UFRRJ

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

DISSERTAÇÃO

ESTUDO DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO EM DUTOS E EM REGIÕES ANULARES

EDUARDO RANGEL BRAGA

2009

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

ESTUDO DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO EM DUTOS E EM REGIÕES ANULARES

EDUARDO RANGEL BRAGA

Sob a Orientação de
Luís Américo Calçada

E Co-orientação de
Cláudia Miriam Scheid

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
Abril de 2009

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

EDUARDO RANGEL BRAGA

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 __/__/_____

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

_____
Oswaldo Curty da Motta Lima, D. Sc., DEQ/UEM

_____
Ricardo de Andrade Medronho, D. Sc., Escola de Química/UFRJ

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pela realização deste trabalho, pois sem sua permissão nada é possível.

À professora Cláudia Miriam Scheid e ao professor Luís Américo Calçada, pela orientação, dedicação e profissionalismo neste trabalho.

A todos os professores e servidores do DEQ-IT/UFRRJ, pelo suporte técnico na realização deste trabalho.

Ao CENPES por todo suporte tecnológico e pelo financiamento do projeto de pesquisa.

À minha família por todo o suporte e apoio dado para o sucesso deste trabalho.

À Fernanda por todo o apoio, dedicação, companheirismo e a compreensão nos momentos difíceis.

Aos alunos de graduação e amigos Deivídson, Wanderson, Brainer, Erick, Estevão, Leonardo, Herbert, Marlon, Patrícia, Priscila, Raquel, Camila, Fernanda, Letícia, Pedro, Renata e José Messias pela ajuda para coletar os dados experimentais, montagem e manutenção da unidade experimental.

Aos grandes e verdadeiros amigos Fred, Cristiano, Rômulo, Agustinho, Cristiane e Adriana simplesmente pela amizade, companheirismo e pelos bons momentos vividos na universidade.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelos grandes momentos vividos e todo conhecimento adquirido.

RESUMO

BRAGA, Eduardo Rangel. **Estudo do Escoamento de Fluidos de Perfuração em Dutos e em Regiões Anulares.** 2009. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2009.

A necessidade de avanços tecnológicos na operação de perfuração de poços de petróleo tem incentivado a pesquisa e o desenvolvimento de fluidos de perfuração, assim como o estudo do escoamento dos mesmos em geometrias distintas. Neste trabalho é estudado o escoamento de dois fluidos de perfuração em tubos e dutos anulares, com o objetivo de avaliar modelos reológicos que descrevam o comportamento do fluido, caracterizar os regimes de escoamento utilizando método experimental e comparar com correlações encontradas na literatura, avaliar equações de diâmetro hidráulico encontradas na literatura, avaliar correlações de fator de atrito no regime turbulento e propor novas correlações para o fator de atrito no regime turbulento. Os dados são obtidos em uma unidade piloto constituída de um sistema operando em circuito fechado de 6 metros de extensão horizontal composto de tubos de ferro galvanizado, dispostos em três linhas paralelas de escoamento independentes que permitem a avaliação da perda de carga ocasionada em um tubo circular de 1" de diâmetro e em duas razões de anulares concêntricos (ânulo formado pelos tubos de 2" e 3/4", e 1 1/4" e ½"). O sistema é composto de um tanque com capacidade de 500 litros, dotado de um agitador mecânico, conectado a uma bomba de deslocamento positivo do tipo helicoidal de 25HP, operando com vazões de até $20m^3/h$. A unidade piloto é instrumentada com um conjunto de três transdutores de pressão. A reologia do fluido é avaliada com o auxílio de um viscosímetro FANN, modelo 35A. Os modelos reológicos adotados são o da potência e Casson. Os resultados revelam que a escolha das equações de diâmetro hidráulico e fator de atrito são dependentes da geometria do escoamento e do modelo reológico utilizado, devendo ser analisados separadamente. As novas correlações de fator de atrito para o regime turbulento geram bons resultados.

Palavras chave: fator de atrito, modelo reológico, fluidos de perfuração

ABSTRACT

BRAGA, Eduardo Rangel. **Study of flow of drilling fluids in pipes and in annular regions.** 2009. 99p. Dissertation. (Master Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica , RJ, 2009.

The need for technological advances in the operation of drilling wells for oil has encouraged the research and development of drilling fluids, like the study of the its flowing in different geometries. On this work is studied the flow of two drilling fluids in pipe and annular tube with the objective to evaluate rheological models that describe the fluid behavior, to characterize the flow regimes using the experimental method and compare with correlations found in literature, to evaluate equations of hydraulic diameter found in the literature, to evaluate correlations of friction factor in the turbulent regime and to propose new correlations for the friction factor in turbulent regime. The data are obtained in a pilot plant consisting of a system operating in closed circuit of 6 meters composed of horizontal tubes made of galvanized iron, arranged in three parallel lines of independent flows that allow the measurement of friction loss caused by a circular tube of 1" of diameter and by two ratios of concentric annular tubes (annulus formed by 2" and 3/4 "and 1 1/4" and 1/2"). The system consists of a tank with a capacity of 500 liters, with a mechanical stirrer, connected to a positive displacement pump of helical type with 25HP, operating with volumetric flow up to $20m^3/h$. The pilot plant is instrumented with a set of three transducers of pressure. The rheology of the fluid is evaluated with the aid of a FANN viscometer, model 35A. The rheological models used are the power law and Casson. The results show that the choice of equations of hydraulic diameter and friction factor are dependent on the geometry of flow and the rheological model used, showing that should be analyzed separately. The new correlations of friction factor for turbulent regime generate good results.

Keywords: friction factor, rheological model, drilling fluids

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos reológicos 16
Tabela 2: Equações de Reynolds crítico encontradas na literatura. 18
Tabela 3: Equações para o cálculo de fator de atrito no regime laminar e número de Reynolds. 23
Tabela 4: Equações para o cálculo de fator de atrito no regime turbulento de fluido não-Newtoniano. 24
Tabela 5: Diâmetros reais e nominais das tubulações. 30
Tabela 6: Faixa dos parâmetros reológicos para o modelo da potência. 34
Tabela 7: Faixa dos parâmetros reológicos para o modelo de Casson. 34
Tabela 8: Reynolds críticos determinados experimentalmente e através de correlações para o modelo da potência. 39
Tabela 9: Reynolds críticos determinados experimentalmente e através de correlações para o modelo de Casson. 39
Tabela 10: Reynolds críticos determinados experimentalmente e através de correlações para o modelo da potência. 42
Tabela 11: Reynolds críticos determinados experimentalmente e através de correlações para o modelo de Casson. 42
Tabela 12: Valores de Reynolds crítico para os fluidos 4 e 5 43
Tabela 13: Valor do diâmetro hidráulico para os anulares. 44
Tabela 14: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico. 46
Tabela 15: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico. 48
Tabela 16: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico. 49
Tabela 17: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico. 51
Tabela 18: Resumo da avaliação do diâmetro hidráulico. 51
Tabela 19: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico. 53
Tabela 20: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico. 55
Tabela 21: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo circular. 58
Tabela 22: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para os tubos anulares. 60
Tabela 23: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo circular. 62
Tabela 24: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo anular 1 1/4" e 1/2". 64
Tabela 25: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo anular 2" e 3/4". 65
Tabela 26: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo circular. 68
Tabela 27: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo anular 1 1/4" e 1/2". 70
Tabela 28: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo circular. 72
Tabela 29: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo anular 1 1/4" e 1/2". 74
Tabela 30: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo anular 2" e 3/4". 76
Tabela 31: Melhores resultados obtidos para as equações de fator de atrito no regime turbulento. 77
Tabela 32: Parâmetros da nova correlação e média dos desvios absolutos para o fluido 4 utilizando o modelo da potência. 79
Tabela 33: Parâmetros da nova correlação e média dos desvios absolutos para o fluido 5 utilizando o modelo da potência. 81
Tabela 34: Parâmetros da nova correlação e média dos desvios absolutos para o fluido 4 utilizando o modelo de Casson. 83
Tabela 35: Parâmetros da nova correlação e média dos desvios absolutos para o fluido 5 utilizando o modelo de Casson. 85
Tabela 36: Calibração do tubo circular antes do experimento com o fluido 4. 94
Tabela 37: Calibração do tubo anular 1 1/4" e 1/2" antes do experimento com o fluido 4. 95
Tabela 38: Calibração do tubo anular 2" e 3/4" antes do experimento com o fluido 4. 96
Tabela 39: Calibração do tubo circular antes do experimento com o fluido 5. 97
Tabela 40: Calibração do tubo anular 1 1/4" e 1/2" antes do experimento com o fluido 5. 98
Tabela 41: Calibração do tubo anular 2" e 3/4" antes do experimento com o fluido 5. 99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Imagem do "*top-drive*". 3
Figura 2: Direcionamento do poço 4
Figura 3: Broca de laminas de aço 5
Figura 4: Broca de diamantes naturais 5
Figura 5: Broca de diamantes artificiais. 5
Figura 6: Broca com partes móveis 6
Figura 7: foto de *"Tool Joints"*. 6
Figura 8: Estabilizadores 7
Figura 9: Processo de perfuração 7
Figura 10: Escoamento nos "*tool joints"*. 8
Figura 11: Escoamento de fluido sobre placas planas (BIRD *et al*, 2004). 13
Figura 12: Reogramas típicos 15
Figura 13: Determinação experimental da vazão crítica do escoamento. 19
Figura 14: Determinação experimental da vazão crítica do escoamento. 20
Figura 15: Foto da unidade piloto 29
Figura 16: Esquema da unidade piloto. 29
Figura 17: Foto do transdutor diferencial de pressão. 30
Figura 18: Viscosímetro *Fann V. G. Metter modelo 35A* 32
Figura 19: Reograma típico do fluido 4 para três temperaturas distintas. 33
Figura 20: Reograma típico do fluido 5 para três temperaturas distintas. 33
Figura 21: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo circular para o fluido 4 37
Figura 22: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo anular de razão 1 1/4" e 1/2" para o fluido 4 38
Figura 23: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo anular de razão 2" e 3/4" para o fluido 4 38
Figura 24: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo circular para o fluido 5 40
Figura 25: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo anular de razão 1 1/4" e 1/2" para o fluido 5 41
Figura 26: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo anular de razão 2" e 3/4" para o fluido 5 41
Figura 27: Avaliação das correlações de diâmetro hidráulico D_{H1} e D_{H3}. 44
Figura 28: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 4 utilizando o modelo da potência. 45
Figura 29: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 4 utilizando o modelo da potência. 46
Figura 30: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 5 utilizando o modelo da potência. 47
Figura 31: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 5 utilizando o modelo da potência. 47
Figura 32: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 4 utilizando o modelo de Casson. 48
Figura 33: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 4 utilizando o modelo de Casson. 49
Figura 34: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 5 utilizando o modelo de Casson. 50
Figura 35: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 5 utilizando o modelo de Casson. 50
Figura 36: Avaliação do diâmetro efetivo do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 4. 52
Figura 37: Avaliação do diâmetro efetivo do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 4. 53
Figura 38: Avaliação do diâmetro efetivo do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 5. 54
Figura 39: Avaliação do diâmetro efetivo do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 5. 54
Figura 40: Diagrama de fator de atrito para o fluido 4 escoando no tubo circular. 56
Figura 41: Dados experimentais do fluido 4 no regime turbulento escoando no tubo circular. 57
Figura 42: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo circular. 57
Figura 43: Diagrama de fator de atrito para o fluido 4 escoando nos tubos anulares. 58
Figura 44: Dados experimentais do fluido 4 no regime turbulento escoando no tubo anular de 1 1/4" e 1/2" utilizando a equação D_{H1}. 59
Figura 45: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 1 1/4" e 1/2" 59

