

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TECNOLOGIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO

ESTUDO DO ESCOAMENTO DE PASTA DE CIMENTO EM DUTOS
CIRCULARES E ANULARES CONCÊNTRICOS

EDUARDO DA CUNHA HORA PARAISO

2011



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DO ESCOAMENTO DE PASTA DE CIMENTO EM DUTOS
CIRCULARES E ANULARES CONCÊNTRICOS**

EDUARDO DA CUNHA HORA PARAISO

Sob a Orientação de
Cláudia Miriam Scheid

E Co-orientação de
Luís Américo Calçada

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências** em Engenharia Química, Área de Concentração em Tecnologia Química.

Seropédica, RJ
Novembro de 2011

622.3382

P222e

T

Paraiso, Eduardo da Cunha Hora, 1982-
Estudo do escoamento de pasta de cimento
em dutos circulares e anulares concêntricos
/ Eduardo da Cunha Hora Paraiso - 2011.
110 f. : il.

Orientador: Cláudia Miriam Scheid.
Dissertação (mestrado) - Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Química.
Bibliografia: f. 80-82.

1. Poços de petróleo - Cimentação -
Teses. 2. Poços de petróleo - Perfuração -
Teses. 3. Cimento - Escoamento - Teses. 4.
Cimento - Aditivos - Teses. 5. Engenharia
do petróleo - Teses. I. Scheid, Cláudia
Miriam, 1968-. II. Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-
Graduação em Engenharia Química. III.
Título.

Bibliotecário: _____

Data: ___/___/_____

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

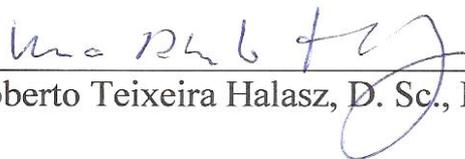
EDUARDO DA CUNHA HORA PARAISO

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de Concentração em Tecnologia Química.

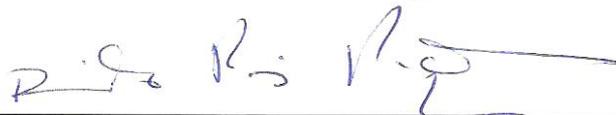
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/11/2011



Cláudia Miriam Scheid, D. Sc., DEQ/UFRRJ
(Orientadora)



Marcos Roberto Teixeira Halasz, D. Sc., DEQ/FAACZ



Ricardo Pires Peçanha, Ph. D., EQ/UFRJ

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me sustentado nesta caminhada e por ter permitido a realização deste trabalho.

Aos meus pais Edson dos Anjos Paraiso e Nelma da Cunha Hora Paraiso que estão sempre, ao meu lado, intercedendo a Deus pelo meu sucesso.

As minhas avós, Terezinha da Cunha Hora e Ivone dos Anjos Paraiso, por toda dedicação e carinho que sempre me oferecem.

Aos meus falecidos avôs, Hilton da Hora e Florisvaldo Paraiso, que apesar do pouco tempo que estivemos juntos, foram pessoas fundamentais para formação do meu caráter.

A minha esposa, Débora Cristina de A. Silva Paraiso, que tem sido uma companheira fiel e inseparável, a quem eu amo.

Ao meu irmão, Emanuel da Cunha Hora Paraiso, que será sempre um grande amigo.

A professora Cláudia Miriam Scheid e ao professor Luís Américo Calçada, pela amizade, orientação e empenho neste trabalho.

Ao amigo Lúcio, por todo ensinamento e apoio na instrumentação da unidade experimental.

Ao Luizão e sua equipe, pela amizade e apoio.

Aos Professores Lindoval Domiciano Fernandes e Márcia Peixoto Vega Domiciano, pelo desenvolvimento do programa de controle da unidade experimental.

Aos amigos, que sempre me ajudaram nesta caminhada, Carlos Raimundo, Daniele, Deividson, Felipe Eller, Felipe Arantes, Frederico, Marlon, Sérgio, Wagner.

Ao CENPES/PETROBRAS e ao seu corpo técnico, envolvido neste projeto, pelo suporte técnico e financeiro dado a essa pesquisa.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, seus professores e funcionários pelo suporte técnico, pelo conhecimento adquirido e pelo acolhimento que recebi, desde a chegada nesta universidade, ainda como aluno de graduação.

RESUMO

PARAISO, Eduardo da Cunha Hora . **Estudo do escoamento de pasta de cimento em dutos circulares e anulares concêntricos**. 2011. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

Na perfuração de poços de petróleo é necessária a cimentação da região anular. Esta região localiza-se entre a formação rochosa e o exterior do duto de revestimento. Neste processo ocorre a circulação de pasta de cimento em regiões circulares, interior da coluna, e regiões anulares, entre a formação rochosa e o exterior do revestimento. O controle da pressão de bombeio depende, dentre vários fatores, da perda de carga causada pelo escoamento da pasta de cimento. A região cimentada confere ao poço resistência mecânica e forma um selo hidráulico, que reduz o influxo de fluidos entre a formação e o revestimento. Neste trabalho, estudou-se a perda de carga no escoamento de pastas de cimento em regiões circulares e anulares concêntricos. Os dados experimentais de perda de carga e vazão, em dutos anulares e circulares, foram determinados em um *loop* de escoamento, construído na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. A unidade foi construída mantendo-se a similaridade dinâmica com o número de Reynolds e a similaridade geométrica através da relação entre os diâmetros de poços e revestimentos. Dados reológicos foram obtidos em um viscosímetro FANN 35A. Foi possível avaliar equações de diâmetro hidráulico, correlações de fator de atrito, modelos reológicos e ainda caracterizar experimentalmente a transição dos regimes de escoamento. A pasta de cimento foi produzida no tanque de mistura da unidade sendo composta por cimento classe G, água e aditivos (retardador de pega e anti-espumante). Foram avaliados os modelos reológicos da potência, de Bingham e de Herschell-Buckley. Os resultados mostram que a escolha do modelo reológico deve ser um ponto de partida na definição das equações pertinentes ao cálculo da perda de carga, pois uma má modelagem reológica refletiu negativamente na avaliação das correlações de diâmetro hidráulico, fator de atrito e de transição de regimes.

Palavras chave: pasta de cimento, perda de carga, escoamento anular.

ABSTRACT

PARAISO, Eduardo da Cunha Hora . **Study of cement slurries flow in circular and concentric annular ducts.** 2011. 110p. Dissertation. (Master Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica , RJ, 2011.

In the oil well drilling is necessary the cementation of the annular region. This region is located between the rock formation and the outside of the covering duct. During this process the circulation of cement slurries happens in the circular regions, in the column inner, in the annular regions, between the rock formation and outside of the covering. The control of the bottom pressure depends, among other factors, on the pressure drop, occasioned by the cement slurry flow. The cemented region gives to the well mechanical resistance and makes a hydraulic seal, which reduces the inflow of fluids between the rock formation and the covering. In this work, the pressure drop occasioned by the circulation of the cement slurries in the circular regions and in the concentric annular was studied. The pressure drop and fluid flow experimental data were determined in a fluid flow loop. The equipment was built keeping the dynamic similarity with the Reynolds Number and the geometric similarity through the rate between the wells and covering diameters. Rheological data were obtained using a FANN 35A viscosimeter. It was possible to evaluate hydraulic diameter equations, friction factor correlations, rheological models and to characterize experimentally the fluid flow transition. The cement slurry produced in the mixing tank was composed by class G cement, water, and additives (set retarder and antifoam). Rheological models of power, Bingham and Herschell-Buckley were evaluated. The results showed that the rheological model choice should be the basis for the pressure drop estimation, since the choice of the rheological model affected the accuracy of the hydraulic diameter, friction factor, and the fluid flow transition.

Key words: cement slurries, friction loss, annular flow

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Dosagem dos principais compostos do cimento (THOMAS <i>et al.</i> , 2001)..... | 4 |
| Tabela 2: Arranjos de anulares concêntricos escolhidos para o trabalho..... | 32 |
| Tabela 3: Comprimentos de entrada propostos na literatura..... | 33 |
| Tabela 4: Parâmetros reológicos médios obtidos..... | 46 |
| Tabela 5: Avaliação da transição de regimes de escoamento a 15°C..... | 50 |
| Tabela 6: Avaliação da transição de regimes de escoamento a 25°C..... | 51 |
| Tabela 7: Avaliação da transição de regimes de escoamento a 60°C..... | 52 |
| Tabela 8: Erros percentuais absolutos médios das correlações de diâmetro hidráulico..... | 56 |
| Tabela 9: Avaliação das correlações de fator de atrito em termos de erros percentuais absolutos médios a 15°C..... | 66 |
| Tabela 10: Avaliação das correlações de fator de atrito em termos de erros percentuais absolutos médios a 25°C..... | 67 |
| Tabela 11: Avaliação das correlações de fator de atrito em termos de erros percentuais absolutos médios a 60°C..... | 68 |
| Tabela 12: Incerteza das variáveis experimentais..... | 71 |
| Tabela 13: Incertezas estimadas dos parâmetros do modelo de Bingham..... | 71 |
| Tabela 14: Incertezas médias percentuais das variáveis calculadas..... | 72 |
| Tabela 15: Calibração do tubo circular de 1” antes do experimento com pasta1, usando transdutor com faixa de calibração de 0,01 a 0,05 kgf/cm ² | 84 |
| Tabela 16: Calibração do duto anular I antes do experimento com pasta1, usando transdutor com faixa de calibração de 0,01 a 0,05 kgf/cm ² | 84 |
| Tabela 17: Calibração do duto anular II antes do experimento com pasta1, usando transdutor com faixa de calibração de 0,01 a 0,05 kgf/cm ² | 85 |
| Tabela 18: Calibração do duto anular III antes do experimento com pasta1, utilizando transdutor com transdutor de selo remoto..... | 86 |
| Tabela 19: Dados experimentais da pasta1 escoando no tubo circular de 1” a 15°C..... | 87 |
| Tabela 20: Dados experimentais da pasta1 escoando no tubo circular de 1” a 25°C..... | 87 |
| Tabela 21: Dados experimentais da pasta1 escoando no tubo circular de 1” a 60°C..... | 88 |
| Tabela 22: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular I a 15°C..... | 88 |
| Tabela 23: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular I a 25°C..... | 89 |
| Tabela 24: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular I a 60°C..... | 89 |
| Tabela 25: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular II a 15°C..... | 90 |
| Tabela 26: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular II a 25°C..... | 90 |
| Tabela 27: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular II a 60°C..... | 91 |
| Tabela 28: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular III a 15°C..... | 91 |
| Tabela 29: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular III a 25°C..... | 92 |
| Tabela 30: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular III a 60°C..... | 92 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: (a) Vista superior de área cimentada, (b) Esquema de trechos cimentados (CAMPOS <i>et al.</i> , 2002). | 2 |
| Figura 2: Unidade de cimentação (CAMPOS <i>et al.</i> , 2002). | 7 |
| Figura 3: Cabeça de cimentação, adaptado de CAMPOS <i>et al.</i> (2002). | 7 |
| Figura 4: Ilustrações de sapatas, (a) sapatas flutuante, (b) sapatas de assento cônico, conhecidas como <i>poppet</i> , adaptado de CAMPOS <i>et al.</i> (2002). | 8 |
| Figura 5: Colares, adaptado de CAMPOS <i>et al.</i> (2002). | 8 |
| Figura 6: Tampões de fundo, adaptado de CAMPOS <i>et al.</i> (2002). | 9 |
| Figura 7: Tampão de topo, adaptado de CAMPOS <i>et al.</i> (2002). | 9 |
| Figura 8: Centralizadores, adaptado de CAMPOS <i>et al.</i> (2002). | 10 |
| Figura 9: Revestimentos. | 10 |
| Figura 10: (a)Tensão de cisalhamento, τ , e (b)Viscosidade aparente, η , como função da taxa de deformação, $\dot{\gamma}$, para escoamento unidimensional, adaptado de FOX <i>et al.</i> (1998). | 12 |
| Figura 11: (a) Queda da viscosidade aparente (tixotrópicos), e (b)Aumento da viscosidade aparente (reopéticos), durante cisalhamento constante ao longo do tempo, adaptado de SILVA <i>et al.</i> (1989). | 13 |
| Figura 12: Escoamento lamiar, fluido Newtoniano entre placas, adap. de BIRD <i>et al.</i> (2004). | 14 |
| Figura 13: Ilustração de reograma do modelo da potência | 15 |
| Figura 14: Ilustração de reograma modelo de Bingham | 16 |
| Figura 15: Contribuição da fase sólida e líquida à resistência ao cisalhamento, adaptado de MIRANDA <i>et al.</i> (2009). | 17 |
| Figura 16: Ilustração de reogramas do modelo de Herschell-Buckley. | 18 |
| Figura 17: Avaliação da transição dos regimes de escoamento bem delineada. | 19 |
| Figura 18: Avaliação da transição dos regimes de escoamento indefinida. | 20 |
| Figura 19: Esquema da unidade de escoamento de pasta. | 31 |
| Figura 20: Foto da unidade de simulação de escoamento de fluidos (USEF). | 31 |
| Figura 21: Foto demonstrativa da centralização do anular com destaque nos espaçadores e na ponta do tubo interno. | 32 |
| Figura 22: Foto do medidor de vazão e densidade coriollis da unidade. | 34 |
| Figura 23: Imagem do transdutor de pressão diferencial com selo remoto | 35 |
| Figura 24: Bomba helicoidal de 25HP e 12Kgf/cm ² de pressão de descarga. | 35 |
| Figura 25: Tanque da unidade experimental. | 36 |
| Figura 26: Foto de <i>chiller</i> da unidade experimental. | 37 |
| Figura 27: (a) Viscosímetro FANN modelo 35A e (b) esquema simplificado de funcionamento do viscosímetro. | 39 |
| Figura 28: (a) Copo encamisado utilizado em ensaio reológico e (b) Conjunto banho termostático, viscosímetro FANN 35A e copo encamisado. | 39 |
| Figura 29: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento de água em duto anular I, temperatura de 25 °C, transdutor com faixa de calibração 0,01 a 0,05kgf/cm ² | 43 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento de água em duto anular II, temperatura de 25 °C, transdutor com faixa de calibração 0,01 a 0,05kgf/cm ² | 44 |
| Figura 31: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento de água em duto circular de 1", regime turbulento, temperatura de 25 °C, transdutor com faixa de calibração 0,01 a 0,05kgf/cm ² | 45 |
| Figura 32: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento de água em duto anular II, regime turbulento, temperatura de 25 °C, transdutor com faixa de calibração 0,01 a 0,05kgf/cm ² | 45 |
| Figura 33: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 25°C em duto circular de 1" | 47 |
| Figura 34: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 25°C em duto anular 1(2" e 1 1/2")..... | 48 |
| Figura 35: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 25°C em duto anular 2(1 1/2" e 1")..... | 48 |
| Figura 36: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 25°C em duto anular 3(1 1/4" e 3/4")..... | 49 |
| Figura 37: Avaliação do efeito das equações de diâmetro hidráulico na queda de pressão versus vazão no escoamento da pasta 1 a 25°C, no duto anular 3(1 1/4" e 3/4") utilizando o modelo de Herschell-Buckley. | 54 |
| Figura 38: Avaliação do efeito das equações de diâmetro hidráulico na queda de pressão versus vazão no escoamento da pasta 1 a 25°C, no duto anular 3(1 1/4" e 3/4") utilizando o modelo da Bingham..... | 55 |
| Figura 39: Avaliação do efeito das equações de diâmetro hidráulico na queda de pressão versus vazão no escoamento da pasta 1 a 25°C, no duto anular 3(1 1/4" e 3/4") utilizando o modelo da potência..... | 55 |
| Figura 40: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em tubo circular de 1", temperatura de 25 °C e utilizando o modelo de Herschell-Buckley..... | 58 |
| Figura 41: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 1, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH ₃ | 59 |
| Figura 42: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH ₃ | 59 |
| Figura 43: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 3, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH ₃ | 60 |
| Figura 44: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em tubo circular de 1", temperatura de 25 °C e utilizando o modelo de Herschell-Buckley..... | 60 |
| Figura 45: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 1, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH ₃ | 61 |
| Figura 46: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH ₃ | 61 |
| Figura 47: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 3, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH ₃ | 62 |
| Figura 48: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH ₂ | 62 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 49: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Bingham e correlação DH_2 | 63 |
| Figura 50: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo da potência e correlação DH_2 | 63 |
| Figura 51: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH_2 para o cálculo do diâmetro hidráulico. | 64 |
| Figura 52: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Bingham e correlação DH_2 para o cálculo do diâmetro hidráulico..... | 64 |
| Figura 53: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo da potência e correlação DH_2 para o cálculo do diâmetro hidráulico..... | 65 |
| Figura 54: Gráfico de avaliação da incerteza relativa ao fator de atrito nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 15 °C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico...73 | 73 |
| Figura 55: Gráfico de avaliação da incerteza relativa ao fator de atrito nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico...73 | 73 |
| Figura 56: Gráfico de avaliação da incerteza relativa ao fator de atrito nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 60°C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico...74 | 74 |
| Figura 57: Gráfico de avaliação da incerteza relativa a queda de pressão nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 15 °C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico...75 | 75 |
| Figura 58: Gráfico de avaliação da incerteza relativa a queda de pressão nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico...75 | 75 |
| Figura 59: Gráfico de avaliação da incerteza relativa a queda de pressão nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 60 °C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico...76 | 76 |
| Figura 60: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 15°C em duto circular de 1". | 93 |
| Figura 61: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 15°C em duto anular I..... | 93 |
| Figura 62: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 15°C em duto anular II. | 94 |
| Figura 63: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 15°C em duto anular III..... | 94 |
| Figura 64: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 60°C em duto circular de 1". | 95 |
| Figura 65: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 60°C em duto anular I..... | 95 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 66: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 60°C em duto anular II. | 96 |
| Figura 67: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 60°C em duto anular II. | 96 |

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

| | |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|
| [A] | parâmetro Equação 26 (adim.); |
| a | parâmetro das Equações 39 e 47 (adim.); |
| A | rea de escoamento (m^2); |
| A | parâmetro Equação 33 (adim.); |
| b | parâmetro Equação 45 (adim.); |
| B | parâmetro Equação 33 (adim.); |
| D | diâmetro (m); |
| D_1 | diâmetro externo do tubo interno(m). |
| D_2 | diâmetro interno do tubo externo(m); |
| DH | diâmetro hidráulico (m); |
| DH_1 | diâmetro hidráulico (slot) (m); |
| DH_2 | diâmetro hidráulico (raio hidráulico) (m); |
| DH_3 | diâmetro hidráulico experimental(m); |
| DH_{exp} | diâmetro hidráulico experimental(m); |
| f | fator de atrito de Darcy (adim.); |
| f | fator de atrito de Fanning (adim.); |
| f_L | fator de atrito laminar de Fanning (adim.); |
| f_T | fator de atrito turbulento de Fanning (adim.); |
| hd | perda de carga distribuída (m); |
| He | número de Hedstron (adim.); |
| He_B | número de Hedstron – modelo Bingham (adim.); |
| He_{HB} | número de Hedstron – modelo Herschell-Buckley (adim.); |
| hs | perda de carga localizada (m); |
| k | ndice de consistência potência ($Pa \cdot s^n$); |
| k_{HB} | ndice de consistência Herschell-Buckley ($Pa \cdot s^n$); |
| L | comprimento da seção reta (m); |
| LE_B | limite de escoamento de Bingham (Pa); |
| LE_{HB} | limite de escoamento de Herschell-Buckley (Pa); |
| m | parâmetro Equação 37 (adim.); |
| n | ndice de comportamento do modelo potência (adim.); |
| n_{HB} | ndice de comportamento do modelo potência (adim.); |
| Q | vazão volumétrica (m^3/s); |
| R | raio (m); |
| R^2 | coeficiente de correlação (adim.); |
| Re | número de Reynolds (adim.); |
| Re_B | número de Reynolds generalizado – modelo Bingham (adim.); |
| Re_c | número de Reynolds crítico (adim.); |
| Re_{CN} | número de Reynolds crítico Newtoniano (adim. ; 2300 neste trabalho); |
| Re_{HB} | número de Reynolds generalizado – modelo Herschell-Buckley (adim.); |
| Re_P | número de Reynolds generalizado – modelo power law (adim.); |

| | |
|---------------------|-----------------------------------------|
| R_H | raio hidráulico(m); |
| $\langle v \rangle$ | velocidade média (m/s); |
| v_c | velocidade crítica (m/s); |
| VP_B | viscosidade plástica de Bingham (Pa.s); |
| x_c | parâmetro da Equação 8 (adim.); |

Letras Gregas

| | |
|--------------------|-------------------------------------------------|
| ΔP | queda de pressão (Pa); |
| ΔP_{calc} | queda de pressão calculada por correlação (Pa); |
| ΔP_{exper} | queda de pressão experimental (Pa); |
| ε | rugosidade relativa do tubo; |
| γ | taxa de deformação (s^{-1}); |
| λ | parâmetro Equação 30 (s^{-1}); |
| μ | viscosidade dinâmica ($Kg.m^{-1}.s^{-1}$); |
| ρ | massa específica do fluido ($Kg.m^{-3}$); |
| τ | tensão de cisalhamento (Pa). |

SUMÁRIO

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Cimentação primária (definição)..... | 2 |
| 1.2 Histórico da cimentação | 3 |
| 1.3 Cimento | 3 |
| 1.3.1 Composição química..... | 3 |
| 1.3.2 Classificação | 4 |
| 1.4 Aditivos | 5 |
| 1.5 Equipamentos da cimentação | 6 |
| 1.5.1 Unidades de cimentação | 6 |
| 1.5.2 Cabeça de cimentação..... | 7 |
| 1.5.3 Sapatas | 7 |
| 1.5.4 Colar..... | 8 |
| 1.5.5 Tampão ou plug de fundo | 9 |
| 1.5.6 Tampão ou plug de topo | 9 |
| 1.5.7 Centralizadores | 10 |
| 1.5.8 Revestimento | 10 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA..... | 11 |
| 2.1 Análises físico-químicas | 11 |
| 2.2 Classificação dos fluidos..... | 11 |
| 2.2.1 Independentes do tempo | 11 |
| 2.2.2 Dependentes do tempo..... | 12 |
| 2.2.3 Viscoelásticos | 13 |
| 2.3 Modelos reológicos | 13 |
| 2.3.1 Modelo de Newton da viscosidade | 14 |
| 2.3.2 Modelo de potência da viscosidade | 14 |
| 2.3.3 Modelo de Bingham da viscosidade | 15 |
| 2.3.4 Modelo de Herschell-Buckley | 17 |
| 2.4 Regimes de escoamento | 18 |
| 2.4.1 Regimes de escoamento na cimentação | 18 |
| 2.4.2 Determinação experimental do regime de escoamento | 19 |
| 2.4.3 Correlações para estimativas de Reynolds e velocidade críticos..... | 20 |
| 2.5 Balanço de energia mecânica no escoamento de fluidos | 22 |
| 2.6 Equações para o cálculo do fator de atrito | 23 |
| 2.6.1 Fluidos Newtonianos | 23 |
| 2.6.2 Fluidos não-Newtonianos independentes do tempo | 23 |
| 2.7 Correlações de diâmetro hidráulico para dutos anulares..... | 28 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 30 |
| 3.1 Descrição da unidade piloto | 30 |
| 3.1.1 Trechos experimentais | 32 |

| | | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.2 | Extensão dos trechos experimentais | 33 |
| 3.1.3 | Medidor de vazão e densidade coriollis..... | 34 |
| 3.1.4 | Transdutores de pressão diferencial com selo remoto | 34 |
| 3.1.5 | Definição da bomba do sistema | 35 |
| 3.1.6 | Tanque da unidade experimental | 36 |
| 3.1.7 | Sistema de refrigeração..... | 36 |
| 3.2 | Metodologia | 37 |
| 3.3 | Fluido utilizado | 38 |
| 3.4 | Determinação dos parâmetros reológicos | 38 |
| 3.5 | Limpeza e calibração da unidade experimental | 40 |
| 3.6 | Tratamento das incertezas experimentais..... | 41 |
| 3.6.1 | Propagação das incertezas das variáveis experimentais e desvio padrão dos parâmetros reológicos | 41 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 43 |
| 4.1 | Calibração da unidade experimental | 43 |
| 4.2 | Avaliação do comportamento reológico | 46 |
| 4.3 | Determinação dos regimes de escoamento..... | 47 |
| 4.4 | Avaliação das correlações de diâmetro hidráulico..... | 54 |
| 4.5 | Avaliações das correlações de fator de atrito | 58 |
| 4.5.1 | Avaliação da mudança de geometria | 58 |
| 4.5.2 | Avaliação da mudança do modelo reológico..... | 62 |
| 4.6 | Avaliações das incertezas..... | 70 |
| 4.6.1 | Determinação das incertezas das variáveis experimentais | 70 |
| 4.6.2 | Determinação das incertezas estimadas dos parâmetros reológicos (desvio padrão)..... | 71 |
| 4.6.3 | Propagação das incertezas experimentais nas variáveis calculadas..... | 71 |
| 4.6.4 | Propagação das incertezas experimentais no calculo do fator de atrito (f_{calc} e f_{exp})..... | 72 |
| 4.6.5 | Propagação das incertezas experimentais no ΔP_{calc} | 74 |
| 5 | CONCLUSÕES | 77 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 79 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 80 |
| 8 | ANEXOS | 83 |

1 INTRODUÇÃO

Na cimentação de poços de petróleo e gás, pasta de cimento é bombeada do interior do revestimento à região anular, formada entre a formação rochosa e o exterior do revestimento. Após o preenchimento da região anular a pasta finaliza seu processo de cura. A região cimentada forma um selo hidráulico no poço que proporciona um isolamento zonal que fixa e protege a coluna de revestimento, além de fornecer sustentação mecânica a formação geológica perfurada (NELSON,1990; BOURGOYNE *et al.*,1991).

Durante o escoamento da pasta existe a preocupação com a carga e a velocidade de bombeio ao longo da coluna do poço. Elevadas pressões e velocidades são eficientes na remoção da lama ou fluido de perfuração e dos cascalhos. Entretanto podem causar fraturas na formação rochosa e ainda a invasão da pasta e contaminação do poço (SILVA *et al.*, 1989).

Nos processos em que se trabalha a baixas pressões, normalmente em formações fragilizadas, existe a preocupação de que ocorra a invasão de fluidos do interior da formação geológica para o interior da coluna de revestimento (*kick*), que ocorrendo de maneira descontrolada pode levar a unidade de perfuração a acidentes de grandes proporções (*blowout*), (THOMAS *et al.*, 2001).

Dentro deste contexto e tentando simular o escoamento que ocorre durante o processo de cimentação primária de poços de petróleo, foi construída uma unidade experimental baseada na similaridade dinâmica com o processo real, capaz de fornecer dados de perda de carga e vazão em regiões anulares e circulares. Os dados obtidos foram utilizados na avaliação de correlações pertinentes à previsão da perda de carga na etapa de cimentação. Avaliaram-se correlações de fator de atrito, diâmetro hidráulico e ainda de transição de regimes de escoamento. Além dos ensaios de perda de carga, realizados na unidade, a reologia foi acompanhada através de ensaios realizados no viscosímetro FANN modelo 35A.

No decorrer deste primeiro capítulo é apresentada uma pequena introdução sobre o processo de cimentação de poços de petróleo.

O segundo capítulo deste trabalho apresenta uma revisão da literatura mostrando estudos de autores com assuntos relevantes a esta pesquisa. No terceiro capítulo, são demonstrados os materiais, as técnicas adotadas e os métodos utilizados para conduzir o trabalho. Os resultados experimentais obtidos são apresentados e discutidos no capítulo 4. Nos capítulos seguintes são apresentadas as conclusões, referencias bibliográfica e os anexos.

1.1 Cimentação primária (definição)

A etapa inicial do processo de prospecção de petróleo passa por análises de dados geológicos e geofísicos do terreno onde então se indica áreas favoráveis a acumulação de petróleo ou gás assim como as características físico-químicas do solo a ser perfurado. Baseado na indicação dessas análises, os poços de petróleo são então perfurados em fases, de acordo com as formações geológicas e profundidades previstas como favoráveis para o acúmulo de petróleo ou gás.

Após cada fase da perfuração é descida uma coluna de revestimento (duto cilíndrico, normalmente metálico), e o espaço anular, formado entre esta tubulação de revestimento e as paredes do poço, é preenchido com pasta de cimento, de modo a fixar a tubulação e evitar que haja migração de fluidos entre as diversas zonas permeáveis atravessadas pelo poço, por detrás do revestimento.

A cimentação do espaço anular é realizada, basicamente, mediante o bombeio de pasta de cimento (cimento, água e aditivos), através da própria tubulação de revestimento. Após o endurecimento da pasta, o cimento deve ficar fortemente aderido à superfície externa do revestimento e a parede do poço, nos intervalos previamente definidos como pode ser visto na Figura 1 (THOMAS *et al.*, 2001).

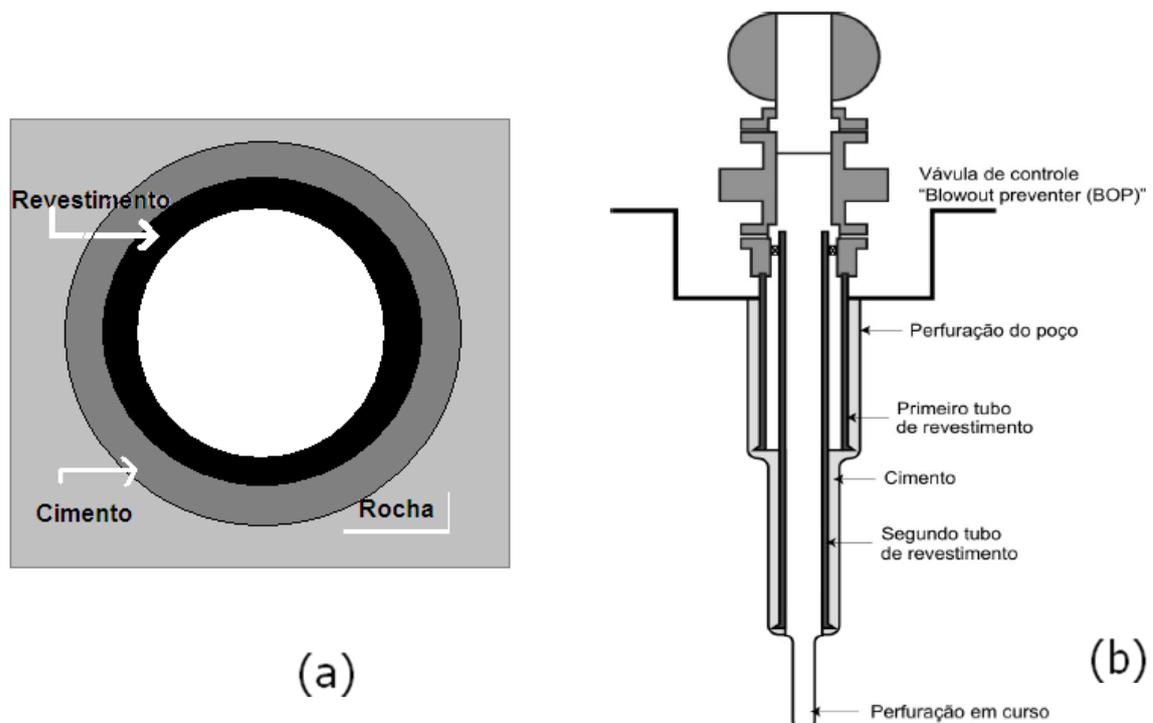


Figura 1: (a) Vista superior de área cimentada, (b) Esquema de trechos cimentados (CAMPOS *et al.*, 2002).

1.2 Histórico da cimentação

Desde a antiguidade o homem tem perfurado poços na crosta terrestre e vem reconhecendo a necessidade de revesti-los para proteger suas paredes, (THOMAS *et al.*, 2001).

Em 1859 foi perfurado o primeiro poço de petróleo, na era moderna. No ano de 1903 foi cimentado o primeiro poço, no Campo Lompoc na Califórnia. Nesta primeira operação de cimentação, foram bombeados um total de 50 sacos de cimento com o objetivo de evitar o fluxo de água da formação para o poço. Esperava-se 28 dias para o endurecimento do cimento e o método de cimentação utilizado era denominado por *dump bailer* ou caçambeio (CAMPOS *et al.*, 2002).

A necessidade de perfurar poços profundos em um curto espaço de tempo, atrelado a concorrência comercial das indústrias petrolíferas geraram a necessidade de se acelerar o processo de cimentação, além de se desenvolver novas pastas.

Atualmente, as pastas podem ser mantidas fluidas por certo tempo, a altas temperaturas e pressões (4 horas, em geral), permitindo seu deslocamento em poços profundos. A partir deste tempo a pasta endurece rapidamente e as atividades no poço podem ser retomadas apenas 6 a 8 horas após a cimentação (CAMPOS *et al.*, 2002).

1.3 Cimento

O cimento portland destinado à cimentação de poços petrolíferos, CPP-Classe G e CPP-Classe Especial, podem ser definidos conforme descrito na norma NBR-9831 da ABNT, de novembro de 2006, como:

"Aglutinante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte por silicatos de cálcio hidráulicos e que apresenta características especiais para uso em poços de petróleo assim como produzido. Na fabricação, a única adição permitida durante a moagem nestes dois tipos de cimento é a de gesso”.

1.3.1 Composição química

Os principais materiais utilizados na fabricação do Cimento Portland são o calcário e a argila, sendo estes convenientemente dosados, podendo eventualmente ser adicionado algum

minério contendo óxido de ferro ou alumínio, caso estes óxidos já não estejam em teores suficientes na argila. Dosagens desses compostos no cimento podem ser vistos em Tabela 1.

Tabela 1: Dosagem dos principais compostos do cimento (THOMAS *et al.*, 2001)

| COMPOSTO | FÓRMULA | FAIXA DE DOSAGEM |
|----------------|--------------------------------|------------------|
| CAL | CaO | 60-67% |
| ALUMINA | Al ₂ O ₃ | 3-8% |
| SÍLICA | SiO ₂ | 17-25% |
| ÓXIDO DE FERRO | Fe ₂ O ₃ | 0,5-6% |

Esses compostos são designados pelas letras C, A, S, F e inter-relacionados com o propósito de formar compostos complexos com propriedades específicas como por exemplo:

- **Aluminato Tricálcico (C₃A)** - juntamente com o gesso é um dos principais responsáveis pelo controle do tempo de pega e pela suscetibilidade ao ataque de águas sulfatadas;
- **Silicato Tricálcico (C₃S)** - principal componente do cimento e o que responde pela sua resistência mecânica inicial (1-28 dias);
- **Ferro-Aluminato Tetracálcico (C₄AF)** - responsável pela coloração cinzenta do cimento, devido à presença de ferro. Controla a resistência a corrosão química;
- **Silicato Bicálcico (C₂S)** - composto do cimento que apresenta menor velocidade de hidratação, apresenta baixa resistência inicial, porém contribui para resistência mecânica em longo prazo.

1.3.2 Classificação

O American Petroleum Institute (API) padronizou processos de fabricação e composição química do cimento e os classificou em oito classes, de A até H, cujas propriedades diferem quanto à faixa de aplicação (temperatura e pressão), à sua resistência inicial e retardamento, à resistência ao ataque de sulfatos e ao calor de hidratação (BOURGOYNE *et al.*, 1991).

- Classe A: Utilizado em profundidades de até 1830 m (6000 in) quando não há necessidade de propriedades especiais (similar ao cimento ASTM C 150, Tipo I).
- Classe B: Utilizado em profundidades de até 1830 m (6000 in) em condições onde há a necessidade de moderada a alta resistência a sulfato.
- Classe C: Utilizado em profundidades de até 1830 m (6000 in) em condições onde há a necessidade de uma alta resistência à compressão inicial (similar ao cimento ASTM C 150, Tipo III), apresenta alta resistência a sulfato.
- Classe D: Utilizado em profundidades de 1830 m (6000 in) a 3050 m (10.0000 in) sob condições de pressões e temperaturas de moderadas a altas. Disponível nos tipos de moderada a alta resistência a sulfato.
- Classe E: Utilizado em profundidades de 3050 m (10.000 in) a 4270 m (14.0000 in) sob condições de pressões e temperaturas altas. Disponível nos tipos de moderada a alta resistência a sulfato.
- Classe F: Utilizado em profundidades de 3050 m (10.000 in) a 4880 m (16.0000 in) sob condições de pressões e temperaturas extremamente altas. Disponível nos tipos de moderada a alta resistência a sulfato.
- Classes G e H: Utilizados em operações básicas de cimentação de poços de petróleo de revestimentos de superfície até profundidade de 2440 m (8.000 in), podendo ainda ser utilizado com uma série de aditivos químicos como aceleradores e retardadores de modo a contemplar uma série de aplicações distintas a depender da profundidade e temperatura. Por isso são as mais utilizadas atualmente na indústria do petróleo, inclusive no Brasil.

