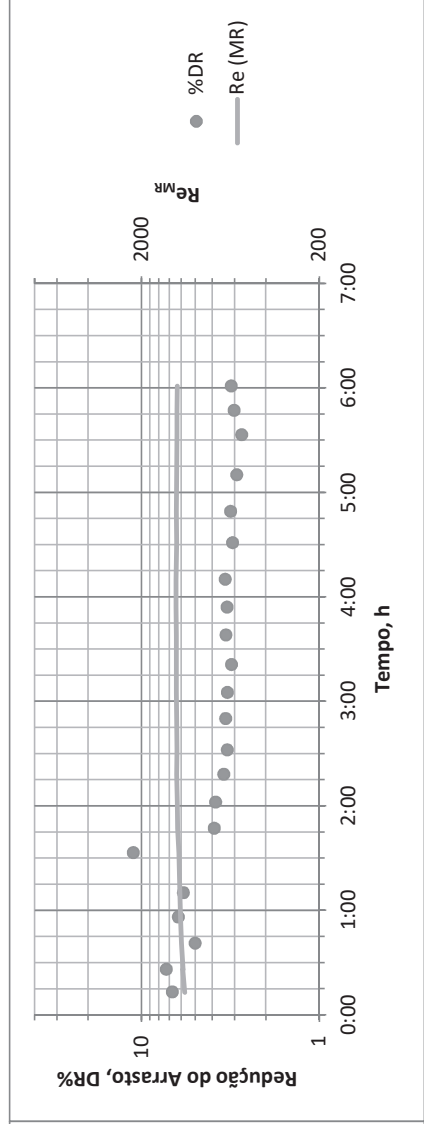
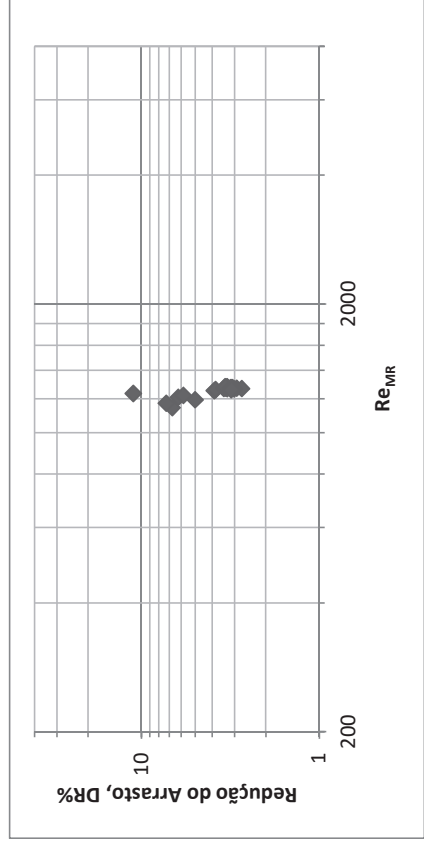
## **Apêndice 5**

**Planilhas de tratamento dos dados de ensaios  
de degradação obtidos no circuito fechado de  
escoamento**

Dt acum. [min.]	T Media (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>MIR</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
00:13:00	28,6009	2,84159	0,011115	9,7034E-05	8,134566	696,1436	0,017927	1,011314	836,197	0,040967	0,027968	193,4444	9725,845	3834,029	0,193484	30,44215
00:27:00	32,36801	2,795507	0,011118	9,7084E-05	7,998577	695,8471	0,015491	1,012404	833,8087	0,039483	0,029005	193,4112	11124,67	4312,575	0,197365	25,7105
00:41:00	34,83131	2,780231	0,01112	9,7116E-05	7,952222	701,2321	0,014289	1,012386	832,2469	0,038597	0,029632	194,9403	12050,94	4641,514	0,199831	22,69796
00:56:00	36,74202	2,771754	0,011121	9,7141E-05	7,925933	705,3125	0,013356	1,01237	831,0356	0,03786	0,03005	196,1	12883,83	4943,556	0,201968	20,36196
01:11:00	38,36097	2,766852	0,011123	9,7162E-05	7,910188	707,8102	0,012566	1,012354	830,0091	0,037201	0,030318	196,8159	13685,95	5238,954	0,203953	18,47921
01:27:00	39,6262	2,76017	0,011123	9,7179E-05	7,889738	710,7722	0,011948	1,012341	829,207	0,036678	0,030635	197,6564	14386,42	5491,494	0,205577	16,65128
01:42:00	40,55444	2,756619	0,011124	9,7191E-05	7,8786	712,4607	0,011567	1,012701	828,6185	0,03638	0,030818	198,1384	14803,16	5643,492	0,206528	15,57787
01:55:00	41,365	2,782373	0,011125	9,7201E-05	7,951338	727,3751	0,011278	1,013254	828,1046	0,036065	0,030911	202,2972	15098,69	5810,724	0,207547	14,7027
02:09:00	42,30404	2,904523	0,011125	9,7214E-05	8,299361	768,2822	0,010943	1,013928	827,5092	0,035368	0,029992	213,6878	15455,63	6207,8	0,209859	15,85943
02:22:00	43,0316	2,900384	0,011126	9,7223E-05	8,28672	769,6177	0,010683	1,014476	827,048	0,035188	0,030154	214,0697	15743,6	6316,615	0,210478	15,03621
02:36:00	43,61254	2,879635	0,011126	9,7231E-05	8,226794	773,8854	0,010476	1,014932	826,6796	0,035103	0,03078	215,2652	15981,06	6368,6	0,210774	13,09597
02:48:00	44,04962	2,913265	0,011127	9,7237E-05	8,322382	775,2184	0,01032	1,015285	826,4025	0,034867	0,03014	215,6424	16164,33	6517,341	0,211593	14,41093
03:01:00	44,41659	2,888702	0,011127	9,7241E-05	8,251803	778,5847	0,010189	1,01559	826,1699	0,034851	0,0308	216,5841	16321,34	6527,491	0,211653	12,50169
03:15:00	42,78753	2,895827	0,011126	9,722E-05	8,273972	786,7919	0,01077	1,01429	827,2027	0,035269	0,030916	218,8431	15645,85	6266,957	0,210198	13,06182
03:28:00	43,51449	2,884996	0,011126	9,723E-05	8,24222	792,2368	0,010511	1,014854	826,7418	0,035111	0,031389	220,3684	15940,5	6363,748	0,210746	11,39203
03:39:00	44,05397	2,905161	0,011127	9,7237E-05	8,299226	792,4596	0,010318	1,015289	826,3998	0,034894	0,030982	220,4384	16166,17	6500,246	0,2115	12,0759