Figura 46: Diagrama de fator de atrito para o fluido 5 escoando no tubo circular. 60
Figura 47: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo circular. 61
Figura 48: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo circular. 61
Figura 49: Diagrama de fator de atrito para o fluido 5 escoando nos tubos anulares. 62
Figura 50: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo anular de 1 1/4" e 1/2"..... 63
Figura 51: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 1 1/4" e 1/2"..... 63
Figura 52: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo anular de 2" e 3/4"..... 64
Figura 53 Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 2" e 3/4"..... 65
Figura 54: Diagrama de fator de atrito para o fluido 4 escoando no tubo circular. 66
Figura 55: Dados experimentais do fluido 4 no regime turbulento escoando no tubo circular. 67
Figura 56: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo circular. 67
Figura 57: Diagrama de fator de atrito para o tubo anular de 1 1/4" e 1/2"..... 68
Figura 58: Dados experimentais do fluido 4 no regime turbulento escoando no tubo anular de 1 1/4" e 1/2"..... 69
Figura 59: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 1 1/4" e 1/2"..... 69
Figura 60: Diagrama de fator de atrito para o fluido 5 escoando no tubo circular. 71
Figura 61: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo circular. 71
Figura 62: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo circular. 72
Figura 63: Diagrama de fator de atrito para o fluido 5 escoando no tubo anular de 1 1/4" e 1/2"..... 73
Figura 64: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo anular de 1 1/4" e 1/2"..... 73
Figura 65: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 1 1/4" e 1/2"..... 74
Figura 66: Diagrama de fator de atrito para o tubo anular de 2" e 3/4"..... 75
Figura 67: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo anular de 2" e 3/4"..... 75
Figura 68: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 2" e 3/4"..... 76
Figura 69: Dados experimentais do fluido 4 no tubo circular usando modelo da potência com nova correlação. 78
Figura 70: Dados experimentais do fluido 4 no tubo anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H1}) usando modelo da potência com nova correlação..... 79
Figura 71: Dados experimentais do fluido 5 no tubo circular usando modelo da potência com nova correlação. 80
Figura 72: Dados experimentais do fluido 5 no tubo anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H2}) usando modelo da potência com nova correlação..... 80
Figura 73: Dados experimentais do fluido 5 no tubo anular 2" e 3/4" (D_{H2}) usando modelo da potência com nova correlação. 81
Figura 74: Dados experimentais do fluido 4 no tubo circular usando modelo de Casson com nova correlação.. 82
Figura 75: Dados experimentais do fluido 4 no tubo anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H2}) usando modelo de Casson com nova correlação..... 82
Figura 76: Dados experimentais do fluido 5 no tubo circular usando modelo de Casson com nova correlação.. 84
Figura 77: Dados experimentais do fluido 5 no tubo anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H2}) usando modelo de Casson com nova correlação..... 84
Figura 78: Dados experimentais do fluido 5 no tubo anular 2" e 3/4" (D_{H1}) usando modelo de Casson com nova correlação. 85

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SÍMBOLOS

A, B, C	Parâmetro recalculado a partir da equação de Ellis e George;
A_r	Área da placa (m^2);
D	Diâmetro da tubulação (m);
Def	Diâmetro efetivo do escoamento (m);
D_H	Diâmetro hidráulico (m);
D_1	Diâmetro do tubo interno (m);
D_2	Diâmetro do tubo externo (m);
F	Força exercida pela placa no fluido (N);
f	Fator de atrito predito por Fanning;
f_{calc}	Fator de atrito calculado;
f_{exp}	Fator de atrito experimental;
f_D	Fator de atrito de Darcy;
g	Aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$);
G	fator de correção do diâmetro hidráulico (m);
h_t	Somatório de todas as perdas de cargas geradas no tubo (m);
h_s	Perda de carga ocasionada por acidentes presentes na tubulação (m);
h_d	Perda de carga provocadas pelo atrito na parede do tubo reto (m);
He	Número de Hedstrom;
k	Parâmetro do modelo *power- law* (índice de consistência) ($Kg.m^{-1}.s^{n-1}$);
K	Coeficiente de perda de carga localizada;
L	Comprimento da seção reta (m);
LE	Limite de escoamento ($Kg.m^{-1}.s^{-2}$);
n	Parâmetro do modelo *power-law* (índice de comportamento);
P	Pressão no interior do tubo ($kg.m^{-1}.s^{-2}$);
Q	Vazão volumétrica ($m^3.s^{-1}$);
R	Coeficiente de correlação de Pearson;
Re	Número de Reynolds;
Re_c	Número de Reynolds crítico;
$Re_{c\ calc}$	Número de Reynolds crítico calculado pela correlação;
$Re_{c\ exp}$	Número de Reynolds crítico experimental;
Re_{cN}	Número de Reynolds crítico Newtoniano;
Re_L	Número de Reynolds crítico para o regime laminar;
Re_T	Número de Reynolds crítico para o regime turbulento;
R_H	Raio hidráulico (m);
V	Velocidade do fluido ($m.s^{-1}$);
$\langle v \rangle$	Velocidade média do fluido ($m.s^{-1}$);
v_c	Velocidade crítica do fluido ($m.s^{-1}$);
VP	Viscosidade plástica ($kg.m.s^{-1}$);
x_c	Parâmetro de Hanks;
Y	Distancia entre as placas (m);
z	Alturas geométricas (cotas) (m);

Letras gregas

β	Razão entre os diâmetros interno e externo;

ε	Rugosidade relativa do tubo;
γ	Taxa de deformação (s^{-1});
μ	Viscosidade do fluido ($Kg.m^{-1}.s^{-1}$);
μ_{ap}	Viscosidade aparente ($Kg.m^{-1}.s^{-1}$);
ρ	Massa específica do fluido ($Kg.m^{-3}$);
τ	Tensão cisalhante ($Kg.m^{-1}.s^{-2}$);
τ_w	Tensão cisalhante na parede ($Kg.m^{-1}.s^{-2}$);
ΔP	Queda de pressão (Pa);
ΔL	Comprimento da seção de teste (m);
ΔP_{calc}	Perda de carga calculada (Pa);
ΔP_{exp}	Perda de carga experimental (Pa);

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 PERFURAÇÃO 2
1.1.1 Sonda de Perfuração *4*
1.1.1.1 Coluna de Perfuração 5
1.1.1.2 Brocas 5
1.1.1.3 Conexões cônicas e estabilizadores 6
1.1.1.4 Escoamento do fluido no processo de perfuração 7
1.2 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO 8
1.2.1 Classificação dos fluidos de perfuração *10*

2 REVISÃO DA LITERATURA 13

2.1 LEI DE NEWTON DA VISCOSIDADE 13
2.1.1 Fluidos não-Newtoniano *14*
2.1.2 Modelos reológicos *16*
2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS REGIMES 17
2.3 BALANÇO DE ENERGIA MECÂNICA 20
2.4.1 Fator de atrito *22*
2.4 DIÂMETRO HIDRÁULICO 25

3 MATERIAL E MÉTODOS 28

3.1 DESCRIÇÃO DA UNIDADE PILOTO 28
3.2 METODOLOGIA 30
3.3 FLUIDOS UTILIZADOS 31
3.4 DETERMINAÇÃO DA REOLOGIA 32
3.5 LIMPEZA E CALIBRAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL 35

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 36

4.1 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS CRÍTICO 36
4.1.1 Fluido 4 ..... *37*
4.1.2 Fluido 5 ..... *40*
4.2 AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES DE DIÂMETRO HIDRÁULICO PARA CADA MODELO REOLÓGICO 44
4.2.1 Fluido 4 utilizando o modelo da potência *45*
4.2.2 Fluido 5 utilizando o modelo da potência *47*
4.2.3 Fluido 4 utilizando o modelo de Casson *48*
4.2.4 Fluido 5 utilizando o modelo de Casson *49*
4.2.5 Avaliação do diâmetro efetivo de escoamento *52*
4.3 AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES DE FATOR DE ATRITO 55
4.3.1 Avaliação de fator de atrito para o fluido 4 utilizando o modelo da potência *56*
4.3.2 Avaliação de fator de atrito para o fluido 5 utilizando o modelo da potência *60*
4.3.3 Avaliação de fator de atrito para o fluido 4 utilizando o modelo de Casson *66*
4.3.4 Avaliação de fator de atrito para o fluido 5 utilizando o modelo de Casson *70*
4.3.5 Resumo dos Resultados Obtidos *76*
4.4 PROPOSTA DE NOVAS CORRELAÇÕES PARA O CÁLCULO DE FATOR DE ATRITO 78
4.4.1 Resultados do Fluido 4 utilizando o modelo da potência *78*
4.4.2 Resultados do Fluido 5 utilizando o modelo da potência *80*
4.4.3 Resultados do Fluido 4 utilizando o modelo de Casson *82*
4.4.4 Resultados do Fluido 5 utilizando o modelo de Casson *83*

5 CONCLUSÃO 87

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 88

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 89

8 ANEXOS 91

1 INTRODUÇÃO

A perfuração de poços de petróleo é uma das principais operações para a produção do óleo, sendo dispendiosa e envolvendo alto risco operacional e ao meio ambiente. Em virtude disto, é necessário o completo domínio da operação e constantes avanços da tecnologia.

O fluido de perfuração exerce um papel importante na perfuração de poços, pois é o mesmo que retira os cascalhos, ajuda na perfuração por erosão, controla a pressão no poço e previne acidentes operacionais.

Para obter o melhor desempenho dos fluidos durante a operação, é necessário ter o completo domínio de suas propriedades físicas, químicas e características de escoamento.

Há ainda a necessidade de um controle rigoroso da velocidade do fluido e pressão ao longo do poço, pois velocidades altas podem provocar danos à rocha produtora, enquanto velocidades baixas demais podem não ser eficientes para a remoção dos cascalhos. Pressões altas podem causar fratura das rochas e pressões baixas podem permitir o fluxo de fluidos da formação para o interior do poço (*kick*) o que em uma situação descontrolada pode causar um acidente de grandes proporções (*blowout*).

Dentro deste contexto, foi construída uma unidade piloto simulando um aspecto da perfuração de poços de petróleo com ênfase no escoamento em tubo circular (simulando o escoamento dentro da coluna de perfuração) e anulares concêntricos (simulando o escoamento na região entre a coluna de perfuração e a parede do poço) com similaridade dinâmica e geométrica. Este trabalho estuda o comportamento de fluidos de perfuração reais já utilizados em sondas de perfuração da Petrobras.

Na unidade piloto são obtidos dados experimentais de queda de pressão em um trecho reto e vazão. Através destes dados é possível caracterizar os regimes de escoamento do fluido, avaliar modelos reológicos, avaliar correlações de diâmetro hidráulico e avaliar equações para o calculo do fator de atrito.

Este trabalho é apresentado na forma de texto corrido, onde no primeiro capítulo deste trabalho há uma pequena introdução explicando o processo de perfuração de poços de petróleo.

Na divisão seguinte há a revisão da literatura mostrando estudos de outros autores com o mesmo tema desta pesquisa. No terceiro capítulo, são demonstrados os materiais, o delineamento experimental, as técnicas e os métodos utilizados para conduzir o trabalho. Os resultados experimentais obtidos são mostrados e discutidos no capítulo 4. Nas divisões

seguintes são apresentadas às conclusões, referências bibliográficas, sugestões para trabalhos futuros e os anexos.

1.1 Perfuração

Antes de iniciar o processo de perfuração, deve-se fazer uma análise geológica do local a ser perfurado para avaliar características importantes do local como relevos, tipo de solo, tipo de rocha geradora, tipo de rocha-reservatório e aprisionamento, determinar seus limites, estudar o impacto ambiental, entre outros.

Os geólogos examinam as rochas superficiais e o terreno com a ajuda adicional de imagens de satélite. No entanto, eles também usam uma variedade de outros métodos para encontrar petróleo, como por exemplo, a sismologia, criando ondas de choque que passam através das camadas ocultas de rochas e interpretando as ondas que são refletidas de volta para a superfície (TRIGGIA *et al*, 2001).

Uma vez terminada a análise, o terreno é limpo e nivelado e estradas de acesso são construídas, se necessário. A perfuração utiliza água, então é necessário que haja uma fonte nas proximidades e caso não exista deve-se cavar um poço de água. A equipe cava um fosso de reserva, que é usado para o descarte dos cortes de rocha e lama da perfuração durante o processo e o forra com plástico para proteger o meio ambiente. Se o local for uma reserva ecológica, como um pântano ou região selvagem, os cortes e a lama deverão ser descartados em outros locais com ajuda de caminhões.

Logo que o terreno estiver preparado, diversos poços secundários precisarão ser escavados para a torre e o poço principal. Um fosso retangular, chamado de escavação, é feito ao redor do local do poço real da perfuração. A escavação proporciona um espaço de trabalho ao redor do poço para os trabalhadores e acessórios de perfuração. A equipe então começa a perfurar o poço principal, freqüentemente com um pequeno caminhão-sonda ao invés de uma torre principal. A primeira parte do poço é maior e mais rasa do que a porção principal e é revestida com uma tubulação de esteio de grande diâmetro. Poços adicionais são escavados na lateral para armazenar temporariamente o equipamento. Quando esses poços são finalizados, o equipamento da torre pode ser trazido e erigido.

A perfuração caracteriza-se pela aplicação de peso e rotação da broca sobre o solo, e pela circulação de fluido. O peso e a rotação têm a função de destruir as rochas, já o fluido tem diversas funções, como retirar os cascalhos gerados pela broca e transportá-los para a superfície. A circulação consiste em manter o bombeio do fluido, em geral com rotação, mas

sem tocar com a broca no fundo. Assim, não se tem avanço e pode-se efetuar uma melhor limpeza, retirando todo o cascalho do poço.

Na perfuração convencional, o poço é perfurado por um tubo cujo comprimento nominal varia de aproximadamente 5,49m a 16,50m e depois de certa profundidade outro tubo é adicionado até ter a profundidade desejada. Já na perfuração com "*top-drive*" (figura 1), há um motor conectado no topo da coluna e a perfuração é feita de seção em seção, ou seja, de três em três tubos (TRIGGIA *et al*, 2001).