1.4 Aditivos

Os aditivos têm um papel importante no processo de cimentação, pois são estes os responsáveis pelas modificações nas propriedades físico-químicas das pastas, tornando-as

adaptáveis a cada fase da cimentação. Como exemplo, THOMAS *et al.*(2001) cita algumas das funções dos aditivos:

- **Acelerador de pega** – visam diminuir o tempo de espessamento e aumentar a resistência compressiva inicial da pasta. CaCl_2 (0,5-2%)/NaCl (até 6%);
- **Retardadores de pega** – aumentam o tempo de espessamento, mantendo a fluidez em temperaturas e pressões elevadas. Lignossulfonatos e seus derivados, ácidos orgânicos, derivados de celulose e glicose;
- **Estendedores** – Reduzem a densidade, aumentando o rendimento. Argilas (bentonita, atapulgita, etc.), silicato de sódio;
- **Redutores de fricção (ou dispersantes)** – Eliminam a interação entre as partículas, liberando a água trapeada entre os grãos, o que diminui a viscosidade aparente da pasta, possibilitando o bombeio com menor perda de carga;
- **Controladores de filtrado** – Atuam reduzindo a permeabilidade do reboco de cimento. Polímeros derivados da celulose e polímeros sintéticos.

1.5 Equipamentos da cimentação

Neste tópico são apresentados equipamentos utilizados no transporte, preparo e injeção da pasta de cimento.

1.5.1 Unidades de cimentação

Montadas em caminhões para operações em terra ou sobre *skids* em sondas marítimas, as unidades de cimentação (Figura 2) são responsáveis pelas dosagens de cimento, água e aditivos, além de homogeneizar a pasta até que suas propriedades estejam de acordo com padrões pré-estabelecidos e se possa então liberá-la para bombeio.



Figura 2: Unidade de cimentação (CAMPOS *et al.*, 2002).

1.5.2 Cabeça de cimentação

A cabeça de cimentação, de maneira simplificada, apresentada na Figura 3, é conectada no topo da coluna e funciona como uma válvula que regula a sequência de entrada dos fluidos (fluido de perfuração, colchão lavador e pasta de cimento) e dos tampões de borracha que separam a pasta de cimento do fluido de perfuração e colchão lavador.

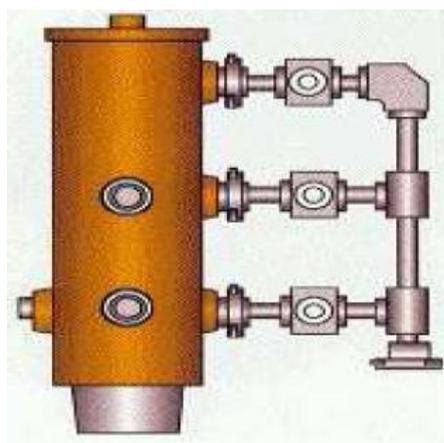


Figura 3: Cabeça de cimentação, adaptado de CAMPOS *et al.*(2002).

1.5.3 Sapatas

As sapatas, Figura 4, servem de guia na introdução do revestimento no poço, sendo colocada em sua extremidade. Podem ainda receber em seu interior um mecanismo de

vedação, para evitar que a pasta, retorne ao interior do revestimento após seu deslocamento. Este mecanismo de vedação pode ser flutuante ou de assento.

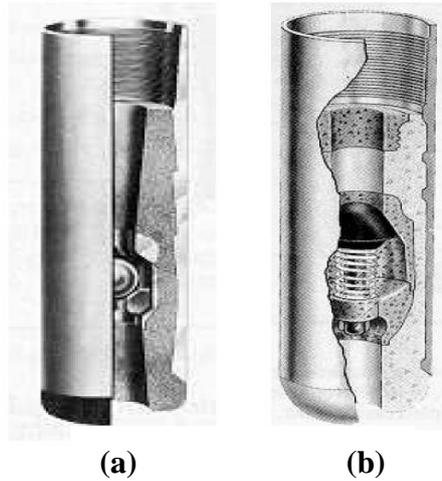


Figura 4: Ilustrações de sapatas, (a) sapatas flutuante, (b) sapatas de assento cônico, conhecidas como *poppet*, adaptado de CAMPOS *et al.* (2002).

1.5.4 Colar

Além de exercerem o papel de uma união entre os dutos de revestimento, os colares, Figura 5, são posicionados entre alguns dutos superiores a sapata, em pontos estratégicos e de acordo com a área que se deseja cimentar. Podem possuir em seu interior mecanismos de vedação similares aos da sapata e servem ainda para retenção dos tampões ou plugs.

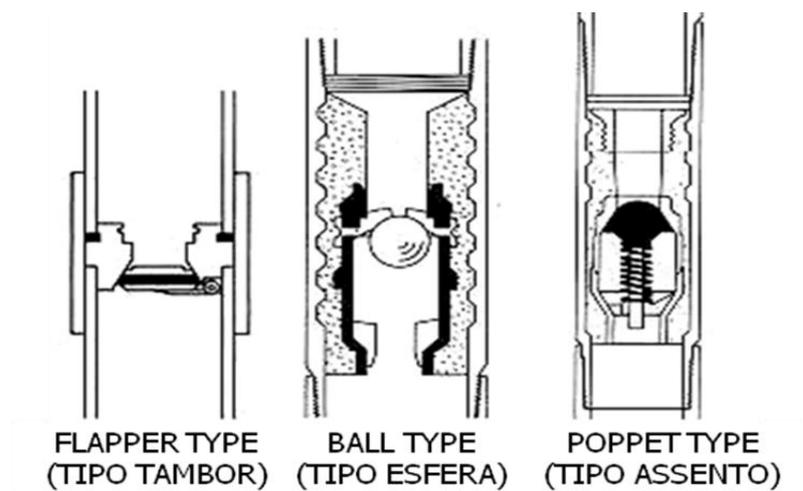


Figura 5: Colares, adaptado de CAMPOS *et al.*(2002).

1.5.5 Tampão ou *plug* de fundo

Liberado pela cabeça de cimentação, à frente da pasta, os tampões de fundo, Figura 6, servem para evitar a contaminação da pasta e efetuar a raspagem de incrustações (resíduos de fluidos de perfuração), na parede interna do revestimento. Por possuírem um núcleo de baixa resistência mecânica, ao se chocarem com o colar, a pressão de bombeio é aumentada e ocorre a ruptura de seu núcleo, seguida pelo escoamento da pasta em seu interior.

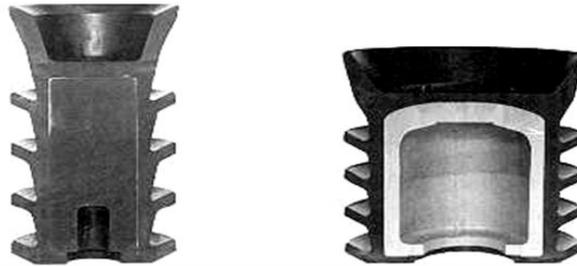


Figura 6: Tampões de fundo, adaptado de CAMPOS *et al.* (2002).

1.5.6 Tampão ou plug de topo

Assim como os tampões de fundo, o de topo apresentado em Figura 7 é liberado pela cabeça de cimentação, no entanto, é inserido imediatamente após a pasta e diferente do plug de fundo, seu núcleo possui alta resistência mecânica e ao se chocarem com o colar, a pressão de bombeio é aumentada e este aumento indica para a operação, o término do escoamento da pasta.



Figura 7: Tampão de topo, adaptado de CAMPOS *et al.* (2002).

1.5.7 Centralizadores

Apresentados na Figura 8, os centralizadores são fixados externamente ao revestimento, estes tem a finalidade, como o próprio nome indica, de centralizar a coluna de revestimento fazendo com que o duto seja mantido concêntrico a parede da formação rochosa e a cimentação ocorra “por igual”, sem regiões fragilizadas pela pequena espessura de pasta.



Figura 8: Centralizadores, adaptado de CAMPOS *et al.* (2002).

1.5.8 Revestimento

Juntamente com a pasta de cimento os dutos de revestimento, Figura 9, são responsáveis pela resistência mecânica do poço, além de impedir a migração de fluidos entre a formação e o interior do revestimento. Os revestimentos são ainda responsáveis pela suportação de pressões externas e internas.



Figura 9: Revestimentos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

No processo de cimentação de poços, fatores como comportamento reológico, transição dos regimes de escoamento, correlações de fator de atrito e de diâmetro hidráulico, são essenciais para o cálculo da perda de carga e determinação da velocidade de escoamento pasta. Neste capítulo estes fatores são abordados a partir de estudos da literatura.

2.1 Análises físico-químicas

Durante os processos de preparo e aplicação das pastas de cimento é necessário o completo conhecimento de suas propriedades e características desejáveis durante a aplicação, para tal CAMPOS *et al.* (2002) descrevem algumas análises físico-químicas que são realizadas em pastas de cimento, sendo estas:

- ✓ Peso específico;
- ✓ Perda de filtrado;
- ✓ Tempo de espessamento;
- ✓ Migração de gás;
- ✓ Análise reológica;
- ✓ Ataque ácido;
- ✓ Permeabilidade;
- ✓ Resistência à compressão.

2.2 Classificação dos fluidos

Os fluidos podem ser classificados quanto à variação de suas propriedades reológicas em três classes:

- ✓ Independentes do tempo;
- ✓ Dependentes do tempo;
- ✓ Viscoelásticos.

2.2.1 Independentes do tempo

Os fluidos independentes do tempo são os que mantêm a viscosidade aparente constante sem depender do tempo de exposição a certa taxa de cisalhamento.

FOX *et al.* (1998) ilustram o comportamento reológico, destes fluidos, através da Figura 10 e definem subclasses dos fluidos independentes do tempo como sendo:

- ✓ Newtonianos – cuja viscosidade aparente se mantém constante com o aumento ou diminuição da taxa de cisalhamento;
- ✓ Pseudoplásticos - viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento;
- ✓ Dilatantes - viscosidade aparente aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento;
- ✓ Bingham - possuem tensão mínima de escoamento e posterior relação linear entre a tensão e taxa de deformação.

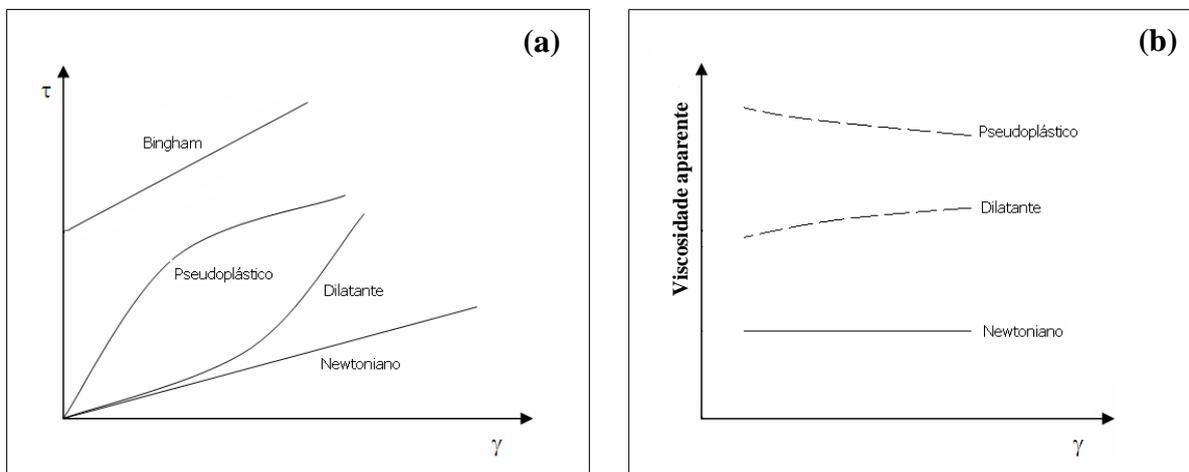


Figura 10: (a) Tensão de cisalhamento, τ , e (b) Viscosidade aparente, η , como função da taxa de deformação, γ , para escoamento unidimensional, adaptado de FOX *et al.* (1998).

2.2.2 Dependentes do tempo.

SILVA *et al.* (1989) definem os fluidos dependentes do tempo como fluidos que apresentam viscosidade aparente dependente do tempo de aplicação da taxa de cisalhamento, como mostrado na Figura 11, e ainda subdividem este grupo em :

- ✓ Tixotrópicos - fluidos que apresentam uma diminuição da viscosidade aparente com o tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante até alcançar o equilíbrio;
- ✓ Reopéticos - fluidos que apresentam um aumento da viscosidade aparente com o tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante.

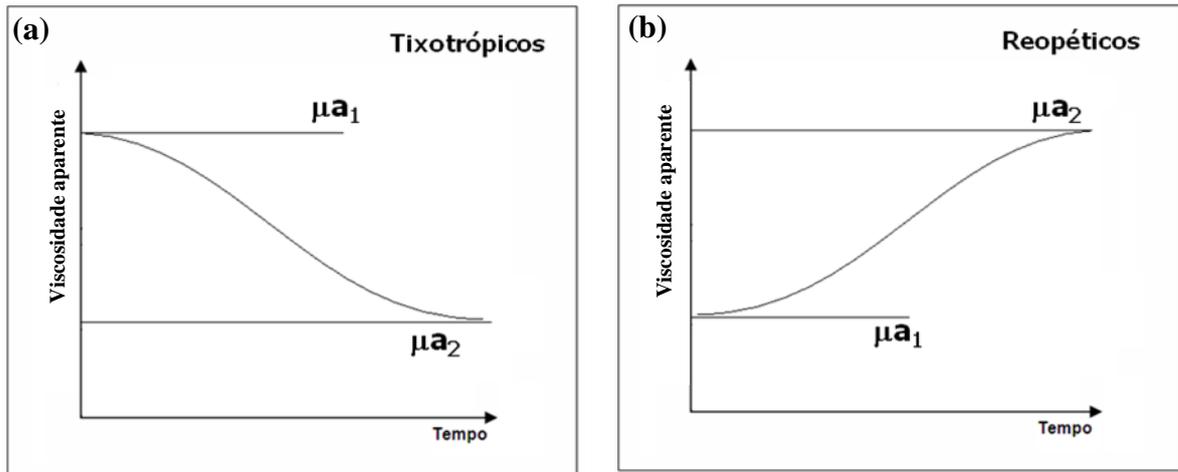


Figura 11: (a) Queda da viscosidade aparente (tixotrópicos), e (b) Aumento da viscosidade aparente (reopéticos), durante cisalhamento constante ao longo do tempo, adaptado de SILVA *et al.* (1989).

2.2.3 Viscoelásticos

FOX *et al.* (1998) descreve os viscoelásticos como fluidos que após serem deformados, retornam parcialmente a sua forma original, quando cessada a tensão aplicada.

ROCHA (2008) acrescenta que nestes fluidos, uma parte da energia recebida na sua deformação é armazenada, como nos sólidos elásticos, e a outra parte é dissipada, como nos fluidos puramente viscosos (independentes do tempo).

2.3 Modelos reológicos

A pasta 1, formulada pelo CENPES/PETROBRAS, analisada neste trabalho, possui características de fluido não-Newtoniano (que não seguem a “lei” de Newton da viscosidade) e em condições onde não ocorra uma perda significativa no teor de água, ou não seja iniciada a cura ou pega deste material, o mesmo pode ser considerado como independente do tempo.

Nesta pesquisa além do modelo de Newton da viscosidade, utilizado na calibração da unidade com água, utilizou-se os modelos de Bingham e *power law* que vêm sendo aplicados com sucesso em processos de cimentação, SILVA *et al.* (1989).

NELSON (1990) relata que os modelos de Bingham e *power law* são os mais usuais ou populares, no estudo de pastas de cimento. Além destes, optou-se por um modelo mais robusto que leva em conta, características dos dois modelos anteriormente citados que é o modelo de Herschell-Buckley. A seguir são apresentados e discutidos os modelos reológicos, utilizados neste trabalho.

2.3.1 Modelo de Newton da viscosidade

BIRD *et al.* (2004), através da análise da Figura 12, descrevem o desenvolvimento do perfil laminar permanente e linear de velocidades para um fluido contido entre duas placas paralelas, mostrando que, para os fluidos Newtonianos a força cisalhante por unidade de área é proporcional ao negativo do gradiente de velocidade e esta relação é chamada de “Lei” de Newton da viscosidade de acordo com Equação 1.

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dV_x}{dy} \quad (1)$$

Onde:

τ – tensão de cisalhamento (Pa);

(dV_x/dy) ou γ - taxa de deformação (s^{-1});

μ – viscosidade dinâmica (Pa.s).

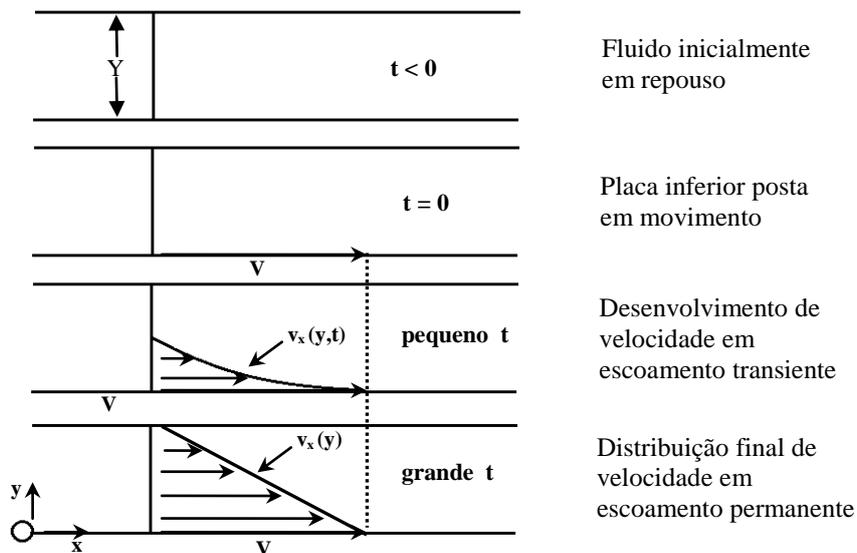


Figura 12: Escoamento de fluido Newtoniano entre placas, adaptado de BIRD *et al.* (2004).

2.3.2 Modelo de potência

NELSON (1990) descreve o modelo da potência ou *power law* como uma relação de potência entre tensão cisalhante e a taxa de deformação, sendo esta relação ajustada a dois parâmetros (k e n) conforme mostrado em Equação 2.

$$\tau = k\gamma^n \quad (2)$$

Onde:

τ – tensão de cisalhamento (Pa);

γ - taxa de deformação (s^{-n});

k – índice de consistência ($Pa.s^n$);

n – índice de comportamento (adim.).

Os parâmetros do modelo são determinados pela linearização da Equação 2. Com dados de tensão e taxa de deformação, determinados através da análise viscosimétrica é possível, através da análise gráfica, apresentada em Figura 13, determinar os parâmetros k e n .

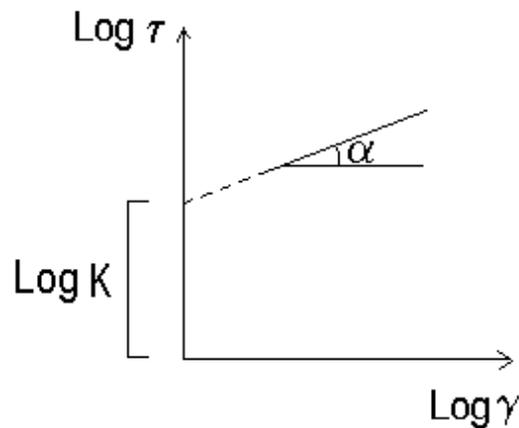


Figura 13: Ilustração de reograma do modelo da potência

2.3.3 Modelo de Bingham

SILVA *et al.* (1989) descrevem o modelo de Bingham como uma correlação linear entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação, mediante a ajuste de dois parâmetros, limite de escoamento (LE) e viscosidade plástica que podem ser vistos em Equação 3.

$$\tau = VP_B \gamma + LE_B \quad (3)$$

Onde:

τ – tensão de cisalhamento (Pa);

γ - taxa de deformação (s^{-1});

LE_B ou τ_0 - Limite de escoamento ou tensão crítica (Pa);

VP_B ou μ_p - Viscosidade plástica (Pa.s).

Os parâmetros do modelo de Bingham podem ser determinados através de reogramas similares ao esquematizado em Figura 14, onde são plotados dados de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação, determinados através da análise viscosimétrica.

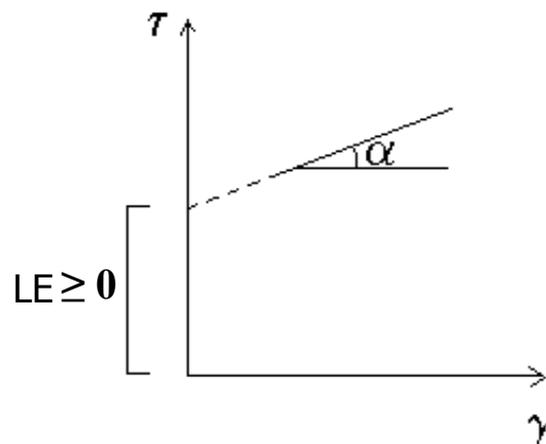


Figura 14: Ilustração de reograma modelo de Bingham

MIRANDA *et al.* (2009) em sua pesquisa sobre os aspectos relevantes em reologia de pastas de cimento com alto teor de sólidos, destacam que em geral se utiliza o modelo de Bingham na caracterização das pastas de cimento. Estes mesmos autores relacionam os termos deste modelo com a resistência fornecida pela pasta ao cisalhamento, onde parte da energia é dissipada na movimentação de fluidos, entre as partículas sólidas, e a outra no atrito entre os grãos, conforme ilustrado na Figura 15.

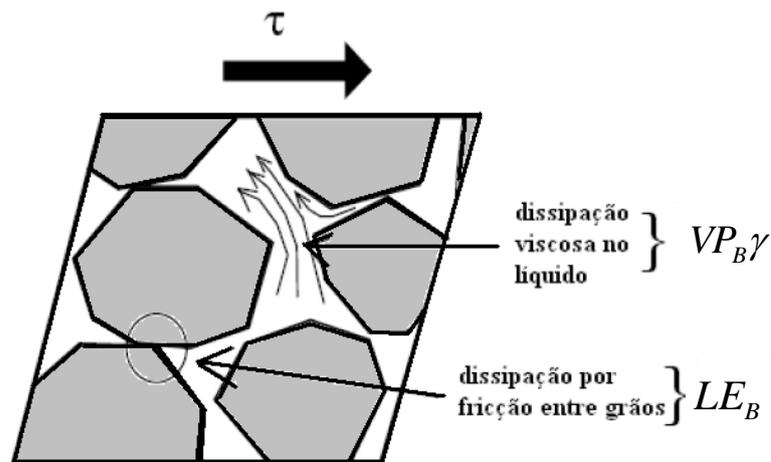


Figura 15: Contribuição da fase sólida e líquida à resistência ao cisalhamento, adaptado de MIRANDA *et al.* (2009).

2.3.4 Modelo de Herschell-Buckley

O modelo de Herschell-Buckley apresentado em Equação 4, leva em conta características dos modelos da potência e de Bingham, pois a tensão varia potencialmente com o parâmetro n_{HB} e o modelo apresenta um limite de escoamento LE_{HB} .

$$\tau = k_{HB} \gamma^{n_{HB}} + LE_{HB} \quad (4)$$

Onde:

τ – tensão de cisalhamento (Pa);

γ - taxa de deformação (s^{-n});

k_{HB} – índice de consistência ($Pa \cdot s^n$);

LE_{HB} ou τ_0 – limite de escoamento ou tensão crítica (Pa);

n_{HB} - índice de comportamento (adim.).

A Figura 16 apresenta um reograma típico deste modelo com três curvas possíveis. Na primeira curva em $n_{HB} < 1$ o fluido possui características pseudoplásticas, ou seja, sua viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, já na segunda curva ($n_{HB} > 1$), ocorre o inverso e neste caso o fluido é classificado como dilatante. Para $n_{HB} = 1$ o fluido é equivalente ao de Bingham, dependendo de uma tensão mínima de escoamento e posterior relação linear entre a tensão e taxa de deformação.

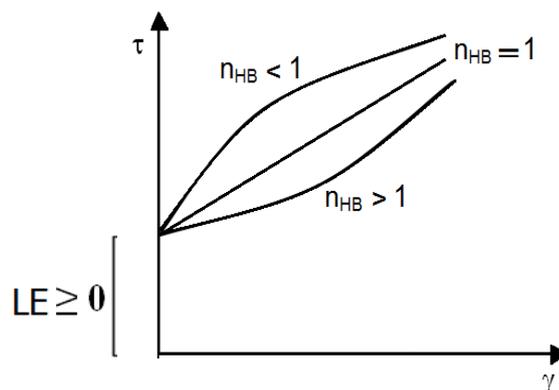


Figura 16: Ilustração de reogramas típicos do modelo de Herschell-Buckley.

O modelo de Herschell-Buckley, neste trabalho, teve seus parâmetros definidos através da aplicação do método dos mínimos quadrados com utilização do programa Microsoft Excel.

2.4 Regimes de escoamento

Um fluido é dito em regime laminar quando o escoamento é ordenado, ou seja, caracterizado pelo movimento das partículas fluidas em camadas ordenadas, ou lâminas. Na transição, inicia-se o “descolamento” dessas partículas fluidas, de suas camadas ordenadas, em direção a um movimento aleatório e desordenado. No regime turbulento, as partículas fluidas rapidamente se misturam enquanto se movimentam ao longo do escoamento, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades.

Para caracterização dos regimes é utilizado um adimensional conhecido como número de Reynolds, que relaciona as forças inerciais com as viscosas, presentes no escoamento de um fluido.

FOX *et al.* (1998) relatam que para escoamento em dutos de fluidos Newtonianos, geralmente a região laminar é compreendida em valores de Reynolds menores ou iguais a 2300, e para valores maiores o regime seria turbulento.

2.4.1 Regimes de escoamento na cimentação

CAMPOS *et al.* (2002) descreveram que em testes de campo e em simuladores, têm-se observado que as melhores eficiências de remoção da lama são alcançadas quando a pasta de cimento é deslocada a altas vazões e a melhor eficiência é obtida em fluxo turbulento.

SILVA *et al.* (1989) ressaltam que apesar da maior eficiência no processo de cimentação ser obtida no regime turbulento (onde se há uma maior remoção do reboco de lama deixado na parede do poço), é necessário que este regime esteja próximo a transição para preservar a formação geológica.

Estes últimos informam ainda que frente a formações fragilizadas, tem sido uma prática bem sucedida o deslocamento das pastas no regime laminar de baixas vazões.

2.4.2 Determinação experimental do regime de escoamento

SILVA *et al.* (1989) descrevem que a região de transição pode ser obtida experimentalmente em qualquer sistema físico que permita medir, com precisão suficiente, o diferencial de pressão (ΔP) e a vazão de escoamento (Q). A transição entre os regimes é então definida através da análise na alteração da inclinação das curvas de gráficos experimentais de vazão versus queda de pressão, como mostram as Figuras 17 e 18. Nestas figuras, Q_L define o final do regime laminar e Q_T o início do turbulento. A determinação experimental da vazão crítica (Q_L), e posteriormente, com esta, o número de Reynolds Crítico, foi feita pela definição do ponto de intercessão das equações de reta definidas nos patamares laminar-transitório (Figura 17) ou laminar-turbulento (Figura 18).

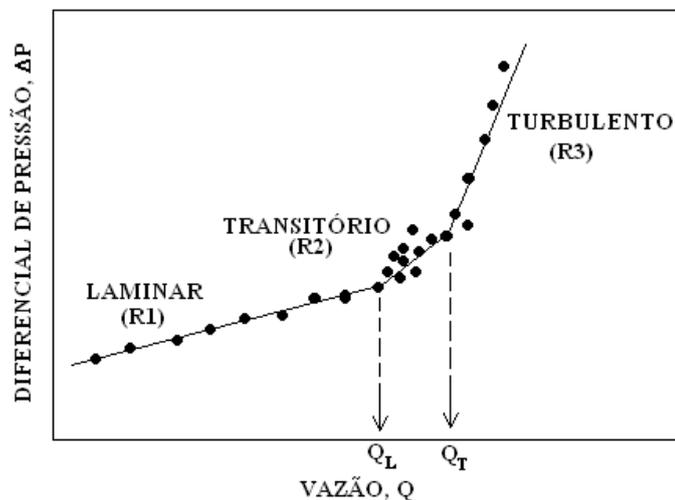


Figura 17: Avaliação da transição dos regimes de escoamento bem delineada.

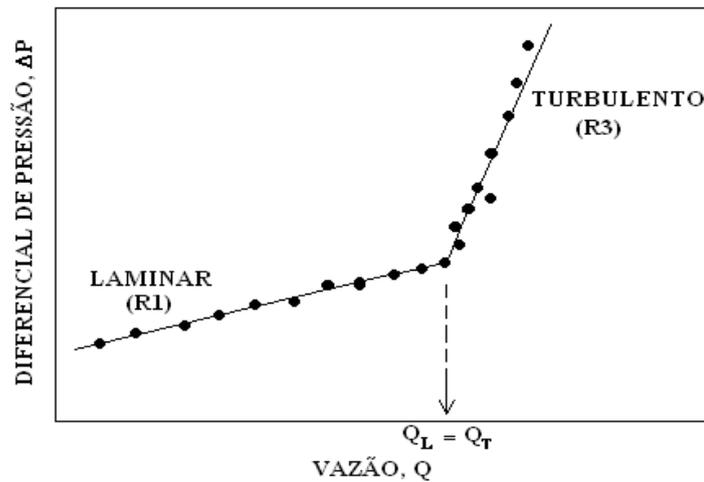


Figura 18: Avaliação da transição dos regimes de escoamento indefinida.

2.4.3 Correlações para estimativas de Reynolds e velocidade críticos

Para os fluidos não-Newtonianos o número de Reynolds e velocidade críticos variarão de acordo com as propriedades físicas e reológicas do fluido. Quando não é possível a determinação da transição do regime através da análise experimental, é necessário o uso de correlações empíricas.

RYAN E JONHSON (1959) através de argumentos físicos sugeriram o uso de um parâmetro de estabilidade local, para a obtenção de um critério geral na caracterização da transição do regime de escoamento, através do qual é possível obter a Equação 5, para fluidos que seguem o modelo da potência. Na Equação 5, n é o índice de comportamento do modelo da potência e Re_c é o número de Reynolds crítico.

$$Re_c = \frac{6464n}{(1 + 3n)^2 (2 + n)^{\frac{(2+n)}{(1+n)}}} \quad (5)$$

CRAFT (1962) e pouco tempo depois, THOMAS (1963), citados em GONÇALVES (2008) e em BRAGA (2009), propuseram o cálculo da velocidade crítica (v_c), apresentadas nas Equações 6 e 7 (respectivamente), para caracterizar os regimes de escoamento de fluidos não-Newtonianos com limite de escoamento. Nestas equações VP é a viscosidade plástica do fluido, LE o limite de escoamento, D o diâmetro do duto de escoamento ou o diâmetro hidráulico para escoamento em dutos anulares, ρ é a densidade do fluido e Re_{CN} é o número de Reynolds crítico Newtoniano, que neste trabalho foi assumido como 2300.

$$v_c = \frac{1,078VP + 1,078\sqrt{VP^2 + 12,34D^2LE\rho}}{\rho D} \quad (6)$$

$$v_c = \sqrt{\frac{Re_{cN}LE}{6\rho}} \quad (7)$$

Em sequência ao trabalho de RYAN E JONHSON (1959), HANKS (1963) propôs um parâmetro de estabilidade que é independente da geometria do sistema de fluxo, possibilitando como resultado a obtenção da Equação 8, que pode ser aplicada em fluidos com limite de escoamento (LE), como os descritos pelos modelos reológicos de Bingham e Herschell-Buckley. Na equação 8, x_c é o parâmetro de Hanks e He o número de Hedstron

$$Re_c = \frac{He}{8x_c} \left(1 - \frac{4}{3}x_c + \frac{1}{3}x_c^4 \right) \quad (8)$$

Onde:

$$\frac{x_c}{(1-x_c)^3} = \frac{He}{16800} \quad (9)$$

$$He = \frac{D^2\rho LE}{VP^2} \quad (10)$$

MISHRA E TRIPATHI (1971) desenvolveram a Equação 11, aplicável a fluidos que seguem o modelo da potência, tendo como base dados experimentais disponíveis na literatura e um critério de estabilidade de fluxo onde a relação entre energia cinética média por unidade de volume do fluido e a tensão de cisalhamento na parede, permanece a mesma durante a transição.

$$\text{Re}_c = 2100 \frac{(4n + 2)(5n + 3)}{3(3n + 1)^2} \quad (11)$$

Todas as correlações, de transição de regimes, citadas neste trabalho, foram avaliadas.

2.5 Balanço de energia mecânica no escoamento de fluidos

FOX *et al.* (1998) apresentam a equação de Bernoulli modificada (Equação 12) que representa o balanço de energia mecânica no escoamento isotérmico e estacionário de um fluido incompressível entre dois pontos quaisquer, neste caso 1 e 2, onde não há fornecimento de energia.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\langle v_1 \rangle^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\langle v_2 \rangle^2}{2g} + z_2 + h_t \quad (12)$$

Onde P_1 e P_2 são as pressões nos pontos 1 e 2, $\langle v_1 \rangle$ e $\langle v_2 \rangle$ as velocidades médias nos pontos 1 e 2, z_1 e z_2 as alturas em relação ao eixo de coordenadas arbitrado, h_t é o somatório das perdas de carga distribuída h_d e localizada h_s .

As perdas de carga distribuídas (h_d) consistem nas perdas de cargas ocasionadas pelo atrito do fluido ao longo de todo trecho reto e as perdas de carga localizada (h_s) são causadas quando há acidentes no sistema como joelhos, válvulas, reduções entre outros.

Geralmente, este último tipo de perda é devido à sobreposição de dois ou mais efeitos como mudança na direção ou na área de escoamento, FOX *et al.* (1998).

A perda de carga distribuída pode ser calculada através da Equação 13, onde L é o comprimento da tubulação, D é o diâmetro do tubo ou diâmetro hidráulico no caso de escoamento em regiões anulares, $\langle v \rangle$ é a velocidade média do fluido e f é um adimensional conhecido como fator de atrito de Fanning. É comum encontrar outras definições de fator de atrito, como a de Darcy (f_d) que se relaciona com Fanning através da relação $4f=f_d$.

$$h_d = 4f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\langle v \rangle^2}{2g} \quad (13)$$

Experimentalmente com os dados de pressão entre dois pontos de um trecho reto, de mesma área, sem a presença de acidentes e sem o fornecimento ou retirada de energia no trecho, o fator de atrito experimental, pode ser determinado pela Equação 14 que é oriunda da substituição da Equação 13 em 12, feitas as considerações citadas.

$$f = \frac{\Delta PD}{2 \rho L \langle v \rangle^2} \quad (14)$$

2.6 Equações para o cálculo do fator de atrito

Neste capítulo são apresentadas equações propostas para o cálculo do fator de atrito de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos nos regimes de escoamento laminar e turbulento.

2.6.1 Fluidos Newtonianos

Para fluidos Newtonianos, BIRD *et al.* (2004) apresentam as Equações 15 e 16 que são respectivamente a equação do fator de atrito de Fanning, aplicada no regime laminar e a equação de Blasius, aplicada no regime turbulento para números de Reynolds entre $2,1 \times 10^3$ e 10^5 .

$$f = \frac{16}{Re} \quad (15)$$

$$f = \frac{0,0791}{Re^{0,25}} \quad (16)$$

2.6.2 Fluidos não-Newtonianos independentes do tempo

Para fluidos não-Newtonianos, independentes do tempo, a viscosidade aparente varia com a taxa de deformação, e cada modelo reológico terá equações específicas para o cálculo do fator de atrito.