03:51:00	44,46621	2,905499	0,011127	9,7242E-05	8,299729	793,3625	0,010171	1,015631	826,1384	0,03478	0,031024	220,6957	16342,8	6573,691	0,211903	11,70846
04:03:00	44,82075	2,923874	0,011127	9,7247E-05	8,35182	793,1218	0,010045	1,015933	825,9136	0,034619	0,030638	220,634	16497,71	6678,869	0,212469	12,46033
04:15:00	45,04746	2,888639	0,011128	9,725E-05	8,25092	794,1904	0,009964	1,01613	825,7699	0,034677	0,031441	220,9347	16598,25	6640,938	0,212271	10,29618
04:28:00	45,22866	2,941561	0,011128	9,7252E-05	8,40188	797,2568	0,009899	1,016289	825,655	0,034447	0,030443	221,7904	16679,46	6794,585	0,213084	12,64545
04:41:00	45,37935	2,889511	0,011128	9,7254E-05	8,253043	798,5299	0,009845	1,016423	825,5595	0,034581	0,031605	222,1468	16747,57	6704,323	0,212612	9,613033
04:53:00	45,52702	2,896607	0,011128	9,7256E-05	8,273146	799,4088	0,009793	1,016555	825,4659	0,034515	0,03149	222,3936	16814,85	6748,281	0,212846	9,794398
05:06:00	45,69948	2,92535	0,011128	9,7258E-05	8,355046	804,4756	0,009731	1,016712	825,3565	0,03437	0,031076	223,8057	16894,07	6847,161	0,213365	10,65648



Dt acum. [min.]	T Media (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>MIR</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
00:13:00	25,18433	0,964394	0,011113	9,6987E-05	2,762096	150,3218	0,021055	1,009151	838,3631	0,056006	0,052234	41,76127	1851,513	1142,738	0,158096	6,734545
00:26:00	25,67023	0,969232	0,011113	9,6987E-05	2,775952	147,3219	0,02061	1,009421	838,0551	0,05468	0,050701	40,92786	1887,303	1170,454	0,158729	7,277179
00:41:00	26,08318	0,971487	0,011113	9,6987E-05	2,78241	148,7664	0,020232	1,009659	837,7933	0,053664	0,050976	41,32916	1918,815	1192,611	0,159226	5,008156
00:56:00	26,42105	0,971151	0,011113	9,6987E-05	2,781446	144,7712	0,019922	1,00986	837,5791	0,052953	0,049654	40,21924	1945,381	1208,613	0,15958	6,229957
01:10:00	26,71043	0,969513	0,011113	9,6987E-05	2,776755	143,3919	0,019657	1,010037	837,3956	0,052416	0,049358	39,83607	1968,721	1220,998	0,159852	5,83364
01:33:00	26,96262	0,969654	0,011113	9,6987E-05	2,777159	133,8625	0,019427	1,010195	837,2357	0,051863	0,046074	37,18867	1989,518	1234,016	0,160134	11,16332
01:47:00	27,21758	0,973833	0,011113	9,6987E-05	2,789128	143,8474	0,019193	1,010358	837,0741	0,051094	0,049096	39,9626	2010,989	1252,602	0,160534	3,910463
02:02:00	27,3405	0,973978	0,011113	9,6987E-05	2,789544	143,2119	0,019081	1,010438	836,9961	0,050821	0,048869	39,78605	2021,505	1259,314	0,160677	3,842052
02:18:00	27,504	0,974247	0,011113	9,6987E-05	2,790316	142,8115	0,018931	1,010546	836,8925	0,050455	0,048711	39,67483	2035,663	1268,453	0,160871	3,456494
02:32:00	27,53294	0,971373	0,011113	9,6987E-05	2,782082	142,432	0,018905	1,010565	836,8741	0,05054	0,048871	39,56939	2038,189	1266,314	0,160825	3,303492