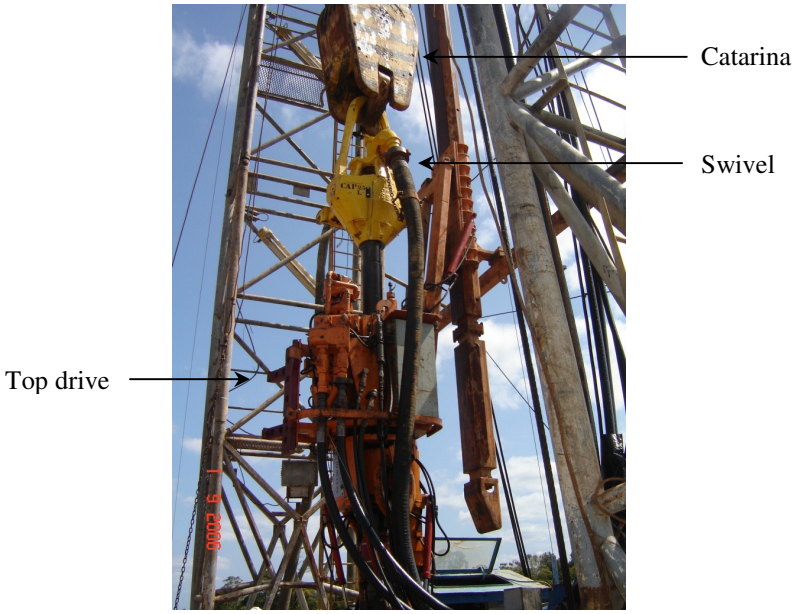

Figura 1: Imagem do "*top-drive*".

Em um poço típico "*onshore*", primeiro crava-se no chão um condutor de 20" de diâmetro por onde descerá a broca de 12 1/4" que perfura até certa profundidade, em seguida retira-se a broca, para depois descer um revestimento de 9 5/8", para que então ocorra a cimentação.

Em um poço "*offshore*" primeiro desce uma base guia temporária de 36", onde se inicia a perfuração com uma broca de 26", em seguida retira-se a broca, desce o revestimento de 20", para então ocorrer a cimentação. O processo de perfuração é continuado como na situação "*onshore*" com uma broca de 8 1/2" e seus passos seguintes.

Os poços podem ser considerados pioneiros quando têm o objetivo de encontrar uma nova reserva de petróleo; estratigráfico quando o poço é perfurado para se obter dados estratigráficos para futuras programações e análises específicas; extensão quando visa perfurar uma área onde já existe uma reserva com intenção ampliar a produção, delimitar a

reserva, determinar o comprimento, largura, sentido, sendo possível estimar o tamanho da reserva; pioneiro adjacente quando se busca novas reservas em um campo produtor.

Os poços também são classificados por seu direcionamento, são verticais quando seu objetivo está sob a sonda e não há mudança de direção elevada, direcionais quando é necessária a mudança de direção ou inclinação e horizontais quando a inclinação final chega perto dos noventa graus conforme mostra a figura 2.

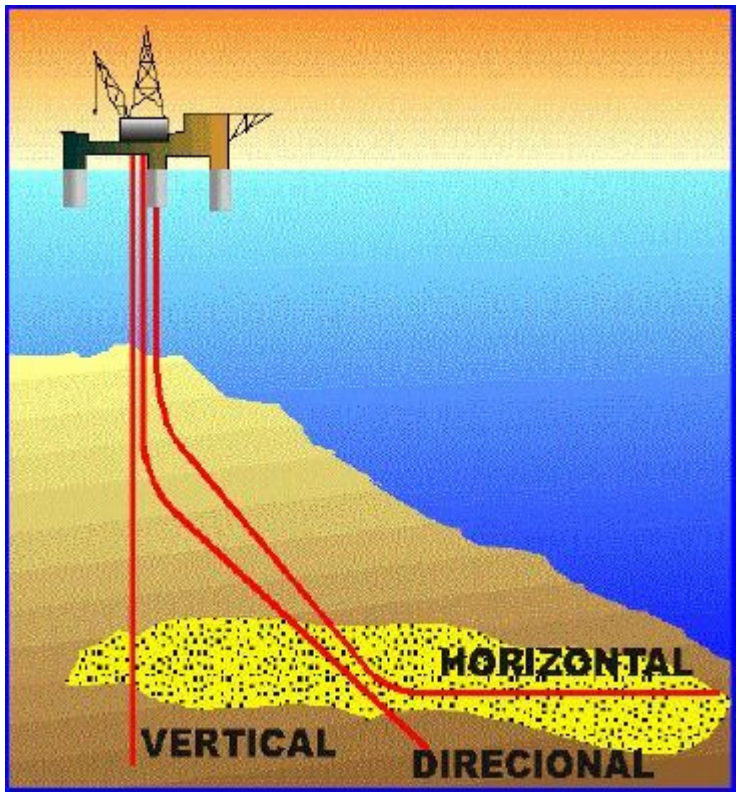

Figura 2: Direcionamento do poço

1.1.1 Sonda de Perfuração

A sonda de perfuração é o conjunto de equipamentos e acessórios que possibilitam a perfuração do poço. Uma sonda é formada por diversos sistemas que permitem o fornecimento de energia, a sustentação de cargas, a rotação de brocas, o bombeamento de líquidos, a segurança do poço e o monitoramento constante de diversas condições no processo de perfuração, entre outros.

1.1.1.1 Coluna de Perfuração

A coluna de perfuração é uma parte importante da sonda, sendo formada pela broca, elementos tubulares, uniões cônicas "*tool joints"*, acessórios e ferramentas de manuseio.

Tem como função aplicar peso sobre a broca, transmitir rotação à broca, conduzir o fluido de perfuração, manter o poço calibrado e garantir a inclinação e direção.

As brocas são instrumentos que, em movimento de rotação são capazes de perfurar o solo de forma circular. São definidas previamente com base em estudos geológico, pois são de altíssimo custo e se perde muito tempo em uma troca. Portanto, o plano de brocas deve ser bem programado. As brocas podem ser sem partes móveis e com partes móveis.

1.1.1.2 Brocas

As brocas são classificadas em dois tipos, sem partes móveis e com partes móveis. Nas sem partes móveis, os principais tipos são as integrais de lâminas de aço, diamantes naturais e diamantes artificiais (figuras 3, 4 e 5).

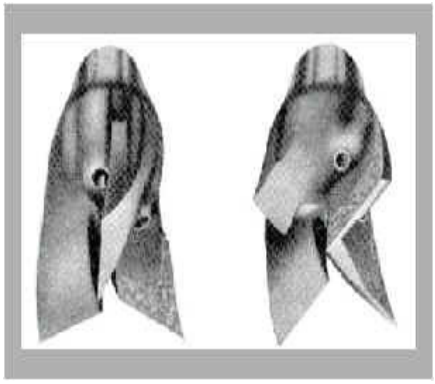

Figura 3: Broca de laminas de aço

Figura 4: Broca de diamantes naturais

Figura 5: Broca de diamantes artificiais.

As brocas de partes móveis (figura 6) podem ter de um a quatro cones, sendo as mais utilizadas as brocas tricônicas pela sua eficiência e custo. Possuem dois elementos principais, estrutura cortante e rolamentos (TRIGGIA *et al*, 2001).

Os elementos que compõem a estrutura cortante das brocas tricônicas são fileiras de dentes montados sobre o cone que se interpõem entre as fileiras dos dentes dos cones adjacentes. São divididas entre brocas de dentes de aço e brocas de insertos.

As de dentes de aço têm sua estrutura cortante fresada no próprio cone. Já a de insertos, têm os insertos de carbureto de tungstênio instalados por processo de interferência em orifícios abertos na superfície do cone. (TRIGGIA *et al*, 2001)

Figura 6: Broca com partes móveis

1.1.1.3 Conexões cônicas e estabilizadores

São conhecidas como "*Tool Joints*" (figura 7) e servem para conectar um tubo a outro da coluna, são soldadas no corpo do tubo, sendo caracterizadas de acordo com o ângulo de inclinação e diâmetro.

Figura 7: foto de "*Tool Joints*".

Os estabilizadores (figura 8) garantem o calibre do poço, a rigidez das paredes, bem como afasta os comandos das paredes evitando o desmoronamento do poço, são colocadas ao longo da coluna de perfuração com o objetivo de estabilizar a mesma auxiliando no direcionamento da perfuração de modo a permitir maior controle na trajetória do poço.

Os escareadores têm a mesma função que os estabilizadores e são usados em rochas duras e abrasivas, pois possuem lâminas no seu corpo.

Figura 8: Estabilizadores

1.1.1.4 Escoamento do fluido no processo de perfuração

Durante o processo de perfuração, o fluido é injetado através da coluna de perfuração em um típico escoamento num tubo circular conforme mostra a figura 9.

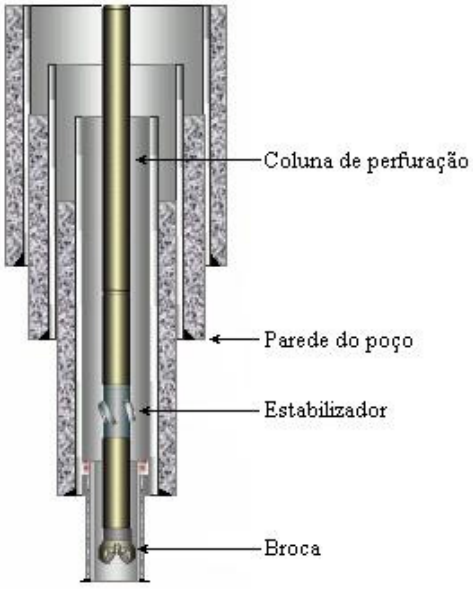

Figura 9: Processo de perfuração.

Depois que o fluido passa ao longo da coluna, o mesmo é ejetado pela broca e retorna à superfície na região compreendida entre a coluna de perfuração e a parede do poço, analogamente, podemos dizer que é um escoamento na região anular de dois tubos que podem ser concêntricos ou excêntricos conforme mostra a figura 9. A coluna também gira, exercendo sobre o fluido uma tensão na direção radial.

Ao longo da coluna há acessórios como os *"tool joints"* em que o escoamento influência na região de escoamento dentro da coluna e também na região anular entre a coluna e o poço. Dentro da coluna assim que o fluido encontra o "*tool joint*" ocorre uma contração do diâmetro, depois escoa por um pequeno trecho reto de tubo circular e em seguida há uma expansão do diâmetro.

Na região entre a coluna e o poço ocorre o mesmo, assim que o fluido encontra o "*tool joint*" ele sofre uma contração, depois passa por um trecho reto de escoamento na região anular e em seguida há uma expansão, conforme mostra a figura 10.

No estabilizador, devido a sua geometria característica, o fluido escoa helicoidalmente na região entre a coluna e o poço.

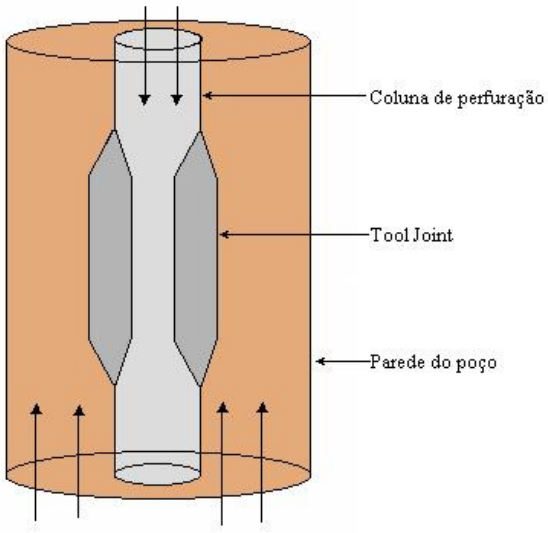

Figura 10: Escoamento nos "*tool joints"*.

1.2 Fluidos de Perfuração

Os fluidos de perfuração são misturas de sólidos, líquidos, e podem ter até gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão (BOURGOYNE *et al*, 1991).

Os fluidos devem ser especificados de forma a garantir uma perfuração segura e rápida. Assim, é desejável que o fluido seja quimicamente estável, estabilize as paredes do poço, facilite a separação dos cascalhos na superfície, garanta segurança operacional ao meio-ambiente, seja bombeável, evite danos a formação produtora, mantenha sólidos em suspensão quando estiver em repouso, iniba a reatividade de formações argilosas, previna a corrosão da coluna e equipamentos de superfície.

Tem como principais funções limpar o fundo do poço, resfriar a broca, lubrificar a coluna de perfuração, evitar o influxo de fluidos indesejáveis "*kick"*, ajudar na perfuração por erosão (BOURGOYNE *et al*, 1991).