Para o cálculo do fator de atrito, no **regime laminar** utilizando o modelo da potência, a Equação 17, é dependente apenas do número de Reynolds desenvolvido para seu modelo (Re_p) e este é função do diâmetro do tubo circular D (em escoamentos anulares usa-se o

diâmetro hidráulico), densidade do fluido ρ , parâmetros reológicos k e n e velocidade média do escoamento $\langle v \rangle$.

$$f = \frac{16}{\text{Re}_p} \quad (17)$$

Onde:

$$\text{Re}_p = \frac{D\langle v \rangle\rho}{k\left(\frac{8v}{D}\right)^{n-1}\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n} \quad (18)$$

A Equação 19, para o fator de atrito do modelo de Bingham, no regime laminar é uma função do número de Reynolds (Re_B) e do número de Hedstrom (He_B), que são adimensionais do modelo. O Re_B é calculado de modo semelhante ao de um fluido Newtoniano, sendo função do diâmetro do tubo D (em escoamentos anulares usa-se o diâmetro hidráulico), velocidade média do escoamento $\langle v \rangle$, densidade do fluido ρ e viscosidade plástica VP_B . O He_B é o adimensional que leva em consideração o limite de escoamento do fluido LE_B .

$$f = \frac{16}{\text{Re}_B} \left[1 + \frac{\text{He}_B}{6\text{Re}_B} - \frac{\text{He}_B^4}{3f^3\text{Re}_B^7} \right] \quad (19)$$

Onde:

$$\text{Re}_B = \frac{D\langle v \rangle\rho}{\text{VP}_B} \quad (20)$$

$$\text{He}_B = \frac{D^2\rho\text{LE}_B}{\text{VP}_B^2} \quad (21)$$

O modelo de Herschell-Buckley é mais complexo que os anteriores, pois o fator de atrito depende, além dos adimensionais He_{HB} e Re_{HB} , do parâmetro de tensão na parede τ_w . O número de Reynolds é calculado a partir do diâmetro do tubo D (em escoamentos anulares usa-se o diâmetro hidráulico), densidade do fluido ρ , velocidade média do escoamento $\langle v \rangle$ e dos parâmetros reológicos k_{HB} e n_{HB} . O He_{HB} é obtido a partir do limite de escoamento do fluido LE_{HB} . O parâmetro τ_w é posto como função do limite de escoamento LE_{HB} , dos adimensionais He_{HB} e Re_{HB} e do próprio fator de atrito, tornando a Equação 22 implícita.

$$f = \frac{2He_{HB}}{Re_{HB}^2} + \frac{16}{Re_{HB}} [A]^{-n_{HB}} \quad (22)$$

Onde:

$$[A] = \left[\left(1 - \frac{LE_{HB}}{\tau_w} \right)^3 + \frac{2(3n_{HB} + 1)}{(2n_{HB} + 1)} \left(\frac{LE_{HB}}{\tau_w} \right) \left(1 - \frac{LE_{HB}}{\tau_w} \right)^2 + \frac{(3n_{HB} + 1)}{(n_{HB} + 1)} \left(\frac{LE_{HB}}{\tau_w} \right)^2 \left(1 - \frac{LE_{HB}}{\tau_w} \right) \right] \quad (23)$$

$$Re_{HB} = \frac{8D^{n_{HB}} \langle v \rangle^{2-n_{HB}} \rho}{k_{HB} [2(3n_{HB} + 1)/n_{HB}]^{n_{HB}}} \quad (24)$$

$$\frac{LE_{HB}}{\tau_w} = 2 \frac{He_{HB}}{f Re_{HB}^2} \quad (25)$$

Para fluidos não-Newtonianos, independentes do tempo, no **regime turbulento**, as correlações propostas são funções de diversas variáveis, dentre elas, o número de **Reynolds** e o número de **Hedstrom**, os quais devem ser aplicados de acordo com o modelo reológico escolhido ou originalmente proposto para cada correlação de fator de atrito. Dentre as correlações para o cálculo do fator de atrito tem-se a Equação 26, que foi desenvolvida por TOMITA (1959), no estudo de fluidos de Bingham em dutos circulares de diferentes diâmetros.

$$f = \frac{\lambda}{4} \quad (26)$$

Onde:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(\text{Re} \frac{\sqrt{\lambda}}{2} \right) - 0,2 \quad (27)$$

CHURCHILL (1977) propôs através da combinação de equações existentes na literatura a Equação 28 para o cálculo do fator de atrito nos três regimes de escoamento, para tubos lisos e rugosos com dependência do número de Reynolds e da rugosidade relativa.

$$f = 2 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (28)$$

Onde:

$$A = \left[2,457 \ln \frac{1}{\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \frac{\varepsilon}{D}} \right]^{16} \quad (29)$$

$$B = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16} \quad (30)$$

ELLIS e GEORGE (1977), citado em GONÇALVES (2008) e em BRAGA (2009), propuseram a Equação 31 para o cálculo do fator de atrito no regime turbulento com dependência apenas no número de Reynolds. SILVA *et al.* (1989) relatam que em seus experimentos com escoamento de pastas de cimento, a Equação 31, apesar de não apresentar em sua expressão parâmetros reológicos, foi uma das equações que apresentou melhor resultado na estimativa da perda de carga no regime turbulento.

$$f = 0,00454 + 0,645\text{Re}^{-0,70} \quad (31)$$

DARBY e MELSON (1981) desenvolveram uma expressão, Equação 32, aplicável aos três regimes de escoamento, para estimar o fator de atrito de fluidos que seguem o modelo de Bingham. No trabalho de DARBY e MELSON (1981), a Equação 32 foi comparada com resultados experimentais obtidos por HANKS e DADIA (1971), obtendo boa concordância entre os resultados experimentais e calculados.

$$f = (f_L^m + f_T^m)^{1/m} \quad (32)$$

Onde:

$$f_L = \frac{16}{\text{Re}} \left[1 + \frac{\text{He}}{6\text{Re}} - \frac{\text{He}^4}{3f_L^3 \text{Re}^7} \right] \quad (33)$$

$$f_T = \frac{10^a}{\text{Re}^{0,193}} \quad (34)$$

$$m = 1,7 + \frac{40000}{\text{Re}} \quad (35)$$

$$a = -1,378 \left[1 + 0,146 \exp(-2,9 \times 10^{-5} \text{He}) \right] \quad (36)$$

DARBY *et. al.* (1992) propuseram alterações no parâmetro a , da equação original de DARBY e MELSON (1981), para melhorar a previsão do fator de atrito em fluxo turbulento, chegando para este parâmetro na Equação 37.

$$a = -1,47 \left[1 + 0,146 \exp(-2,9 \times 10^{-5} \text{He}) \right] \quad (37)$$

GOMES (1987), a partir dos valores de fator de atrito, obtidos pelas equações de Dodge and Metzner, Ostwald de Waele e Frank Schuh, propôs pelo método dos mínimos quadrados, uma forma explícita ou em alguns casos formas simplificadas para o cálculo do fator de atrito e estas são apresentadas, respectivamente, pelas Equações de 38 a 40. SILVA *et al.* (1989) relatam que estas expressões mostraram desempenho satisfatório na determinação da perda de carga, no regime turbulento de pastas de cimento pseudoplásticas .

$$f = 0,060n^{0,462}Re^{-0,223} \quad (38)$$

$$f = 0,069n^{0,666}Re^{-0,235} \quad (39)$$

$$f = 0,110n^{0,616}Re^{-0,287} \quad (40)$$

2.7 Correlações de diâmetro hidráulico para dutos anulares

As correlações de diâmetro hidráulico ou equivalente têm como finalidade gerar fatores geométricos capazes de representar o duto anular como um duto circular de maneira a permitir o uso das, já bem estabelecidas, equações da mecânica dos fluidos.

BOURGOYNE *et al.* (1991), comenta sobre algumas correlações propostas para o cálculo do diâmetro equivalente ou diâmetro hidráulico de dutos anulares, dentre elas a Equação 41, onde considera-se a região anular, formada por dois cilindros, como uma fenda, formada por duas placas planas. Essa teoria é conhecida como *slot* e suas considerações são válidas quando a razão dos diâmetros interno e externo é maior que 0,3.

$$D_{H1} = 0,816(D_2 - D_1) \quad (41)$$

Uma segunda correlação citada por BOURGOYNE *et al.* (1991) foi desenvolvida analiticamente através da teoria do raio hidráulico, e é determinada pela razão entre a área da seção transversal sobre o perímetro molhado da região anular, que é equivalente a quatro vezes o valor do raio hidráulico, conforme mostrado em Equação 42.

$$D_{H2} = 4R_H = (D_2 - D_1) \quad (42)$$

Uma nova correlação vem sendo desenvolvida nesta pesquisa. A base matemática desta correlação é sedimentada em duas equações. Na primeira delas, para o **regime laminar** do escoamento de fluidos Newtonianos (Reynolds menores que 2100), considera-se o fator de atrito experimental (Equação 14), aproximadamente igual ao fator de atrito laminar de Fanning (Equação 15), onde se simplificando chega-se a Equação 43.

$$Q = \frac{DH_{\text{exp}}^2}{(32 \mu LA^{-1})} \Delta P \quad (43)$$

A segunda proposta é para o **regime turbulento** do escoamento de fluidos Newtonianos (Reynolds de 2100 a 10^5). O fator de atrito experimental (Equação 14) é considerado aproximadamente igual ao fator de atrito de Blasius (Equação 16), onde simplificando se chega a Equação 44.

$$Q^{1,75} = \frac{DH_{\text{exp}}^{1,25}}{(0,1582 \mu^{0,25} LA^{-1,75} \rho^{0,75})} \Delta P \quad (44)$$

Onde μ é a viscosidade da água (kg/m.s), ρ a densidade média da água (kg/m³), L a distância entre as tomadas de pressão (m), A a área do anular (m²), DH_{exp} ou DH_3 é o diâmetro hidráulico experimental (m), Q a vazão volumétrica (m³/s) e ΔP a variação de pressão (Pa).

Dados experimentais de variação de pressão e vazão, do escoamento de água à 25°C, obtidos na unidade experimental, e extraídos de BRAGA (2009), foram utilizados para construção de gráficos de ΔP versus Q, para o **regime laminar**, e ΔP versus $Q^{1,75}$ para o **regime turbulento**. Através da análise do coeficiente angular das retas formadas nestes gráficos, utilizando as Equações 43 e 44, foi possível determinar valores de DH_{exp} que foram utilizados na construção da correlação de diâmetro hidráulico experimental, (Equação 45), onde DH_{exp} é apresentado como DH_3 sendo expresso em metros.

$$D_{H3}(m) = 0,7021(D_2 - D_1) + 0,0014 \quad (45)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foram determinados dados de perda de carga em função da vazão de escoamento. Estes dados foram obtidos em unidade experimental de escoamento de pasta de cimento. Neste capítulo é apresentada a unidade experimental e seus equipamentos, bem como, as técnicas e os métodos utilizados para conduzir o trabalho experimental.

3.1 Descrição da unidade piloto

Para realizar o estudo proposto foi construída uma Unidade de Simulação de Escoamento de Fluidos (USEF), apresentada nas Figuras 19 e 20, que consiste de um sistema que opera em circuito fechado composto de tubos de ferro galvanizado, uma bomba de deslocamento positivo do tipo helicoidal de 25HP de potência da marca GEREMIAS (WEATHERFORD) que é responsável pela circulação do fluido do tanque de armazenagem para todo o sistema com vazões de até 20m³/h e pressões de recalque da ordem de 12kgf/cm².

Através do controle de um inversor de frequência, instalado na bomba, é possível alterar a velocidade de escoamento através do trecho de análise, permitindo o estudo da perda de carga em dutos circulares e regiões anulares, formadas por tubos de aço concêntricos.

Um transdutor de pressão diferencial da marca SMAR modelo LD301D, com selo remoto, fornece a perda de carga em cada arranjo estudado enquanto um medidor de vazão mássica tipo coriólis fabricado pela Metroval, modelo RHM40 fornece as vazões, temperaturas e densidades das pastas durante o escoamento. O tanque de mistura é dotado de sistema de agitação e aquecimento, podendo ainda ser refrigerado por um sistema auxiliar de refrigeração (*Chiller*), fabricado pela empresa Friotec, modelo TF-15 AR, com potência de refrigeração de 15000 kcal/h.

Quatro sistemas foram construídos para avaliação da perda de carga, um duto circular de 1", e anulares concêntricos formados por dutos externos e internos com respectivamente: 2" - 1 1/2", 1 1/2" - 1", 1 1/4" - 3/4".

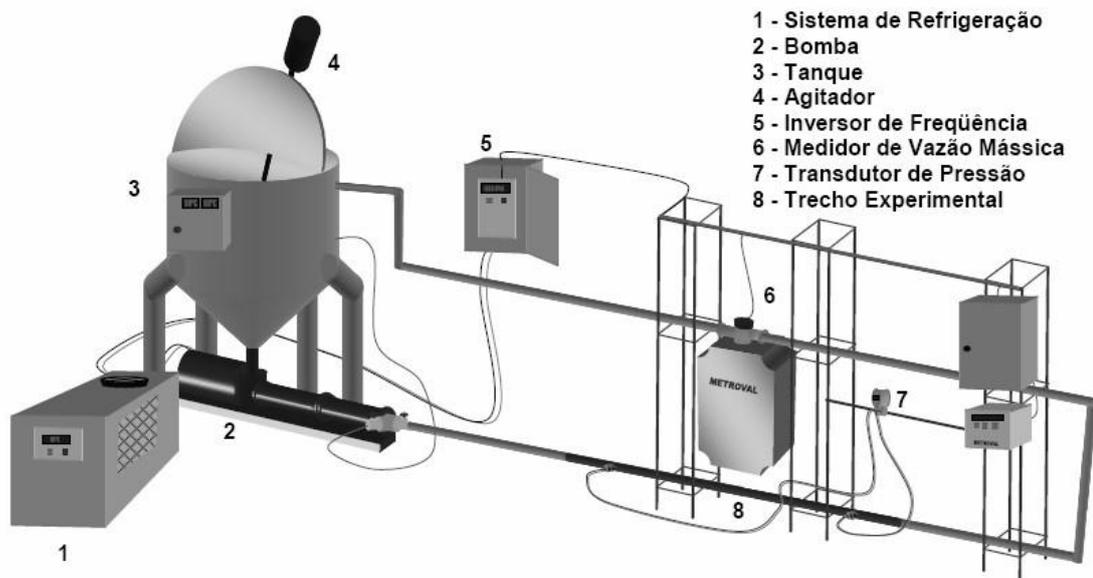


Figura 19: Esquema da unidade de escoamento de pasta



Figura 20: Foto da unidade de simulação de escoamento de fluidos (USEF).

3.1.1 Trechos experimentais

Baseado na similaridade geométrica dos poços, levando-se em consideração as razões entre os diâmetros (ζ), definiu-se 3 arranjos de tubos de aço carbono que possuem razões de diâmetros similares aos arranjos anulares reais (revestimento/poço) e estes são descritos na Tabela 2. Além destes, um duto circular de 1", com diâmetro interno real de 0,02686m, foi utilizado para simular o escoamento circular que ocorre no interior do revestimento dos poços.

Tabela 2: Arranjos de anulares concêntricos escolhidos para o trabalho.

| ANULAR | DIÂMETRO TUBO EXTERNO | | DIÂMETRO DO TUBO INTERNO | | $\zeta = D1/D2$ |
|--------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|
| | NOMINAL (pol) | DIÂMETRO INTERNO REAL (D1) | NOMINAL (pol) | DIÂMETRO EXTERNO REAL (D2) | |
| I | 2" | 0,0539m | 1 1/2" | 0,0483m | 1,12 |
| II | 1 1/2" | 0,0421m | 1" | 0,0337m | 1,24 |
| III | 1 1/4" | 0,0365m | 3/4" | 0,0269m | 1,33 |

Para centralização dos dutos internos nos anulares, foram soldados pontilhetes em forma de cruz conforme apresentado em Figura 21. Nesta figura, pode ser visto ainda o afinamento feito no tubo interno para facilitar a estabilização do regime de escoamento na entrada do fluido no trecho experimental.



Figura 21: Foto demonstrativa da centralização do anular com destaque nos espaçadores e na ponta do tubo interno.

3.1.2 Extensão dos trechos experimentais

Para definição da extensão do trecho experimental, dois fatores foram levados em consideração, o primeiro é o fato de que um maior comprimento geraria uma maior perda de carga e conseqüente dificuldade de bombeio e o segundo, sendo um fator limitante, o comprimento de entrada, a partir do qual o perfil de velocidades torna-se plenamente desenvolvido e a perturbação gerada pelos acidentes de entrada, já não é mais percebida ou sentida.

Buscando trabalhar com o último fator, as literaturas indicam algumas correlações, porém a maioria se refere ao comprimento de entrada em dutos circulares. Na falta de outras equações, considerou-se no lugar do diâmetro das tubulações, o diâmetro equivalente dos anulares. Tomou-se como referência as indicações de DODGE & METZNER (1952), citado em SILVA *et al.* (1985), onde para fluidos não-Newtonianos, um comprimento de entrada maior que 53 vezes o diâmetro da tubulação. Outra indicação, apresentada por FOX *et al.* (1998), relata que o perfil de velocidade só se torna plenamente desenvolvido entre 25 e 40 vezes o diâmetro da tubulação.

Utilizando as indicações acima, e considerando o diâmetro hidráulico DH_2 (Equação 14), chegou-se aos comprimentos da Tabela 3.

Tabela 3: Comprimentos de entrada propostos na literatura.

| Dutos | D ou DH (m) | Comprimento de entrada (DODGE e METZNER (1952), citado em SILVA <i>et al.</i> (1985)) | Comprimento de entrada (FOX <i>et al.</i> (1998)) |
|------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Anular I | 0,0056 | 0,297m | 0,224m |
| Anular II | 0,0081 | 0,429m | 0,324m |
| Anular III | 0,009 | 0,477m | 0,36m |
| Circular | 0,0272 | 1,442m | 1,088m |

Baseado nas informações da Tabela 3, definiu-se a linha experimental anular com 3m de comprimento e 2 tomadas de pressão, sendo a primeira a 1m da entrada, e a segunda a 2,5m da entrada. O duto circular será de 1" com 6m de comprimento com 2 tomadas de pressão, sendo a primeira a 2m da entrada, e a segunda a 4m da entrada.

3.1.3 Medidor de vazão e densidade coriollis

Para simular o que ocorre no campo, a unidade conta com um medidor de vazão e densidade mássico de efeito coriollis da Metroval modelo RHM40-3FS1PN (Figura 22), indicado para medição de líquidos de alta e baixa viscosidade, lamas, suspensões e emulsões contendo partículas sólidas em suspensão. Além dessas características, o medidor possui tubulações internas de inox sendo então resistente a fluidos corrosivos.

O equipamento também é capaz de fornecer a densidade, o que é importante para o simulador já que esta propriedade é o indicador da completa homogeneidade da pasta, e consequente momento em que os testes de perda de carga deverão ser iniciados.



Figura 22: Foto do medidor de vazão e densidade coriollis da unidade.

3.1.4 Transdutores de pressão diferencial com selo remoto

Os transdutores de pressão diferencial da empresa Smar, já foram utilizados em pesquisas realizadas com fluidos de perfuração por ROCHA (2008) e BRAGA (2009) e apresentaram bons resultados. Nestas pesquisas, no entanto, a preocupação da abrasividade do fluido e a sedimentação deste na célula de medição eram menores. Para a USEF, com o intuito de escoar pastas de cimento, optou-se pela adição de um selo remoto a este equipamento como pode ser visto em Figura 23. Este selo permite que a leitura seja realizada através de uma membrana (diafragma) de inox externa, não havendo contato direto com a célula de medição do aparelho.

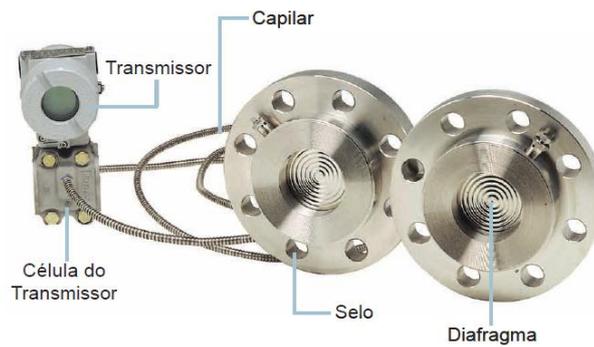


Figura 23: Imagem do transdutor de pressão diferencial com selo remoto

A faixa de calibração solicitada para este transdutor é de 0 a 7kgf/cm², podendo esta ser alterada, segundo a empresa Smar, para intervalos contidos entre 0 e 24kgf/cm². Um segundo transdutor sem o selo remoto com faixa de calibração de 0,01 a 0,05kgf/cm² foi utilizado para calibração da unidade com água em alguns dos arranjos estudados.

3.1.5 Definição da bomba do sistema

Para definição da bomba de deslocamento positivo a ser utilizada na USEF, levou-se em consideração a vazão de 10 barris/min, que segundo o CENPES-PETROBRAS é o valor máximo em processos de cimentação. Baseado neste, e de posse das geometrias de campo, chegou-se a conclusão que com uma bomba helicoidal de 25HP, Figura 24, é possível simular boa parte dos escoamentos desejados.



Figura 24: Bomba helicoidal de 25HP e 12Kgf/cm² de pressão de descarga.

3.1.6 Tanque da unidade experimental

O tanque da unidade experimental apresentado em Figura 25 é construído em aço inox com volume útil de 200L, dotado de sistema de agitação com motor de 3,3KW e rotação de até 1800rpm com dispersor tipo *cowles*. O tanque é encamisado e pode ser aquecido por 3 resistências elétricas de 5000kW ou refrigerado pela circulação de água gelada na camisa.



Figura 25: Tanque da unidade experimental.

3.1.7 Sistema de refrigeração

Para análise da pasta de cimento a 15°C foi necessário uma unidade de refrigeração, Figura 26, capaz de recircular água gelada na camisa do tanque, a temperatura de até 5°C a uma potência de 15.000kcal/h.



Figura 26: Foto de *chiller* da unidade experimental.

3.2 Metodologia

Para cada trecho experimental analisado, após o sistema atingir o regime permanente, a vazão mássica e a densidade são determinadas através do medidor de vazão mássico, e a queda de pressão e a temperatura, respectivamente pelo transdutor diferencial de pressão e pelo tanque de mistura.

O sistema possui controle de temperatura para garantir que os parâmetros reológicos permaneçam estáveis ao longo do teste. Para cada trecho experimental estudado, foram avaliadas 3 temperaturas, 15, 25 e 60°C.

Os dados reológicos foram obtidos em viscosímetro FANN 35A na temperatura do escoamento do fluido. Foram realizados testes ao longo do experimento em vazões predeterminadas para avaliar a reologia do fluido com o tempo.

Após analisar o escoamento da pasta, a mesma era descartada e iniciava-se a circulação de água nos dutos da unidade para remoção de resíduos e incrustações presentes nos tubos.

Com os dados extraídos, foi possível, através das equações citadas anteriormente: o cálculo do número de Reynolds, a determinação da transição dos regimes de escoamento (experimental e teórica), determinação da perda de carga teórica utilizando equações de fator

de atrito encontradas na literatura e avaliar as equações de diâmetro hidráulico no regime laminar.

3.3 Fluido utilizado

A pasta analisada, neste trabalho, foi formulada pelo CENPES/PETROBRAS e possui características de fluido não-Newtoniano e em condições onde não ocorra uma redução significativa no teor de água, ou não seja iniciada a cura ou pega deste material, o mesmo pode ter sua reologia considerada como independente do tempo. A pasta de cimento analisada foi produzida no tanque de mistura da unidade a temperatura controlada por uma mistura composta de cimento classe G da empresa Holcim, água doce e aditivos da empresa Schlumberger (retardador de pega e anti-espumante). As dosagens de cimento e aditivos não podem ser divulgadas.

3.4 Determinação dos parâmetros reológicos

Para realização dos ensaios reológicos, utilizou-se o viscosímetro FANN modelo 35A, Figura 27a. Nesse viscosímetro, o sistema Couette é aplicado aos cilindros, isto é, o cilindro externo ou rotor é impulsionado a uma velocidade rotacional constante expressa em rotações por minuto (rpm). A rotação do rotor na pasta de cimento produz um torque no cilindro interno (bob). Uma mola restringe o movimento do bob e um ponteiro conectado a mola de torção indica a deformação angular gerada pelo cisalhamento repassado pelo fluido ao bob. Este conjunto rotor-bob-mola é ilustrado em Figura 27b. Durante o ensaio, a amostra era mantida em copo encamisado (Figura 28a) para controle da temperatura e no interior da camisa deste copo era bombeada água na temperatura do teste por um banho termostático Haake modelo K10 que é apresentado no conjunto em Figura 28b.

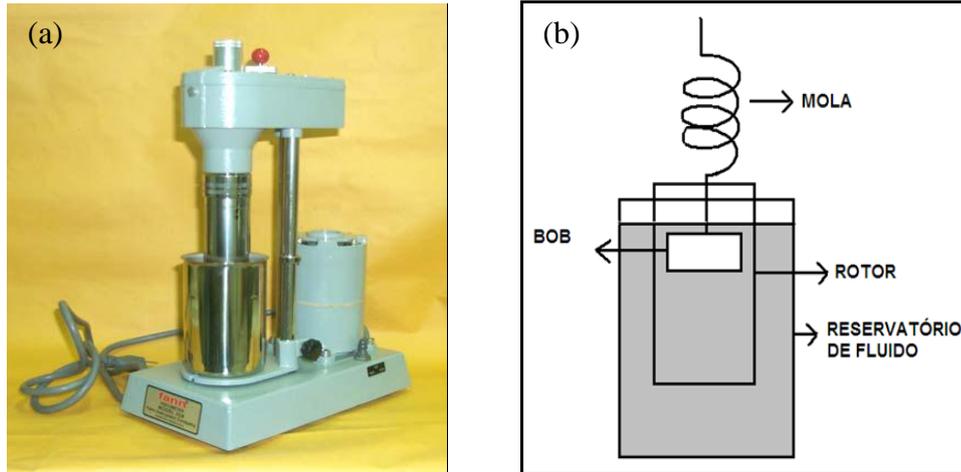


Figura 27: (a) Viscosímetro FANN modelo 35A e (b) esquema simplificado de funcionamento do viscosímetro.



Figura 28: (a) Copo encamisado utilizado em ensaio reológico e (b) Conjunto banho termostático, viscosímetro FANN 35A e copo encamisado

No viscosímetro trabalhou-se com velocidades de rotação controladas de 300, 200, 100, 60, 30, 6 e 3rpm. O teste era realizado de maneira descendente, ou seja, da maior para menor velocidade e em cada velocidade aguardava-se 20 segundos antes de efetuar a leitura da deformação angular. De posse da rotação e deformação angular foi possível, através das Equações 46 e 47 o cálculo da taxa de deformação (γ) e da tensão de cisalhamento (τ), respectivamente, (PETROBRAS, 2005).

$$\gamma(\text{s}^{-1}) = 1,7023 \times \Omega(\text{rpm}) \quad (46)$$

$$\tau(\text{Pa}) = 0,511 \times \theta \quad (47)$$

Nas Equações 46 e 47,

τ – é a tensão de cisalhamento(Pa);

γ - é a taxa de deformação(s^{-1});

Ω – a rotação do rotor em rpm e

θ – a deformação angular em graus.

Os pares de tensão cisalhante e taxa de deformação foram utilizados para obtenção dos parâmetros e avaliação dos modelos reológicos.

Para avaliar a adequação do modelo reológico, calculou-se o coeficiente de determinação (R^2), onde o mesmo é dado pelo quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, que foi obtido através da Equação 48.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (48)$$

Este coeficiente varia entre 0 e 1, onde 0 significa que os dados representam um comportamento não-linear, e 1 significa que os dados representam uma reta perfeita.

3.5 Limpeza e calibração da unidade experimental

A unidade experimental foi calibrada escoando água a 25°C, antes de utilizar a pasta de cimento. A água é utilizada como fluido de calibração por ser um fluido Newtoniano, amplamente estudado na literatura e ser de fácil remoção para posterior análise.

A calibração consiste em determinar experimentalmente o fator de atrito (Equação 14) e compará-lo com a equação de Fanning para o regime laminar (Equação 15) e a de Blasius (Equação 16) para o regime turbulento.

Após os testes com a pasta de cimento, as tubulações e os equipamentos são lavados com água até que, através de uma análise visual, não se perceba a presença de resíduos de cimento no retorno de água ao tanque.

3.6 Tratamento das incertezas experimentais

Com o intuito de verificar o intervalo de confiança dos dados experimentais de fator atrito e queda de pressão, foram feitas análises de incertezas das grandezas experimentais. As análises das incertezas envolvem o cálculo do erro aleatório, ou seja, o desvio padrão (σ) dos dados experimentais, Equação 49.

$$\delta y = \psi \sigma \quad (49)$$

Sendo, ψ o fator de abrangência na análise das incertezas (δy), que mede o nível de confiança dos resultados obtidos. O parâmetro y é a variável experimental de interesse. Quando se emprega, o fator de abrangência ψ igual a **2**, esse valor associa ao resultado obtido um nível de confiança de aproximadamente 95% (BARTHEM, 1996).

3.6.1 Propagação das incertezas das variáveis experimentais e desvio padrão dos parâmetros reológicos

Numa variável calculada, como exemplo, $Y = Y(X, Z)$, ocorre uma propagação das incertezas dos dados experimentais, X e Z . Estas variáveis experimentais apresentam incertezas σ_x e σ_z , respectivamente. A propagação dessas incertezas sobre a variável calculada foi realizada através da Equação 50.

$$\sigma_Y^2 = \left[\frac{\partial Y}{\partial X} \right]^2 \sigma_x^2 + \left[\frac{\partial Y}{\partial Z} \right]^2 \sigma_z^2 + \left[\frac{\partial Y}{\partial X} \right] \left[\frac{\partial Y}{\partial Z} \right] \sigma_x \sigma_z \quad (50)$$

O terceiro termo, $\sigma_x \sigma_z$, considera o efeito cruzado das incertezas, este termo só é utilizado quando a determinação da variável experimental sofre influência de outra, não sendo considerado neste trabalho.

No caso dos parâmetros reológicos, os desvios padrões (incertezas estimadas) são gerados a partir dos valores médios desses parâmetros, referentes a todos os pontos experimentais, Equação 51. Nesta equação \bar{X} é o valor médio das variáveis analisadas, X_i o resultado de uma das variáveis e n o número total destas.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (51)$$

Nesta análise, para o cálculo da incerteza, também foi utilizado um fator de abrangência igual a 2, associado ao desvio padrão obtido para cada parâmetro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados e discutidos, resultados obtidos no escoamento da pasta 1, na unidade experimental, através dos anulares I, II, III e duto circular de 1" em temperaturas de 15, 25 e 60°C.

4.1 Calibração da unidade experimental

Com os resultados de perda de carga e vazão do escoamento de água a 25°C, no **regime laminar**, nos dutos circular e anulares I, II e III, foi possível determinar experimentalmente o fator de atrito (Equação 14) e compará-lo com a equação de Fator de atrito laminar de Fanning (Equação 15). Nesta avaliação foi utilizada a Equação 41 para o diâmetro hidráulico dos dutos anulares. Resultados típicos são apresentados nas Figuras 29 e 30.

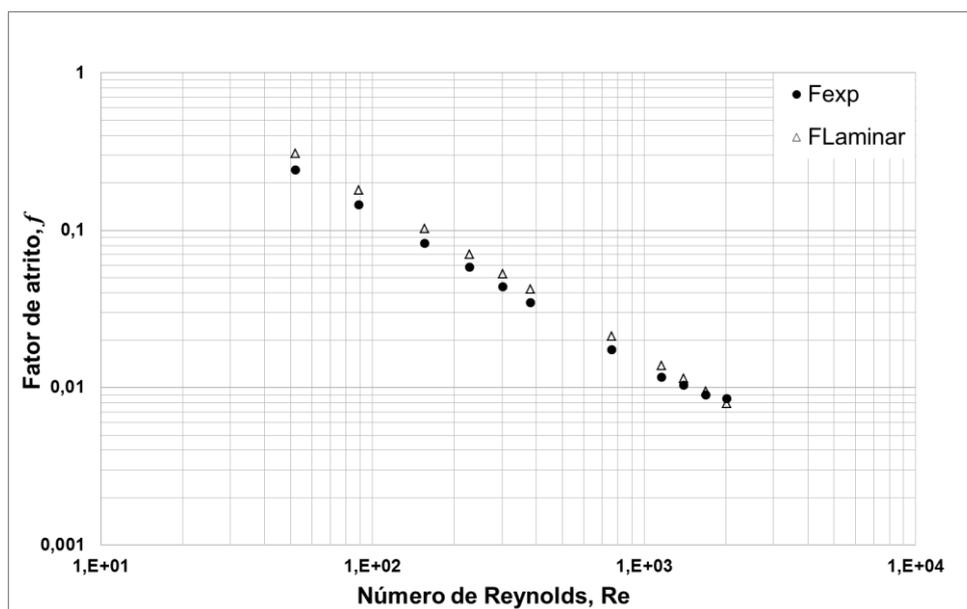


Figura 29: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento de água em duto anular I, temperatura de 25 °C, transdutor com faixa de calibração 0,01 a 0,05kgf/cm²

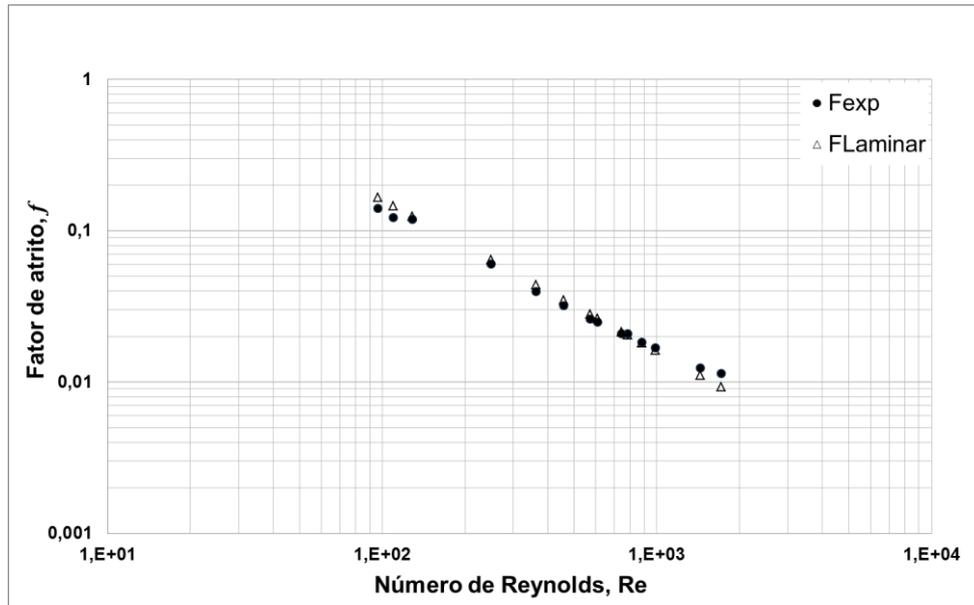


Figura 30: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento de água em duto anular II, temperatura de 25 °C, transdutor com faixa de calibração 0,01 a 0,05kgf/cm²

Os gráficos apresentados nas Figuras 29 e 30 demonstram boa concordância entre o fator de atrito experimental (Equação 14) e o Fator de atrito laminar de Fanning (Equação 14), com desvios médios da ordem de 13,5%.

Resultados de perda de carga e vazão do escoamento de água a 25°C, no **regime turbulento** foram utilizados para análise da rugosidade (ϵ) dos dutos circular e anulares I, II e III. Foi possível determinar experimentalmente o fator de atrito (Equação 14) e compará-lo com a equação de fator de atrito de Blasius (Equação 16). Nesta avaliação foi utilizada a Equação 41 para o diâmetro hidráulico dos dutos anulares. Resultados típicos são apresentados nas Figuras 31 e 32.