02:50:00	27,58077	0,972705	0,011113	9,6987E-05	2,785899	142,2304	0,018861	1,010597	836,8438	0,050369	0,04867	39,51339	2042,378	1270,632	0,160917	3,372921
03:05:00	27,62876	0,972972	0,011113	9,6987E-05	2,786662	142,0818	0,018817	1,010629	836,8134	0,050251	0,048594	39,4721	2046,598	1273,595	0,160979	3,298235
03:21:00	27,65033	0,972081	0,011113	9,6987E-05	2,78411	142,0672	0,018797	1,010644	836,7997	0,05025	0,048679	39,46804	2048,501	1273,62	0,16098	3,127296
03:38:00	27,64276	0,973379	0,011113	9,6987E-05	2,787829	141,964	0,018804	1,010639	836,8045	0,0502	0,048514	39,43937	2047,833	1274,889	0,161006	3,36016
03:54:00	27,66653	0,975421	0,011113	9,6987E-05	2,793677	142,1867	0,018782	1,010655	836,7894	0,050045	0,048387	39,50124	2049,933	1278,841	0,16109	3,312849
04:10:00	27,64449	0,976548	0,011113	9,6987E-05	2,796906	142,3734	0,018802	1,010664	836,8034	0,050036	0,048338	39,55312	2047,986	1279,091	0,161095	3,391996
04:31:00	27,6077	0,973174	0,011113	9,6987E-05	2,787241	142,5564	0,018836	1,010615	836,8267	0,050287	0,048735	39,60396	2044,744	1272,706	0,16096	3,084755
04:49:00	27,58336	0,974314	0,011113	9,6987E-05	2,790507	142,7616	0,018858	1,010599	836,8421	0,050281	0,04869	39,66096	2042,606	1272,853	0,160964	3,162935
05:10:00	27,53637	0,973708	0,011113	9,6987E-05	2,78877	143,3224	0,018901	1,010568	836,8719	0,050413	0,048941	39,81675	2038,49	1269,513	0,160893	2,920299
05:33:00	27,46248	0,974584	0,011113	9,6987E-05	2,791279	144,1807	0,018969	1,010519	836,9188	0,050527	0,049143	40,05519	2032,049	1266,64	0,160832	2,740425
05:47:00	27,38627	0,975903	0,011113	9,6987E-05	2,795058	144,4337	0,019039	1,010468	836,9671	0,050624	0,049093	40,12548	2025,449	1264,231	0,160781	3,023501
06:01:00	27,3182	0,97518	0,011113	9,6987E-05	2,792988	144,5791	0,019101	1,010424	837,0103	0,050807	0,049213	40,16587	2019,59	1259,662	0,160684	3,138207



Ensaio de avaliação da degradação de PIB 1MM a 500ppm a 8L/min

Dt acum. [min.]	T Media (°C)	Q(m³/h) corrigido	D (m)	A (m²)	U (m/s)	Dp/Dx	Índice de consist. k	Índice de comport. n	Massa Especif. [kg/m³]	f tubo liso	f experi- mental	tau parede (Pa)	gama dot	RE <sub>MIR</sub>	Compr. Entrada (m)	%DR
00:12:00	24,435	0,485144	0,011113	9,6987E-05	1,389489	81,49485	0,021741	1,008756	838,8382	0,113874	0,111836	22,64029	980,4327	562,0258	0,140461	1,78907
00:26:00	24,435	0,488685	0,011113	9,6987E-05	1,399629	80,88701	0,021741	1,008756	838,8382	0,113056	0,1094	22,47142	980,4327	566,0912	0,14063	3,233962
00:46:00	24,435	0,486341	0,011113	9,6987E-05	1,392917	78,71202	0,021741	1,008756	838,8382	0,113596	0,107487	21,86718	980,4327	563,4003	0,140519	5,378219
01:00:00	24,435	0,487367	0,011113	9,6987E-05	1,395855	78,48651	0,021741	1,008756	838,8382	0,113359	0,106728	21,80453	980,4327	564,578	0,140568	5,849595