As propriedades de controle dos fluidos podem ser físicas ou químicas. As propriedades físicas mais importantes e freqüentemente medidas são densidade, parâmetros reológicos, forças géis, parâmetros de filtração e o teor de sólidos (TRIGGIA *et al*, 2001).

A pressão hidrostática do poço é controlada pelo fluido de perfuração, se precisar de maior pressão no poço deve-se aumentar a densidade do fluido. Vale ressaltar que não se deve operar com uma pressão maior que a pressão de fratura da rocha para evitar danos à rocha geradora.

No Brasil, a perfuração ocorre em "*overbalance*", ou seja, a pressão hidrostática dentro do poço deve ser maior que a pressão da rocha reservatório. Se a pressão ficar menor que a da rocha diz-se que o poço teve um "*kick"*, mas se isso fugir do controle pode causar um acidente muito grave durante o processo chamado de "*blowout"*.

O comportamento do fluxo de um fluido é definido pelos parâmetros reológicos. Para isto considera-se que o fluido segue um modelo reológico, cujos parâmetros vão influir diretamente no cálculo de perdas de carga na tubulação e velocidade de transporte dos cascalhos.

Alguns fluidos de perfuração são tixotrópicos. A força gel é um parâmetro também de natureza reológica que indica o grau de gelificação devido à interação elétrica entre partículas dispersas. A força gel inicial mede a resistência inicial para colocar o fluido em fluxo. A força gel final mede a resistência de o fluido reiniciar o escoamento quando este fica certo tempo em repouso. A diferença entre o final e inicial indica o grau de tixotropia (TRIGGIA *et al*, 2001).

A capacidade do fluido de formar uma camada de partículas sólidas úmidas (torta de filtração) sobre as rochas permeáveis expostas pela broca é muito importante para a perfuração do poço, pois a pressão no poço deve ser maior do que dentro da rocha para garantir que não haja influxo (entrada de fluidos proveniente da rocha).

O teor de sólidos deve ser bem controlado, pois um aumento no seu valor pode levar a um grande aumento na densidade do fluido e suas propriedades reológicas, além de aumentar o desgaste dos equipamentos. Mas um teor muito baixo pode também ser ruim, pois vai formar pouca torta de filtração fazendo com que o fluido invada muito a rocha, aumentando assim o custo operacional, já que o mesmo deve ser retirado da rocha para evitar problemas ambientais (TRIGGIA *et al*, 2001).

As propriedades químicas determinadas com maior freqüência são o pH, os teores de cloreto e de bentonita.

O pH é medido através de papéis indicadores ou potenciômetros, e é geralmente mantido no intervalo alcalino baixo (entre 7 e 10) para evitar a corrosão dos equipamentos e evitar dispersão das formações argilosas (BOURGOYNE *et al*, 1991).

O teste de salinidade é uma análise volumétrica de precipitação feita por titulação dos íons cloretos. São usados para verificar o teor salino da água de preparo do fluido, controlar a salinidade de fluidos inibidos com sal, identificar influxos de água salgada e identificar a perfuração de uma rocha ou domo salino (TRIGGIA *et al*, 2001).

O teste do azul de metileno é uma análise volumétrica por adsorção que serve como indicador da quantidade de sólidos ativos ou bentoníticos no fluido de perfuração. Ele mede a capacidade de troca de cátion das argilas e sólidos ativos presentes.

1.2.1 Classificação dos fluidos de perfuração

A classificação de um fluido é feita em função de sua composição. O principal critério se baseia no constituinte principal da fase contínua ou dispersante. Portanto são classificados como a base de água, de óleo, ou de ar.

O fluido a base de água considera principalmente a natureza da água e os aditivos químicos empregados no preparo do fluido. A proporção entre os componentes básicos e as interações entre eles provoca sensíveis modificações nas propriedades físicas e químicas do fluido.

A água pode ser dura, doce ou salgada. A principal função da água é prover o meio de dispersão para os materiais coloidais, estes, principalmente argilas e polímeros controlam as propriedades reológicas em valores adequados para promover ao fluido uma boa taxa de remoção de sólidos perfurados e capacidade de estabilização das paredes do poço.

Os sólidos no meio aquoso podem ser ativos ou inertes. Os sólidos ativos são materiais argilosos, cuja função principal é tornar o fluido mais viscoso. Os sólidos inertes podem se

originar da adição de materiais industrializados ou detritos finos das rochas perfuradas. O adensante baritina é o inerte mais comum (BOURGOYNE *et al*, 1991).

Os produtos químicos adicionados ao fluido podem ser alcalinizantes e controladores de pH, dispersantes, redutores de filtrado, floculantes, polímeros de uso geral para viscosificar, deflocular ou reduzir filtrado, surfactantes para emulsificar e reduzir a tensão superficial, removedores de cálcio e magnésio, inibidores de formações ativas e bactericidas.

Os fluidos a base de água com baixo teor de sólidos e os emulsionados com óleo são programados para situações especiais. Os primeiros são usados para aumentar a taxa de penetração da broca, reduzindo o custo total da operação e os outros têm o objetivo de reduzir a densidade do sistema.

O fluido a base de óleo é quando a fase contínua ou dispersante é constituída por uma fase óleo, geralmente composta por hidrocarbonetos líquidos. Devido ao alto custo inicial e grau de poluição, os fluidos a base de óleo são empregados com menor freqüência do que os fluidos a base de água (BOURGOYNE *et al*, 1991).

As principais características dos fluidos a base de óleo são grau de inibição elevado em relação às rochas ativas, baixíssima taxa de corrosão, propriedades controláveis acima de 350ºF até 500ºF, grau de lubricidade elevado, amplo intervalo de variação de densidade 0,89 a 2,4 e baixíssima solubilidade de sais inorgânicos;

Devido a essas características, os fluidos são usados em poços de alta pressão e temperatura, formações de folhelhos argilosos e plásticos, formações salinas de halita, silvita, carnalita e etc, formações de arenitos produtores danificáveis por fluidos à base de água, poços direcionais ou delgados ou de longo afastamento e formações com baixa pressão de poros ou de fratura (TRIGGIA *et al*, 2001).

Mas esses fluidos possuem algumas desvantagens em relação aos de base de água, como dificuldade na detecção de gás no poço devido a sua solubilidade na fase contínua, menores taxas de penetração, maiores graus de poluição, menor número de perfis que podem ser executados, dificuldade no combate a perda de circulação e maior custo inicial.

Perfuração a ar ou a gás é um termo genérico aplicado quando o ar ou o gás, como todo ou parte, é usado como fluido circulante na perfuração rotativa.

Algumas situações recomendam o uso desse fluido de baixa densidade, tais como em zonas com perdas de circulação severas e formações produtoras com pressões muito baixas ou com grande susceptibilidade a danos. Também em formações muito duras, como o basalto ou o diabásio e em regiões com escassez de água ou regiões glaciais com camadas espessas de gelo.

A perfuração com ar puro utiliza apenas ar comprimido ou nitrogênio como fluido, tendo aplicação limitada a formações que não produzam elevadas quantidades de água, nem contenham hidrocarbonetos.

A perfuração com névoa, uma mistura de água dispersa no ar, é empregada quando são encontradas formações que produzem água em quantidade suficiente para comprometer a perfuração com ar puro (TRIGGIA *et al*, 2001).

A espuma é uma dispersão de gás em líquido, na qual a fase contínua é constituída por um filme delgado de uma fase líquida, estabilizada através de um tensoativo específico, denominado espumante. É usado quando necessita de uma eficiência elevada de carregamentos dos sólidos devido a uma maior viscosidade.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo demonstra de forma breve estudos de outros autores com o mesmo tema desta pesquisa objetivando dar um embasamento teórico ao estudo do escoamento de fluidos de perfuração em dutos e anulares concêntricos.

2.1 Lei de Newton da Viscosidade

A Figura 11 mostra um par de placas grandes paralelas, com áreas iguais a A, separadas por uma distância Y. No espaço entre elas existe um fluido, gás ou líquido. Este sistema está inicialmente em repouso, mas no instante t = 0 a placa inferior é posta em movimento na direção positiva de x a uma velocidade constante V.

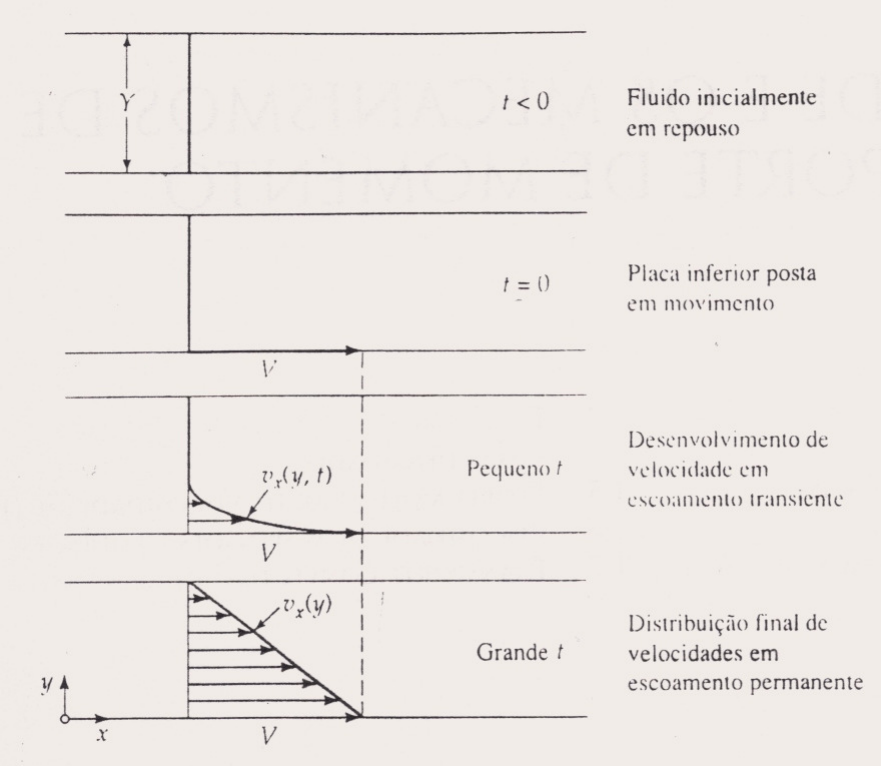

Figura 11: Escoamento de fluido sobre placas planas (BIRD *et al*, 2004).

Conforme o tempo passa, o fluido ganha momento até que se estabelece o perfil linear e permanente de velocidades conforme mostrado na figura 11, impondo que o escoamento seja laminar. Quando o estado final de movimento permanente for atingido, uma força constante F é necessária para manter o movimento da placa inferior (BIRD *et al*, 2004),

podemos dizer que a força deve ser proporcional à área, A_r, e à velocidade e inversamente proporcional à distância entre as placas montando a equação abaixo:

$$\frac{F}{A_r} = -\mu \frac{V}{Y} \tag{1}$$

A constante de proporcionalidade, μ, é uma propriedade inerente do fluido, definida como sendo a viscosidade. A viscosidade de um fluido que segue este modelo varia apenas com a temperatura e pressão do fluido, sendo que nos líquidos a viscosidade diminui com o aumento da temperatura enquanto nos gases ela se comporta de modo oposto (BIRD *et al*, 2004).

Fazendo τ_{yx} como a força na direção x por área unitária perpendicular à direção y em um espaço infinitesimal de y, a equação se torna:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dV_x}{dy} \quad . \tag{2}$$

Esta equação, afirma que o tensor tensão τ_{yx} é proporcional ao negativo do gradiente de velocidade, essa é a lei de Newton da viscosidade. A equação 2 é boa para descrever o escoamento de todos os gases e líquidos com peso molecular menor que cerca de 5000, e tais fluidos são classificados como fluidos Newtonianos. Líquidos poliméricos, suspensões, pastas, lamas e outros fluidos complexos não seguem esse modelo (BIRD *et al*, 2004). A relação $\frac{dV_x}{dy}$ é conhecida como gradiente de velocidade e o seu módulo é a taxa de deformação.

2.1.1 Fluidos não-Newtoniano

Existem muitos fluidos que não são descritos pela equação 2, e eles são denominados fluidos não-Newtonianos. Esses fluidos estruturalmente complexos incluem soluções poliméricas, polímeros fundidos, soluções de sabões, suspensões, emulsões, pastas e alguns fluidos biológicos.

Suas viscosidades (agora chamada viscosidade aparente) dependem fortemente dos gradientes de velocidade e, adicionalmente, eles podem apresentar efeitos elásticos pronunciados. No escoamento cisalhante simples entre duas placas planas paralelas, também existem tensões normais não-nulas e desiguais (τ_{xx},τ_{yy},τ_{zz}) que não aparecem em fluidos Newtonianos (BIRD *et al*, 2004).