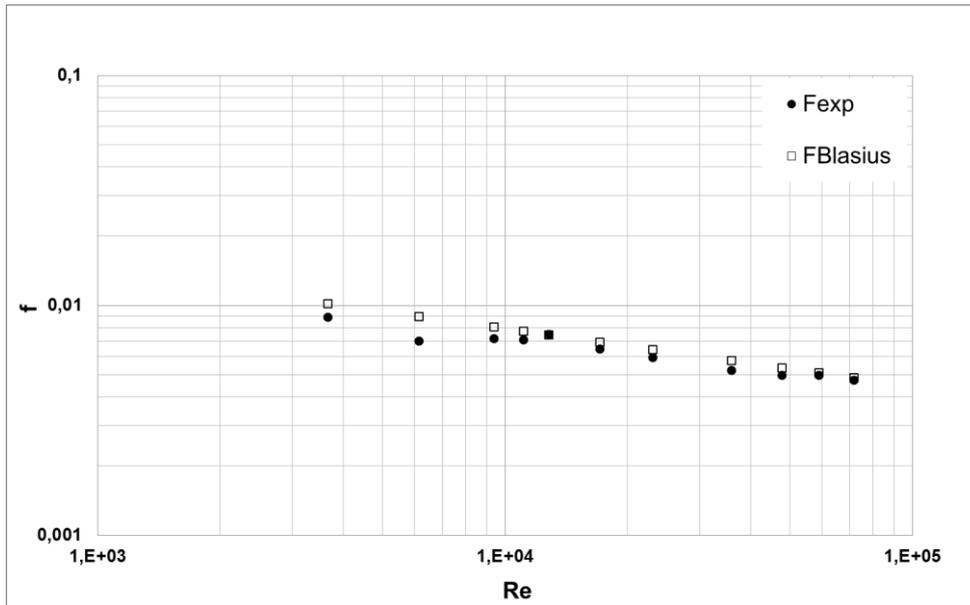


Figura 31: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento de água em duto circular de 1", regime turbulento, temperatura de 25 °C, transdutor com faixa de calibração 0,01 a 0,05kgf/cm²

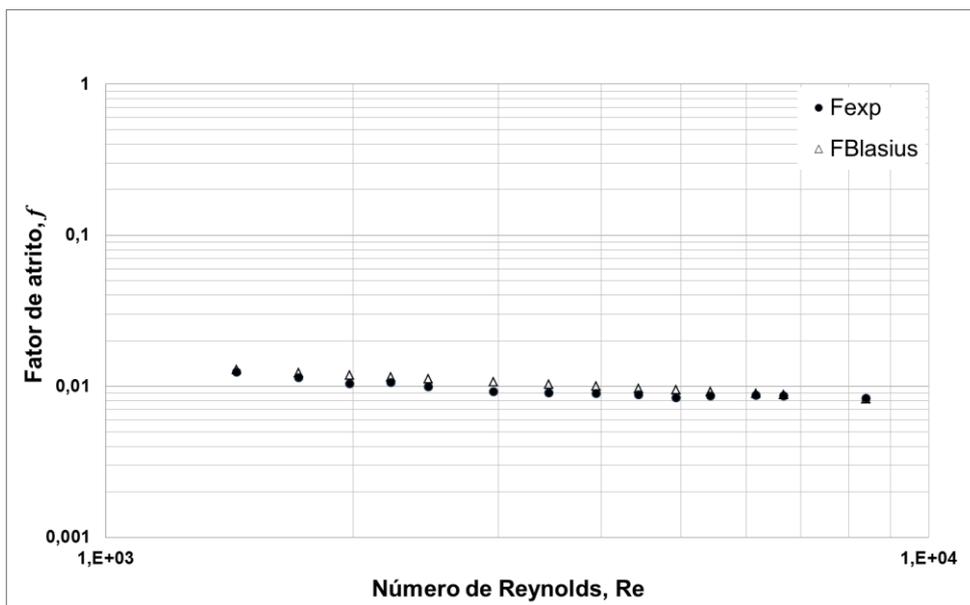


Figura 32: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento de água em duto anular II, regime turbulento, temperatura de 25 °C, transdutor com faixa de calibração 0,01 a 0,05kgf/cm²

Os gráficos apresentados nas Figuras 31 e 32 demonstram boa concordância entre o fator de atrito experimental (Equação 14) e o Fator de atrito de Blasius (Equação 16), com desvios médios da ordem de 9,0%.

Os baixos desvios médios apresentados nos gráficos das Figuras 31 e 32 confirmam algo já percebido por ROCHA (2008), que dutos de ferro galvanizado comerciais têm rugosidade (ε) próxima à zero, já que a equação de fator de atrito de Blasius (Equação 16), utilizada na comparação com resultados experimentais, é utilizada para tubos lisos. Este fato difere das usuais tabelas de rugosidade e esta diferença pode estar atrelada ao avanço no processo de fabricação dos dutos. Em virtude desse fato, nos cálculos deste trabalho, considerou-se a rugosidade dos dutos desprezíveis.

4.2 Avaliação do comportamento reológico

Os dados reológicos foram obtidos em viscosímetro FANN 35A na temperatura do escoamento do fluido. Foram realizados testes ao longo de cada experimento em vazões predeterminadas para avaliar a reologia do fluido com o tempo. Na Tabela 4 são apresentadas as médias dos parâmetros reológicos, bem como o coeficiente de correlação (R^2) obtido em cada modelo.

Tabela 4: Parâmetros reológicos médios obtidos.

| ANULAR | T(°C) | power law | | | Bingham | | | Herschell-Buckley | | | |
|-----------------------------|-------|-----------|-----------------------|----------------|---------|----------|----------------|-------------------|-----------------------|--------|----------------|
| | | n(ADM) | K(Pa.s ⁿ) | R ² | LE(Pa) | VP(Pa.s) | R ² | N(ADM) | K(Pa.s ⁿ) | LE(Pa) | R ² |
| CIRCULAR 1" | 15°C | 0,34 | 2,56 | 0,9249 | 5,73 | 0,042 | 0,9924 | 0,81 | 0,14 | 4,71 | 0,9988 |
| | 25°C | 0,28 | 2,84 | 0,8775 | 5,40 | 0,029 | 0,9952 | 0,87 | 0,07 | 4,44 | 0,9983 |
| | 60°C | 0,18 | 6,04 | 0,9153 | 9,42 | 0,022 | 0,9772 | 0,68 | 0,18 | 8,25 | 0,9981 |
| ANULAR 1 (2" e 1 1/2") | 15°C | 0,39 | 1,43 | 0,9303 | 3,45 | 0,035 | 0,9969 | 0,90 | 0,07 | 3,02 | 0,9988 |
| | 25°C | 0,26 | 2,95 | 0,8810 | 5,22 | 0,024 | 0,9966 | 0,89 | 0,05 | 4,90 | 0,9991 |
| | 60°C | 0,13 | 11,62 | 0,9505 | 16,59 | 0,024 | 0,9130 | 0,43 | 1,00 | 13,10 | 0,9960 |
| ANULAR 2 (1 1/2" e 1") | 15°C | 0,39 | 1,25 | 0,9180 | 2,92 | 0,030 | 0,9978 | 0,92 | 0,05 | 2,64 | 0,9994 |
| | 25°C | 0,31 | 1,50 | 0,8905 | 3,02 | 0,020 | 0,9960 | 0,92 | 0,04 | 2,82 | 0,9978 |
| | 60°C | 0,14 | 8,06 | 0,9135 | 11,59 | 0,019 | 0,9298 | 0,55 | 0,60 | 9,54 | 0,9653 |
| ANULAR 3 (1 1/4" e 3/4") | 15°C | 0,41 | 1,25 | 0,9269 | 3,04 | 0,035 | 0,9986 | 0,93 | 0,06 | 2,76 | 0,9996 |
| | 25°C | 0,32 | 1,49 | 0,8979 | 3,05 | 0,021 | 0,9965 | 0,91 | 0,04 | 2,81 | 0,9991 |
| | 60°C | 0,22 | 3,42 | 0,9452 | 6,01 | 0,018 | 0,9601 | 0,60 | 0,27 | 4,62 | 0,9963 |
| MÉDIA POR TEMP. | 15°C | 0,38 | 1,63 | 0,9250 | 3,78 | 0,036 | 0,9964 | 0,89 | 0,08 | 3,28 | 0,9992 |
| | 25°C | 0,29 | 2,19 | 0,8867 | 4,17 | 0,024 | 0,9961 | 0,90 | 0,05 | 3,74 | 0,9986 |
| | 60°C | 0,17 | 7,29 | 0,9311 | 10,90 | 0,021 | 0,9450 | 0,56 | 0,51 | 8,88 | 0,9889 |

Como pode ser visto na Tabela 4, o modelo de Herschell-Buckley é o que apresenta o melhor coeficiente de correlação, independentemente da temperatura. O modelo de Bingham apresenta bons coeficientes para temperaturas de 15 e 25°C, porém a 60°C o coeficiente já demonstra uma piora. O modelo da potência nas 3 temperaturas analisadas apresenta o pior desempenho no ajuste dos dados experimentais. Um fato relevante a se destacar é que, em alguns casos, ao comparar-se os parâmetros reológicos, de um dado modelo, numa mesma temperatura, em diferentes dutos, nota-se uma pequena diferença, que neste trabalho foi atribuída ao tempo de cisalhamento em que a pasta era mantida. Essa diferença no tempo de realização dos ensaios se deve as dificuldades experimentais e logísticas encontradas em cada teste.

4.3 Determinação dos regimes de escoamento

Os gráficos apresentados nas Figuras de 33 a 36 mostram a determinação experimental da vazão crítica de escoamento. Estes gráficos foram construídos a partir dos dados experimentais de variação de pressão e vazão do escoamento da pasta de cimento a 25°C, nas quatro geometrias estudadas. A mesma análise gráfica foi realizada com os resultados dos testes nas temperaturas de 15 e 60°C, sendo estes gráficos dispostos em anexo.

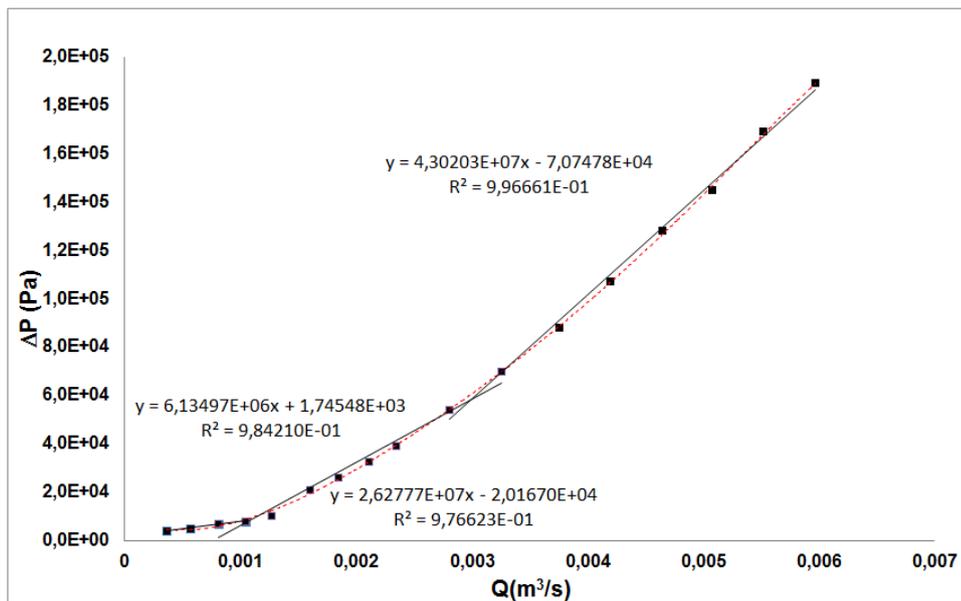


Figura 33: Curva de variação de pressão em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 25°C em duto circular de 1”.

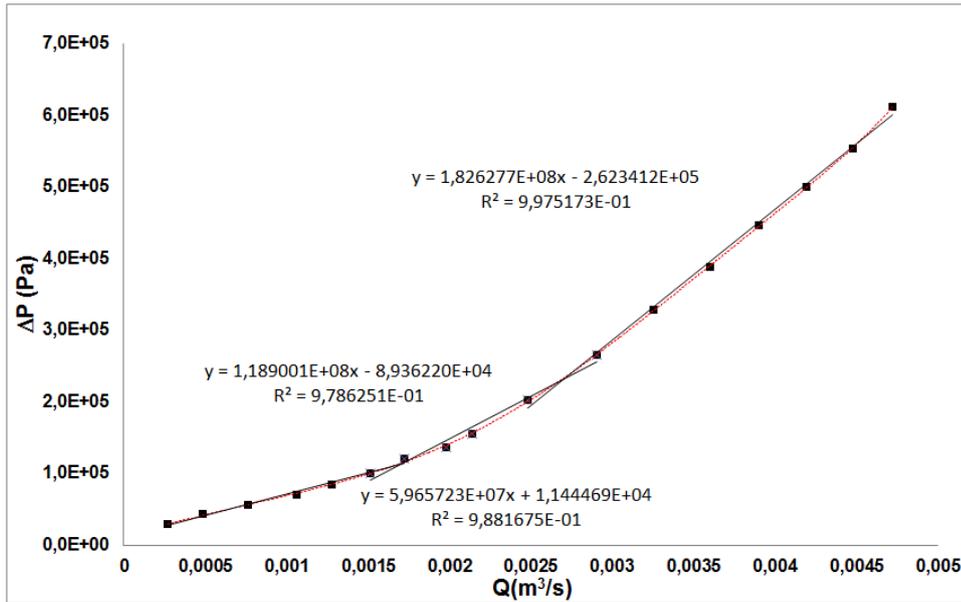


Figura 34: Curva de variação de pressão em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 25°C em duto anular 1(2'' e 1 1/2'').

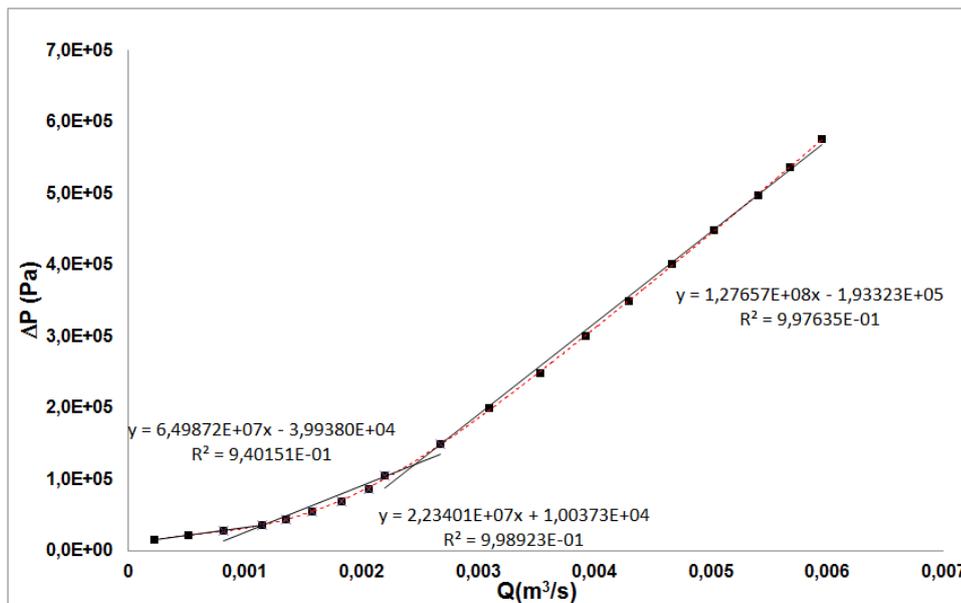


Figura 35: Curva de variação de pressão em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 25°C em duto anular 2(1 1/2'' e 1'').

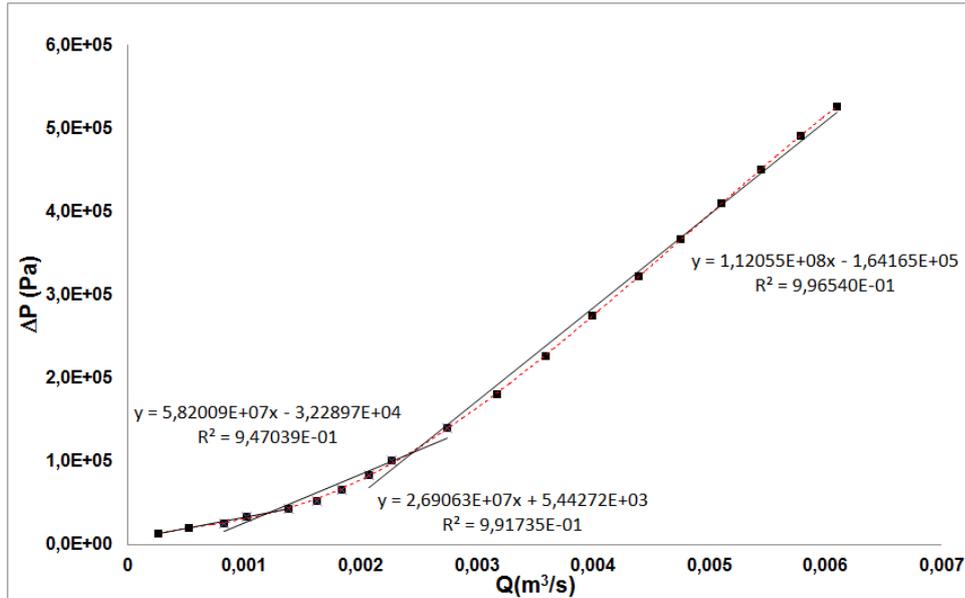


Figura 36: Curva de variação de pressão em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 25°C em duto anular 3(1 1/4” e 3/4”).

Nos quatro gráficos apresentados nas Figuras de 33 a 36, tipificam-se através das linhas de tendência, os regimes de escoamento (laminar, transitório e turbulento). Através da análise das equações de reta desses “patamares” foi possível determinar a vazão crítica de escoamento.

Após a determinação da vazão crítica, e conseqüentemente, a utilização desta, junto aos parâmetros reológicos médios de cada modelo e das respectivas correlações de diâmetro hidráulico, o número de Reynolds crítico experimental pôde ser definido. Estes valores foram listados nas Tabelas de 5 a 7, onde são comparados com valores de Reynolds críticos obtidos por correlações. Nas Tabelas de 5 a 7, os valores de Reynolds críticos experimentais e teóricos são comparados através do erro percentual (Equação 52) e os valores de erro, menores que 25%, são destacados.

$$\text{Erro}(\%) = \frac{\text{Rec}_{\text{exp}} - \text{Rec}_{\text{cor}}}{\text{Rec}_{\text{exp}}} \cdot 100 \quad (52)$$

Tabela 5: Avaliação da transição de regimes de escoamento a 15°C.

| Reynolds crítico - pasta 1 (15°C) | Circular de 1" | ANULAR 1 (2" e 1 1/2") | | | ANULAR 2 (1 1/2" e 1") | | | ANULAR 3 (1 1/4" e 3/4") | | | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-------|--|
| | | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | | |
| power law | Rec - exp | 3547 | 4539 | 4913 | 4817 | 3929 | 4247 | 4026 | 2842 | 3086 | 2887 | |
| | Rec – Ryan e Johnson (1959) | 2377 | 2395 | 2395 | 2395 | 2393 | 2393 | 2393 | 2397 | 2397 | 2397 | |
| | Rec - Mishra e Tripathi (1971) | 2709 | 2620 | 2620 | 2620 | 2633 | 2633 | 2633 | 2595 | 2595 | 2595 | |
| | Erro(%) - Ryan e Johnson (1959) | 33 | 47,2 | 51,3 | 50,3 | 39,1 | 43,6 | 40,5 | 15,7 | 22,3 | 17 | |
| | Erro(%) - Mishra e Tripathi (1971) | 23,6 | 42,3 | 46,7 | 45,6 | 33 | 38 | 34,6 | 8,7 | 15,9 | 10,1 | |
| | Rec - exp | 3187 | 1003 | 1229 | 1169 | 1274 | 1561 | 1357 | 1103 | 1352 | 1147 | |
| | Rec – Hanks (1963) | 2806 | 2126 | 2138 | 2134 | 2163 | 2194 | 2172 | 2163 | 2193 | 2168 | |
| | Rec – Thomas (1963) | 1274 | 206 | 252 | 240 | 323 | 396 | 345 | 324 | 397 | 337 | |
| | Rec - Craft (1962) | 259 | 43 | 52 | 50 | 67 | 81 | 71 | 67 | 82 | 69 | |
| | Erro(%) - Hanks (1963) | 12 | -112 | -74 | -83 | -70 | -41 | -60 | -96 | -62 | -89 | |
| Bingham | Erro(%) - Thomas (1963) | 60 | 79 | 79 | 79 | 75 | 75 | 75 | 71 | 71 | 71 | |
| | Erro(%) – Craft (1962) | 92 | 96 | 96 | 96 | 95 | 95 | 95 | 94 | 94 | 94 | |
| | Rec - exp | 3195 | 1220 | 1466 | 1401 | 1364 | 1642 | 1445,2 | 1217 | 1467 | 1261 | |
| | Rec – Ryan e Johnson (1959) | 2210 | 2156 | 2156 | 2156 | 2151 | 2151 | 2151 | 2146 | 2146 | 2146 | |
| | Rec - Mishra e Tripathi (1971) | 2195 | 2145 | 2145 | 2145 | 2142 | 2142 | 2142 | 2137 | 2137 | 2137 | |
| | Erro(%) - Ryan e Johnson (1959) | 30,8 | -76,7 | -47 | -53,9 | -57,7 | -31 | -48,9 | -76,4 | -46,2 | -70,1 | |
| | Erro(%) - Mishra e Tripathi (1971) | 31,3 | -75,8 | -46,3 | -53,2 | -57 | -30,4 | -48,2 | -75,6 | -45,6 | -69,4 | |
| | Herschell-Buckley | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

Tabela 6: Avaliação da transição de regimes de escoamento a 25°C.

| Reynolds crítico - pasta 1 (25°C) | Circular de 1" | ANULAR 1 (2" e 1 1/2") | | | ANULAR 2 (1 1/2" e 1") | | | ANULAR 3 (1 1/4" e 3/4") | | |
|------------------------------------|----------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| | | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ |
| Rec - exp | 2949 | 6796 | 7153 | 7063 | 3929 | 4183 | 4007 | 4449 | 4743 | 4505 |
| Rec – Ryan e Jonhson (1959) | 2317 | 2276 | 2276 | 2276 | 2353 | 2353 | 2353 | 2359 | 2359 | 2359 |
| Rec - Mishra e Tripathi (1971) | 2844 | 2908 | 2908 | 2908 | 2775 | 2775 | 2775 | 2761 | 2761 | 2761 |
| Erro(%) - Ryan e Jonhson (1959) | 21,4 | 66,5 | 68,2 | 67,8 | 40,1 | 43,8 | 41,3 | 47 | 50,3 | 47,6 |
| Erro(%) - Mishra e Tripathi (1971) | 3,6 | 57,2 | 59,3 | 58,8 | 29,4 | 33,7 | 30,7 | 37,9 | 41,8 | 38,7 |
| Rec - exp | 3359 | 1364 | 1671 | 1588 | 1436 | 1760 | 1530 | 1746 | 2139 | 1815 |
| Rec – Hanks (1963) | 3214 | 2174 | 2209 | 2199 | 2223 | 2280 | 2239 | 2255 | 2325 | 2267 |
| Rec – Thomas (1963) | 1741 | 357 | 437 | 416 | 470 | 576 | 501 | 532 | 651 | 553 |
| Rec - Craft (1962) | 354 | 73 | 90 | 85 | 96 | 118 | 102 | 109 | 133 | 113 |
| Erro(%) - Hanks (1963) | 4 | -59 | -32 | -38 | -55 | -30 | -46 | -29 | -9 | -25 |
| Erro(%) - Thomas (1963) | 48 | 74 | 74 | 74 | 67 | 67 | 67 | 70 | 70 | 70 |
| Erro(%) – Craft (1962) | 89 | 95 | 95 | 95 | 93 | 93 | 93 | 94 | 94 | 94 |
| Rec - exp | 3199 | 1579 | 1899 | 1813 | 1429 | 1729 | 1516 | 1714,5 | 2068 | 1777 |
| Rec – Ryan e Jonhson (1959) | 2176 | 2154 | 2153 | 2153 | 2135 | 2135 | 2135 | 2146 | 2146 | 2146 |
| Rec - Mishra e Tripathi (1971) | 2163 | 2143 | 2143 | 2143 | 2128 | 2128 | 2128 | 2137 | 2137 | 2137 |
| Erro(%) - Ryan e Jonhson (1959) | 32 | -36,4 | -13,4 | -18,8 | -49,4 | -23,5 | -40,8 | -25,2 | -3,8 | -20,7 |
| Erro(%) - Mishra e Tripathi (1971) | 32,4 | -35,8 | -12,9 | -18,2 | -49 | -23,1 | -40,3 | -24,6 | -3,4 | -20,2 |

Tabela 7: Avaliação da transição de regimes de escoamento a 60°C.

| Reynolds crítico - pasta 1 (60°C) | Circular de 1" | ANULAR 1 (2" e 1 1/2") | | | ANULAR 2 (1 1/2" e 1") | | | ANULAR 3 (1 1/4" e 3/4") | | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|------|
| | | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | |
| power law | Rec - exp | 3375 | 5133 | 5277 | 5241 | 2644 | 2716 | 2666 | 3566 | 3727 | 3596 |
| | Rec – Ryan e Johnson (1959) | 2037 | 1850 | 1850 | 1850 | 1816 | 1816 | 1816 | 2196 | 2196 | 2196 |
| | Rec - Mishra e Tripathi (1971) | 3160 | 3304 | 3304 | 3304 | 3327 | 3327 | 3327 | 3007 | 3007 | 3007 |
| | Erro(%) - Ryan e Johnson (1959) | 39,6 | 64 | 64,9 | 34,7 | 31,3 | 33,1 | 31,9 | 38,4 | 41,1 | 38,9 |
| | Erro(%) - Mishra e Tripathi (1971) | 6,4 | 35,6 | 37,4 | 37 | -25,8 | -22,5 | -24,8 | 15,7 | 19,3 | 16,4 |
| | Rec - exp | 5008 | 1335 | 1636 | 1555 | 1544 | 1892 | 1645 | 1784 | 2187 | 1855 |
| | Rec – Hanks (1963) | 4397 | 2303 | 2392 | 2367 | 2632 | 2834 | 2689 | 2458 | 2604 | 2483 |
| | Rec – Thomas (1963) | 3036 | 611 | 749 | 712 | 1058 | 1296 | 1127 | 843 | 1034 | 877 |
| | Rec - Craft (1962) | 616 | 125 | 153 | 145 | 215 | 263 | 229 | 172 | 210 | 179 |
| | Erro(%) - Hanks (1963) | 12 | -73 | -46 | -52 | -70 | -50 | -63 | -38 | -19 | -34 |
| | Erro(%) - Thomas (1963) | 39 | 54 | 54 | 54 | 32 | 32 | 32 | 53 | 53 | 53 |
| | Erro(%) – Craft (1962) | 88 | 91 | 91 | 91 | 86 | 86 | 86 | 90 | 90 | 90 |
| Bingham | Rec - exp | 4675,7 | 3860 | 4244 | 4140 | 2072 | 2286 | 2137 | 2232 | 2531 | 2286 |
| | Rec – Ryan e Johnson (1959) | 2297 | 2391 | 2391 | 2391 | 2387 | 2387 | 2386 | 2327 | 2327 | 2327 |
| | Rec - Mishra e Tripathi (1971) | 2295 | 2509 | 2509 | 2508 | 2485 | 2485 | 2484 | 2339 | 2339 | 2339 |
| | Erro(%) - Ryan e Johnson (1959) | 50,5 | 38 | 43,7 | 42,2 | -15,2 | -4,4 | -11,7 | -4,3 | 8,1 | -1,8 |
| | Erro(%) - Mishra e Tripathi (1971) | 50,6 | 35 | 40,9 | 39,4 | -19,9 | -8,7 | -16,3 | -4,8 | 7,6 | -2,3 |
| Herschell-Buckley | | | | | | | | | | | |

Através da análise dos resultados apresentados em Tabela 5, onde é apresentada uma avaliação da transição do regime de escoamento a 15°C, percebe-se que, as correlações de MISHRA e TRIPATHI (1971) e HANKS (1963) apresentaram uma previsão satisfatória para o duto circular de 1", utilizando respectivamente os modelos *power law* e Bingham. Na análise dos dutos anulares, percebe-se que MISHRA e TRIPATHI (1971) e RYAN E JONHSON (1959) apresentam bons resultados utilizando o modelo *power law* para o duto anular 3.

Na Tabela 6, a avaliação da transição do regime de escoamento a 25°C, mostra que as correlações de MISHRA e TRIPATHI (1971) e HANKS (1963) novamente apresentam boa previsão para o duto circular de 1", utilizando respectivamente os modelos *power law* e Bingham. Na análise dos dutos anulares, MISHRA e TRIPATHI (1971) e RYAN E JONHSON (1959) à 25°C, já não apresentam bons resultados como à 15°C, utilizando o modelo *power law*, mas utilizando o modelo de Herschell-Buckley consegue-se resultados satisfatórios, nos 3 anulares estudados, principalmente quando se utiliza a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico.

Na Tabela 7 as correlações de MISHRA e TRIPATHI (1971) e HANKS (1963), à 60°C, voltam a apresentar boa previsão para o duto circular de 1", utilizando respectivamente os modelos *power law* e Bingham. Na análise dos dutos anulares, percebe-se que MISHRA e TRIPATHI (1971) apresenta bons resultados utilizando o modelo *power law* e Herschell-Buckley para os anulares 2 e 3. Com o modelo de Herschell-Buckley, a correlação de RYAN E JONHSON (1959) também apresenta bons resultados para os anulares 2 e 3.

Combinando-se os resultados das Tabelas 5, 6 e 7 destaca-se que as correlações de MISHRA e TRIPATHI (1971) e HANKS (1963) apresentaram previsão satisfatória para o duto circular de 1" utilizando, respectivamente os modelos *power law* e de Bingham, nas 3 temperaturas. Para os dutos anulares, MISHRA e TRIPATHI (1971) apresenta bons resultados utilizando o modelo *power law* para o duto anular 3, a 15 e 60°C. Com o modelo de Herschell-Buckley, ainda na avaliação dos dutos anulares, MISHRA e TRIPATHI (1971) e RYAN E JONHSON (1959) à 25 e 60°C, apresentam bons resultados em quase todos os anulares estudados. A correlação de CRAFT (1962), em todos os dutos estudados, apresentou erro percentual elevado utilizando o modelo de Bingham.

4.4 Avaliação das correlações de diâmetro hidráulico

Nesta avaliação, a perda de carga teórica é calculada através de equações obtidas com a substituição do fator de atrito experimental (Equação 14), em equações de fator de atrito laminar, de cada modelo reológico. Nestas equações é inserida a correlação de diâmetro hidráulico, que se deseja avaliar, e então é possível o cálculo da perda de carga teórica do trecho, no regime laminar. As Figuras de 37 à 39 são gráficos comparativos da perda de carga experimental (ΔP_{exp}) com a perda de carga teórica (ΔP_t), obtida no escoamento da pasta 1, no anular 3 a 25°C, calculada para os três modelos reológicos, com as três correlações de diâmetro hidráulico (Equações 41, 42 e 45). Gráficos similares aos apresentados nas Figuras de 37 à 39 foram construídos para os demais anulares, nas temperaturas de 15, 25 e 60°C, e a média dos erros percentuais absolutos (Equação 53), das correlações de diâmetro hidráulico (Equações 41, 42 e 45) foram agrupados em Tabela 8.

$$\text{Erro}(\%) = \left| \frac{\Delta P_{exp} - \Delta P_t}{\Delta P_{exp}} \right| \cdot 100 \quad (53)$$

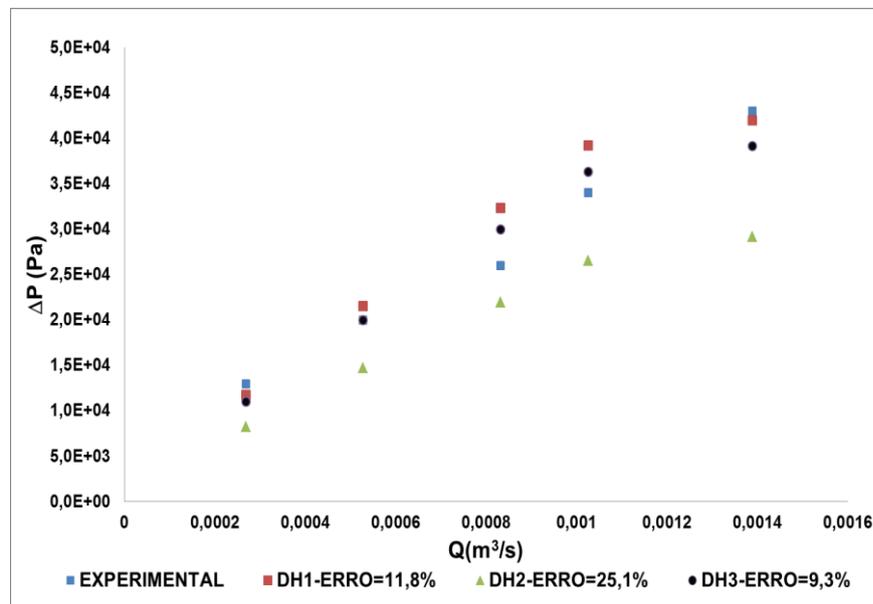


Figura 37: Avaliação do efeito das equações de diâmetro hidráulico na queda de pressão versus vazão no escoamento da pasta 1 a 25°C, no duto anular 3(1 1/4" e 3/4") utilizando o modelo de Herschell-Buckley.

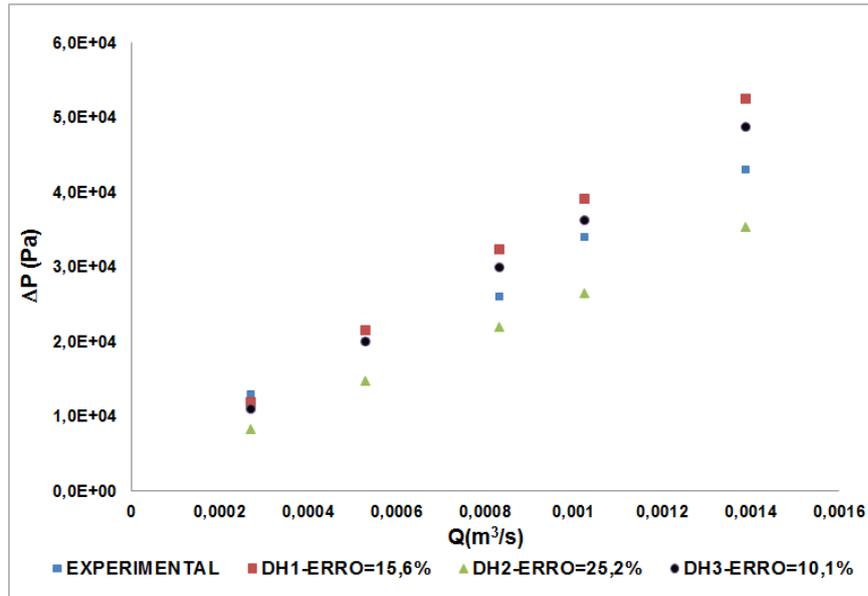


Figura 38: Avaliação do efeito das equações de diâmetro hidráulico na queda de pressão versus vazão no escoamento da pasta 1 a 25°C, no duto anular 3(1 1/4" e 3/4") utilizando o modelo da Bingham.

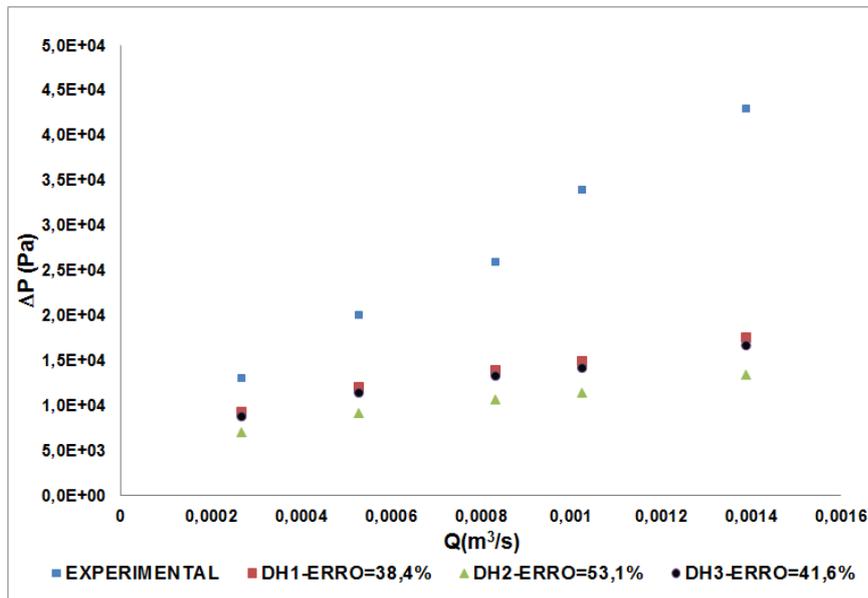


Figura 39: Avaliação do efeito das equações de diâmetro hidráulico na queda de pressão versus vazão no escoamento da pasta 1 a 25°C, no duto anular 3(1 1/4" e 3/4") utilizando o modelo da potência.