01:14:00	24,435	0,487434	0,011113	9,6987E-05	1,396047	78,3742	0,021741	1,008756	838,8382	0,113344	0,106546	21,77333	980,4327	564,655	0,140571	5,997348
01:39:00	25,53363	0,489033	0,011113	9,6987E-05	1,400626	78,11706	0,020735	1,009344	838,1417	0,108262	0,105591	21,70189	1023,429	591,1578	0,141649	2,467538
01:58:00	25,56325	0,490013	0,011113	9,6987E-05	1,403432	78,25535	0,020708	1,00936	838,1229	0,107921	0,105357	21,74031	1024,64	593,0275	0,141724	2,375165
02:19:00	25,57817	0,486988	0,011113	9,6987E-05	1,394769	77,88262	0,020694	1,009369	838,1134	0,10852	0,106163	21,63676	1025,252	589,7508	0,141593	2,171946
02:34:00	25,59386	0,488206	0,011113	9,6987E-05	1,398259	77,93405	0,02068	1,009378	838,1035	0,108185	0,105705	21,65105	1025,895	591,5814	0,141666	2,291847
02:53:00	25,61758	0,490214	0,011113	9,6987E-05	1,404008	77,77667	0,020658	1,009391	838,0885	0,107644	0,104631	21,60733	1026,869	594,5517	0,141785	2,79878
03:09:00	25,6426	0,488391	0,011113	9,6987E-05	1,398788	77,8529	0,020635	1,009405	838,0726	0,107934	0,105519	21,62851	1027,899	592,9525	0,141721	2,237786
03:25:00	25,66012	0,489498	0,011113	9,6987E-05	1,401959	77,78697	0,020619	1,009415	838,0615	0,107617	0,104955	21,61019	1028,621	594,6992	0,141791	2,474215
03:41:00	25,67971	0,490688	0,011113	9,6987E-05	1,405365	77,93506	0,020601	1,009426	838,0491	0,107275	0,104647	21,65133	1029,429	596,5963	0,141866	2,449957
03:59:00	25,67309	0,490343	0,011113	9,6987E-05	1,404379	77,74177	0,020607	1,009422	838,0533	0,107378	0,104534	21,59764	1029,156	596,0242	0,141843	2,649157
04:17:00	25,64308	0,488363	0,011113	9,6987E-05	1,398707	78,0157	0,020635	1,009405	838,0723	0,107939	0,105752	21,67374	1027,918	592,9298	0,14172	2,025757
04:39:00	25,65551	0,491441	0,011113	9,6987E-05	1,407523	78,16372	0,020623	1,009412	838,0644	0,107216	0,10463	21,71486	1028,431	596,9275	0,141879	2,411217
04:57:00	25,64649	0,490847	0,011113	9,6987E-05	1,405821	78,06452	0,020631	1,009407	838,0701	0,107383	0,10475	21,6873	1028,059	595,9981	0,141842	2,451648
05:16:00	25,63981	0,489194	0,011113	9,6987E-05	1,401086	78,15364	0,020638	1,009403	838,0744	0,107771	0,105579	21,71206	1027,784	593,8515	0,141757	2,03372
05:33:00	25,61668	0,489559	0,011113	9,6987E-05	1,402133	78,21685	0,020659	1,00939	838,089	0,107791	0,105505	21,72962	1026,832	593,7437	0,141753	2,120269
05:47:00	25,60313	0,489153	0,011113	9,6987E-05	1,400969	78,45786	0,020671	1,009383	838,0976	0,107938	0,106005	21,79657	1026,275	592,9356	0,14172	1,790324
06:01:00	25,57417	0,488775	0,011113	9,6987E-05	1,399887	78,48267	0,020698	1,009366	838,116	0,108145	0,1062	21,80347	1025,088	591,8006	0,141675	1,797919
06:18:00	25,56184	0,489138	0,011113	9,6987E-05	1,400926	78,47314	0,020709	1,00936	838,1238	0,108118	0,106029	21,80082	1024,583	591,9453	0,141681	1,932302