Quando se trabalha com fluidos Newtonianos, a ciência da medida da viscosidade é chamada viscosimetria. Para caracterizar fluidos não-Newtonianos, deve-se medir não somente a viscosidade como também as tensões normais e as respostas viscoelásticas. A ciência da medida dessas propriedades denomina-se reometria, enquanto os instrumentos são chamados reômetros. A ciência da reologia inclui todos os aspectos do estudo da deformação e escoamento de sólidos elásticos e líquidos não-Newtonianos.

A viscosidade aparente de fluidos não-Newtonianos não depende apenas da taxa de cisalhamento do fluido, a mesma varia de acordo com a temperatura, concentração das espécies quando for uma solução e em alguns casos o tempo de cisalhamento.

Os fluidos não-Newtonianos podem ser classificados em três classes (PEREIRA, 2006):

- independentes do tempo;
- dependentes do tempo;
- visco-elásticos.

Os fluidos independentes do tempo são fluidos nos quais a viscosidade se mantém constante sem depender do tempo exposto a certa taxa de cisalhamento. São os mais fáceis de estudar, podem ser pseudoplásticos (sua viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento), dilatante (sua viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento) e possuir uma tensão mínima de escoamento conforme mostra a figura 12. Nesse estudo os fluidos são pertencentes a esta classe, há diversos modelos reológicos que descrevem este tipo de fluido conforme é discutido posteriormente.

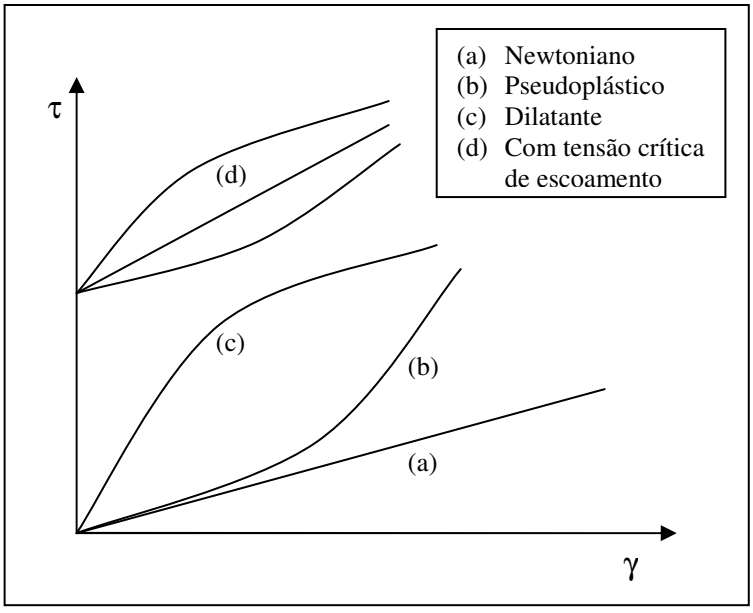

Figura 12: Reogramas típicos

Os fluidos dependentes do tempo são fluidos nos quais a viscosidade varia quando expostos durante um tempo a taxa de cisalhamento constante, e se classificam em tixotrópicos (viscosidade aparente diminui com o tempo exposto a uma taxa de cisalhamento constante) e reopéticos (viscosidade aparente aumenta com o tempo exposto a uma taxa de cisalhamento constante). Os tixotrópicos adquirem um estado semi-rígido quando estão em repouso e voltam a adquirir um estado de fluidez quando estão novamente em movimento (PEREIRA, 2006).

Os visco-elásticos são aqueles que apresentam uma componente viscosa e elástica simultaneamente. Possuem comportamento intermediário entre um fluido puramente viscoso, como a água, e um sólido elástico. Propriedades elásticas se referem a uma deformação reversível do fluido e propriedades viscosas se referem à deformação infinita da substância, são fluidos bem mais complexos de serem estudados.

2.1.2 Modelos reológicos

Há diversos modelos empíricos que descrevem como é o comportamento do tensor tensão em função da taxa de cisalhamento do fluido, e esses modelos são necessários para o cálculo do fator de atrito e do número Reynolds, tendo assim grande importância para o cálculo de perda de carga e caracterização dos regimes de escoamento.

Os modelos de um fluido não-Newtoniano consideram o fluido incompressível (sua densidade é constante) e, com a exceção do fluido de Bingham, a tensão não varia linearmente com a taxa de cisalhamento.

Modelos reológicos muito difundidos na literatura são os modelos da potência (também conhecido como *Power Law* ou modelo de Ostwald de Waele), Bingham, Casson e Herschell-Buckley conforme mostra a tabela 1 (MACHADO, 2002).

Tabela 1: Modelos reológicos

Modelo	Equação	
potência	$\tau = k\gamma^{n}$	(3)
Bingham	$\tau = VP_{B}\gamma + LE_{B}$	(4)
Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{(VP_{c}\gamma)} + \sqrt{LE_{c}}$	(5)
Herschell-Buckley	$\tau = k_{HB}\gamma^{n_{HB}} + LE_{HB}$	(6)

Os parâmetros dos modelos da potência, Bingham e Casson são facilmente calculados através de uma regressão linear, porém os modelos com três parâmetros não são calculados tão facilmente, pois necessitam de uma estimação não-linear.

O modelo da potência é o mais utilizado, devido a sua simplicidade matemática na hora de calcular os parâmetros e costuma apresentar boa aplicabilidade em diversos fluidos, apresenta como parâmetros o índice de consistência k e o índice de comportamento *n*.

O índice de comportamento é um parâmetro importante, pois se o seu valor for igual a 1, a equação do modelo da potência se torna igual à de um fluido newtoniano. Se o valor for menor que 1, o fluido tem comportamento pseudoplástico e se o valor for maior que 1, o fluido tem comportamento dilatante (MACHADO, 2002).

O modelo de Bingham é o único modelo linear, e por este fato lembra o escoamento de um fluido Newtoniano, porém ele precisa de uma tensão mínima para iniciar o escoamento, chamada de limite de escoamento LE_B. Neste modelo a viscosidade não varia de acordo com a taxa de cisalhamento apresentando mais um comportamento Newtoniano, sendo assim chamada de viscosidade plástica VP_B.

O modelo de Casson também apresenta limite de escoamento LE_C e outro parâmetro VP_C. É muito utilizado para descrever o comportamento reológico de sangue, iogurte, extrato de tomate, chocolate etc (PEREIRA, 2006).

O modelo de Herschell-Buckley é baseado nos modelos da potência e de Bingham, pois a tensão varia exponencialmente com o parâmetro n_{HB} e ele apresenta um limite de escoamento LE_{HB} como novo parâmetro.

2.2 Caracterização dos Regimes

Dizemos que um fluido está em regime laminar quando o escoamento é ordenado, ou seja, é caracterizado pelo movimento das partículas fluidas em camadas lisas, ou lâminas. No turbulento as partículas fluidas rapidamente se misturam enquanto se movimentam ao longo do escoamento, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades. Entre os dois regimes de escoamento está o regime de transição.

Para um fluido Newtoniano pode-se caracterizar o regime de escoamento em um tubo através do adimensional chamado número de Reynolds (Re), que é uma relação entre forças inerciais e forças viscosas como mostra a equação 7,

$$\mathrm{Re} = \frac{D\langle v\rangle\rho}{\mu} \tag{7}$$

onde D é o diâmetro do tubo circular, $\langle v\rangle$ é a velocidade média do escoamento do fluido, ρ é a viscosidade do fluido e μ a massa específica do fluido. Para o fluido escoar em um tubo em regime laminar, o Re deve ser menor que 2100, na faixa entre 2100 e 4000 se caracteriza o regime de transição e acima de 4000 escoa em regime turbulento (FOX *et al*, 2004).

Para o fluido não-Newtoniano não é tão simples definir os limites de escoamento, pois somente o Re não é suficiente. Para isso é necessário calcular o número de Reynolds crítico, Re_c, através de correlações empíricas (tabela 2) ou através de gráficos experimentais.

Tabela 2: Equações de Reynolds crítico encontradas na literatura.

Correlação	Equação	Parâmetros
Ryan e Jonhson (1959)	$\mathrm{Re}_c = \frac{6464n}{(1+3n)^2(2+n)^{-\frac{(2+n)}{(1+n)}}}$ (8)	Re_c – Reynolds crítico n – índice de comportamento
Mishra e Tripathi (1971)	$\mathrm{Re}_c = 2100\frac{(4n+2)(5n+3)}{3(3n+1)^2}$ (9)	Re_c – Reynolds crítico n – índice de comportamento
Hanks (1963)	$\mathrm{Re}_c = \frac{He}{8x_c}\left(1-\frac{4}{3}x_c+\frac{1}{3}x_c^4\right)$ (10) $\frac{x_c}{(1-x_c)^3} = \frac{He}{16800}$	Re_c – Reynolds crítico He – número de Hedstrom x_c- parâmetro de Hanks
Thomas (1963)	$v_c = \sqrt{\frac{\mathrm{Re}_{cN}\,LE}{6\rho}}$ (11)	v_c – velocidade crítica Re_{cN} – número de Reynolds crítico Newtoniano LE- limite de escoamento ρ - densidade
Craft (1962)	$v_c = \frac{1{,}078VP+1{,}078\sqrt{VP^2+12{,}34D^2LE\rho}}{\rho D}$ (12)	v_c – velocidade crítica VP – viscosidade plástica D – diâmetro do tubo LE- limite de escoamento ρ - densidade

Ryan e Jonhson (1959), com o objetivo de formular um critério mais geral para caracterizar os regimes de escoamento e para testar esta forma de aplicação a fluidos não-Newtonianos desenvolveram a equação 8. De acordo este autor, argumentos físicos intuitivos sugerem o uso de um parâmetro de estabilidade local para o escoamento isotérmico de fluidos não-Newtonianos em tubos circulares.

A partir do trabalho de Ryan e Jonhson (1959), Hanks (1963) propôs um parâmetro de estabilidade generalizado, ou seja, independe da geometria do sistema de escoamento, formulando assim a equação 10 para fluido com limite de escoamento como os descritos pelos modelos reológicos de Bingham, Herschel-Bulkley e Casson.

Mishra e Tripathi (1971) desenvolveram a equação 9, tendo como base os trabalhos citados anteriormente, onde propôs um critério de estabilidade do escoamento no regime laminar de fluido puramente viscosos.

Craft (1962) e pouco tempo depois, Thomas (1963) propuseram o cálculo da velocidade crítica para caracterizar os regimes de escoamento de fluidos não-newtonianos com limite de escoamento. Para Thomas (1963), v_c depende do Reynolds crítico Newtoniano.

As correlações de Ryan e Jonhson (1959) e Mishra e Tripathi (1971), dependem apenas do índice de comportamento do modelo da potência, não contendo informação sobre a geometria do escoamento.

Outra forma de se calcular os limites dos regimes através de gráficos experimentais de diferença de pressão contra vazão volumétrica (SILVA, 1989) onde a mudança inclinação da reta gerada através dos pontos experimentais indica uma mudança no regime de escoamento conforme mostram as figuras 13 e 14.

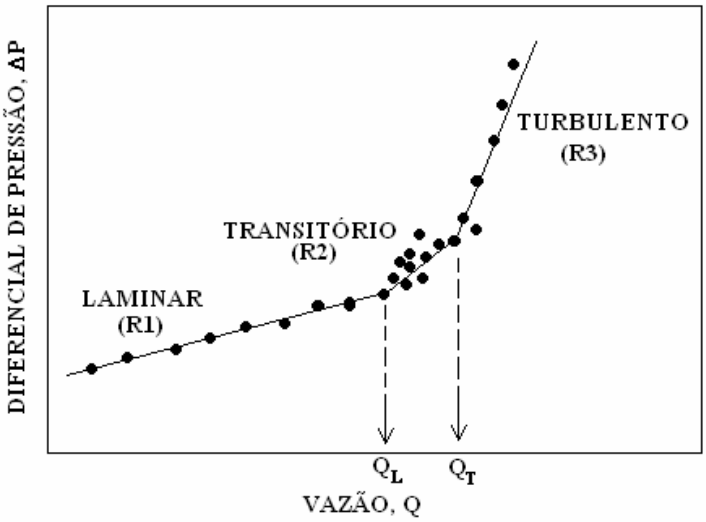

Figura 13: Determinação experimental da vazão crítica do escoamento.