Tabela 8: Erros percentuais absolutos médios das correlações de diâmetro hidráulico.

| MODELO REOLÓG. | T(°C) | MÉDIA COEFF. VARIAÇÃO MODELO | ANULAR 1(2" e 1 1/2") | | | ANULAR 2(1 1/2" e 1") | | | ANULAR 3(1 1/4" e 3/4") | | | ERRO MÉDIO | | |
|-------------------|-------|------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ |
| power law | 15°C | 0,9251 | 25,7 | 44,3 | 40,1 | 30,3 | 47,6 | 39,8 | 31,1 | 48,5 | 29,6 | 29,0 | 46,8 | 36,5 |
| | 25°C | 0,8898 | 42,1 | 55,3 | 52,3 | 41,3 | 55,1 | 46,0 | 38,4 | 53,1 | 41,6 | 40,6 | 54,5 | 46,6 |
| | 60°C | 0,9364 | 23,5 | 30,1 | 30,2 | 20,3 | 33,4 | 21,7 | 15,2 | 38,0 | 24,4 | 19,7 | 33,8 | 25,4 |
| Bingham | 15°C | 0,9978 | 108,6 | 40,2 | 54,8 | 44,4 | 7,4 | 27,7 | 31,0 | 13,6 | 21,4 | 61,3 | 20,4 | 34,6 |
| | 25°C | 0,9964 | 69,2 | 20,6 | 27,2 | 26,4 | 18,5 | 17,6 | 15,6 | 25,2 | 10,1 | 37,1 | 21,4 | 18,3 |
| | 60°C | 0,9343 | 103,4 | 44,7 | 58,2 | 51,3 | 7,7 | 35,9 | 31,5 | 7,2 | 22,9 | 62,1 | 19,9 | 39,0 |
| Herschell-Buckley | 15°C | 0,9993 | 73,3 | 19,3 | 30,9 | 33,5 | 12,0 | 18,6 | 24,1 | 13,7 | 15,3 | 43,6 | 15,0 | 21,6 |
| | 25°C | 0,9987 | 59,1 | 15,5 | 22,4 | 11,9 | 27,1 | 9,0 | 11,8 | 25,1 | 9,3 | 27,6 | 22,6 | 13,6 |
| | 60°C | 0,9859 | 15,2 | 10,5 | 10,0 | 18,9 | 12,4 | 13,5 | 12,4 | 22,7 | 12,8 | 15,5 | 15,2 | 12,1 |
| ERRO MÉDIO GLOBAL | | | | | | | | | | | 37,4 | 27,7 | 27,5 | |

Para analisar as correlações de diâmetro hidráulico (Equações 41, 42 e 45), foi necessária a substituição das equações de fator de atrito no regime laminar pelo fator de atrito experimental (Equação 14). Essas equações de fator de atrito levam em conta os parâmetros reológicos de cada modelo, e quando se avalia o diâmetro hidráulico da forma como foi feita neste trabalho e em outros da literatura como BRAGA (2009) e GONÇALVES (2008), na verdade se avalia uma associação entre o erro dos parâmetros reológicos e o efetivo erro adicionado pela correlação do diâmetro hidráulico. O fato citado acima pode ser confirmado ao analisar as Figuras 37 a 39, onde é possível verificar que a utilização do modelo da potência, que apresentou o pior ajuste dos parâmetros reológicos, causou um afastamento entre os valores de ΔP_{exp} e ΔP_t . Esta associação entre os erros pode mascarar o verdadeiro erro associado à correlação de diâmetro hidráulico, reduzindo-o ou ampliando-o.

Quando se analisa a Tabela 8, quanto a utilização do modelo da potência, que apresentou o pior ajuste dos parâmetros reológicos, a correlação DH₁, de uma maneira geral, apresenta melhores resultados que as correlações DH₂ e DH₃, já para os modelos de Bingham e Herschell-Buckley, há uma inversão. Essa inversão pode estar associada ao desvio fornecido pelos parâmetros do modelo da potência, que desloca os valores de ΔP_t (calculados com DH₂ e DH₃), para pontos mais distantes de ΔP_{exp} .

Outra análise sobre a Tabela 8 é quanto a melhor utilização das correlações de diâmetro hidráulico, aplicando os modelos de Bingham e Herschell-Buckley, de acordo com a temperatura.

A correlação DH₂, na temperatura de 15°C, apresentou melhor resultado nos três anulares estudados, com erros percentuais absolutos da ordem de 20,4% para o modelo de Bingham e 15% para o modelo Herschell-Buckley.

Na temperatura de 25°C a correlação DH₃ apresentou melhor resultado médio, com erros percentuais absolutos da ordem de 18,3% para o modelo de Bingham e 13,6% com o modelo de Herschell-Buckley.

A correlação DH₂, apresentou um melhor resultado para os 3 anulares estudados utilizando o modelo de Bingham a 60°C, com erros percentuais absolutos médios da ordem de 19,9%. A utilização do modelo de Herschell-Buckley a 60°C, fez com que as três correlações de diâmetro hidráulico apresentassem bons resultados nos três anulares estudados, porém a correlação DH₃ apresentou melhor resultado médio, com erros percentuais absolutos da ordem de 12,1%.

4.5 Avaliações das correlações de fator de atrito

Neste tópico são avaliadas correlações de fator de atrito quanto à mudança de geometria e alteração do modelo reológico.

4.5.1 Avaliação da mudança de geometria

Os gráficos das Figuras 40 a 43 apresentam o fator de atrito experimental e os obtidos por correlações da literatura para os dados de perda de carga e vazão no escoamento da pasta 1, nos dutos circular e anulares. Nestes gráficos, para exemplificar, foi utilizado o modelo de Herschell-Buckley, na modelagem dos parâmetros reológicos e ainda, a correlação DH_3 como fator geométrico dos anulares e o experimento ocorrido a 25°C. Outras combinações serão feitas em análise das Tabelas 9, 10 e 11, onde todos os resultados foram condensados na forma de erro médio de cada correlação de fator de atrito.

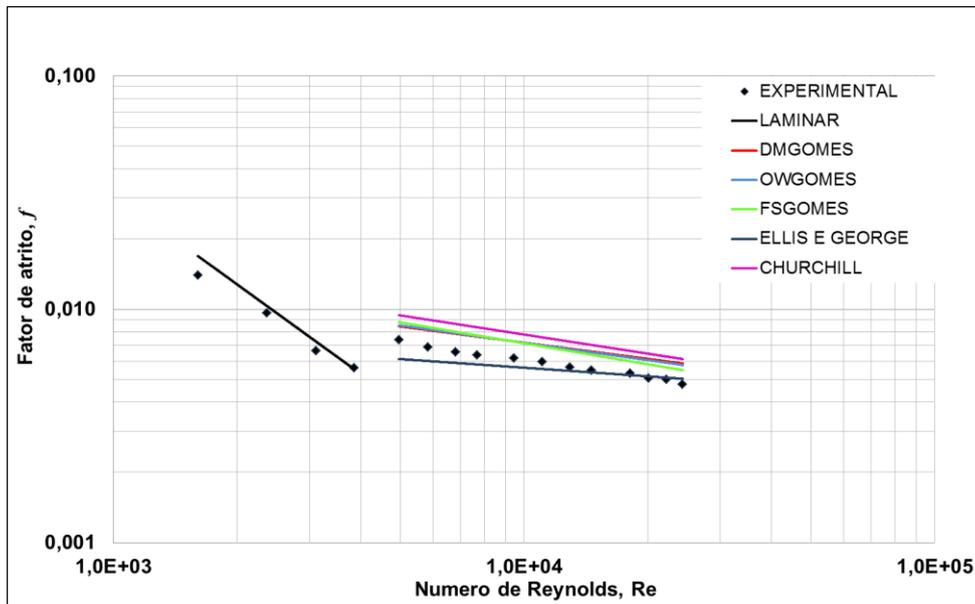


Figura 40: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em tubo circular de 1", temperatura de 25 °C e utilizando o modelo de Herschell-Buckley.

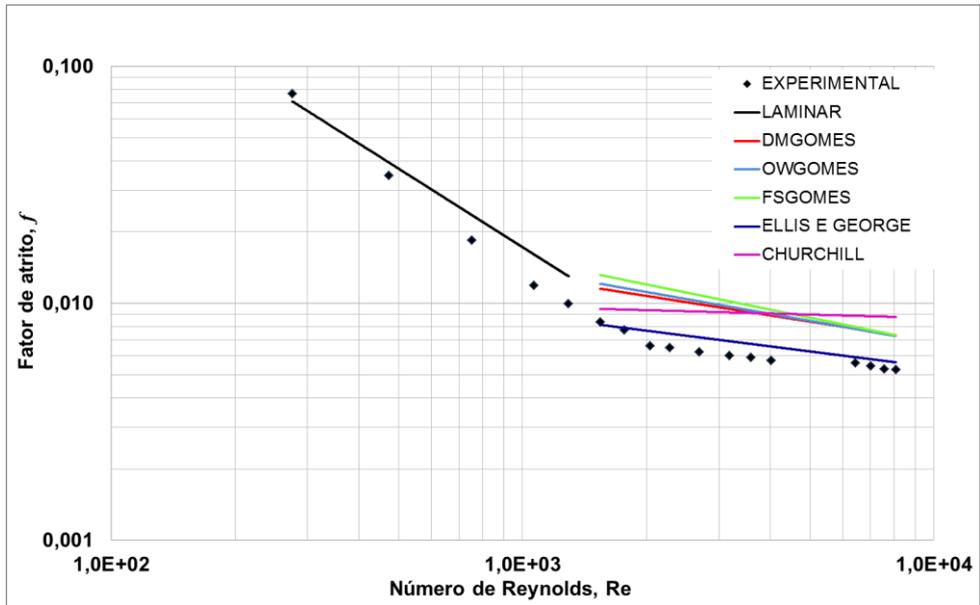


Figura 41: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 1, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH_3 .

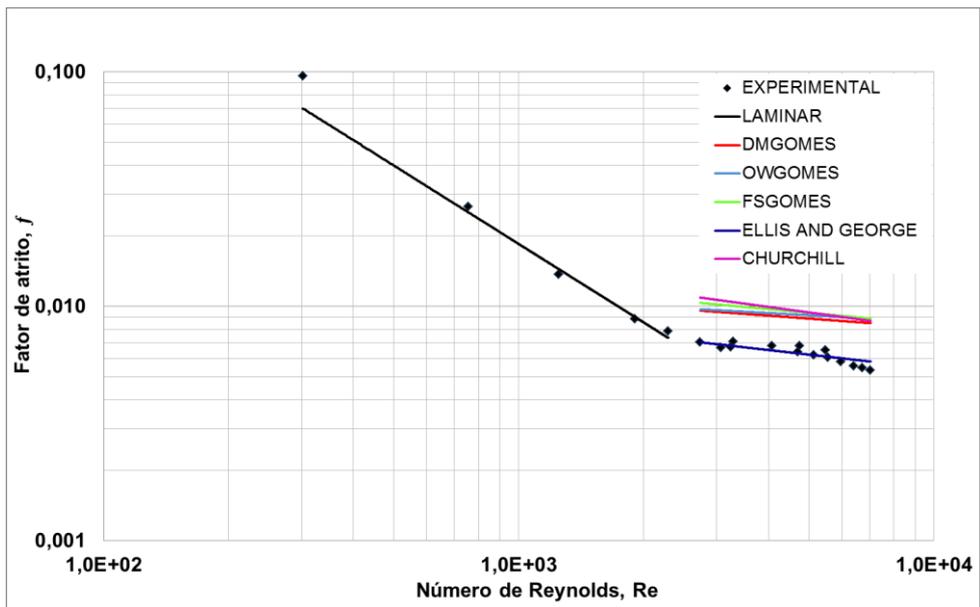


Figura 42: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH_3 .

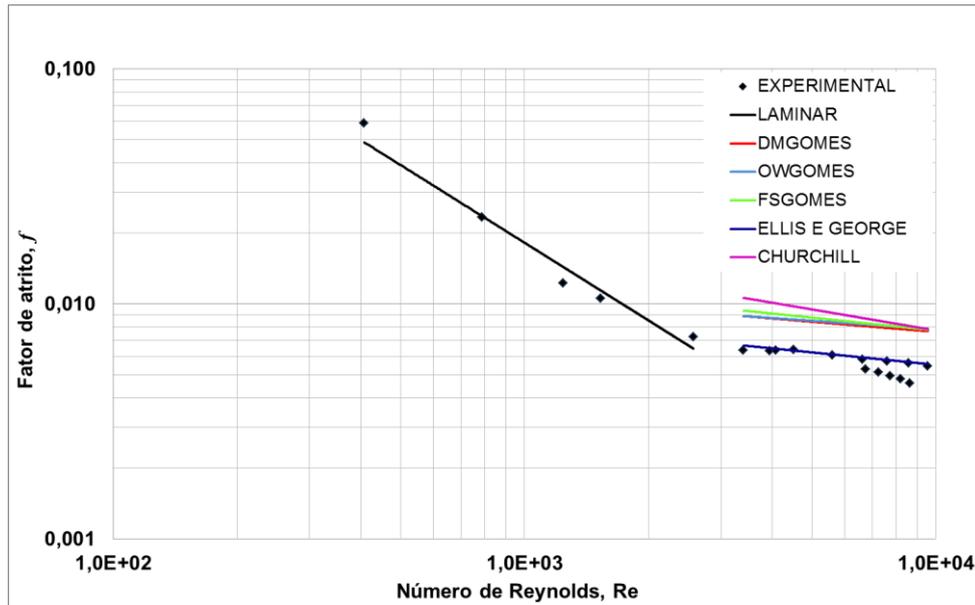


Figura 43: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 3, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH_3 .

Através da análise dos dados de fator de atrito apresentados nas Figuras 40 a 43, é possível perceber que a correlação de ELLIS e GEORGE (1977) apresenta o melhor ajuste dos dados no regime turbulento a 25°C, independente do duto de escoamento, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH_3 para o cálculo do diâmetro hidráulico. Este fato pode ser confirmado através dos gráficos de erro apresentados nas Figuras 44 a 47, onde a correlação de ELLIS e GEORGE (1977) apresenta um erro médio da ordem de 7,1%.

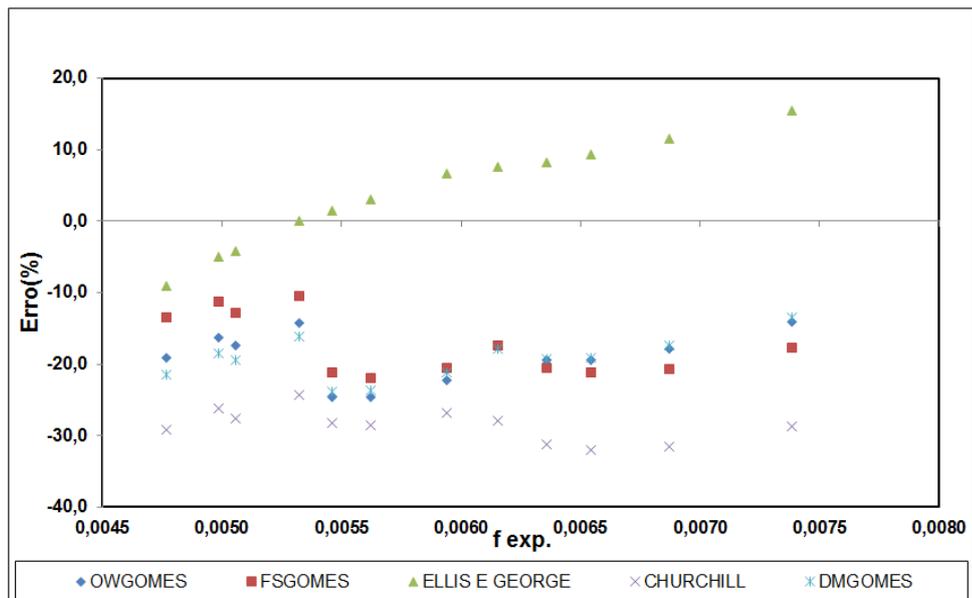


Figura 44: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em tubo circular de 1", temperatura de 25 °C e utilizando o modelo de Herschell-Buckley.

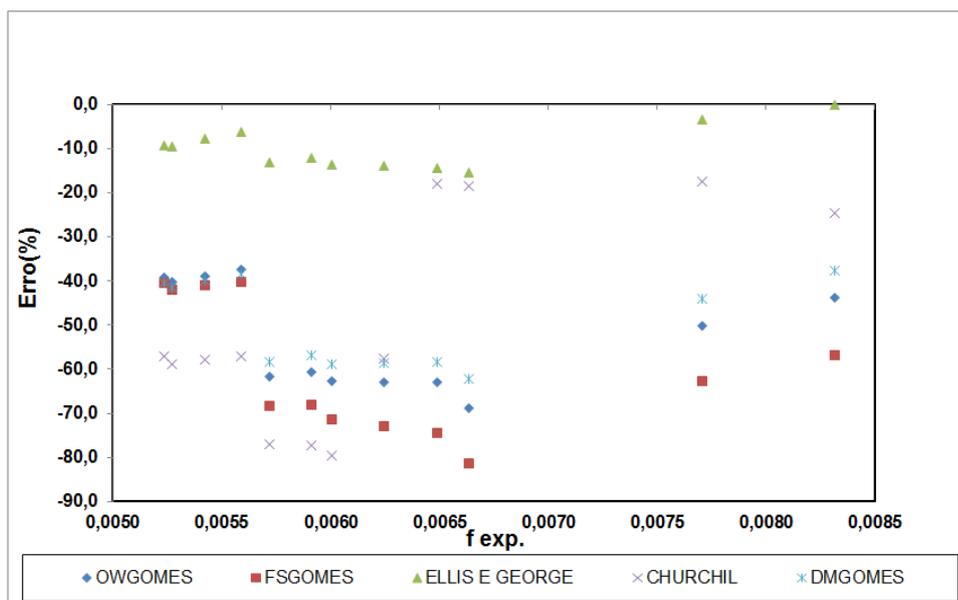


Figura 45: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 1, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH_3 .

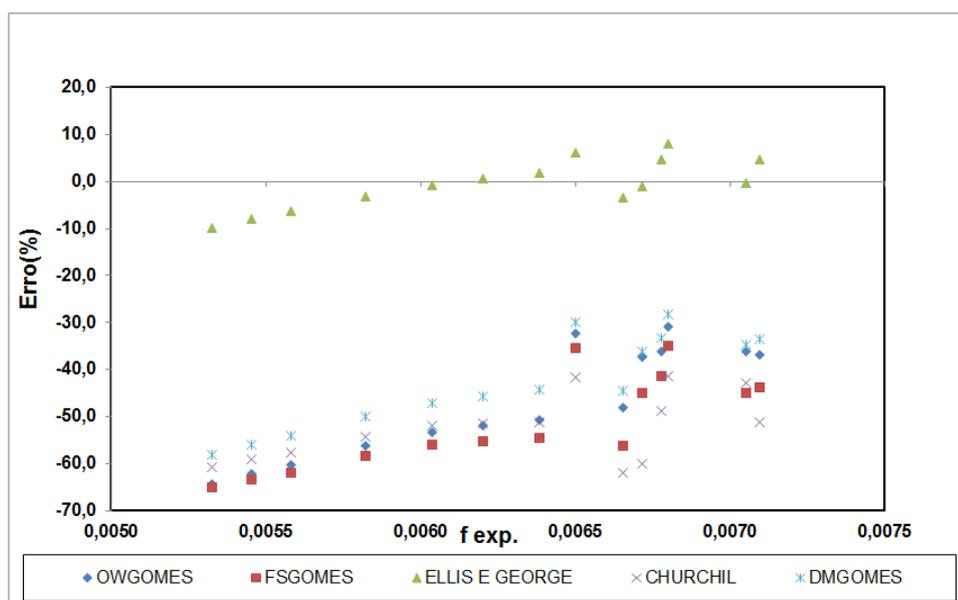


Figura 46: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH_3 .

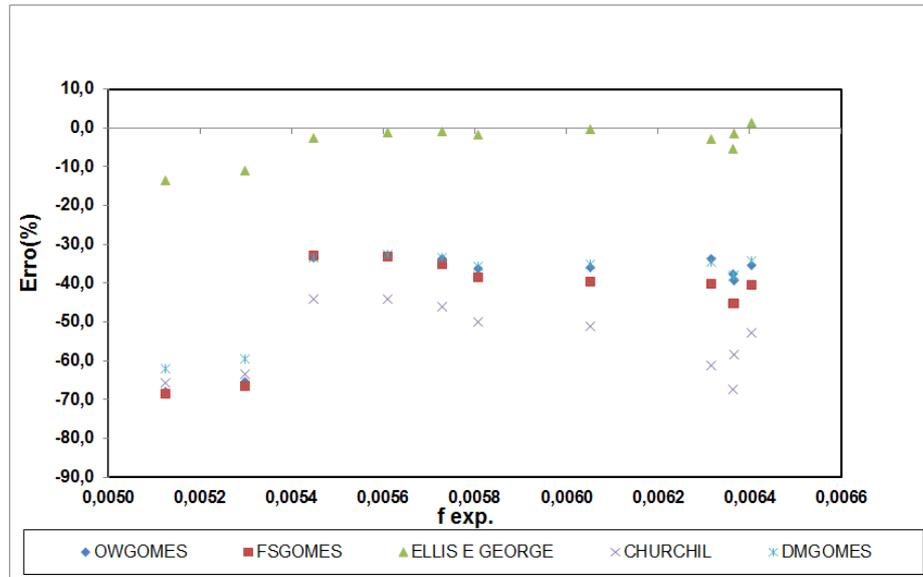


Figura 47: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 3, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH_3 .

4.5.2 Avaliação da mudança dos modelos reológicos

Uma segunda avaliação que pode ser feita no tocante as correlações de fator de atrito é a comparação entre os modelos reológicos, utilizando como exemplo os dados obtidos no anular 2 a 25°C, que são apresentados nas Figuras 48 a 50.

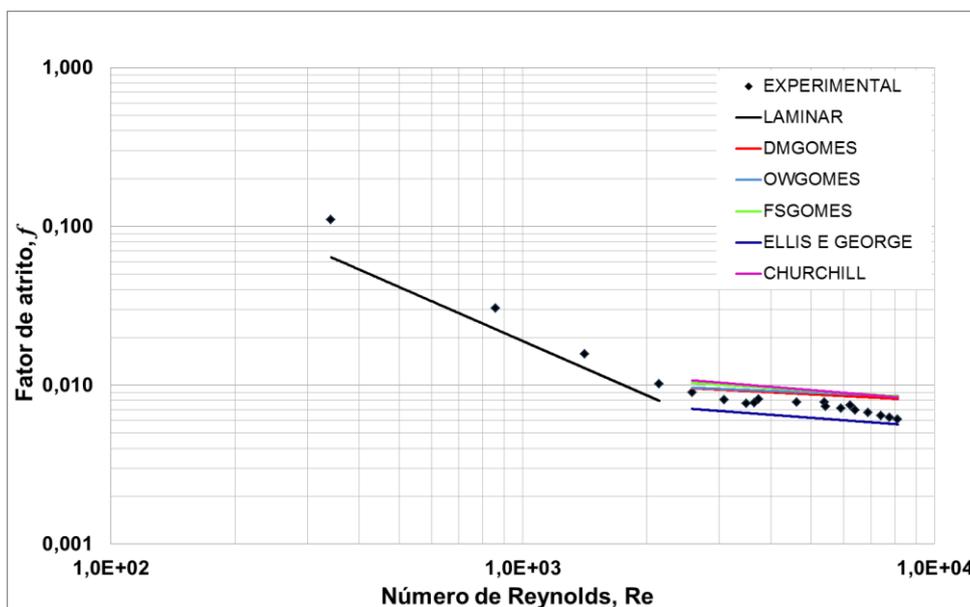


Figura 48: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH_2 .

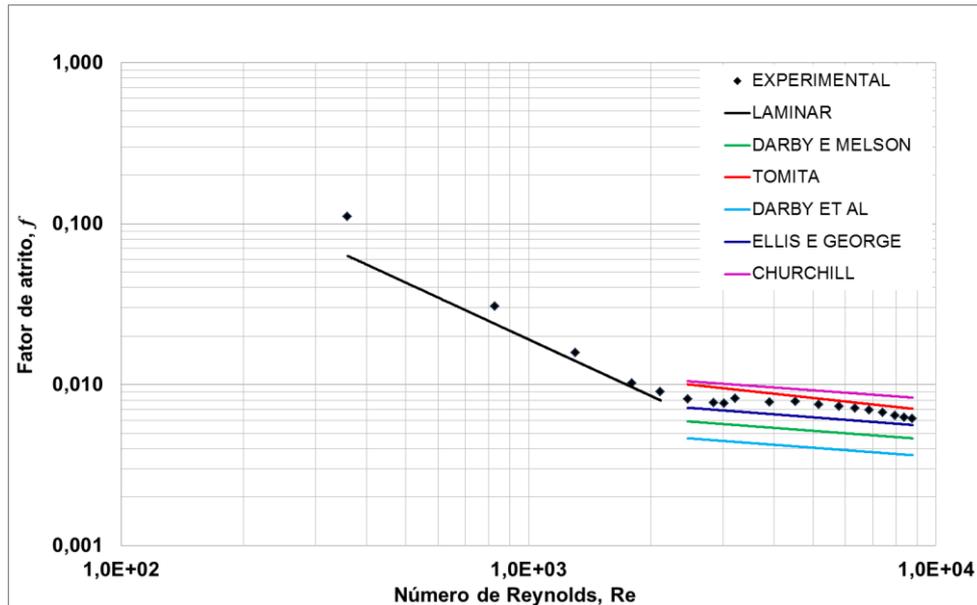


Figura 49: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Bingham e correlação DH_2 .

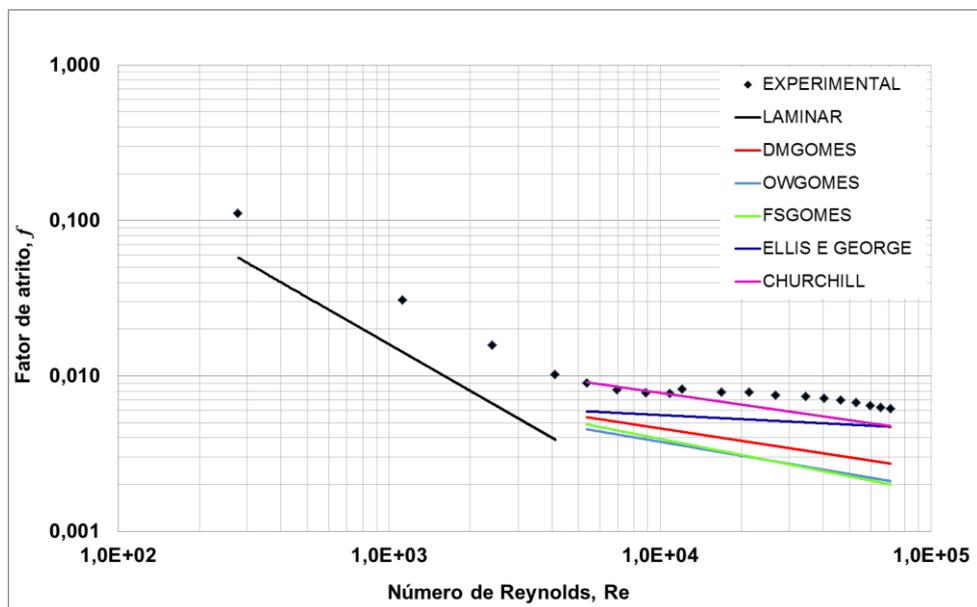


Figura 50: Gráfico de fator de atrito versus Reynolds do escoamento da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo da potência e correlação DH_2 .

Assim como na análise do diâmetro hidráulico, a avaliação do fator de atrito, apresentada nas Figuras 48 a 50, é afetada pelo erro associado ao modelo reológico. Para o modelo da potência (Figura 50), este erro causou um deslocamento significativo das correlações em relação aos pontos experimentais. Esse prejuízo gerado pelo modelo da potência causou, na maioria dos casos, uma inversão na tendência geral das correlações, isso é

percebido quando se compara as Figuras 48 e 50, respectivamente os modelos da potência e Herschell-Buckley. Através das Figuras 48 a 50 foi possível avaliar o erro percentual associado às correlações de fator de atrito e ainda o efeito do modelo reológico na aplicação das correlações. Os gráficos destes erros podem ser vistos em Figuras de 51 a 53.

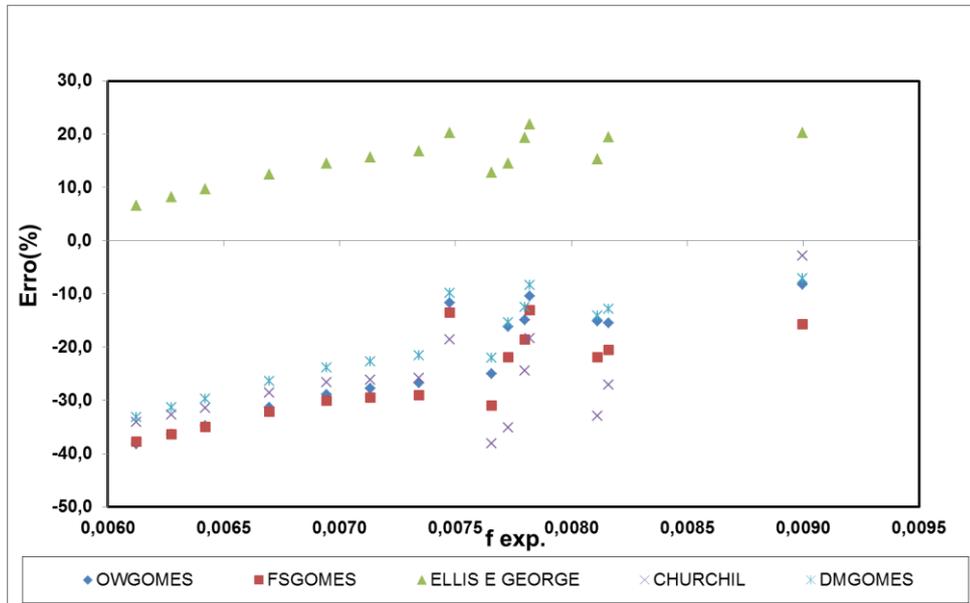


Figura 51: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley e correlação DH_2 para o cálculo do diâmetro hidráulico.

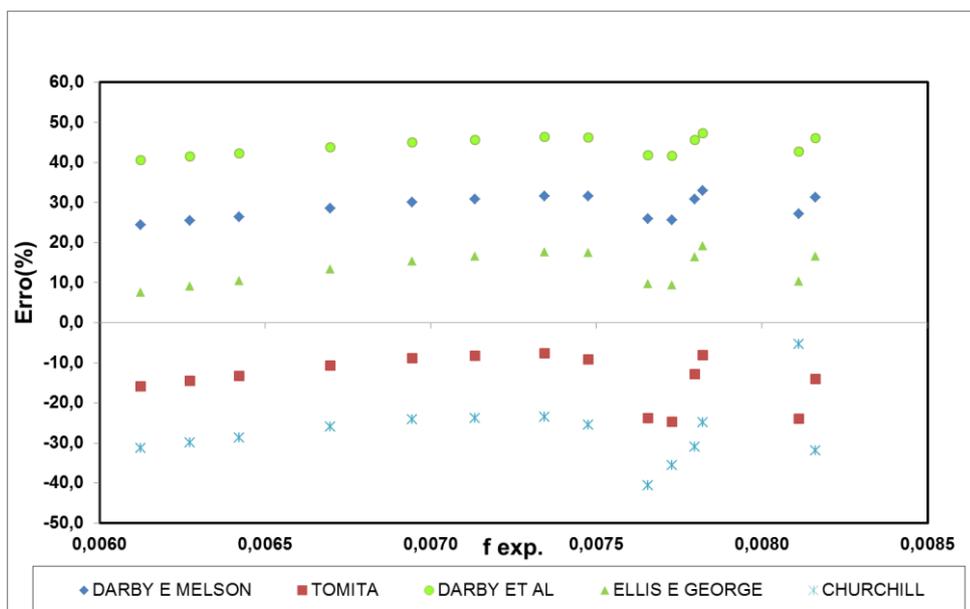


Figura 52: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo de Bingham e correlação DH_2 para o cálculo do diâmetro hidráulico.

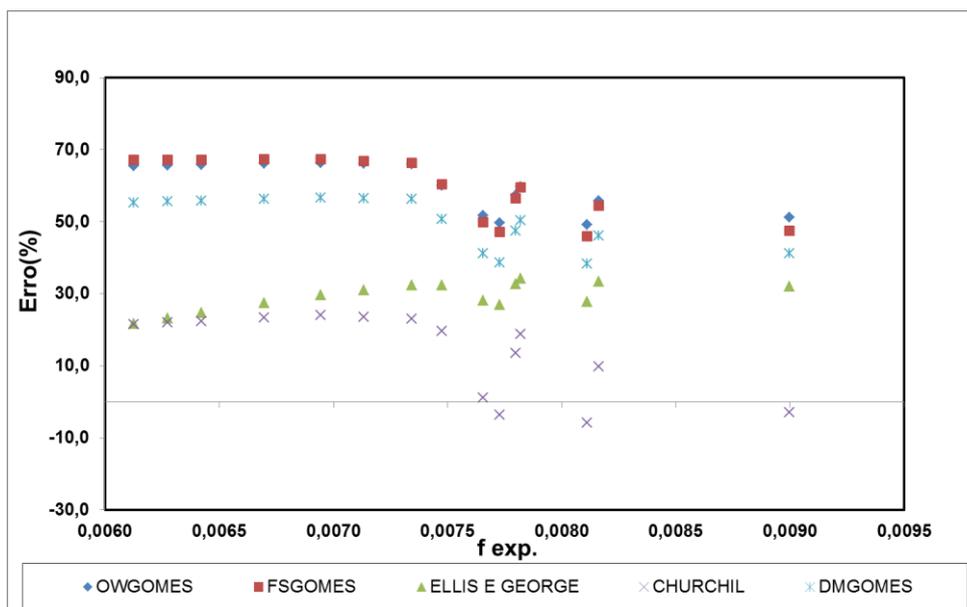


Figura 53: Erro percentual das correlações de fator de atrito da pasta 1 em anular 2, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo da potência e correlação DH_2 para o cálculo do diâmetro hidráulico.

Através das Figuras 51 e 52, é possível avaliar que a correlação de ELLIS e GEORGE (1977) apresenta o melhor ajuste dos dados para os modelos de Bingham e Herschell-Buckley, com erros médios da ordem de 13,6 e 15,2% respectivamente.

Para o modelo da potência (Figura 53), a correlação de CHURCHILL (1977) apresentou erro médio da ordem de 15,7%. Neste mesmo modelo, a correlação de ELLIS e GEORGE (1977) se apresenta como uma segunda opção com erro médio da ordem de 29,2%.

Utilizando o modelo de Bingham (Figura 52), vale destacar a correlação de TOMITA (1959) que apresentou erro médio da ordem de 14%.

A mesma análise gráfica realizada nos itens **4.5.1** e **4.5.2**, que tratam respectivamente da avaliação do fator de atrito com a mudança de geometria e com a mudança do modelo reológico, foi feita com os resultados obtidos nos experimentos realizados com pasta 1, em anulares I, II, III e duto circular de 1", nas temperaturas de 15, 25 e 60°C, com os três modelos reológicos e com as três correlações de diâmetro hidráulico e foram condensados em forma de erros médios absoluto das correlações de fator de atrito em Tabelas 9, 10 e 11.

As Tabelas 9, 10 e 11 mostram, em destaque, as correlações que obtiveram uma média dos erros percentuais médios inferiores a 25%.