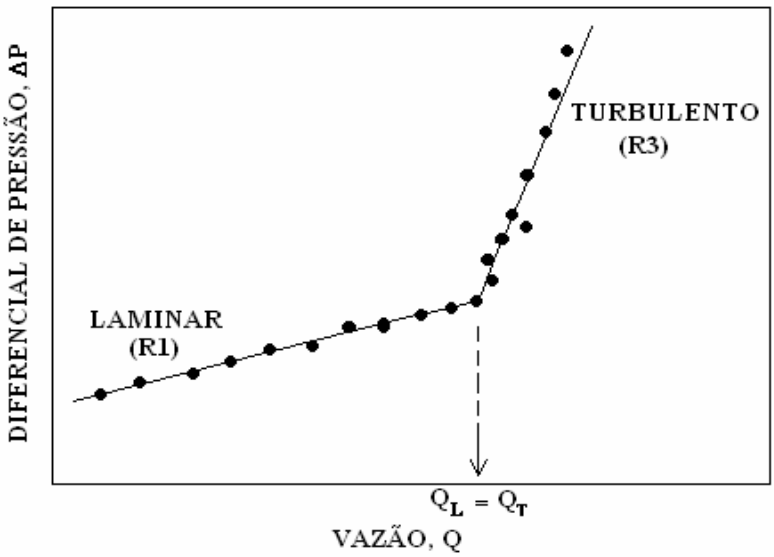

Figura 14: Determinação experimental da vazão crítica do escoamento.

Nesta figura Q_L é a vazão na qual o regime muda de laminar a transiente e Q_T é a vazão na qual o regime muda de transiente a turbulento e através da vazão pode-se calcular o valor de Re_c. Pode-se notar que na figura 13 ocorre à caracterização de todos os regimes, porém na figura 14 nota-se que a mudança de regime laminar a transiente coincide com a do transiente ao turbulento.

2.3 Balanço de Energia Mecânica

A equação 13 é a equação de Bernoulli modificada que representa o balanço de energia mecânica no escoamento isotérmico e estacionário de um fluido incompressível entre pontos 1 e 2 entre os quais não há fornecimento de energia (FOX *et al*, 2004),

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_f = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_t \qquad (13)$$

onde P_1 e P_2 representam as pressões nos pontos 1 e 2, v_1 e v_2 as velocidades 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 ocasionadas entre os pontos citados, H_f é a carga fornecida ao sistema, g é a aceleração da gravidade e ρ é a densidade do fluido.

O termo h_t é ocasionado devido a soma de dois tipos de perda de carga, a perda de carga distribuída h_d e a perda de carga localizada h_s. A primeira consiste na perda de carga ocasionada pelo atrito do fluido ao longo de todo trecho reto e a segunda se refere a perda de

carga causada quando há acidentes no sistema de tubulações 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 e o atrito do fluido com a parede de cada elemento (FOX *et al*, 2004).

A perda de carga distribuída h_d pode ser calculada através da equação 14, onde L é o comprimento da tubulação, D é o diâmetro do tubo, $\langle v \rangle$ é a velocidade média do fluido e f_d é um adimensional conhecido como fator de atrito de Darcy, é comum encontrar outra definição de fator de atrito, como a de Fanning f que se relaciona com Darcy na forma $f_d=4f$,

$$h_d = f_d \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\langle v \rangle^2}{2g} \quad . \tag{14}$$

Utilizando a equação de Bernoulli (FOX *et al*, 2004) em um sistema horizontal entre os pontos 1 (imediatamente antes do acidente) e 2 (imediatamente após o acidente) com a tubulação de seção transversal uniforme e sem fornecimento de carga, origina a equação 15,

$$h_d = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad . \tag{15}$$

Logo, se tivermos a diferença de pressão e velocidade média determinadas experimentalmente podemos combinar a equação 14 com a 15 resultando na equação 16 para o cálculo do fator de atrito experimental,

$$f = \frac{2\Delta P D}{\rho L \langle v \rangle^2} \quad . \tag{16}$$

A perda de carga localizada h_s, em qualquer tipo de acidente pode ser expressa pelo coeficiente de perda de carga K (BIRD *et al*, 2004), conforme descreve a equação abaixo,

$$h_s = K \frac{\langle v \rangle^2}{2g} \quad . \tag{17}$$

Logo, se tivermos a diferença de pressão e velocidade média determinadas experimentalmente podemos combinar a equação 15 com a 17 resultando na equação 18 que permite o cálculo do coeficiente de perda de carga,

$$K = \frac{2\Delta P}{\langle v \rangle^2 \rho} \quad . \tag{18}$$

2.4.1 Fator de atrito

Há diversas correlações para o cálculo do fator de atrito, sendo que o mesmo depende do modelo reológico e do número de Reynolds.

Para um fluido Newtoniano, no regime laminar, o fator de atrito de Fanning pode ser calculado através da equação 19.

No regime turbulento há correlações, como a de Blasius (equação 20) e Colebrook (equação 21) onde a primeira é utilizada para tubo liso e a outra leva em consideração à rugosidade relativa do tubo $\frac{\varepsilon}{D}$ (PERRY e GREEN, 1999),

$$f = \frac{16}{\mathrm{Re}} \tag{19}$$

$$f = \frac{0{,}079}{\mathrm{Re}^{0,25}} \tag{20}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[\frac{\varepsilon / D}{3{,}7065} + \frac{1{,}2613}{\mathrm{Re}\ \sqrt{f}} \right] \quad . \tag{21}$$

Para um fluido não-Newtoniano, no regime laminar, o fator de atrito depende do número de Reynolds generalizado estabelecido para cada modelo reológico conforme mostra a tabela 3.

No modelo da potência, o fator de atrito depende apenas do número de Reynold desenvolvido para seu modelo $\mathrm{Re_p}$. O $\mathrm{Re_p}$ é função do diâmetro do tubo circular *D*, ou se necessário diâmetro hidráulico, velocidade média do escoamento $\langle v \rangle$, densidade do fluido ρ e dos parâmetros reológicos k e *n*.

Para os modelos de Bingham e Casson, o fator de atrito é função do número de Reynolds, $\mathrm{Re_B}$ e $\mathrm{Re_{CN}}$, e do número de Hedstrom, $\mathrm{He_B}$ e $\mathrm{He_{CN}}$. O Re é calculado de modo semelhante ao de um fluido Newtoniano, sendo função do diâmetro do tubo *D*, velocidade média do escoamento $\langle v \rangle$, densidade do fluido ρ e viscosidade plástica VP. O número de Hedstrom é o adimensional que leva em consideração o limite de escoamento do fluido LE.

O modelo de Herschel-Bulkley é mais complexo, o fator de atrito depende dos adimensionais He e Re e do parâmetro de tensão na parede τ_w. o Re é calculado a partir do diâmetro do tubo *D,* densidade do fluido ρ, velocidade média do escoamento $\langle v \rangle$ e dos parâmetros reológicos k e *n*. O He é obtido a partir do limite de escoamento do fluido LE. O

parâmetro τ_w é função do limite de escoamento LE, dos adimensionais He e Re e do próprio fator de atrito, o que torna a equação 30 implícita.

Tabela 3: Equações para o cálculo de fator de atrito no regime laminar e número de Reynolds.

Modelo	Fator de atrito no regime laminar
potência	$\mathrm{f} = \frac{16}{\mathrm{Re_P}}$ com $\mathrm{Re}_P = \frac{D\langle v\rangle\rho}{k\left(\frac{8v}{D}\right)^{n-1}\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n}$ (22) (23)
Casson	$f = \frac{16}{\mathrm{Re}_{CN}}\left[1 - \frac{He_{CN}}{6\mathrm{Re}_{CN}} + \frac{(2fHe_{CN})^{1/2}}{7} + \frac{He_{CN}^4}{21 f^3 \mathrm{Re}_{CN}^7}\right]$ (24) Com $\mathrm{Re}_{CN} = \frac{D\langle v\rangle\rho}{VP_{CN}}$ e $He_{CN} = \frac{D^2\rho LE_{CN}}{VP_{CN}^2}$ (25) (26)
Bingham	$f = \frac{16}{\mathrm{Re}_B}\left[1 + \frac{He_B}{6\mathrm{Re}_B} - \frac{He_B^4}{3 f^3 \mathrm{Re}_B^7}\right]$ (27) Com $\mathrm{Re}_B = \frac{D\langle v\rangle\rho}{VP_B}$ e $He_B = \frac{D^2\rho LE_B}{VP_B^2}$ (28) (29)
Herschel-Bulkley	$\mathrm{f} = \frac{2\mathrm{He_{HB}}}{\mathrm{Re_{HB}^2}} + \frac{16}{\mathrm{Re_{HB}}}[\mathrm{A}]^{-\mathrm{n_{HB}}}$ $[\mathrm{A}] = \left[\left(1 - \frac{\mathrm{LE_{HB}}}{\tau_w}\right)^3 + \frac{2(3\mathrm{n_{HB}}+1)}{(2\mathrm{n_{HB}}+1)}\left(\frac{\mathrm{LE_{HB}}}{\tau_w}\right)\left(1 - \frac{\mathrm{LE_{HB}}}{\tau_w}\right)^2 + \frac{(3\mathrm{n_{HB}}+1)}{(\mathrm{n_{HB}}+1)}\left(\frac{\mathrm{LE_{HB}}}{\tau_w}\right)^2\left(1 - \frac{\mathrm{LE_{HB}}}{\tau_w}\right)\right]$ (30) $\mathrm{Re}_{HB} = \frac{8D^{n_{HB}}\langle v\rangle^{2-n_{HB}}\rho}{k_{HB}[2(3n_{HB}+1)/n_{HB}]^{n_{HB}}}$ (31) $He_{HB} = \mathrm{Re}_{HB}^2\frac{LE_{HB}}{\rho\langle v\rangle^2}$ $\frac{\mathrm{LE_{HB}}}{\tau_w} = 2\frac{\mathrm{He_{HB}}}{\mathrm{f\,Re_{HB}^2}}$ (32) (33)

Para o regime turbulento o fator de atrito pode ser calculado de acordo com as correlações mostradas na tabela 4.

Tabela 4: Equações para o cálculo de fator de atrito no regime turbulento de fluido não-Newtoniano.

Autor	Fator de atrito
Gomes (1987)	$f = an^b Re^c$ DMGomes $f = 0{,}060n^{0{,}462} Re^{-0{,}223}$ (34) OWGomes $f = 0{,}069n^{0{,}666} Re^{-0{,}235}$ (35) FSGomes $f = 0{,}110n^{0{,}616} Re^{0{,}287}$ (36)
Darby e Melson (1981)	$f = \left(f_L^m + f_T^m\right)^{1/m}$ (37) onde $f_L = \frac{16}{Re}\left[1 + \frac{He}{6Re} - \frac{Re^4}{3f^3 Re^7}\right]$ (38) e $f_T = \frac{10^a}{Re^{0{,}290}}$ (39) $m = 1{,}7 + \frac{40000}{Re}$ (40) e $a = -1{,}378\left[1 + 0{,}14\exp(-2{,}9X10^{-5} Re\right]$ (41)
Tomita (1959)	$f = \lambda/4$ (42) Onde $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\log\left(Re\frac{\sqrt{\lambda}}{2}\right) - 0{,}2$ (43)
Darby *et al* (1992)	$f = \frac{10^a}{Re^{0{,}193}}$ (44) $a = -1{,}47\left[1 + 0{,}146\exp\left(-2{,}9.10^{-5} He\right)\right]$ (45)
Ellis e George (1977)	$f = 0{,}00454 + 0{,}645 Re^{-0{,}70}$ (46)
Churchill (1977)	$f = 2\left[\left(\frac{8}{Re}\right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}}\right]^{\frac{1}{12}}$ (47) onde $A = \left[2{,}457\ln\frac{1}{\left(\frac{7}{Re}\right)^{0{,}9} + 0{,}27\frac{\varepsilon}{D}}\right]^{16}$ (48) e $B = \left(\frac{37530}{Re}\right)^{16}$ (49)

Gomes (1987) propôs as equações 34 a 36 como forma de explicitar as correlações originalmente propostas por Dodge e Metzner (DMGomes), Ostawald de Waele (OWGomes) e Frank Schuh (FSGomes), no estudo do escoamento de fluidos da potência.

Darby e Melson (1981) propuseram a Equação 37 para o escoamento de fluidos de Bingham em tubos. Posteriormente, Darby et. al. (1992) propuseram alterações na equação original chegando à equação 44. A Equação 42 foi proposta por Tomita (1959) também no estudo de fluidos de Bingham em dutos circulares de diferentes diâmetros.

Ellis e George (1977) propuseram a equação 46 que tem uma forma bem simples para o cálculo do fator de atrito e é dependente apenas do número de Reynolds.

Churchill (1977) propôs a equação 47 a fim de obter um método melhor do que o uso tabelas e interpolações gráficas para calcular o fator de atrito no regime turbulento. A correlação é dependente da rugosidade relativa do tubo, podendo ser aplicada a tubos lisos e tubos com rugosidade conhecida.

2.4 Diâmetro Hidráulico

Para calcular o número de Reynolds e fator de atrito deve-se usar o diâmetro do tubo, porém para o escoamento em tubos não circulares, este não está definido, por isso há a necessidade de se utilizar um diâmetro hidráulico, que seria o diâmetro de um tubo circular que caracterize a região do escoamento.

A correlação de *Slot* (equação 50) foi desenvolvida analiticamente considerando-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 (BOURGOYNE *et al*, 1991),

$$D_{H1} = 0{,}816(D_2 - D_1) \quad . \tag{50}$$

A partir da teoria do raio hidráulico foi desenvolvido analiticamente a equação de diâmetro hidráulico (equação 51), onde o diâmetro é determinado 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 (BIRD *et al*, 2004),

$$D_{H2} = 4R_H = (D_2 - D_1) \quad . \tag{51}$$

A partir das equações para perda de carga de fluidos Newtonianos em tubos e anulares, Lamb (1945) desenvolveu a equação 52,

$$D_{H3} = \sqrt{D_2^2 + D_1^2 - \frac{D_2^2 - D_1^2}{\ln(D_2/D_1)}} \quad . \tag{52}$$

A equação 53 foi obtida empiricamente a partir de um estudo feito para cem razões de diâmetros (CRITTENDON, 1959),

$$D_{H4} = \frac{\sqrt[4]{D_2^4 - D_1^4 - \frac{(D_2^2 - D_1^2)^2}{\ln(D_2/D_1)}} + \sqrt{D_2^2 - D_1^2}}{2} \quad . \tag{53}$$

A partir da definição de diâmetro hidráulico através da correlação proposta por Lamb (1945) e da solução da equação de Navier-Stokes para anulares concêntricos, Pilehvari e Serth (2005) desenvolveram a Equação 54,

$$D_{H5} = (D_2 - D_1)\frac{\left[1 + (D_1/D_2)^2 + \frac{\left(1 - (D_1/D_2)^2\right)}{\ln(D_1/D_2)}\right]}{\left(1 - (D_1/D_2)^2\right)} \quad . \tag{54}$$

Para corrigir os efeitos das equações de diâmetro hidráulico, Reed e Pilehvari (1993) apresentaram o diâmetro efetivo de escoamento para fluidos não-Newtonianos (BAILEY e PEDEN, 2000).

O diâmetro efetivo (equação 55) é utilizado para corrigir o diâmetro físico, pois alguns fluidos podem ter um comportamento diferente do previsto, por exemplo, fluidos dilatantes podem ter o diâmetro efetivo menor que o diâmetro físico, como se o fluido não pudesse preencher todo o tubo, enquanto fluidos pseudo-plásticos podem ter o diâmetro efetivo maior que o diâmetro físico (BAILEY e PEDEN, 2000). Desta forma,

$$D_e = \frac{D_H}{G} \tag{55}$$

onde D_H é a equação de diâmetro hidráulico e G é o fator de correlação do diâmetro hidráulico que pode ser obtido pela equação 56, onde se percebe que esta correção depende fortemente de características reológicas do fluido e é relacionado com índice de comportamento generalizado *n'*.

$$G = \frac{\left[1 + (Z/2)\right]\left[(3 - Z)n' + 1\right]}{(4 - Z)n'} \tag{56}$$

O parâmetro *n'* guarda informação sobre a reologia do fluido e pode ser relacionado com o parâmetro *n* do modelo reológico da potência conforme demonstrado no anexo A.

As equações 57 e 58 são necessárias para o cálculo de G. Z e Y não possuem significado físico, estando separadas da equação 56 para facilitar sua visualização.

$$Z = 1 - \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{Y} \right]^{-Y} \tag{57}$$

$$Y = 0{,}37(n')^{-0{,}34} \tag{58}$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo visa demonstrar os materiais, o delineamento experimental, as técnicas e os métodos utilizados para conduzir o trabalho experimental.

3.1 Descrição da Unidade Piloto

Os dados experimentais de perda de carga são obtidos em uma unidade piloto com similaridade dinâmica, o número de Reynolds está entre 500 e 5000, e geométrica do processo de perfuração, que opera em circuito fechado, composta de tubos de ferro galvanizado dispostos em sete linhas de escoamento independentes com 6m de comprimento.

A unidade tem vários propósitos e para este trabalho são utilizadas três linhas de escoamento, que são compostas de um tubo circular de 1" de diâmetro e dois anulares concêntricos com razões de diâmetros externos e internos diferentes, 1 1/4" – 1/2" e 2" – 3/4".

As outras quatro linhas são compostas de tubos circulares e anulares com acessórios para o estudo de perda de carga em "*tool joints"* e estabilizadores que não são utilizadas para este trabalho.

O sistema de dutos encontra-se conectado a um tanque com capacidade de 500 litros, dotado de um agitador vertical rápido, construído em aço inox modelo FLUXOMIX F4D-030M-200N1**,** com potência de 3HP.

O deslocamento dos fluidos, na unidade piloto, é proporcionado por uma bomba de deslocamento positivo do tipo helicoidal de 25HP da marca GEREMIAS (WEATHERFORD), operando com vazões de até 20m^3/h e pressão de recalque da ordem de 12kgf/cm^2. As Figuras 15 e 16 apresentam uma foto e um esquema da unidade piloto, respectivamente.

Leal (2006) e Rocha (2008) realizaram experimentos com fluidos Newtonianos nessa unidade e mostraram que os tubos de ferro galvanizado têm rugosidade relativa (ε) muito próxima à zero.

Figura 15: Foto da unidade piloto.

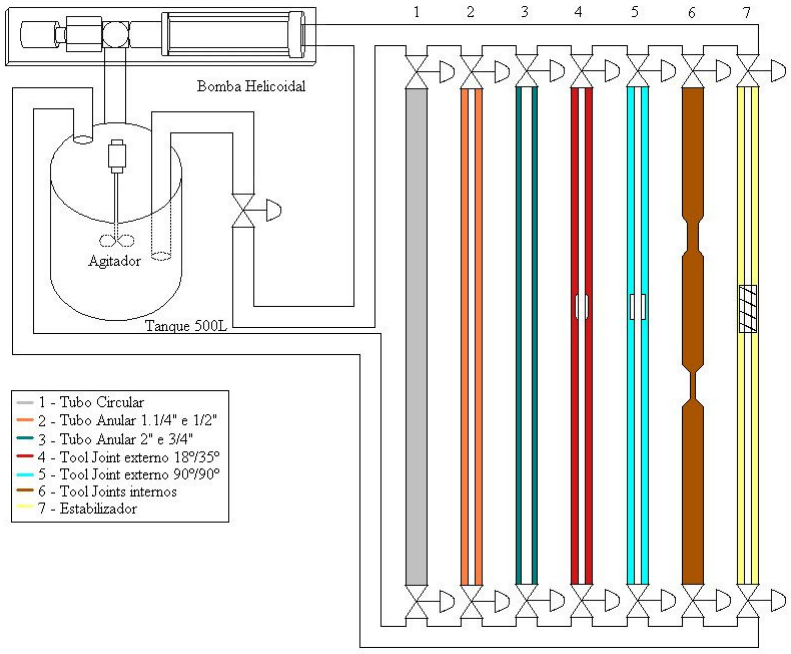

Figura 16: Esquema da unidade piloto.

Cabe ressaltar que os valores dos diâmetros das tubulações apresentadas na Figura 16 são nominais. Os diâmetros reais, interno e externo considerando-se a espessura da tubulação,

utilizados nos cálculos deste trabalho, são obtidos a partir da medição das tubulações com um paquímetro, e seus valores estão na Tabela 5 onde as dimensões marcadas com x não foram medidas por serem irrelevantes aos cálculos efetuados.

Tabela 5: Diâmetros reais e nominais das tubulações.

Diâmetro Nominal (pol)		½"	¾"	1"	1 ¼"	2"
Diâmetro Real (m)	Interno	x	x	0,0271	0,0363	0,0538
	Externo	0,0213	0,0268	x	x	x

A unidade piloto é instrumentada com um conjunto de três transmissores diferenciais de pressão (Figura 17), da marca SMAR LD301D11I-BU11-017 / A1 / I5/Y2/Y5, com as seguintes faixas: 0,93 a 37 mmHg, 3,12 ~ 373 mmHg e 8,33 ~ 1866mmHg.

Figura 17: Foto do transdutor diferencial de pressão.

Estes transdutores permitem o estudo do escoamento para uma ampla faixa de perda carga ocasionada nos diferentes tipos de escoamento. Cabe acrescentar que, as tomadas de pressão no estudo do escoamento em tubos são posicionadas a 60 diâmetros da região de entrada e, no caso das peças, estas foram localizadas a 50 cm antes e 50 cm depois das mesmas.

3.2 Metodologia

Para cada fluido de perfuração estudado, são obtidos conjuntos de pontos de perda de carga em função da vazão para as tubulações de seção circular e anular.

Após o sistema atingir o regime permanente, a vazão volumétrica é determinada por técnica gravimétrica, com triplicatas de cada ponto, e a queda de pressão pelo transdutor diferencial mais adequado ao intervalo de pressão trabalhado.

O sistema não possui controle de temperatura, portanto, para garantir que os parâmetros reológicos fossem correspondentes à temperatura do fluido em escoamento, os ensaios de reologia são feitos no viscosímetro FANN 35 A, para cada ponto experimental.

Após analisar o escoamento de um determinado fluido em todas as tubulações, as mesmas são lavadas com soluções ácidas para a remoção de resíduos e incrustações presentes nos tubos. Depois desse procedimento são realizados experimentos com água, para verificar as tubulações em relação à integridade do sistema.

Durante os experimentos, são obtidos valores de vazão, queda de pressão e parâmetros reológicos dos fluidos. O que possibilita através das equações citadas anteriormente o cálculo do número de Reynolds, a determinação do regime de escoamento (experimental e teórica), a determinação da perda de carga teórica utilizando equações de fator de atrito encontradas na literatura, avaliar as equações de diâmetro hidráulico no regime laminar e o efeito do diâmetro efetivo sobre a equações de diâmetro hidráulico.

3.3 Fluidos Utilizados

Os fluidos utilizados neste trabalho foram cedidos pelo Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES). São estudados dois fluidos não-Newtonianos pseudo-plásticos e denominados fluido 4 e 5, pois foram estudados outros três fluidos de perfuração antes desta pesquisa (GONÇALVES, 2008). Estes fluidos não foram sintetizados em laboratório, são fluidos já utilizados no processo de perfuração de poços de petróleo pela Petrobrás. São constituídos de soluções poliméricas e adensante, normalmente baritina, à base de água, com as concentrações de cada componente na solução desconhecidas devido ao sigilo da empresa.

Os valores das massas específicas são obtidos por picnometria, sendo os valores de 1150 Kg/m³ e 1100 Kg/m³ para os fluidos 4 e 5 respectivamente. Os modelos reológicos adotados para o proposto estudo são os modelos da potência e Casson. O primeiro por ser um modelo de simples aplicação e obter bons resultados em uma ampla faixa de fluidos não-Newtonianos, o segundo por possuir um limite de escoamento e ter fácil determinação dos parâmetros.

3.4 Determinação da Reologia

Para os ensaios experimentais utiliza-se o viscosímetro rotativo *Fann* modelo 35A (Figura 18). Este instrumento trabalha com taxas de cisalhamentos controladas, onde há um cilindro externo que gira a uma velocidade constante (3, 6, 100, 200, 300 ou 600), enquanto o cilindro interno "*bob*" fica estático. O mesmo sofre uma força de arraste, que é transmitida pelo fluido e se conecta a uma mola de torção através de um eixo, que se apóia na parte superior girando livremente através de um sistema de rolamentos com um medidor do ângulo de deflexão.

Figura 18: Viscosímetro *Fann V. G. Metter modelo 35A*

No viscosímetro não se formam turbulências causadas por forças centrífugas. As faixas de tensão e taxa de cisalhamento estão bem definidas, onde a taxa de cisalhamento varia de acordo com a velocidade do cilindro externo, obtendo os valores de 5,1; 10,2; 170,3; 340,6; 511,0 e 1022,0 s^{-1}.

Para utilizar o aparelho, deve-se colocar o fluido no copo reservatório metálico e girar o cilindro externo em uma velocidade constante obtendo assim um ângulo de deflexão.

Uma vez conhecido o ângulo, pode-se calcular a viscosidade aparente e o valor da tensão cisalhante para construir um reograma, que é um gráfico de tensão cisalhante contra taxa de cisalhamento, as figuras 19 e 20 mostram os reogramas dos fluidos 4 e 5.