Tabela 9: Avaliação das correlações de fator de atrito em termos de erros percentuais absolutos médios a 15°C.

| Correlações de fator de atrito pasta 1 (15°C) | Circular 1" | ANULAR 1 (2" e 1 1/2") | | | ANULAR 2 (1 1/2" e 1") | | | ANULAR 3 (1 1/4" e 3/4") | | | ERRO MÉDIO | | | |
|-----------------------------------------------|----------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| | | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | |
| power law | Laminar | 15,6 | 25,7 | 44,3 | 40,1 | 30,3 | 47,6 | 39,8 | 31,1 | 48,5 | 29,6 | 29,0 | 46,8 | 36,5 |
| | DM Gomes | 32,6 | 14,8 | 31,7 | 27,8 | 31,5 | 45,1 | 35,7 | 32,2 | 45,7 | 36 | 26,2 | 40,8 | 33,2 |
| | OW Gomes | 45,2 | 28,3 | 42,5 | 39,3 | 42,3 | 53,8 | 46 | 42,4 | 53,9 | 45,5 | 37,7 | 50,1 | 43,6 |
| | FS Gomes | 43,8 | 26,4 | 41,3 | 37,9 | 41 | 53 | 45,2 | 41,5 | 53,4 | 44,4 | 36,3 | 49,2 | 42,5 |
| | Ellis e George | 12,6 | 12,1 | 18,8 | 14,4 | 17,1 | 32,9 | 21,3 | 19,5 | 34,9 | 24,4 | 16,2 | 28,9 | 20,0 |
| | Churchill | 13,2 | 34,3 | 7,9 | 13,5 | 10,4 | 13,6 | 8 | 6,7 | 16,9 | 7,1 | 17,1 | 12,8 | 9,5 |
| Bingham | Laminar | 14,5 | 108,6 | 40,2 | 54,8 | 44,4 | 7,4 | 27,7 | 31 | 13,6 | 21,4 | 61,3 | 20,4 | 34,6 |
| | Darby e Melson | 19,4 | 16,8 | 11,5 | 10,8 | 12,5 | 32,2 | 18,8 | 15,2 | 31,9 | 19,1 | 14,8 | 25,2 | 16,2 |
| | Tomita | 17,7 | 99,7 | 53,2 | 63,7 | 47,5 | 12,8 | 35,9 | 41,5 | 12,3 | 34,6 | 62,9 | 26,1 | 44,7 |
| | Darby et al. | 36,5 | 11,6 | 30,6 | 26,3 | 31,3 | 46,8 | 36,3 | 33,5 | 46,5 | 36,5 | 25,5 | 41,3 | 33,0 |
| | Ellis e George | 6,5 | 44,2 | 13,1 | 18,6 | 9 | 16,3 | 3,8 | 11,3 | 16,8 | 9,3 | 21,5 | 15,4 | 10,6 |
| | Churchill | 33,6 | 95,9 | 56,5 | 66,2 | 55,7 | 24,2 | 43,8 | 48,4 | 29,9 | 42,4 | 66,7 | 36,9 | 50,8 |
| Heschel-Buckley | Laminar | 14,1 | 73,3 | 19,3 | 30,9 | 33,5 | 12 | 18,6 | 24,1 | 13,7 | 15,3 | 43,6 | 15,0 | 21,6 |
| | DM Gomes | 15,0 | 86,5 | 46 | 55,2 | 41,8 | 11,2 | 31,3 | 37,9 | 13,4 | 31,6 | 55,4 | 23,5 | 39,4 |
| | OW Gomes | 13,5 | 92,1 | 50 | 59,5 | 44,7 | 12,6 | 34 | 40,9 | 14 | 34,3 | 59,2 | 25,5 | 42,6 |
| | FS Gomes | 13,8 | 105,1 | 58,7 | 69,2 | 50,9 | 15,9 | 39,3 | 46,3 | 14,3 | 39,3 | 67,4 | 29,6 | 49,3 |
| | Ellis e George | 7,8 | 35,5 | 11,2 | 13,5 | 5,3 | 19,7 | 4,3 | 9,2 | 22,7 | 8,4 | 16,7 | 17,9 | 8,7 |
| | Churchill | 29,1 | 92,2 | 48,1 | 57,2 | 47,2 | 21,4 | 35,4 | 43,3 | 23,9 | 39,9 | 60,9 | 31,1 | 44,2 |

Tabela 10: Avaliação das correlações de fator de atrito em termos de erros percentuais absolutos médios a 25°C.

| Correlações de fator de atrito pasta 1 (25°C) | Circular 1" | ANULAR 1 (2" e 1 1/2") | | | ANULAR 2 (1 1/2" e 1") | | | ANULAR 3 (1 1/4" e 3/4") | | | ERRO MÉDIO | | | |
|-----------------------------------------------|----------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| | | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | |
| power law | Laminar | 18,5 | 42,1 | 55,3 | 52,3 | 41,3 | 55,1 | 46 | 38,4 | 53,1 | 41,6 | 40,6 | 54,5 | 46,6 |
| | DM Gomes | 37,2 | 33,3 | 46,2 | 43,2 | 37,6 | 49,8 | 41,7 | 33,9 | 46,8 | 36,6 | 34,9 | 47,6 | 40,5 |
| | OW Gomes | 50,6 | 48,8 | 58,7 | 56,4 | 49,9 | 59,7 | 53,2 | 46,8 | 57,2 | 49 | 48,5 | 58,5 | 52,9 |
| | FS Gomes | 49,6 | 47,2 | 57,5 | 55,1 | 49,3 | 59,4 | 52,7 | 46,2 | 56,9 | 48,5 | 47,6 | 57,9 | 52,1 |
| | Ellis e George | 10,0 | 5,5 | 18,4 | 14,1 | 12,7 | 29,2 | 18,2 | 9 | 24,8 | 11,5 | 9,1 | 24,1 | 14,6 |
| | Churchill | 12,2 | 27,1 | 4,5 | 8,1 | 11 | 15,7 | 11,3 | 12,7 | 12,2 | 8,8 | 16,9 | 10,8 | 9,4 |
| | Laminar | 10,1 | 69,2 | 20,6 | 27,2 | 26,4 | 18,5 | 17,2 | 15,6 | 25,2 | 10,1 | 37,1 | 21,4 | 18,2 |
| | Darby e Welson | 15,3 | 14,2 | 9,7 | 5,6 | 9,6 | 28,8 | 16,1 | 5,4 | 25 | 8,7 | 9,7 | 21,2 | 10,1 |
| | Tomita | 17,6 | 95,4 | 51,7 | 60,3 | 47,8 | 14 | 36,2 | 53 | 18,1 | 45,5 | 65,4 | 27,9 | 47,3 |
| | Darby et al. | 33,1 | 11,3 | 29,1 | 25,9 | 29 | 44,1 | 34,1 | 25 | 41,1 | 28,3 | 21,8 | 38,1 | 29,4 |
| Bingham | Ellis e George | 6,8 | 41,7 | 11 | 16,9 | 10,3 | 13,6 | 4,2 | 16,1 | 9,3 | 10,8 | 22,7 | 11,3 | 10,6 |
| | Churchill | 32,9 | 91 | 51,8 | 58,7 | 55,3 | 27,3 | 46,1 | 69,4 | 32,6 | 62,6 | 71,9 | 37,2 | 55,8 |
| | Laminar | 11,3 | 59,1 | 15,5 | 22,4 | 11,9 | 27,1 | 9 | 11,8 | 25,1 | 9,3 | 27,6 | 22,6 | 13,6 |
| | DM Gomes | 19,3 | 79,6 | 41,8 | 49,6 | 54 | 19,4 | 42,6 | 53,1 | 19,1 | 46 | 62,2 | 26,8 | 46,1 |
| | OW Gomes | 18,9 | 83,4 | 44,1 | 52,5 | 58,9 | 22,8 | 47 | 55,6 | 20,7 | 48,4 | 66,0 | 29,2 | 49,3 |
| Heschel-Buckley | FS Gomes | 17,4 | 93,8 | 50,4 | 60 | 64 | 25,7 | 51,2 | 58,3 | 22,1 | 50,7 | 72,0 | 32,7 | 54,0 |
| | Ellis e George | 7,0 | 32,2 | 4,8 | 9,9 | 8,5 | 15,2 | 4,2 | 12 | 12,1 | 7,2 | 17,6 | 10,7 | 7,1 |
| | Churchill | 28,5 | 80,4 | 44,2 | 50,1 | 63,7 | 26,8 | 52,4 | 66,5 | 28,5 | 58,5 | 70,2 | 33,2 | 53,7 |

Tabela 11: Avaliação das correlações de fator de atrito em termos de erros percentuais absolutos médios a 60°C.

| Correlações de fator de atrito pasta 1 (60°C) | Circular 1" | ANULAR 1 (2" e 1 1/2") | | | ANULAR 2 (1 1/2" e 1") | | | ANULAR 3 (1 1/4" e 3/4") | | | ERRO MÉDIO | | | |
|-----------------------------------------------|----------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| | | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | DH ₁ | DH ₂ | DH ₃ | |
| power law | Laminar | 13,7 | 23,5 | 30,1 | 30,2 | 20,3 | 33,4 | 21,7 | 15,2 | 38 | 24,4 | 19,7 | 33,8 | 25,4 |
| | DM Gomes | 39,7 | 36,8 | 50,4 | 46,6 | 49,2 | 58,8 | 52,5 | 32,7 | 45,1 | 34,8 | 39,6 | 51,4 | 44,6 |
| | OW Gomes | 57,2 | 57,1 | 66,2 | 63,7 | 66,2 | 72,5 | 68,2 | 49,7 | 59 | 51,2 | 57,7 | 65,9 | 61,0 |
| | FS Gomes | 55,2 | 54,4 | 63,7 | 61,3 | 64,2 | 70,7 | 66,1 | 48,7 | 58,5 | 50,6 | 55,8 | 64,3 | 59,3 |
| | Ellis e George | 9,9 | 25,8 | 10,9 | 10,7 | 11,9 | 14,4 | 11,2 | 14,9 | 12,2 | 12,4 | 17,5 | 12,5 | 11,4 |
| | Churchill | 36,5 | 59,1 | 25,8 | 34,7 | 32,6 | 7,5 | 24,1 | 34,4 | 8,5 | 29 | 42,0 | 13,9 | 29,3 |
| | Laminar | 7,4 | 103,4 | 44,7 | 58,2 | 51,3 | 7,7 | 35,9 | 31,5 | 7,2 | 22,9 | 62,1 | 19,9 | 39,0 |
| | Darby e Melson | 13,9 | 36 | 11,4 | 17 | 12,7 | 11,9 | 9,7 | 14,5 | 11,3 | 10,8 | 21,1 | 11,5 | 12,5 |
| | Tomita | 33,3 | 130,1 | 80,5 | 92,7 | 71,8 | 32,7 | 58,4 | 78,4 | 37,6 | 69,8 | 93,4 | 50,3 | 73,6 |
| Bingham | Darby et al. | 9,3 | 12 | 13,7 | 8,6 | 12,9 | 29,9 | 18,6 | 11,3 | 28,9 | 14 | 12,1 | 24,2 | 13,7 |
| | Ellis e George | 13,6 | 67,6 | 32,8 | 41,4 | 30,6 | 9,5 | 21,1 | 37,7 | 11 | 31,5 | 45,3 | 17,8 | 31,3 |
| | Churchill | 49,8 | 133,6 | 86,6 | 98,1 | 82,1 | 47 | 70 | 100,6 | 56,6 | 91,9 | 105,4 | 63,4 | 86,7 |
| | Laminar | 6,8 | 15,2 | 10,5 | 10 | 18,9 | 12,4 | 13,5 | 12,4 | 22,7 | 12,8 | 15,5 | 15,2 | 12,1 |
| | DM Gomes | 15,2 | 22 | 7,8 | 7,8 | 9,9 | 26,1 | 13,9 | 31,3 | 8,5 | 25,5 | 21,1 | 14,1 | 15,7 |
| Heschel-Buckley | OW Gomes | 8,0 | 12 | 15,9 | 9,9 | 20,9 | 36,7 | 26,1 | 22,9 | 11,7 | 18,5 | 18,6 | 21,4 | 18,2 |
| | FS Gomes | 7,9 | 15,4 | 14 | 9,5 | 21,4 | 36,7 | 25,9 | 22,3 | 11,8 | 16,8 | 19,7 | 20,8 | 17,4 |
| | Ellis e George | 10,8 | 31,6 | 9,5 | 12,8 | 11,9 | 12,9 | 10,4 | 23,3 | 10,2 | 18,3 | 22,3 | 10,9 | 13,8 |
| | Churchill | 39,1 | 77,8 | 39,8 | 49,8 | 38,2 | 10,3 | 28,8 | 62,4 | 28,3 | 55,1 | 59,5 | 26,1 | 44,6 |

Na avaliação do fator de atrito no **regime laminar**, a equação do modelo de Herschell-Buckley (Equação 22), associada às correlações DH_2 ou DH_3 , apresenta bons resultados, nas três temperaturas estudadas, nos três anulares estudados e no duto circular de 1”.

Utilizando a equação do modelo de Bingham (Equação 19), para avaliação do fator de atrito no **regime laminar**, é possível perceber, através das Tabelas de 9 a 11, que a utilização da correlação DH_2 permite uma boa previsão do fator de atrito, nas três temperaturas estudadas. Esta mesma correlação aplicada ao duto circular, também apresenta bons resultados, nas três temperaturas.

A equação do modelo da potência (Equação 17), para o fator de atrito no regime laminar, não apresentou bons resultados quanto à previsão do fator de atrito, para os dutos anulares no **regime laminar**, nas temperaturas de 15 e 25°C. A 60°C, a equação do modelo da potência (Equação 17), já demonstra relativa melhora, principalmente quando associada à correlação DH_1 . No duto circular, no entanto, esta equação, apresenta bons resultados nas três temperaturas estudadas.

Dentre as correlações de fator de atrito para o **regime turbulento**, deve-se ressaltar a eficiência da correlação de ELLIS e GEORGE (1977), que apesar de sua simplicidade matemática foi bem aplicada, na previsão do fator de atrito no regime turbulento, nos três anulares estudados e no duto circular de 1”, utilizando os três modelos reológicos e nas três temperaturas estudadas.

A correlação de CHURCHILL (1977) apresentou bons resultados nos três anulares estudados e no duto circular de 1”, utilizando o modelo da potência nas temperaturas de 15 e 25°C, com as três correlações de diâmetro hidráulico. Esta correlação apresenta ainda, bom resultado nos dutos anulares a 60°C, utilizando a correlação DH_2 como fator geométrico.

As correlações propostas por GOMES (1987) (FSGOMES, OWGOMES e DMGOMES), mostraram-se eficazes para o regime turbulento no duto circular de 1”, nas três temperaturas, utilizando o modelo de Herschell-Buckley. Estas correlações, apresentam ainda bons resultados para os dutos anulares a 60°C, utilizando o modelo de Herschell-Buckley.

Além da correlação de ELLIS E GEORGE (1977), utilizando o modelo de Bingham, a correlação de DARBY e MELSON (1981), foi bem aplicada, na previsão do fator de atrito no regime turbulento dos três anulares estudados e do duto circular de 1”, nas três temperaturas avaliadas.

Utilizando o modelo de Bingham, a correlação de DARBY *et al.* (1992) foi bem aplicada, na previsão do fator de atrito no regime turbulento dos três anulares estudados a 60°C.

As correlações propostas por GOMES (1987) (FSGOMES, OWGOMES e DMGOMES), para os dutos e fluido analisados, não apresentaram bons resultados com o modelo da potência. Há exceção em apenas um caso, com a correlação DMGOMES (Equação 38), no anular 1, utilizando a correlação DH_1 a 15°C.

A correlação proposta por CHURCHILL (1977), para os dutos e fluido analisados, não apresentou bons resultados com o modelo de Bingham. Há exceção de apenas um caso, no anular 2, utilizando a correlação DH_2 a 15°C.

Utilizando o modelo de Herschell-Buckley, a correlação de CHURCHILL (1977) não apresentou bons resultados, para os dutos e fluido analisados, com exceção de 2 casos, nos anulares 2 e 3, utilizando a correlação DH_2 a 15°C e um outro caso no anular 2, utilizando a correlação DH_2 a 60°C.

4.6 Avaliações das incertezas

Dentre os resultados obtidos, constata-se que as correlações de ELLIS E GEORGE (1977), Equação 31, e de DARBY e MELSON (1981), Equação 32, apresentaram bons resultados para a pasta de cimento analisada, quando aplicada com o modelo de Bingham. Nestes casos, em particular, são estudadas as incertezas relacionadas às seguintes variáveis: queda de pressão calculada; fator de atrito (experimental e calculado) e dados reológicos. Foram utilizados os resultados obtidos nos experimentos realizados no anular II a 15, 25 e 60°C. Nestas avaliações foi utilizada a Equação 42, para o cálculo do diâmetro hidráulico.

As incertezas das variáveis experimentais foram propagadas para determinação do intervalo de confiança. Estes resultados foram analisados através de gráficos de $f \times Re_B$ e $\Delta P_{calc} \times \Delta P_{exp}$.

4.6.1 Determinação das incertezas das variáveis experimentais

As incertezas das variáveis experimentais são apresentadas em Tabela 12. Estas incertezas foram fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos ou definida pela metade da menor escala de leitura, no caso do FANN 35A. Incertezas referentes ao comprimento do

trecho reto, diâmetro dos dutos e aceleração da gravidade não foram consideradas significativas.

Tabela 12: Incerteza das variáveis experimentais

| Variável experimental | $2\sigma_i$ | Unidade |
|-------------------------|-------------|---------|
| ΔP (transdutor) | 0,075 | % span |
| W(vazão mássica) | 0,18 | % span |
| ρ (densidade) | 0,15 | % span |
| θ (def. angular) | 0,5 | grau |

4.6.2 Determinação das incertezas estimadas dos parâmetros reológicos (desvio padrão)

O desvio padrão dos parâmetros reológicos do modelo de Bingham foi obtido através da metodologia apresentada no **item 3.6.1**. As incertezas experimentais foram calculadas utilizando o fator de abrangência igual a 2. As incertezas estimadas são apresentadas em Tabela 13, de acordo com a temperatura do ensaio.

Tabela 13: Incertezas estimadas dos parâmetros do modelo de Bingham

| Temperatura(°C) | Grandezas | $2\sigma_i$ | Unidade |
|-----------------|-----------|-------------|---------|
| 15 | VP_B | 0,00673 | Pa.s |
| | LE_B | 0,275 | Pa |
| 25 | VP_B | 0,00048 | Pa.s |
| | LE_B | 0,398 | Pa |
| 60 | VP_B | 0,00093 | Pa.s |
| | LE_B | 1,328 | Pa |

4.6.3 Propagação das incertezas experimentais nas variáveis calculadas

A propagação das incertezas experimentais foi feita inicialmente sobre as variáveis calculadas: velocidade média (v), número de Reynolds modificado para o modelo de Bingham (Equação 20) e o número de Hedstron (Equação 21). As incertezas dessas variáveis foram

calculadas utilizando a metodologia apresentada nos **itens 3.6 e 3.6.1**. As incertezas médias percentuais são apresentadas em Tabela 14.

Tabela 14: Incertezas médias percentuais das variáveis calculadas

| Temperatura(°C) | Grandezas | $2\sigma_i$ (%) |
|------------------------|------------------|-----------------------------------|
| 15 | <v> | 0,23 |
| | Re _B | 24,08 |
| | He _B | 49,05 |
| 25 | <v> | 0,23 |
| | Re _B | 2,62 |
| | He _B | 27,10 |
| 60 | <v> | 0,23 |
| | Re _B | 10,43 |
| | He _B | 29,06 |

De posse das incertezas apresentadas nas Tabelas 13 e 14 foi possível, continuar a propagação em busca da incerteza relativa às variáveis de interesse de análise que são: fator de atrito experimental (Equação 14), fator de atrito de ELLIS E GEORGE (1977), Equação 31, e fator de atrito de DARBY e MELSON (1981), Equação 32, e a queda de pressão calculada.

4.6.4 Propagação das incertezas experimentais no calculo do fator de atrito (f_{calc} e f_{exp})

Esta propagação de incertezas foi realizada nos regimes de escoamento de transição e turbulento, nas temperaturas de 15, 25 e 60°C. Foi utilizado o modelo de Bingham para modelar os dados reológicos e a correlação DH₂ para o diâmetro hidráulico. Os gráficos apresentados nas Figuras 54 a 56 mostram as incertezas relativas obtidas no cálculo do fator de atrito, no regime turbulento, a 15, 25 e 60°C, no escoamento da pasta de cimento no duto anular II. Além do fator de atrito experimental (Equação 14), foi avaliada a incerteza associada aos modelos de ELLIS E GEORGE (1977), Equação 31, e de DARBY e MELSON (1981), Equação 32.

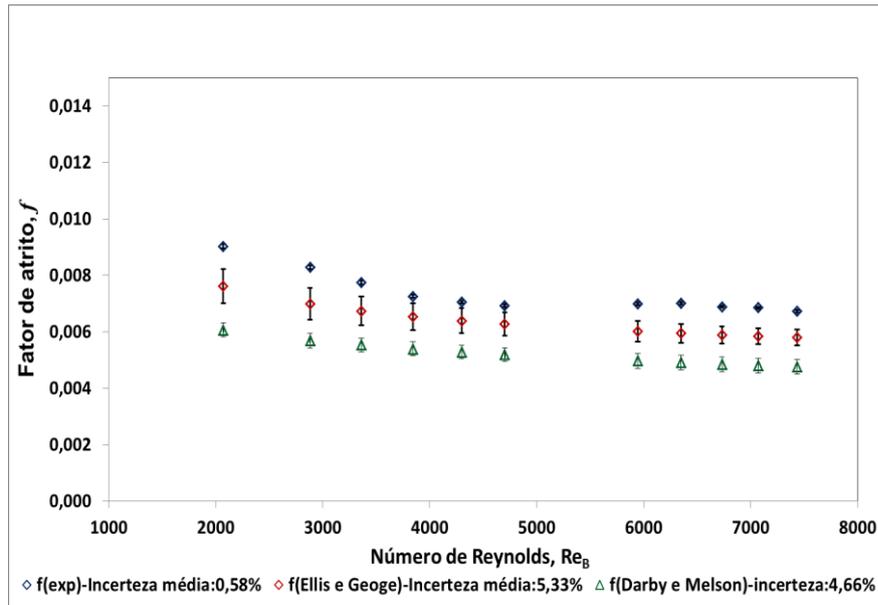


Figura 54: Gráfico de avaliação da incerteza relativa ao fator de atrito nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 15 °C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico.

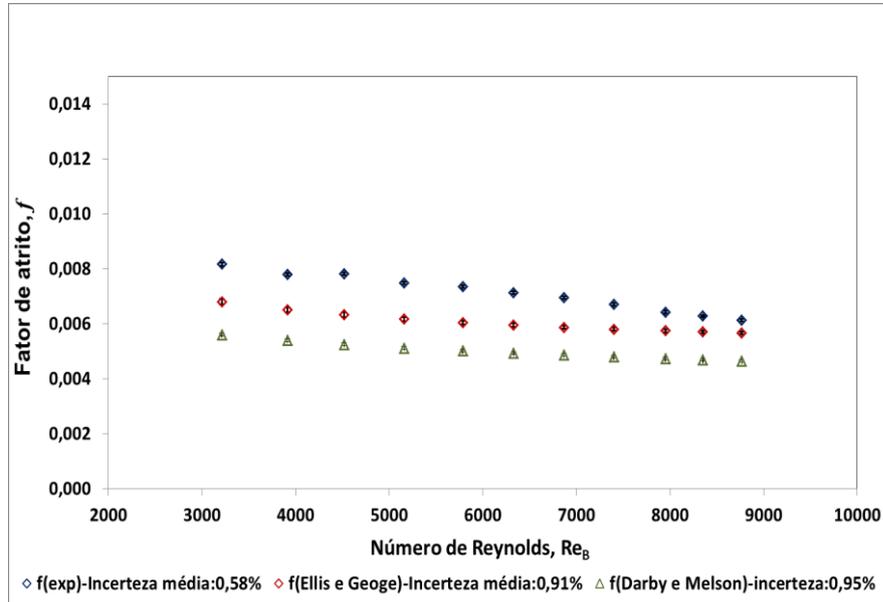


Figura 55: Gráfico de avaliação da incerteza relativa ao fator de atrito nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico.

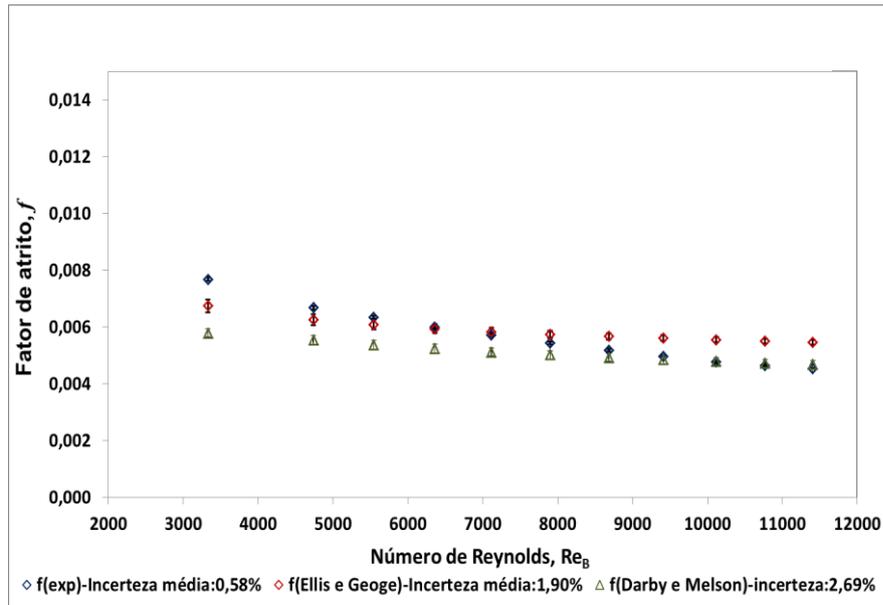


Figura 56: Gráfico de avaliação da incerteza relativa ao fator de atrito nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 60°C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico.

Nas Figuras de 54 a 56 o fator de atrito experimental apresentou uma incerteza média de 0,58%. As demais correlações avaliadas apresentaram baixa incerteza média, variando entre 0,91 e 5,33%.

4.6.5 Propagação das incertezas experimentais no ΔP_{calc}

Esta propagação de incertezas foi realizada nos regimes de escoamento turbulento e de transição, nas temperaturas de 15, 25 e 60°C. Foi utilizado o modelo de Bingham para modelar os dados reológicos e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico. As Figuras 57 a 59 apresentam as incertezas relativas à queda de pressão calculada do escoamento da pasta de cimento no duto anular II.

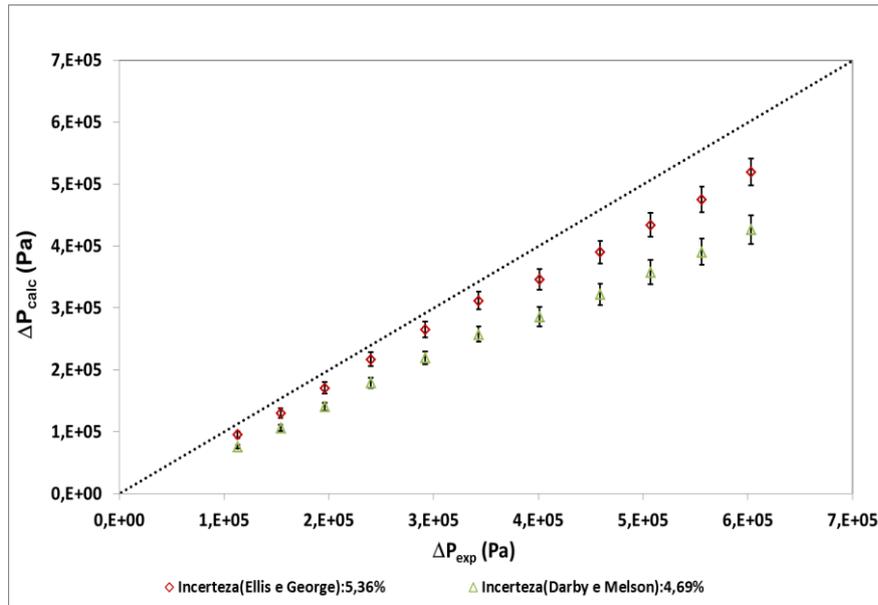


Figura 57: Gráfico de avaliação da incerteza relativa a queda de pressão nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 15 °C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico.

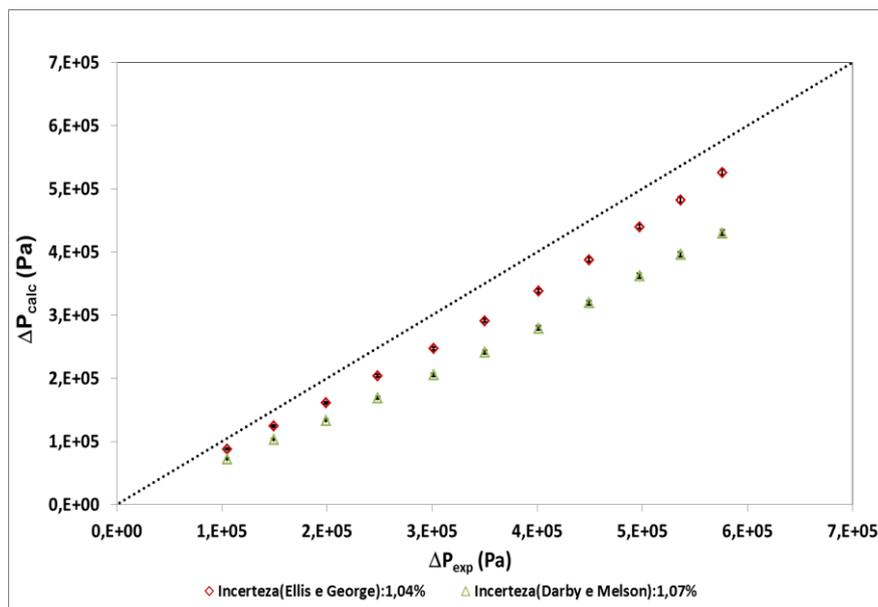


Figura 58: Gráfico de avaliação da incerteza relativa a queda de pressão nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 25 °C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico.

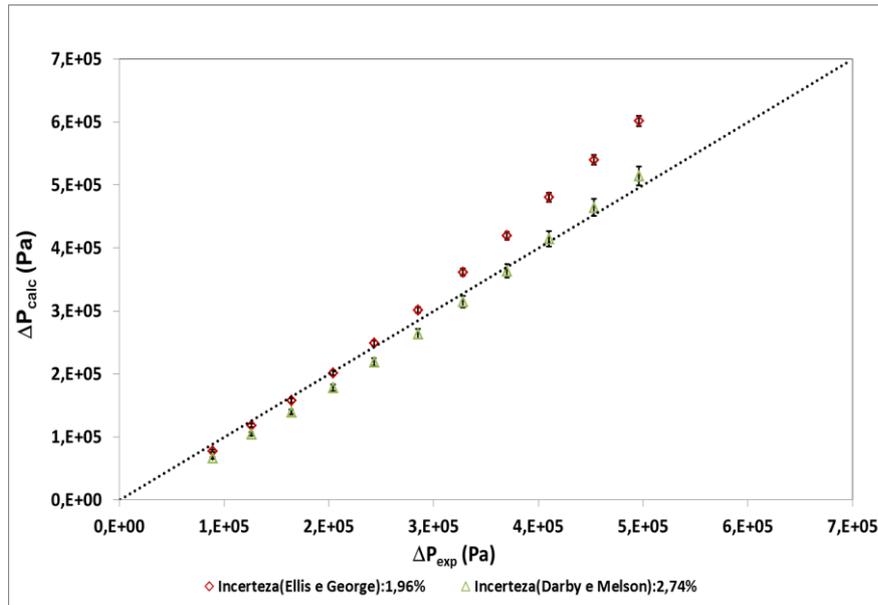


Figura 59: Gráfico de avaliação da incerteza relativa a queda de pressão nos regimes de transição e turbulento do escoamento da pasta 1 em duto anular II, temperatura de 60 °C, utilizando o modelo reológico de Bingham e a correlação DH_2 para o diâmetro hidráulico.

As Figuras de 57 a 59 apresentam as incertezas experimentais obtidas para a perda de carga calculada. Com a utilização da correlação de ELLIS E GEORGE (1977), Equação 32, a incerteza média variou entre 1,04 e 5,36%. Para a correlação de DARBY e MELSON (1981), Equação 32, a incerteza média variou entre 1,07 e 4,69%.

5 CONCLUSÕES

As perdas de carga do escoamento de pasta de cimento em dutos circular e anulares concêntricos foram avaliadas. Através destes dados foi possível avaliar equações de fator de atrito nos regimes de escoamento laminar e turbulento, avaliar a transição entre os regimes de escoamento e ainda equações de diâmetro hidráulico. Os modelos reológicos utilizados foram potência, Bingham e Herschell-Buckley.

Na análise dos modelos reológicos, o modelo de Herschell-Buckley foi, em todos os casos, independentemente da temperatura, o que obteve melhor correlação dos dados reológicos. O modelo de Bingham aparece como uma segunda opção no ajuste dos dados reológicos nas temperaturas de 15 e 25°C, porém a 60°C este modelo não é indicado. O modelo da potência nas 3 temperaturas analisadas apresenta coeficientes insatisfatórios.

Na avaliação das correlações de Reynolds crítico, MISHRA e TRIPATHI (1971) e HANKS (1963) apresentaram previsão satisfatória para o duto circular de 1", utilizando respectivamente os modelos *power law* e de Bingham, nas 3 temperaturas. Para os dutos anulares, MISHRA e TRIPATHI (1971) apresentou bons resultados utilizando o modelo *power law* para o duto anular 3, à 25 e 60°C. Com o modelo de Herschell-Buckley, ainda na avaliação dos dutos anulares, MISHRA e TRIPATHI (1971) e RYAN E JONHSON (1959) à 25 e 60°C, apresentaram bons resultados em quase todos os anulares estudados.

A análise das correlações de diâmetro hidráulico mostrou que as correlações DH_2 e DH_3 são as mais indicadas, quando se utiliza os modelos de Bingham e Herschell-Buckley, no dimensionamento dos anulares estudados, pelo menor erro percentual médio. Os resultados de erros percentuais apresentados para as correlações, utilizando o modelo da potência, não foram satisfatórios, apesar disso, para este modelo, a correlação DH_1 apresenta melhores resultados em todos os anulares e temperaturas avaliadas. Numa análise mais apurada, é possível notar que a correlação DH_3 , mesmo não sendo a correlação que apresenta, na maioria dos casos avaliados, o menor erro percentual, demonstra-se mais estável, sem extremos elevados de erro percentual, como ocorre com as demais. Vale destacar que esta correlação continua sendo desenvolvida.

Na avaliação do fator de atrito no regime laminar, a equação do modelo de Herschell-Buckley, associada às correlações DH_2 ou DH_3 , apresenta bons resultados, nas três temperaturas estudadas, nos três anulares estudados e no duto circular de 1". A equação do modelo de Bingham, permite uma boa previsão do fator de atrito no regime laminar, nas três

temperaturas estudadas, utilizando a correlação DH_2 . Esta mesma correlação aplicada ao duto circular, também apresenta bons resultados, nas três temperaturas. Para o modelo da potência, a Equação 17, não apresentou bons resultados quanto à previsão do fator de atrito no regime laminar, para os dutos anulares, no entanto, para o duto circular, esta equação apresenta bons resultados nas três temperaturas estudadas.

Na avaliação das correlações de fator de atrito, no regime turbulento, a de ELLIS e GEORGE (1977) se destacou, entre as demais, pela ampla faixa de aplicação e pelos baixos erros percentuais. Outro destaque é a correlação proposta por DARBY e MELSON (1981), que foi bem aplicada, na previsão do fator de atrito no regime turbulento dos três anulares estudados e do duto circular de 1", nas três temperaturas avaliadas. A correlação de CHURCHILL (1977) apresentou bons resultados para o modelo da potência nas temperaturas de 15 e 25°C. As correlações propostas por GOMES (1987) (FSGOMES, OWGOMES e DMGOMES) mostraram-se eficazes para o regime turbulento a 60°C e com o modelo de Herschell-Buckley.

A análise de incerteza mostrou que a unidade experimental possui uma baixa incerteza nas variáveis experimentais. Estas incertezas, ao serem propagadas, geraram uma pequena incerteza nas variáveis calculadas, fator de atrito e queda de pressão.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros estão relacionadas com a avaliação de novas correlações para transição de regimes de escoamento e modificações na unidade experimental.

Em relação às correlações de transição dos regimes de escoamento, embora se tenha alguns resultados satisfatórios, deve-se realizar uma revisão de literatura mais aprofundada sobre esse tema, em busca de novas correlações. Outra possibilidade é de se propor novas correlações utilizando os dados obtidos neste experimento e uma posterior validação com nova pasta de cimento.

As sugestões de modificação na unidade experimental visam facilitar a aquisição de dados durante o experimento, reduzindo o tempo de análise. Recomenda-se a alteração do posicionamento do medidor de vazão mássica, com o intuito de evitar o acúmulo de bolhas durante a região transitória de escoamento. Devido ao bombeamento relativamente pulsante se sugere a instalação de um acumulador de pulso na saída da bomba (antes do trecho experimental) para reduzir as oscilações no transdutor de pressão em elevadas vazões.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9831 – Cimento Portland destinado a cimentação de poços petrolíferos - Requisitos e métodos de ensaio**, Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

BARTHEM, R. B. **Tratamento e Análise de Dados em Física Experimental**, Cadernos Didáticos UFRJ, 1996.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômeno de Transporte**, 2ª edição, Editora LTC, 2004.

BOURGOYNE JR, A. T.; MILLHEIM, K. K.; CHENEVERT, M. E.; YOUNG JR, F. S. **Applied drilling engineering**. Second printing, Society of petroleum engineers, Richardson, Texas, 1991.

BRAGA, E. R. **Estudo do escoamento de fluidos de perfuração em dutos e em regiões anulares**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009.

CAMPOS, G.; SIMÃO, A.C.; TEIXEIRA, C. K.; CONCEIÇÃO, F.C. A. Curso básico sobre cimentação primária. **Apostila Interna**, CENPES/PETROBRAS, novembro de 2002.

CHURCHILL, S. W. Friction factor equation spans all fluid flow regimes. **J. Chem. Eng.**, 7 November, 1977.

DARBY, R.; MELSON, J. How to predict the friction factor for the flow of Bingham plastics. **J. Chem. Eng.**, vol. 88, no. 26, pp. 59–6, 28 Dec 1981.

DARBY, R.; MUN, R.; BOGER, D. V. Predict Friction Loss in Slurry Pipes, **J. Chem. Eng.**, v.9, p.116, 1992.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Quarta edição, Editora LTC, 1998.

GOMES, F. J. A. D. Hidráulica, fluidos de potência: racionalização do uso do fator de fricção, I. **Encontro Técnico sobre Informática na Perfuração**, CAPER/87, Módulo 7, Salvador, Brasil, 1987.

GONÇALVES, R. S.A. **Avaliação de Perda de Carga e do Fator de Atrito no Escoamento de Fluidos de Perfuração em Geometrias Circular e Anulares Concêntricos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.

HANKS, R.W. Laminar-turbulent transition for flow in pipes, concentric annuli, and parallel plates. **AICHE Journal** ; v. 9, n.1, p. 45-48, 1963.

MIRANDA, C.R.; MELO, V. A. A.; FAIRBAIRN, E.; TOLEDO, D. R.; THAUMATURGO, C. Aspectos relevantes em reologia de pastas de cimento com alto teor de sólidos, **III Encontro Nacional de Hidráulica de Poços**, 2009.

MISHRA, P.; TRIPATHI, G. Transition from laminar to turbulent flow of purely viscous non-Newtonian fluids in tubes. **Chemical Engineering Science**, 26, 915-921, Junho, 1971.

NELSON, E. B. **Well Cementing**, Houston: Schlumberger Educational Services, 1990.

PETROBRAS. Manual de determinação das propriedades e parâmetros reológicos da pasta e cimento através de um viscosímetro rotativo. **Padrão interno**, CENPES/ PETROBRAS, 3ª Revisão, Julho, 2005.

ROCHA, D. C. **Determinação da Perda de Carga de Fluidos de Perfuração no Escoamento Através de Acessórios Especiais**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008.

RYAN, N. W.; JOHNSON, M. M. Transition from laminar to turbulent flow in pipes. **AICHE Journal**, 5(4), p.433 – 435, 1959

SILVA, M. G. P.; JUNIOR, P. A.; FONSECA, H. F. C.; REGIS, C. A. L. Sistema hidráulico de superfície. **Relatório Técnico Interno**, n° 675–7585, CENPES/PETROBRAS, 1985.

SILVA, M. G. P.; *et al.* Avaliação de equações pertinentes aos projetos hidráulicos com fluidos de perfuração, pastas de cimento e fluidos de completação no escoamento tubular e anular, **Relatório Técnico Interno**, n° 675–12009, Vol.1, CENPES/PETROBRAS, 1989.

THOMAS, J. E.; *et al.* **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, 2ª edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, Petrobras, 2001.

TOMITA, Y. A. A study on non-Newtonian flow in pipe lines. **Bulletin JSME**, v.2, n. 5, p. 10-16, 1959.

8 ANEXOS

A – Dados da calibração da unidade experimental com água a 25°C.

A1 – Dados da calibração obtidos para duto circular de 1”.

A2 – Dados da calibração obtidos para anular I.

A3 – Dados da calibração obtidos para anular II.

A4 – Dados da calibração obtidos para anular III.

B – Dados experimentais obtidos para pasta 1.

B1 – Dados experimentais obtidos para pasta 1 em duto circular de 1”.

B2 – Dados experimentais obtidos para pasta 1 em anular I.

B3 – Dados experimentais obtidos para pasta 1 em anular II.

B4 – Dados experimentais obtidos para pasta 1 em anular III.

C – Gráficos de DP versus vazão do escoamento da pasta de cimento nos dutos circular e anulares I, II e III à 15 e 60°C.

C1 – Gráficos de DP versus vazão para pasta 1 em duto circular de 1” à 15°C.

C2 – Gráficos de DP versus vazão para pasta 1 em anular I à 15°C.

C3 – Gráficos de DP versus vazão para pasta 1 em anular II à 15°C.

C4 – Gráficos de DP versus vazão para pasta 1 em anular III à 15°C.

C5 – Gráficos de DP versus vazão para pasta 1 em duto circular de 1” à 60°C.

C6 – Gráficos de DP versus vazão para pasta 1 em anular I à 60°C.

C7 – Gráficos de DP versus vazão para pasta 1 em anular II à 60°C.

C8 – Gráficos de DP versus vazão para pasta 1 em anular III à 60°C.

A – Dados da calibração da unidade experimental com água a 25°C.

A1 – Dados da calibração obtidos para duto circular de 1”.

Tabela 15: Calibração do tubo circular de 1” antes do experimento com pasta1, usando transdutor com faixa de calibração de 0,01 a 0,05 kgf/cm².

| Teste | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP (mmHg) | Re | F _{exp.} | F _{Blasius} | F _{laminar} | Desvio(%) Blasius | Desvio(%) laminar |
|-------|-----------------|------------------|-------|--------------|----------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 84 | 0,9975 | 26 | 40,32 | 7,18E+04 | 4,71E-03 | 4,83E-03 | - | 2,52 | - |
| 2 | 69 | 0,9972 | 26 | 28,61 | 5,89E+04 | 4,96E-03 | 5,08E-03 | - | 2,43 | - |
| 3 | 56 | 0,9964 | 26 | 18,93 | 4,78E+04 | 4,97E-03 | 5,35E-03 | - | 7,52 | - |
| 4 | 42 | 0,9963 | 26 | 11,13 | 3,59E+04 | 5,20E-03 | 5,75E-03 | - | 10,55 | - |
| 5 | 27 | 0,9964 | 26 | 5,24 | 2,31E+04 | 5,92E-03 | 6,42E-03 | - | 8,36 | - |
| 6 | 20 | 0,9965 | 26 | 3,14 | 1,71E+04 | 6,47E-03 | 6,92E-03 | - | 6,94 | - |
| 7 | 15 | 0,9972 | 26 | 2,04 | 1,28E+04 | 7,48E-03 | 7,43E-03 | - | 0,58 | - |
| 8 | 13 | 0,9966 | 26 | 1,45 | 1,11E+04 | 7,07E-03 | 7,71E-03 | - | 8,96 | - |
| 9 | 11 | 0,9969 | 26 | 1,05 | 9,40E+03 | 7,15E-03 | 8,03E-03 | - | 12,29 | - |
| 10 | 7,1 | 0,9968 | 26 | 0,44 | 6,15E+03 | 7,00E-03 | 8,93E-03 | - | 27,65 | - |
| 11 | 4,21 | 0,9968 | 26 | 0,20 | 3,68E+03 | 8,90E-03 | 1,02E-02 | - | 14,10 | - |

A2 – Dados da calibração obtidos para anular I.

Tabela 16: Calibração do duto anular I antes do experimento com pasta1, usando transdutor com faixa de calibração de 0,01 a 0,05 kgf/cm².

| Teste | <W> (Kg/s) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP (mmHg) | Re | F _{exp.} | F _{Blasius} | F _{laminar} | Desvio(%) Blasius | Desvio(%) laminar |
|-------|---------------|------------------|-------|--------------|----------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 0,450 | 0,9968 | 25 | 34,49 | 4,95E+03 | 7,09E-03 | 9,43E-03 | - | 0,75 | - |
| 2 | 0,417 | 0,9910 | 25 | 30,08 | 4,58E+03 | 7,17E-03 | 9,61E-03 | - | 0,75 | - |
| 3 | 0,383 | 0,9909 | 25 | 25,14 | 4,22E+03 | 7,08E-03 | 9,82E-03 | - | 0,72 | - |
| 4 | 0,350 | 0,9897 | 25 | 22,12 | 3,85E+03 | 7,46E-03 | 1,00E-02 | - | 0,74 | - |
| 5 | 0,317 | 0,9890 | 25 | 18,30 | 3,48E+03 | 7,54E-03 | 1,03E-02 | - | 0,73 | - |
| 6 | 0,283 | 0,9949 | 25 | 15,03 | 3,12E+03 | 7,78E-03 | 1,06E-02 | - | 0,73 | - |
| 7 | 0,250 | 0,9889 | 25 | 11,65 | 2,75E+03 | 7,70E-03 | 1,09E-02 | - | 0,70 | - |
| 8 | 0,217 | 0,9903 | 25 | 9,04 | 2,38E+03 | 7,96E-03 | 1,13E-02 | - | 0,70 | - |
| 9 | 0,183 | 0,9881 | 25 | 6,96 | 2,02E+03 | 8,54E-03 | - | 7,94E-03 | - | 1,08 |
| 10 | 0,153 | 0,9911 | 24 | 5,11 | 1,68E+03 | 9,02E-03 | - | 9,50E-03 | - | 0,95 |
| 11 | 0,127 | 0,9911 | 24 | 4,03 | 1,40E+03 | 1,03E-02 | - | 1,14E-02 | - | 0,90 |
| 12 | 0,105 | 0,9911 | 25 | 3,13 | 1,16E+03 | 1,17E-02 | - | 1,38E-02 | - | 0,84 |
| 13 | 0,069 | 0,9911 | 25 | 2,00 | 7,58E+02 | 1,74E-02 | - | 2,11E-02 | - | 0,83 |
| 14 | 0,035 | 0,9911 | 25 | 1,00 | 3,81E+02 | 3,45E-02 | - | 4,20E-02 | - | 0,82 |
| 15 | 0,028 | 0,9911 | 25 | 0,80 | 3,02E+02 | 4,38E-02 | - | 5,29E-02 | - | 0,83 |
| 16 | 0,021 | 0,9911 | 25 | 0,60 | 2,27E+02 | 5,81E-02 | - | 7,04E-02 | - | 0,83 |
| 17 | 0,014 | 0,9911 | 25 | 0,40 | 1,56E+02 | 8,25E-02 | - | 1,03E-01 | - | 0,80 |
| 18 | 0,008 | 0,9911 | 25 | 0,23 | 8,92E+01 | 1,45E-01 | - | 1,79E-01 | - | 0,81 |
| 19 | 0,005 | 0,9911 | 25 | 0,13 | 5,19E+01 | 2,41E-01 | - | 3,08E-01 | - | 0,78 |
| 20 | 0,004 | 0,9911 | 25 | 0,09 | 4,22E+01 | 2,53E-01 | - | 3,80E-01 | - | 0,67 |
| 21 | 0,003 | 0,9911 | 25 | 0,07 | 3,42E+01 | 2,99E-01 | - | 4,68E-01 | - | 0,64 |
| 22 | 0,003 | 0,9911 | 26 | 0,04 | 2,81E+01 | 2,53E-01 | - | 5,69E-01 | - | 0,45 |
| 23 | 0,002 | 0,9911 | 25 | 0,02 | 1,95E+01 | 2,62E-01 | - | 8,18E-01 | - | 0,32 |

A3 – Dados da calibração obtidos para anular II.

Tabela 17: Calibração do duto anular II antes do experimento com pasta 1, usando transdutor com faixa de calibração de 0,01 a 0,05 kgf/cm².

| Teste | $\langle W \rangle$ (Kg/s) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP (mmHg) | Re | F _{exp.} | F _{Blasius} | F _{laminar} | Desvio(%) Blasius | Desvio(%) laminar |
|-------|-------------------------------|------------------|-------|--------------|----------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 0,5667 | 0,9896 | 24 | 35,86 | 8,39E+03 | 8,33E-03 | 8,26E-03 | 1,91E-03 | 0,7 | - |
| 2 | 0,4500 | 0,9893 | 24 | 23,54 | 6,66E+03 | 8,66E-03 | 8,75E-03 | 2,40E-03 | 1,0 | - |
| 3 | 0,4167 | 0,9898 | 24 | 20,23 | 6,17E+03 | 8,69E-03 | 8,93E-03 | 2,59E-03 | 2,7 | - |
| 4 | 0,3667 | 0,9898 | 25 | 15,58 | 5,43E+03 | 8,64E-03 | 9,21E-03 | 2,95E-03 | 6,6 | - |
| 5 | 0,3333 | 0,9902 | 25 | 12,55 | 4,94E+03 | 8,43E-03 | 9,44E-03 | 3,24E-03 | 12,0 | - |
| 6 | 0,3000 | 0,9902 | 25 | 10,65 | 4,44E+03 | 8,83E-03 | 9,69E-03 | 3,60E-03 | 9,8 | - |
| 7 | 0,2667 | 0,9912 | 25 | 8,50 | 3,95E+03 | 8,93E-03 | 9,98E-03 | 4,05E-03 | 11,8 | - |
| 8 | 0,2333 | 0,9967 | 26 | 6,57 | 3,46E+03 | 9,06E-03 | 1,03E-02 | 4,63E-03 | 13,9 | - |
| 9 | 0,2000 | 0,9896 | 26 | 4,92 | 2,96E+03 | 9,17E-03 | 1,07E-02 | 5,40E-03 | 16,9 | - |
| 10 | 0,1667 | 0,9903 | 26 | 3,69 | 2,47E+03 | 9,91E-03 | 1,12E-02 | 6,48E-03 | 13,2 | - |
| 11 | 0,1500 | 0,9909 | 25 | 3,19 | 2,22E+03 | 1,06E-02 | 1,15E-02 | 7,20E-03 | 8,9 | - |
| 12 | 0,1337 | 0,9907 | 25 | 2,48 | 1,98E+03 | 1,04E-02 | 1,19E-02 | 8,08E-03 | 14,5 | 22,0 |
| 13 | 0,1159 | 0,9907 | 24 | 2,06 | 1,72E+03 | 1,14E-02 | 1,23E-02 | 9,32E-03 | - | 18,6 |
| 14 | 0,0973 | 0,9907 | 24 | 1,57 | 1,44E+03 | 1,24E-02 | 1,28E-02 | 1,11E-02 | - | 10,2 |
| 15 | 0,0666 | 0,9907 | 24 | 1,00 | 9,86E+02 | 1,68E-02 | 1,41E-02 | 1,62E-02 | - | 3,6 |
| 16 | 0,0596 | 0,9907 | 25 | 0,87 | 8,82E+02 | 1,83E-02 | 1,45E-02 | 1,81E-02 | - | 0,9 |
| 17 | 0,0529 | 0,9907 | 25 | 0,78 | 7,83E+02 | 2,08E-02 | 1,50E-02 | 2,04E-02 | - | 1,8 |
| 18 | 0,0501 | 0,9907 | 25 | 0,70 | 7,42E+02 | 2,08E-02 | 1,52E-02 | 2,16E-02 | - | 3,6 |
| 19 | 0,0410 | 0,9907 | 25 | 0,56 | 6,07E+02 | 2,49E-02 | 1,59E-02 | 2,64E-02 | - | 6,0 |
| 20 | 0,0385 | 0,9907 | 25 | 0,52 | 5,70E+02 | 2,62E-02 | 1,62E-02 | 2,81E-02 | - | 7,2 |
| 21 | 0,0309 | 0,9907 | 25 | 0,41 | 4,58E+02 | 3,20E-02 | 1,71E-02 | 3,49E-02 | - | 9,3 |
| 22 | 0,0245 | 0,9907 | 25 | 0,32 | 3,63E+02 | 3,98E-02 | 1,81E-02 | 4,41E-02 | - | 10,8 |
| 23 | 0,0168 | 0,9907 | 25 | 0,23 | 2,49E+02 | 6,06E-02 | 1,99E-02 | 6,42E-02 | - | 6,0 |
| 24 | 0,0087 | 0,9907 | 25 | 0,12 | 1,28E+02 | 1,19E-01 | 2,35E-02 | 1,25E-01 | - | 4,6 |
| 25 | 0,0074 | 0,9907 | 25 | 0,09 | 1,09E+02 | 1,23E-01 | 2,45E-02 | 1,46E-01 | - | 18,9 |
| 26 | 0,0065 | 0,9907 | 25 | 0,08 | 9,62E+01 | 1,41E-01 | 2,53E-02 | 1,66E-01 | - | 17,6 |

A4 – Dados da calibração obtidos para anular III.

Tabela 18: Calibração do duto anular III antes do experimento com pasta1, utilizando transdutor com transdutor de selo remoto.

| Teste | $\langle W \rangle$ (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP (bar) | Re | $F_{exp.}$ | $F_{Blasius}$ | $F_{laminar}$ | Desvio(%) Blasius | Desvio(%) laminar |
|-------|---------------------------------|------------------|-------|-------------|----------|------------|---------------|---------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 431 | 0,9900 | 32 | 3,85 | 1,27E+05 | 4,36E-03 | 4,19E-03 | - | 4,02 | - |
| 2 | 424 | 0,9950 | 32 | 3,66 | 1,25E+05 | 4,31E-03 | 4,21E-03 | - | 2,38 | - |
| 3 | 414 | 0,9956 | 31 | 3,34 | 1,22E+05 | 4,13E-03 | 4,23E-03 | - | 2,53 | - |
| 4 | 406 | 0,9959 | 31 | 3,2 | 1,20E+05 | 4,11E-03 | 4,25E-03 | - | 3,39 | - |
| 5 | 398 | 0,9960 | 31 | 3,06 | 1,17E+05 | 4,09E-03 | 4,27E-03 | - | 4,41 | - |
| 6 | 389 | 0,9969 | 31 | 2,91 | 1,15E+05 | 4,08E-03 | 4,30E-03 | - | 5,39 | - |
| 7 | 378 | 0,9905 | 30 | 2,77 | 1,11E+05 | 4,08E-03 | 4,33E-03 | - | 5,98 | - |
| 8 | 369 | 0,9954 | 30 | 2,63 | 1,09E+05 | 4,09E-03 | 4,36E-03 | - | 6,48 | - |
| 9 | 356 | 0,9977 | 30 | 2,49 | 1,05E+05 | 4,17E-03 | 4,39E-03 | - | 5,38 | - |
| 10 | 346 | 0,9979 | 30 | 2,36 | 1,02E+05 | 4,18E-03 | 4,43E-03 | - | 5,76 | - |
| 11 | 336 | 0,9972 | 29 | 2,23 | 9,91E+04 | 4,19E-03 | 4,46E-03 | - | 6,40 | - |
| 12 | 324 | 0,9976 | 29 | 2,09 | 9,55E+04 | 4,23E-03 | 4,50E-03 | - | 6,49 | - |
| 13 | 311 | 0,9975 | 29 | 1,97 | 9,17E+04 | 4,32E-03 | 4,55E-03 | - | 5,17 | - |
| 14 | 300 | 0,9981 | 29 | 1,83 | 8,85E+04 | 4,32E-03 | 4,59E-03 | - | 6,24 | - |
| 15 | 287 | 0,9991 | 28 | 1,69 | 8,46E+04 | 4,36E-03 | 4,64E-03 | - | 6,35 | - |
| 16 | 276 | 0,9984 | 28 | 1,55 | 8,14E+04 | 4,32E-03 | 4,68E-03 | - | 8,37 | - |
| 17 | 265 | 0,9916 | 28 | 1,43 | 7,81E+04 | 4,30E-03 | 4,73E-03 | - | 10,14 | - |
| 18 | 253 | 0,9920 | 28 | 1,31 | 7,46E+04 | 4,32E-03 | 4,79E-03 | - | 10,82 | - |
| 19 | 241 | 0,9930 | 28 | 1,19 | 7,11E+04 | 4,33E-03 | 4,84E-03 | - | 11,94 | - |
| 20 | 228 | 0,9926 | 28 | 1,1 | 6,72E+04 | 4,47E-03 | 4,91E-03 | - | 9,94 | - |
| 21 | 215 | 0,9931 | 28 | 0,99 | 6,34E+04 | 4,52E-03 | 4,99E-03 | - | 10,17 | - |
| 22 | 203 | 0,9924 | 27 | 0,89 | 5,99E+04 | 4,56E-03 | 5,06E-03 | - | 10,91 | - |
| 23 | 190 | 0,9934 | 27 | 0,78 | 5,60E+04 | 4,57E-03 | 5,14E-03 | - | 12,60 | - |
| 24 | 176 | 0,9933 | 27 | 0,69 | 5,19E+04 | 4,71E-03 | 5,24E-03 | - | 11,34 | - |
| 25 | 162 | 0,9930 | 27 | 0,59 | 4,78E+04 | 4,75E-03 | 5,35E-03 | - | 12,67 | - |
| 26 | 148 | 0,9916 | 27 | 0,5 | 4,36E+04 | 4,82E-03 | 5,47E-03 | - | 13,66 | - |
| 27 | 134 | 0,9911 | 27 | 0,42 | 3,95E+04 | 4,93E-03 | 5,61E-03 | - | 13,76 | - |
| 28 | 121 | 0,9983 | 27 | 0,35 | 3,57E+04 | 5,08E-03 | 5,76E-03 | - | 13,37 | - |
| 29 | 106 | 0,9970 | 27 | 0,28 | 3,13E+04 | 5,29E-03 | 5,95E-03 | - | 12,56 | - |
| 30 | 95 | 0,9916 | 27 | 0,22 | 2,80E+04 | 5,14E-03 | 6,11E-03 | - | 18,90 | - |
| 31 | 81 | 0,9919 | 27 | 0,17 | 2,39E+04 | 5,47E-03 | 6,36E-03 | - | 16,38 | - |
| 32 | 68 | 0,9921 | 28 | 0,12 | 2,00E+04 | 5,48E-03 | 6,65E-03 | - | 21,37 | - |
| 33 | 53 | 0,9930 | 28 | 0,08 | 1,56E+04 | 6,02E-03 | 7,07E-03 | - | 17,59 | - |
| 34 | 39 | 0,9943 | 28 | 0,05 | 1,15E+04 | 6,95E-03 | 7,64E-03 | - | 9,85 | - |
| 35 | 26 | 0,9948 | 28 | 0,02 | 7,67E+03 | 6,26E-03 | 8,45E-03 | - | 35,01 | - |

Anexo B – Dados experimentais obtidos para pasta 1.

B1 – Dados experimentais obtidos para pasta 1 em duto circular de 1”.

Tabela 19: Dados experimentais da pasta 1 escoando no tubo circular de 1” a 15°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 50,8 | 1,9320 | 14 | 0,05 | 8,0 | 8,5 | 13,0 | 18,0 | 24,5 | 39,0 | 49,0 |
| 150 | 70,5 | 1,9270 | 14 | 0,07 | 8,0 | 8,5 | 13,0 | 18,0 | 24,5 | 39,0 | 49,0 |
| 200 | 97,8 | 1,9220 | 14 | 0,08 | 10,0 | 10,0 | 14,5 | 19,5 | 26,0 | 40,0 | 52,0 |
| 250 | 125,3 | 1,9000 | 14 | 0,10 | 10,0 | 10,0 | 14,5 | 19,5 | 26,0 | 40,0 | 52,0 |
| 300 | 145,1 | 1,8630 | 14 | 0,12 | 10,0 | 10,0 | 14,5 | 19,5 | 26,0 | 40,0 | 52,0 |
| 350 | 186,6 | 1,9030 | 14 | 0,16 | 10,0 | 10,0 | 14,5 | 19,5 | 26,0 | 40,0 | 52,0 |
| 400 | 214,2 | 1,9060 | 14 | 0,25 | 11,5 | 11,5 | 16,5 | 22,5 | 27,0 | 41,0 | 54,0 |
| 450 | 243,0 | 1,9230 | 14 | 0,36 | 11,5 | 11,5 | 16,5 | 22,5 | 27,0 | 41,0 | 54,0 |
| 500 | 272,4 | 1,9280 | 14 | 0,43 | 11,5 | 11,5 | 16,5 | 22,5 | 27,0 | 41,0 | 54,0 |
| 600 | 328,9 | 1,9280 | 14 | 0,60 | 11,5 | 12,0 | 16,0 | 21,5 | 28,5 | 41,5 | 52,5 |
| 700 | 382,2 | 1,9220 | 14 | 0,77 | 11,5 | 12,0 | 16,0 | 21,5 | 28,5 | 41,5 | 52,5 |
| 800 | 433,6 | 1,9240 | 15 | 0,97 | 11,5 | 12,0 | 16,0 | 21,5 | 28,5 | 41,5 | 52,5 |
| 900 | 487,0 | 1,9300 | 15 | 1,18 | 11,5 | 12,0 | 16,0 | 21,5 | 28,5 | 41,5 | 52,5 |
| 1000 | 538,0 | 1,9250 | 15 | 1,41 | 11,5 | 12,0 | 16,0 | 21,5 | 28,5 | 41,5 | 52,5 |
| 1100 | 588,5 | 1,9280 | 17 | 1,59 | 11,5 | 13,0 | 16,0 | 21,5 | 27,0 | 39,5 | 49,0 |
| 1200 | 637,4 | 1,9230 | 17 | 1,85 | 11,5 | 13,0 | 16,0 | 21,5 | 27,0 | 39,5 | 49,0 |
| 1300 | 685,4 | 1,9250 | 18 | 2,06 | 11,5 | 13,0 | 16,0 | 21,5 | 27,0 | 39,5 | 49,0 |

Tabela 20: Dados experimentais da pasta 1 escoando no tubo circular de 1” a 25°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 41,5 | 1,9270 | 25 | 0,04 | 10,0 | 10,0 | 12,5 | 16,5 | 21,0 | 31,0 | 39,0 |
| 150 | 65,2 | 1,9170 | 25 | 0,05 | 11,0 | 11,0 | 13,0 | 17,0 | 21,0 | 31,5 | 39,5 |
| 200 | 92,5 | 1,9090 | 25 | 0,07 | 11,0 | 11,0 | 13,0 | 17,0 | 21,0 | 31,5 | 39,5 |
| 250 | 119,0 | 1,9060 | 25 | 0,08 | 11,0 | 11,0 | 13,0 | 17,0 | 21,0 | 31,5 | 39,5 |
| 300 | 143,7 | 1,8900 | 25 | 0,10 | 11,0 | 11,0 | 13,0 | 17,0 | 21,0 | 31,5 | 39,5 |
| 350 | 183,6 | 1,9130 | 25 | 0,21 | 10,0 | 10,0 | 12,5 | 16,5 | 21,0 | 31,0 | 39,0 |
| 400 | 212,3 | 1,9180 | 25 | 0,26 | 10,0 | 10,0 | 12,5 | 16,5 | 21,0 | 31,0 | 39,0 |
| 450 | 244,4 | 1,9270 | 25 | 0,33 | 10,0 | 10,0 | 12,5 | 16,5 | 21,0 | 31,0 | 39,0 |
| 500 | 271,7 | 1,9280 | 25 | 0,39 | 10,0 | 10,0 | 12,5 | 16,5 | 21,0 | 31,0 | 39,0 |
| 600 | 323,1 | 1,9170 | 25 | 0,54 | 10,0 | 10,0 | 12,5 | 16,5 | 21,0 | 31,0 | 39,0 |
| 700 | 375,4 | 1,9220 | 25 | 0,70 | 11,0 | 11,5 | 13,0 | 16,5 | 21,5 | 31,0 | 39,0 |
| 800 | 431,4 | 1,9160 | 25 | 0,88 | 11,0 | 11,5 | 13,0 | 16,5 | 21,5 | 31,0 | 39,0 |
| 900 | 483,6 | 1,9200 | 27 | 1,07 | 11,0 | 11,5 | 13,0 | 16,5 | 21,5 | 31,0 | 39,0 |
| 1000 | 533,6 | 1,9120 | 27 | 1,28 | 11,0 | 11,0 | 14,0 | 17,5 | 22,0 | 31,0 | 39,0 |
| 1100 | 583,2 | 1,9140 | 27 | 1,45 | 11,0 | 11,0 | 14,0 | 17,5 | 22,0 | 31,0 | 39,0 |
| 1200 | 633,4 | 1,9120 | 27 | 1,69 | 11,0 | 11,0 | 14,0 | 17,5 | 22,0 | 31,0 | 39,0 |
| 1300 | 687,0 | 1,9170 | 32 | 1,89 | 11,0 | 11,0 | 14,0 | 17,5 | 22,0 | 31,0 | 39,0 |

Tabela 21: Dados experimentais da pasta1 escoando no tubo circular de 1” a 60°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|----------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 38,2 | 1,8960 | 60 | 0,05 | 15,5 | 16,0 | 18,5 | 21,5 | 25,0 | 31,5 | 37,0 |
| 150 | 65,8 | 1,8950 | 60 | 0,06 | 16,5 | 16,5 | 19,5 | 22,0 | 26,0 | 34,0 | 38,5 |
| 200 | 95,3 | 1,8820 | 59 | 0,08 | 16,5 | 16,5 | 19,5 | 22,0 | 26,0 | 34,0 | 38,5 |
| 250 | 124,9 | 1,8900 | 60 | 0,09 | 16,5 | 16,5 | 19,5 | 22,0 | 26,0 | 34,0 | 38,5 |
| 300 | 155,4 | 1,8850 | 60 | 0,10 | 16,5 | 16,5 | 20,5 | 23,5 | 26,5 | 34,0 | 39,5 |
| 350 | 178,1 | 1,8730 | 61 | 0,17 | 16,5 | 16,5 | 20,5 | 23,5 | 26,5 | 34,0 | 39,5 |
| 400 | 208,3 | 1,8750 | 61 | 0,21 | 16,5 | 16,5 | 20,5 | 23,5 | 26,5 | 34,0 | 39,5 |
| 450 | 235,8 | 1,8780 | 61 | 0,26 | 17,5 | 20,0 | 22,0 | 25,0 | 28,5 | 35,5 | 41,0 |
| 500 | 263,4 | 1,8790 | 60 | 0,32 | 17,5 | 20,0 | 22,0 | 25,0 | 28,5 | 35,5 | 41,0 |
| 600 | 312,0 | 1,8800 | 60 | 0,43 | 17,5 | 20,0 | 22,0 | 25,0 | 28,5 | 35,5 | 41,0 |
| 700 | 369,1 | 1,8860 | 60 | 0,57 | 17,5 | 20,0 | 22,0 | 25,0 | 28,5 | 35,5 | 41,0 |
| 800 | 420,8 | 1,8800 | 60 | 0,71 | 18,5 | 20,0 | 23,0 | 25,5 | 29,0 | 35,5 | 40,0 |
| 900 | 475,3 | 1,8800 | 60 | 0,86 | 18,5 | 20,0 | 23,0 | 25,5 | 29,0 | 35,5 | 40,0 |
| 1000 | 526,8 | 1,8750 | 61 | 1,03 | 18,5 | 20,0 | 23,0 | 25,5 | 29,0 | 35,5 | 40,0 |
| 1100 | 578,4 | 1,8730 | 61 | 1,20 | 18,5 | 20,0 | 23,0 | 25,5 | 29,0 | 35,5 | 40,0 |
| 1200 | 628,4 | 1,8840 | 61 | 1,39 | 18,5 | 20,0 | 23,0 | 25,5 | 29,0 | 35,5 | 40,0 |
| 1300 | 677,4 | 1,8800 | 62 | 1,57 | 18,5 | 20,0 | 23,0 | 25,5 | 29,0 | 35,5 | 40,0 |

B2 – Dados experimentais obtidos para pasta 1 em anular I.**Tabela 22:** Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular I a 15°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|----------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 35,5 | 1,9317 | 14 | 0,37 | 7,0 | 7,5 | 10,5 | 15,0 | 20,0 | 34,0 | 43,0 |
| 150 | 64,5 | 1,9332 | 14 | 0,56 | 6,0 | 7,0 | 11,0 | 15,0 | 19,5 | 32,5 | 43,5 |
| 200 | 92,8 | 1,9383 | 14 | 0,75 | 6,0 | 7,0 | 11,0 | 15,0 | 19,5 | 32,5 | 43,5 |
| 250 | 124,1 | 1,9414 | 14 | 0,93 | 6,0 | 7,0 | 11,0 | 15,0 | 19,5 | 32,5 | 43,5 |
| 300 | 148,0 | 1,9252 | 14 | 1,11 | 6,0 | 7,0 | 11,0 | 15,0 | 19,5 | 32,5 | 43,5 |
| 350 | 169,2 | 1,9215 | 16 | 1,25 | 6,0 | 7,0 | 11,0 | 15,0 | 19,5 | 32,5 | 43,5 |
| 400 | 196,0 | 1,8392 | 15 | 1,44 | 6,5 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 18,0 | 30,0 | 40,0 |
| 450 | 217,1 | 1,9092 | 16 | 1,65 | 6,5 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 18,0 | 30,0 | 40,0 |
| 500 | 235,9 | 1,8996 | 16 | 1,84 | 6,5 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 18,0 | 30,0 | 40,0 |
| 600 | 273,7 | 1,9172 | 16 | 2,36 | 6,5 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 18,0 | 30,0 | 40,0 |
| 700 | 320,2 | 1,9226 | 16 | 2,66 | 6,5 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 18,0 | 30,0 | 40,0 |
| 800 | 363,0 | 1,9242 | 16 | 3,09 | 6,0 | 7,0 | 10,0 | 13,0 | 16,5 | 26,5 | 36,0 |
| 900 | 409,0 | 1,9273 | 17 | 3,56 | 6,0 | 7,0 | 10,0 | 13,0 | 16,5 | 26,5 | 36,0 |
| 1000 | 443,1 | 1,9269 | 17 | 4,12 | 6,0 | 7,0 | 10,0 | 13,0 | 16,5 | 26,5 | 36,0 |
| 1100 | 476,0 | 1,9254 | 17 | 4,73 | 6,0 | 7,0 | 10,0 | 13,0 | 16,5 | 26,5 | 36,0 |
| 1200 | 506,3 | 1,9232 | 18 | 5,36 | 6,0 | 7,0 | 10,0 | 13,0 | 16,5 | 26,5 | 36,0 |
| 1300 | 535,2 | 1,9138 | 19 | 5,98 | 6,0 | 7,0 | 10,0 | 13,0 | 16,5 | 26,5 | 36,0 |

Tabela 23: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular I a 25°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 31,1 | 1,9262 | 23 | 0,29 | 7,0 | 8,0 | 10,0 | 13,0 | 15,5 | 23,0 | 30,0 |
| 150 | 55,9 | 1,9157 | 23 | 0,43 | 9,0 | 9,0 | 11,0 | 13,5 | 17,0 | 25,0 | 32,5 |
| 200 | 87,5 | 1,9189 | 23 | 0,56 | 9,0 | 9,0 | 11,0 | 13,5 | 17,0 | 25,0 | 32,5 |
| 250 | 122,7 | 1,9312 | 23 | 0,70 | 9,0 | 9,0 | 11,0 | 13,5 | 17,0 | 25,0 | 32,5 |
| 300 | 146,8 | 1,9174 | 24 | 0,85 | 9,0 | 9,0 | 11,0 | 13,5 | 17,0 | 25,0 | 32,5 |
| 350 | 173,0 | 1,9033 | 24 | 1,00 | 9,0 | 9,0 | 11,0 | 13,5 | 17,0 | 25,0 | 32,5 |
| 400 | 195,0 | 1,8856 | 25 | 1,20 | 9,0 | 9,0 | 11,0 | 13,5 | 17,0 | 25,0 | 32,5 |
| 450 | 222,7 | 1,8764 | 23 | 1,36 | 9,0 | 9,0 | 11,0 | 13,5 | 17,0 | 25,0 | 32,5 |
| 500 | 246,0 | 1,9170 | 23 | 1,56 | 10,0 | 10,0 | 12,0 | 15,0 | 19,0 | 27,5 | 35,0 |
| 600 | 285,6 | 1,9158 | 23 | 2,02 | 10,0 | 10,0 | 12,0 | 15,0 | 19,0 | 27,5 | 35,0 |
| 700 | 334,3 | 1,9163 | 22 | 2,66 | 10,0 | 10,0 | 12,0 | 15,0 | 19,0 | 27,5 | 35,0 |
| 800 | 374,7 | 1,9194 | 23 | 3,28 | 10,0 | 10,0 | 12,0 | 15,0 | 19,0 | 27,5 | 35,0 |
| 900 | 414,2 | 1,9164 | 24 | 3,89 | 10,0 | 10,0 | 12,0 | 15,0 | 19,0 | 27,5 | 35,0 |
| 1000 | 448,6 | 1,9156 | 24 | 4,46 | 14,0 | 15,0 | 17,0 | 20,0 | 23,0 | 31,0 | 37,0 |
| 1100 | 480,8 | 1,9107 | 25 | 5,00 | 14,0 | 15,0 | 17,0 | 20,0 | 23,0 | 31,0 | 37,0 |
| 1200 | 513,4 | 1,9110 | 26 | 5,54 | 14,0 | 15,0 | 17,0 | 20,0 | 23,0 | 31,0 | 37,0 |
| 1300 | 540,2 | 1,9065 | 27 | 6,12 | 14,0 | 15,0 | 17,0 | 20,0 | 23,0 | 31,0 | 37,0 |

Tabela 24: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular I a 60°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 32,15 | 1,8926 | 60 | 0,39 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 150 | 61,56 | 1,8918 | 60 | 0,49 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 200 | 92,2 | 1,8484 | 61 | 0,6 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 250 | 120,67 | 1,8461 | 61 | 0,7 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 300 | 138,6 | 1,8450 | 61 | 0,82 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 350 | 163,3 | 1,8454 | 61 | 0,92 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 400 | 194,7 | 1,8460 | 61 | 1,05 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 450 | 220,6 | 1,8426 | 61 | 1,2 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 500 | 241,2 | 1,8317 | 61 | 1,39 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 600 | 298,5 | 1,8473 | 61 | 1,93 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 700 | 350 | 1,8516 | 61 | 2,49 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 800 | 395 | 1,8458 | 61 | 3,07 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 900 | 437,1 | 1,8381 | 62 | 3,665 | 25,0 | 31,0 | 34,0 | 37,0 | 40,0 | 47,0 | 53,0 |
| 1000 | 477,5 | 1,8341 | 62 | 4,25 | 30,0 | 35,0 | 40,0 | 42,0 | 44,0 | 50,5 | 56,0 |
| 1100 | 519,5 | 1,8469 | 64 | 4,81 | 30,0 | 35,0 | 40,0 | 42,0 | 44,0 | 50,5 | 56,0 |
| 1200 | 558 | 1,8470 | 65 | 5,35 | 30,0 | 35,0 | 40,0 | 42,0 | 44,0 | 50,5 | 56,0 |
| 1300 | 594 | 1,8457 | 66 | 5,895 | 30,0 | 35,0 | 40,0 | 42,0 | 44,0 | 50,5 | 56,0 |

B3 – Dados experimentais obtidos para pasta 1 em anular II.

Tabela 25: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular II a 15°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 45,3 | 1,8460 | 14 | 0,21 | 5,5 | 6,0 | 8,5 | 12,5 | 17,5 | 29,0 | 40,5 |
| 150 | 65,7 | 1,8594 | 14 | 0,32 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 13,0 | 17,5 | 28,0 | 38,0 |
| 200 | 86,3 | 1,8406 | 14 | 0,43 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 13,0 | 17,5 | 28,0 | 38,0 |
| 250 | 127,9 | 1,8671 | 14 | 0,55 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 13,0 | 17,5 | 28,0 | 38,0 |
| 300 | 148,6 | 1,8118 | 14 | 0,62 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 13,0 | 17,5 | 28,0 | 38,0 |
| 350 | 174,5 | 1,8487 | 14 | 0,74 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 13,0 | 17,5 | 28,0 | 38,0 |
| 400 | 195,2 | 1,8298 | 14 | 0,89 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 13,0 | 17,5 | 28,0 | 38,0 |
| 450 | 216,8 | 1,8376 | 14 | 1,02 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 13,0 | 17,5 | 28,0 | 38,0 |
| 500 | 239,1 | 1,8385 | 14 | 1,13 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 13,0 | 17,5 | 28,0 | 38,0 |
| 600 | 292,9 | 1,8480 | 15 | 1,54 | 5,0 | 5,5 | 8,0 | 12,0 | 16,0 | 25,0 | 33,0 |
| 700 | 342,1 | 1,8500 | 15 | 1,96 | 5,0 | 5,5 | 8,0 | 12,0 | 16,0 | 25,0 | 33,0 |
| 800 | 391,6 | 1,8524 | 16 | 2,40 | 5,0 | 5,5 | 8,0 | 12,0 | 16,0 | 25,0 | 33,0 |
| 900 | 438,1 | 1,8526 | 16 | 2,92 | 5,0 | 5,5 | 8,0 | 12,0 | 16,0 | 25,0 | 33,0 |
| 1000 | 478,8 | 1,8510 | 16 | 3,43 | 5,0 | 5,5 | 8,0 | 12,0 | 16,0 | 25,0 | 33,0 |
| 1100 | 514,7 | 1,8486 | 16 | 4,01 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 10,5 | 14,0 | 22,5 | 30,0 |
| 1200 | 550,0 | 1,8496 | 18 | 4,59 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 10,5 | 14,0 | 22,5 | 30,0 |
| 1300 | 582,6 | 1,8478 | 18 | 5,07 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 10,5 | 14,0 | 22,5 | 30,0 |
| 1400 | 611,7 | 1,8473 | 18 | 5,56 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 10,5 | 14,0 | 22,5 | 30,0 |
| 1500 | 641,4 | 1,8425 | 18 | 6,03 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 10,5 | 14,0 | 22,5 | 30,0 |

Tabela 26: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular II a 25°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 25,1 | 1,8482 | 23 | 0,15 | 5,0 | 6,0 | 8,0 | 9,5 | 12,0 | 19,0 | 24,5 |
| 150 | 57,9 | 1,8529 | 23 | 0,22 | 5,0 | 6,0 | 8,0 | 9,5 | 12,0 | 19,0 | 24,5 |
| 200 | 91,1 | 1,8512 | 25 | 0,28 | 5,0 | 6,0 | 8,0 | 9,5 | 12,0 | 19,0 | 24,5 |
| 250 | 126,9 | 1,8285 | 25 | 0,36 | 5,0 | 6,0 | 7,5 | 10,0 | 13,0 | 19,0 | 25,0 |
| 300 | 150,2 | 1,8423 | 26 | 0,44 | 5,0 | 6,0 | 7,5 | 10,0 | 13,0 | 19,0 | 25,0 |
| 350 | 175,1 | 1,8408 | 25 | 0,54 | 5,0 | 6,0 | 7,5 | 10,0 | 13,0 | 19,0 | 25,0 |
| 400 | 202,3 | 1,8363 | 25 | 0,69 | 5,0 | 6,0 | 7,5 | 10,0 | 13,0 | 19,0 | 25,0 |
| 450 | 228,9 | 1,8418 | 24 | 0,87 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 10,0 | 13,0 | 20,0 | 26,0 |
| 500 | 243,0 | 1,8376 | 24 | 1,05 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 10,0 | 13,0 | 20,0 | 26,0 |
| 600 | 295,9 | 1,8361 | 24 | 1,49 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 10,0 | 13,0 | 20,0 | 26,0 |
| 700 | 341,3 | 1,8352 | 24 | 1,99 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 10,0 | 13,0 | 20,0 | 26,0 |
| 800 | 388,8 | 1,8310 | 24 | 2,48 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 10,0 | 13,0 | 20,0 | 26,0 |
| 900 | 432,2 | 1,8310 | 25 | 3,01 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 11,0 | 14,0 | 21,0 | 28,0 |
| 1000 | 472,7 | 1,8304 | 25 | 3,50 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 11,0 | 14,0 | 21,0 | 28,0 |
| 1100 | 512,7 | 1,8301 | 26 | 4,01 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 11,0 | 14,0 | 21,0 | 28,0 |
| 1200 | 551,8 | 1,8279 | 26 | 4,49 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 11,0 | 14,0 | 21,0 | 28,0 |
| 1300 | 589,5 | 1,8174 | 28 | 4,97 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 11,0 | 14,0 | 21,0 | 28,0 |
| 1400 | 619,7 | 1,8185 | 29 | 5,36 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 11,0 | 14,0 | 21,0 | 28,0 |
| 1500 | 647,9 | 1,8121 | 29 | 5,76 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 11,0 | 14,0 | 21,0 | 28,0 |

Tabela 27: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular II a 60°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 34,3 | 1,8183 | 62 | 0,17 | 16,0 | 18,0 | 20,5 | 22,0 | 25,0 | 30,0 | 37,0 |
| 150 | 58,6 | 1,8004 | 62 | 0,22 | 16,0 | 18,0 | 20,5 | 22,0 | 25,0 | 30,0 | 37,0 |
| 200 | 76,4 | 1,7890 | 62 | 0,265 | 16,0 | 18,0 | 20,5 | 22,0 | 25,0 | 30,0 | 37,0 |
| 250 | 105,2 | 1,8153 | 62 | 0,32 | 19,0 | 23,0 | 26,0 | 28,0 | 30,0 | 35,0 | 41,0 |
| 300 | 129,1 | 1,8190 | 62 | 0,37 | 19,0 | 23,0 | 26,0 | 28,0 | 30,0 | 35,0 | 41,0 |
| 350 | 156,0 | 1,7888 | 61 | 0,45 | 19,0 | 23,0 | 26,0 | 28,0 | 30,0 | 35,0 | 41,0 |
| 400 | 184,5 | 1,8061 | 61 | 0,57 | 19,0 | 23,0 | 26,0 | 28,0 | 30,0 | 35,0 | 41,0 |
| 450 | 206,5 | 1,8139 | 61 | 0,72 | 19,0 | 23,0 | 26,0 | 28,0 | 30,0 | 35,0 | 41,0 |
| 500 | 227,0 | 1,7990 | 61 | 0,89 | 19,0 | 23,0 | 26,0 | 28,0 | 30,0 | 35,0 | 41,0 |
| 600 | 292,1 | 1,8138 | 61 | 1,26 | 23,0 | 30,0 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 40,0 | 44,0 |
| 700 | 342,7 | 1,8186 | 61 | 1,64 | 23,0 | 30,0 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 40,0 | 44,0 |
| 800 | 391,9 | 1,8130 | 61 | 2,04 | 23,0 | 30,0 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 40,0 | 44,0 |
| 900 | 439,5 | 1,8168 | 61 | 2,43 | 23,0 | 30,0 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 40,0 | 44,0 |
| 1000 | 486,8 | 1,8127 | 62 | 2,85 | 23,0 | 30,0 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 40,0 | 44,0 |
| 1100 | 538,7 | 1,8254 | 62 | 3,28 | 23,0 | 30,0 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 40,0 | 44,0 |
| 1200 | 583,2 | 1,8234 | 64 | 3,7 | 23,0 | 30,0 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 40,0 | 44,0 |
| 1300 | 627,0 | 1,8229 | 64 | 4,1 | 23,0 | 30,0 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 40,0 | 44,0 |
| 1400 | 667,4 | 1,8227 | 66 | 4,53 | 23,0 | 30,0 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 40,0 | 44,0 |
| 1500 | 706,7 | 1,8225 | 67 | 4,96 | 23,0 | 30,0 | 31,0 | 33,0 | 35,0 | 40,0 | 44,0 |

B4 – Dados experimentais obtidos para pasta 1 em anular III.**Tabela 28:** Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular III a 15°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 45,33 | 1,8976 | 14 | 0,21 | 5,5 | 6,0 | 9,5 | 14,5 | 19,0 | 33,0 | 46,0 |
| 150 | 69,72 | 1,8973 | 14 | 0,32 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 14,5 | 18,5 | 30,5 | 42,0 |
| 200 | 102,8 | 1,8945 | 14 | 0,44 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 14,5 | 18,5 | 30,5 | 42,0 |
| 250 | 129,2 | 1,9140 | 14 | 0,57 | 5,5 | 6,5 | 9,5 | 14,0 | 18,5 | 31,5 | 44,0 |
| 300 | 154,6 | 1,8933 | 14 | 0,73 | 5,5 | 6,5 | 9,5 | 14,0 | 18,5 | 31,5 | 44,0 |
| 350 | 179,5 | 1,8827 | 14 | 0,88 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 14,0 | 19,0 | 30,5 | 42,5 |
| 400 | 209,1 | 1,8956 | 14 | 1,04 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 14,0 | 19,0 | 30,5 | 42,5 |
| 450 | 235,9 | 1,9037 | 15 | 1,20 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 14,0 | 19,0 | 30,5 | 42,5 |
| 500 | 260,1 | 1,9018 | 15 | 1,36 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 14,0 | 19,0 | 30,5 | 42,5 |
| 600 | 310,2 | 1,9018 | 15 | 1,72 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 14,0 | 19,0 | 30,5 | 42,5 |
| 700 | 356,4 | 1,8952 | 15 | 2,10 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 13,0 | 18,0 | 29,5 | 38,5 |
| 800 | 404,1 | 1,8955 | 16 | 2,47 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 13,0 | 18,0 | 29,5 | 38,5 |
| 900 | 451,3 | 1,8998 | 17 | 2,99 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 13,0 | 18,0 | 29,5 | 38,5 |
| 1000 | 493,4 | 1,8969 | 18 | 3,46 | 6,0 | 6,5 | 9,5 | 13,0 | 18,0 | 29,5 | 38,5 |
| 1100 | 530,1 | 1,8963 | 18 | 3,95 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 12,5 | 16,0 | 26,5 | 35,5 |
| 1200 | 564,7 | 1,8915 | 18 | 4,40 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 12,5 | 16,0 | 26,5 | 35,5 |
| 1300 | 600,9 | 1,8953 | 19 | 4,81 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 12,5 | 16,0 | 26,5 | 35,5 |
| 1400 | 634,5 | 1,8991 | 18 | 5,16 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 12,5 | 16,0 | 25,5 | 34,5 |
| 1500 | 665,1 | 1,8949 | 18 | 5,49 | 6,0 | 6,5 | 9,0 | 12,5 | 16,0 | 25,5 | 34,5 |

Tabela 29: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular III a 25°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 30,3 | 1,8798 | 25 | 0,13 | 5,0 | 5,0 | 7,0 | 9,0 | 12,0 | 19,0 | 25,5 |
| 150 | 59,4 | 1,8743 | 25 | 0,20 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 19,0 | 27,0 |
| 200 | 94,3 | 1,8894 | 25 | 0,26 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 19,0 | 27,0 |
| 250 | 115,2 | 1,8728 | 25 | 0,34 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 19,0 | 27,0 |
| 300 | 157,2 | 1,8861 | 25 | 0,43 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,5 | 13,5 | 20,5 | 26,5 |
| 350 | 185,1 | 1,8887 | 25 | 0,52 | 6,0 | 6,0 | 8,5 | 11,5 | 14,5 | 20,5 | 27,0 |
| 400 | 209,0 | 1,8860 | 25 | 0,66 | 6,0 | 6,0 | 8,5 | 11,5 | 14,5 | 20,5 | 27,0 |
| 450 | 234,9 | 1,8862 | 25 | 0,84 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,0 | 13,5 | 19,5 | 26,0 |
| 500 | 257,1 | 1,8882 | 25 | 1,01 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,0 | 13,5 | 19,5 | 26,0 |
| 600 | 311,2 | 1,8874 | 25 | 1,40 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,0 | 13,5 | 19,5 | 26,0 |
| 700 | 359,4 | 1,8830 | 26 | 1,80 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,0 | 13,5 | 19,5 | 26,0 |
| 800 | 406,4 | 1,8832 | 26 | 2,27 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,0 | 13,5 | 19,5 | 26,0 |
| 900 | 452,0 | 1,8830 | 26 | 2,75 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,0 | 13,5 | 19,5 | 26,0 |
| 1000 | 495,2 | 1,8787 | 26 | 3,22 | 5,5 | 5,5 | 7,5 | 10,0 | 13,5 | 19,5 | 26,0 |
| 1100 | 535,8 | 1,8776 | 26 | 3,67 | 8,5 | 8,5 | 10,0 | 12,5 | 15,5 | 22,5 | 30,0 |
| 1200 | 575,6 | 1,8771 | 27 | 4,10 | 8,5 | 8,5 | 10,0 | 12,5 | 15,5 | 22,5 | 30,0 |
| 1300 | 614,4 | 1,8788 | 28 | 4,50 | 8,5 | 8,5 | 10,0 | 12,5 | 15,5 | 22,5 | 30,0 |
| 1400 | 653,0 | 1,8810 | 28 | 4,91 | 8,5 | 8,5 | 10,0 | 12,5 | 15,5 | 22,5 | 30,0 |
| 1500 | 687,0 | 1,8774 | 30 | 5,26 | 8,5 | 8,5 | 10,0 | 12,5 | 15,5 | 22,5 | 30,0 |

Tabela 30: Dados experimentais da pasta1 escoando no duto anular III a 60°C.

| DADOS DA UNIDADE EXPERIMENTAL | | | | | DEFORMAÇÃO ANGULAR FANN 35-A(graus) | | | | | | |
|-------------------------------|--------------|---------------|-------|---------|-------------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| RPM BOMBA | <W> (Kg/min) | ρ (kg/L) | T(°C) | DP(bar) | 3 RPM | 6 RPM | 30 RPM | 60 RPM | 100 RPM | 200 RPM | 300 RPM |
| 100 | 30,0 | 1,8516 | 58 | 0,12 | 10,0 | 11,5 | 13,5 | 16,0 | 19,0 | 24,0 | 28,5 |
| 150 | 56,9 | 1,8494 | 59 | 0,16 | 10,0 | 11,5 | 13,5 | 16,0 | 19,0 | 24,0 | 28,5 |
| 200 | 81,0 | 1,8486 | 59 | 0,20 | 11,5 | 12,5 | 15,0 | 17,5 | 20,5 | 26,0 | 28,0 |
| 250 | 110,8 | 1,8506 | 60 | 0,25 | 11,5 | 12,5 | 15,0 | 17,5 | 20,5 | 26,0 | 28,0 |
| 300 | 149,0 | 1,8520 | 61 | 0,33 | 11,5 | 12,5 | 15,0 | 17,5 | 20,5 | 26,0 | 28,0 |
| 350 | 174,9 | 1,8499 | 61 | 0,44 | 10,0 | 11,5 | 14,0 | 17,0 | 20,0 | 26,0 | 28,5 |
| 400 | 196,7 | 1,8425 | 61 | 0,57 | 10,0 | 11,5 | 14,0 | 17,0 | 20,0 | 26,0 | 28,5 |
| 450 | 226,9 | 1,8436 | 61 | 0,72 | 10,0 | 11,5 | 14,0 | 17,0 | 20,0 | 26,0 | 28,5 |
| 500 | 252,9 | 1,8479 | 61 | 0,87 | 9,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 | 17,0 | 21,5 | 27,0 |
| 600 | 302,4 | 1,8484 | 61 | 1,20 | 9,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 | 17,0 | 21,5 | 27,0 |
| 700 | 357,5 | 1,8482 | 61 | 1,53 | 9,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 | 17,0 | 21,5 | 27,0 |
| 800 | 407,1 | 1,8489 | 61 | 1,91 | 9,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 | 17,0 | 21,5 | 27,0 |
| 900 | 456,4 | 1,8495 | 61 | 2,27 | 9,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 | 17,0 | 21,5 | 27,0 |
| 1000 | 504,4 | 1,8489 | 61 | 2,65 | 9,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 | 17,0 | 21,5 | 27,0 |
| 1100 | 551,2 | 1,8450 | 61 | 3,04 | 10,5 | 11,5 | 14,5 | 17,5 | 20,5 | 26,0 | 30,0 |
| 1200 | 596,7 | 1,8460 | 63 | 3,40 | 10,5 | 11,5 | 14,5 | 17,5 | 20,5 | 26,0 | 30,0 |
| 1300 | 641,4 | 1,8446 | 63 | 3,80 | 10,5 | 11,5 | 14,5 | 17,5 | 20,5 | 26,0 | 30,0 |
| 1400 | 683,5 | 1,8446 | 63 | 4,19 | 10,5 | 11,5 | 14,5 | 17,5 | 20,5 | 26,0 | 30,0 |
| 1500 | 725,2 | 1,8426 | 65 | 4,56 | 10,5 | 11,5 | 14,5 | 17,5 | 20,5 | 26,0 | 30,0 |

Anexo C – Gráficos de ΔP versus vazão do escoamento da pasta de cimento nos dutos circular e anulares I, II e III à 15 e 60°C.

C1 – Gráfico de DP versus vazão para pasta 1 em duto circular de 1” à 15°C.

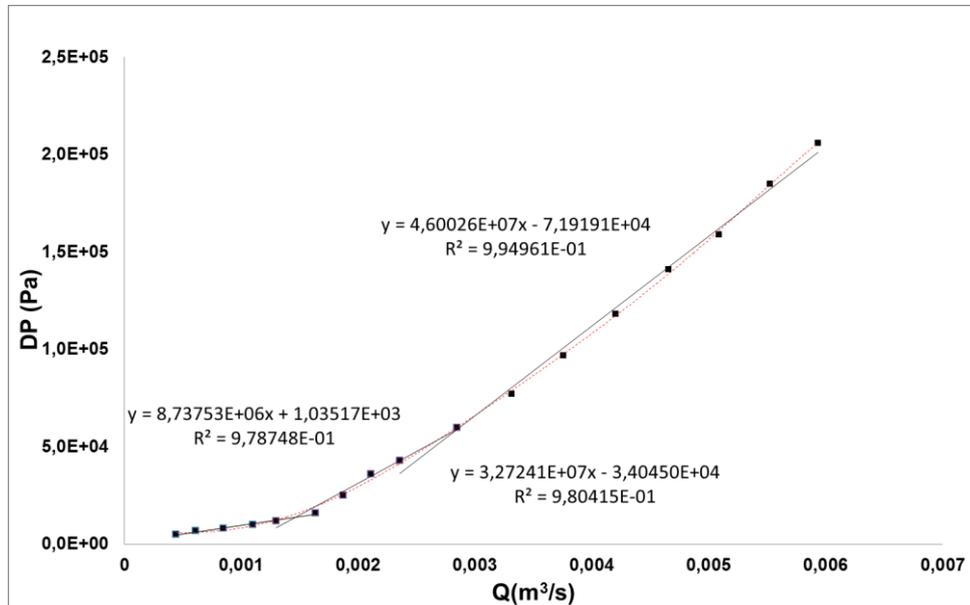


Figura 60: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 15°C em duto circular de 1”.

C2 – Gráfico de DP versus vazão para pasta 1 em anular I à 15°C.

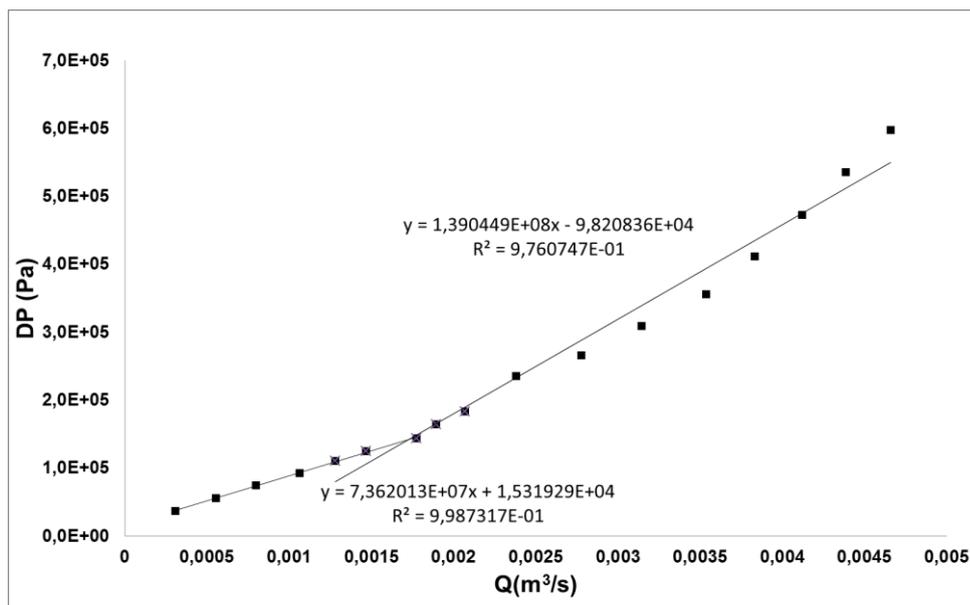


Figura 61: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 15°C em duto anular I.

C3 – Gráfico de DP versus vazão para pasta 1 em anular II à 15°C.

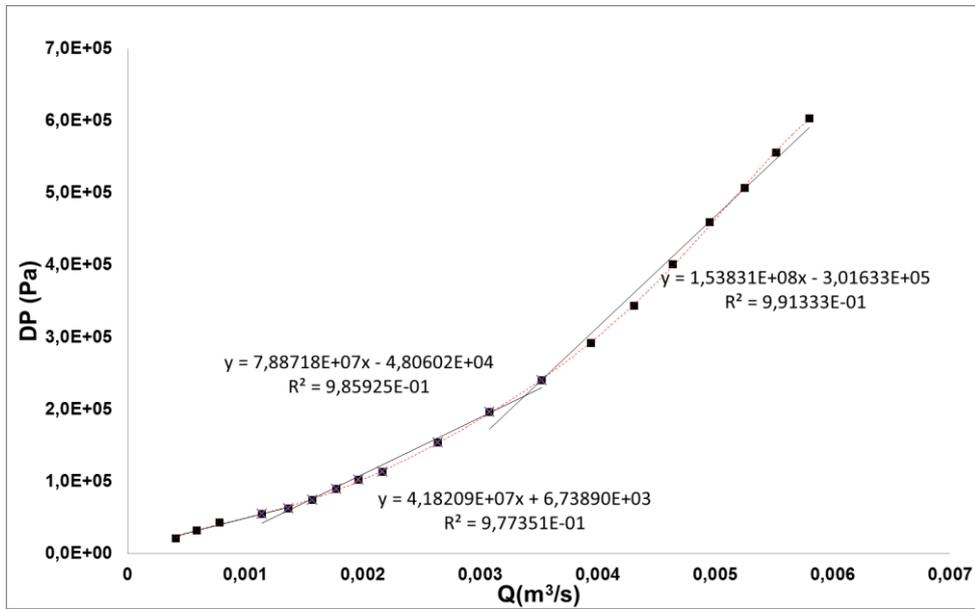


Figura 62: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 15°C em duto anular II.

C4 – Gráfico de DP versus vazão para pasta 1 em anular III à 15°C.

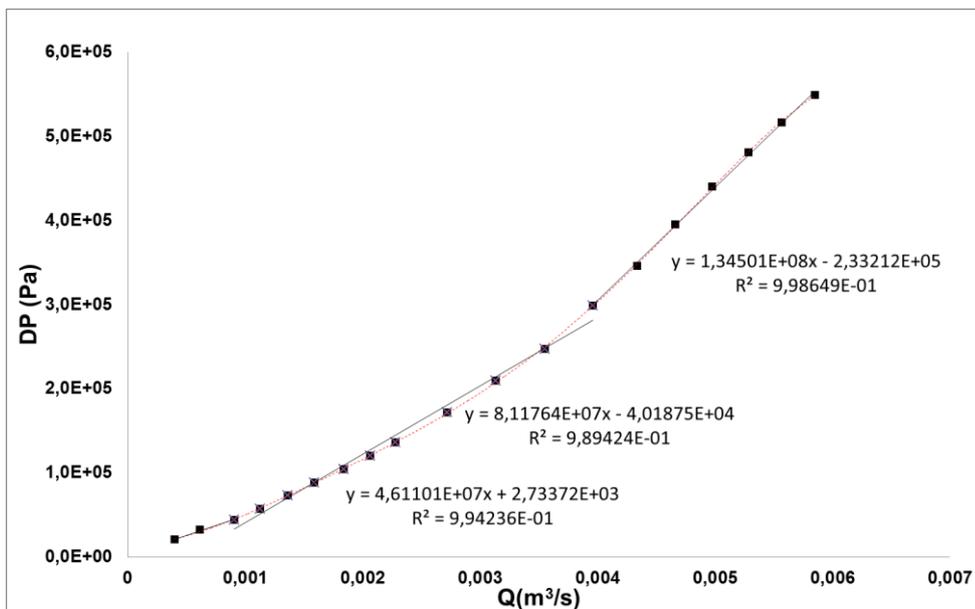


Figura 63: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 15°C em duto anular III.

C5 – Gráfico de DP versus vazão para pasta 1 em duto circular de 1” à 60°C.

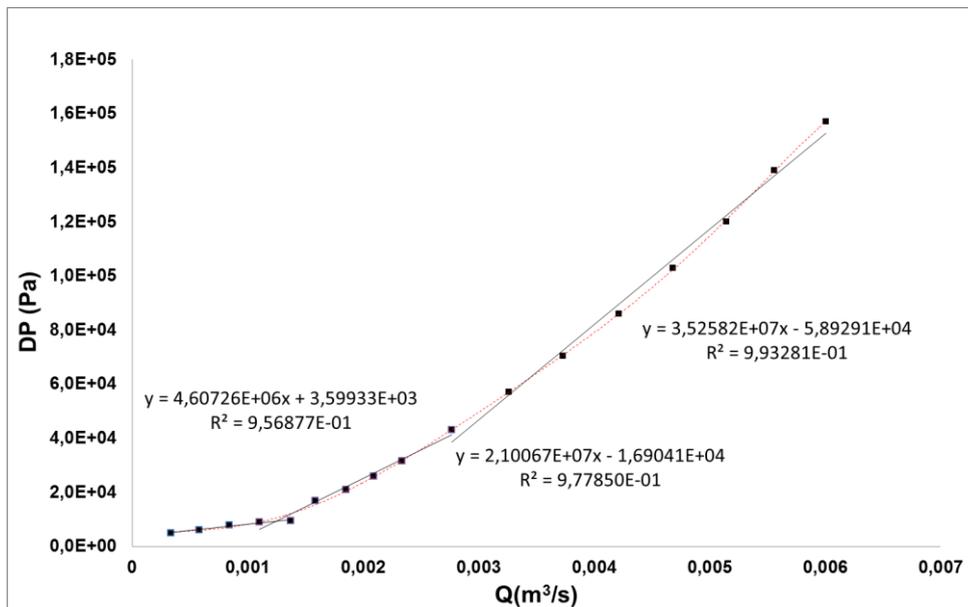


Figura 64: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 60°C em duto circular de 1”.

C6 – Gráfico de DP versus vazão para pasta 1 em anular I à 60°C.

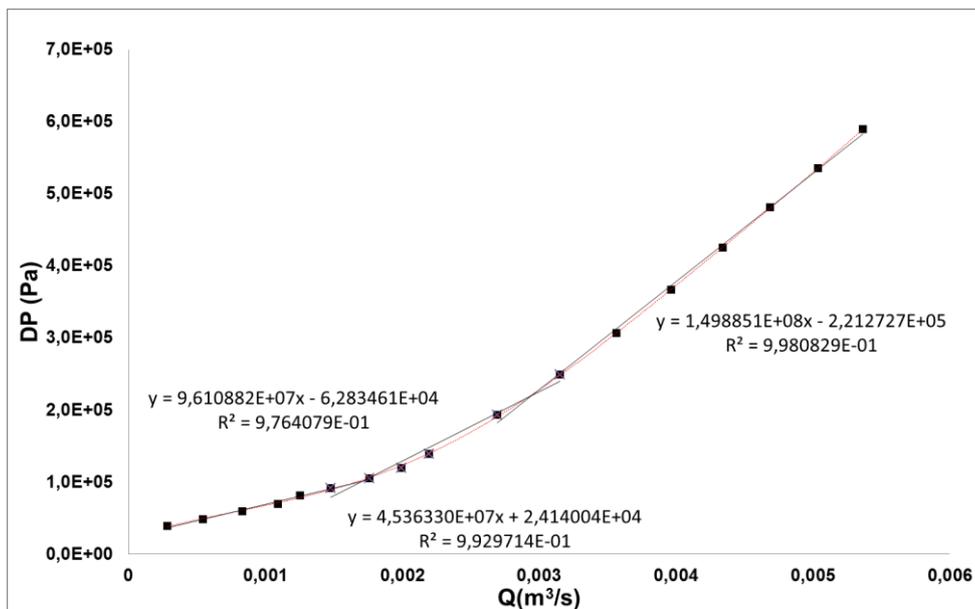


Figura 65: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 60°C em duto anular I.

C7 – Gráfico de DP versus vazão para pasta 1 em anular II à 60°C.

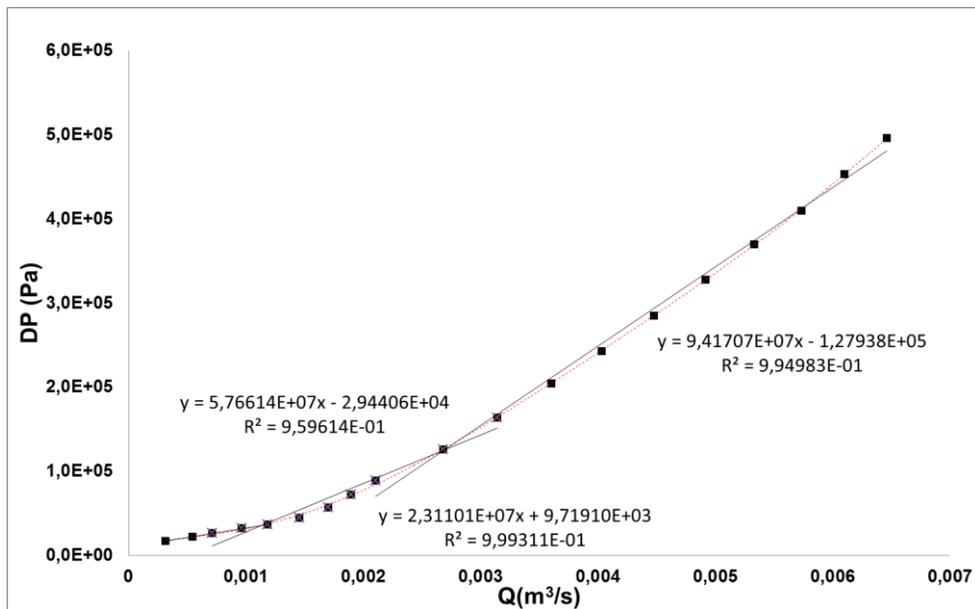


Figura 66: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 60°C em duto anular II.

C8 – Gráfico de DP versus vazão para pasta 1 em anular III à 60°C.

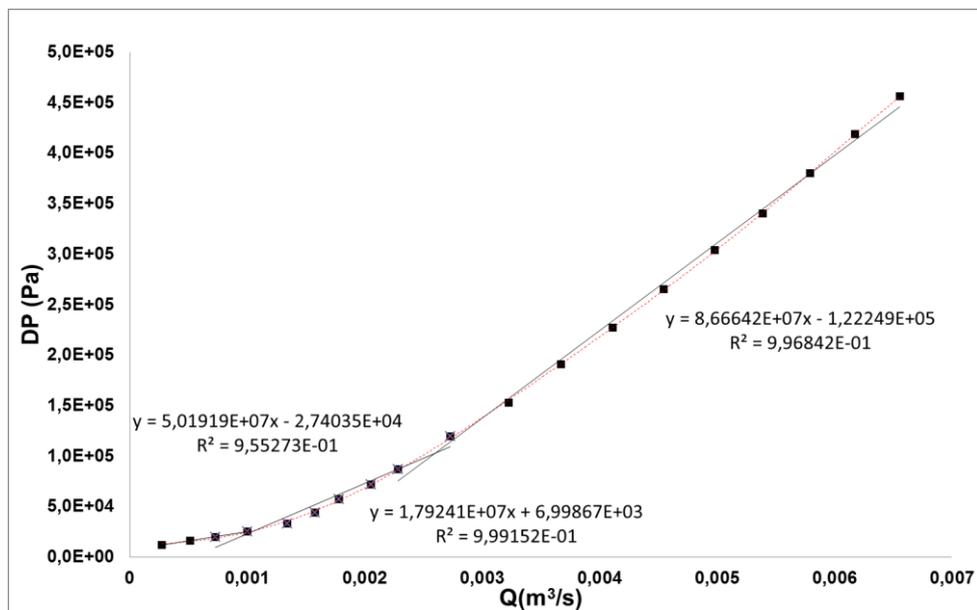


Figura 67: Curva de perda de carga em função da vazão do escoamento da pasta 1 a 60°C em duto anular II.