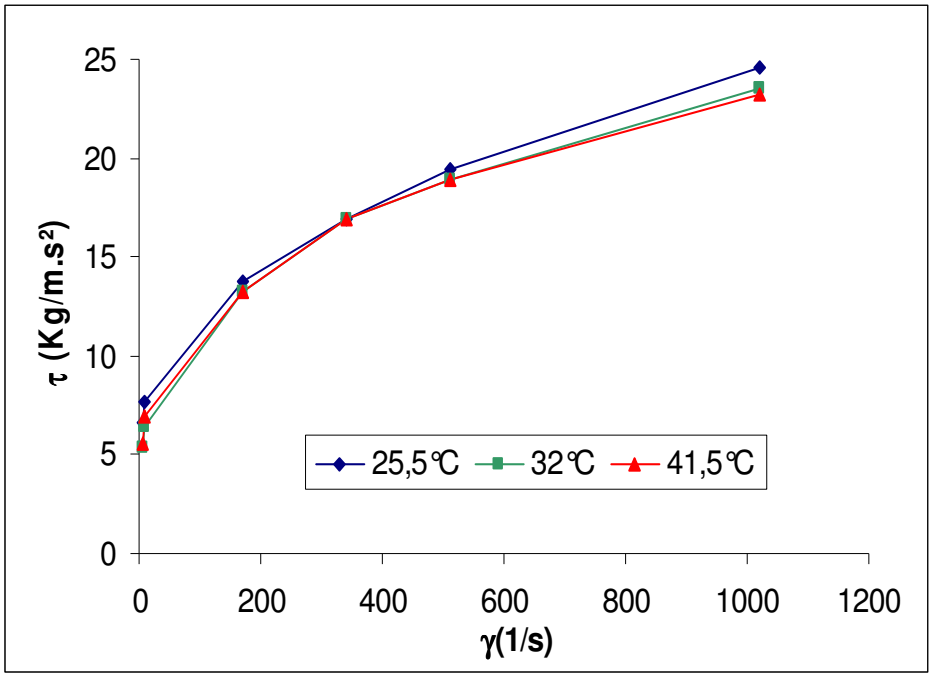

Figura 19: Reograma típico do fluido 4 para três temperaturas distintas.

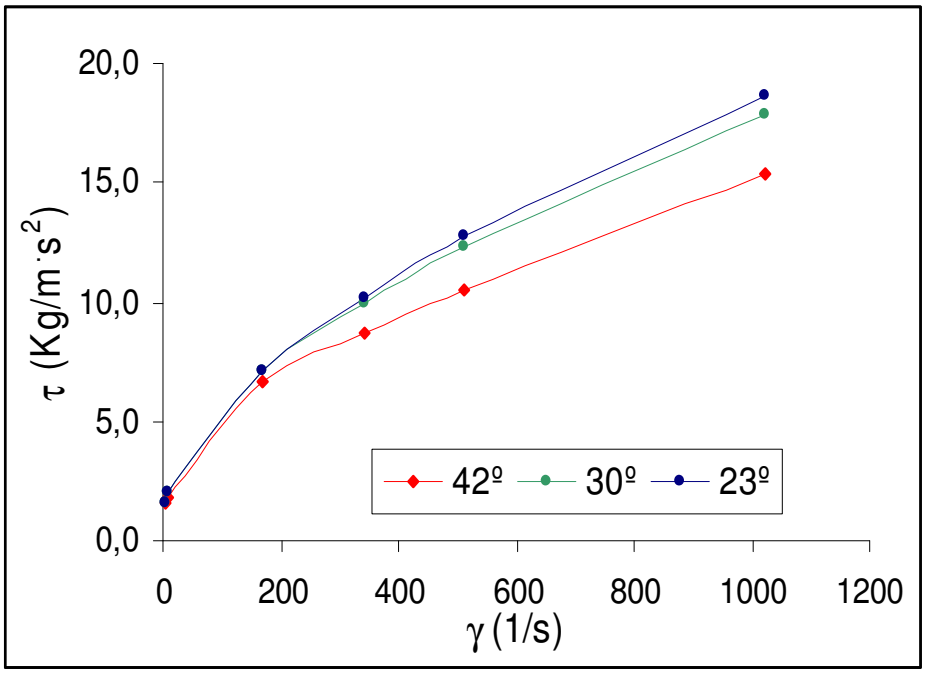

Figura 20: Reograma típico do fluido 5 para três temperaturas distintas.

Tendo os valores de taxa de cisalhamento e tensão cisalhante, obtêm-se os parâmetros reológicos dos modelos descritos anteriormente. Onde os modelos da potência e Casson podem ser facilmente calculados através da regressão linear dos dados.

Para saber se o modelo é adequado para descrever o comportamento do fluido, é necessário calcular o coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) (MONTGOMERY e RUNGER, 2003), onde o mesmo é dado pelo quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, que é calculado através da Equação 59.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)\left(y_i - \bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2}} \tag{59}$$

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.

A tabela 6 mostra os valores mínimos e máximos dos parâmetros reológicos para os fluidos 4 e 5 e o coeficiente de correlação de cada modelo.

Tabela 6: Faixa dos parâmetros reológicos para o modelo da potência.

Grandeza	Fluido 4		Fluido 5	
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo
n	0,2291	0,2977	0,3885	0,5200
k ($kg/m.s^{2-n}$)	2,8379	4,6761	0,4068	1,0427
τ ($kg/m.s^2$)	4,59	30,149	1,02	20,951
λ (s^{-1})	1022	5,1	5,1	1022
Temperatura (°C)	24	46	21	48
R^2	0,9950		0,9959	

Tabela 7: Faixa dos parâmetros reológicos para o modelo de Casson.

Grandeza	Fluido 4		Fluido 5	
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo
LE_c ($kg/m.s^2$)	4,6195	6,6926	0,7829	1,8201
VP_c (kg/m.s)	0,0059	0,0091	0,0073	0,0130
τ ($kg/m.s^2$)	4,59	30,149	1,02	20,951
λ (s^{-1})	1022	5,1	5,1	1022
Temperatura (°C)	24	46	21	48
R^2	0,9725		0,9831	

Nas tabelas acima foi observado que para os fluidos 4 e 5 o modelo de Casson apresentou valores R^2 menores que o modelo da potência, mostrando assim que o modelo da potência descreve melhor os fluidos.

3.5 Limpeza e Calibração da Unidade Experimental

Sempre que terminam os experimentos com os fluidos de perfuração, deve-se limpar a unidade e prepará-la para o próximo fluido. Para limpar, retira-se todo o fluido utilizado e deixa circulando água e detergente na unidade, depois se desmontam todas as sete linhas de escoamento para deixar cada uma com ácido clorídrico na concentração de 20% em massa por 15 minutos para retirar qualquer incrustação e, por conseguinte remontam-se todas as linhas de escoamento.

Para garantir que a unidade experimental está operando corretamente, se faz necessário a calibração da unidade com água antes de utilizar os fluidos de perfuração para evitar fatores prejudiciais como incrustação no interior dos tubos, excentricidade dos tubos anulares, vazamentos em todo o sistema operacional, presença de bolhas nos transdutores de pressão entre outros.

A água é utilizada como fluido de calibração devido a ser um fluido Newtoniano, ser amplamente estudada na literatura e ter sua fácil remoção da unidade para posteriormente inserir o fluido.

A calibração consiste em determinar experimentalmente o fator de atrito (equação 19) e compará-lo com a equação de Blasius (equação 20). O anexo B mostra dados coletados para a calibração da unidade experimental antes da utilização dos fluidos 4 e 5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os dados experimentais obtidos na unidade experimental descrita no capítulo anterior. Os mesmos são avaliados e tratados com as equações e métodos descritos anteriormente.

Os modelos reológicos utilizados são os modelos da potência e Casson. O primeiro devido ao fato de ser amplamente utilizado e de fácil aplicação e o segundo por ter um parâmetro de tensão crítica de escoamento.

Para cada fluido de perfuração são analisados os regimes de escoamento, as equações de diâmetro hidráulico para cada modelo reológico adotado, uma correção para a utilização do diâmetro hidráulico, as correlações de fator de atrito no regime turbulento e as novas correlações de fator de atrito para os fluidos estudados.

Com o objetivo de verificar o intervalo de confiança dos dados experimentais de fator atrito e perda de carga, foram feitas análises de incertezas das grandezas experimentais e propagação de erros experimentais para 4 fluidos de perfuração por Rocha (2008) e Gonçalves (2008).

4.1 Determinação do Número de Reynolds Crítico

A avaliação dos limites entre os regimes de escoamento é feita a partir da comparação entre resultados gerados por correlações presentes na literatura de velocidade crítica ou Reynolds crítico e por determinação gráfica experimental.

No método experimental é obtida a vazão crítica do escoamento que independe do modelo reológico utilizado, sendo assim, são obtidos diferentes valores de Reynolds críticos para os modelos utilizados, pois cada modelo tem uma forma diferente de calcular o número de Reynolds.

O número de Reynolds é uma função do diâmetro, então para o escoamento em tubo anular são utilizadas diferentes equações de diâmetro hidráulico gerando então diferentes valores para o cálculo de Reynolds crítico.

Os resultados obtidos pela avaliação experimental são utilizados como base na determinação do Reynolds crítico e os resultados gerados pelas correlações mostradas na tabela 2 são comparados aos resultados experimentais.

4.1.1 Fluido 4

Nas figuras 21, 22 e 23 são mostrados gráficos de diferença de pressão contra vazão volumétrica para o fluido 4. A partir do mesmo pode-se notar mudança na inclinação das retas geradas pelos pontos experimentais indicando a vazão crítica do escoamento. Para o tubo circular a inclinação muda na vazão 0,00275 m^3/s e no tubo anular de razão de diâmetros 1 1/4" e 1/2" o valor é de 0,00225 m^3/s.

Os dados obtidos apontam apenas duas retas, demonstrando assim que não houve a caracterização do regime de transição.

Pode-se observar pela figura 23 obtida para o escoamento no tubo anular 2" e 3/4" há apenas uma reta gerada pelos pontos experimentais, mostrando assim que não foi obtida vazão crítica do escoamento, ou seja, todos os dados estão no regime laminar.

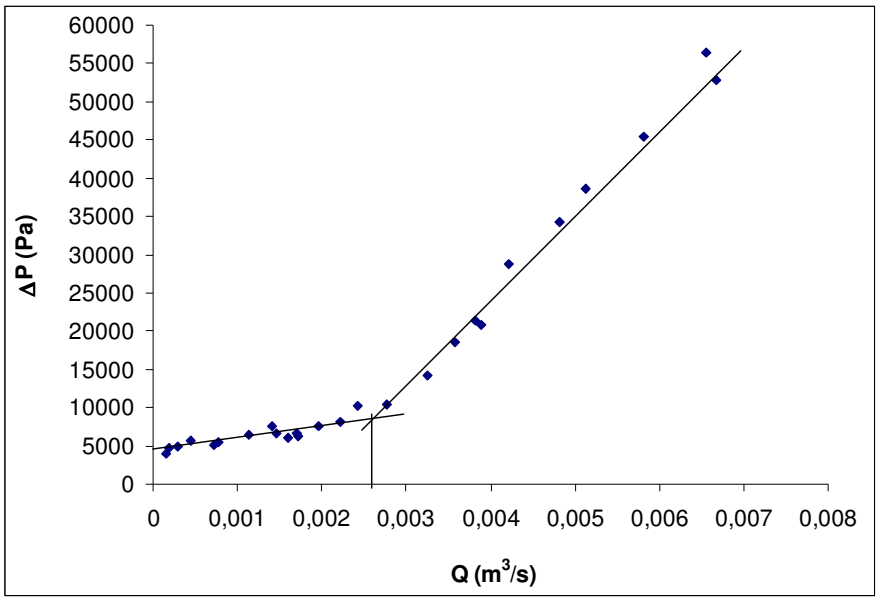

Figura 21: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo circular para o fluido 4.

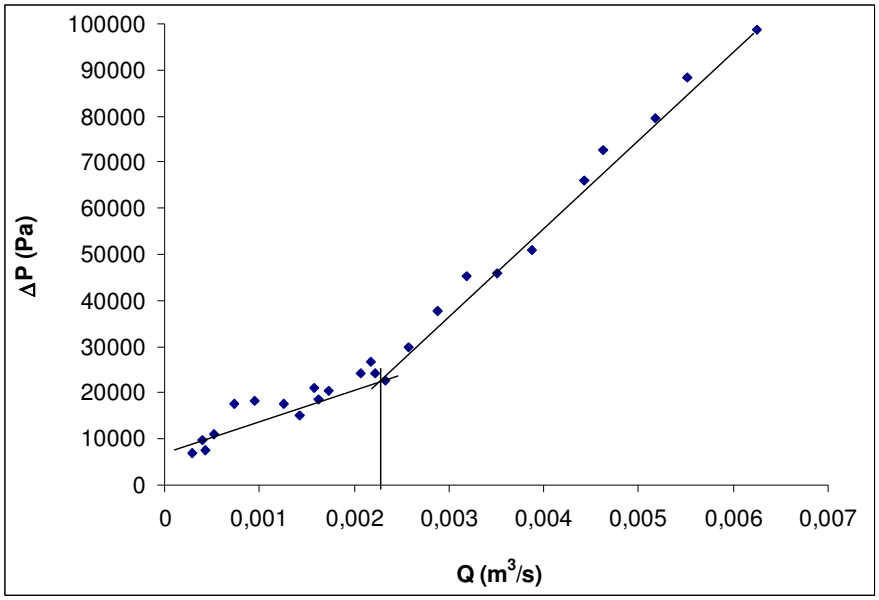

Figura 22: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo anular de razão 1 1/4" e 1/2" para o fluido 4.

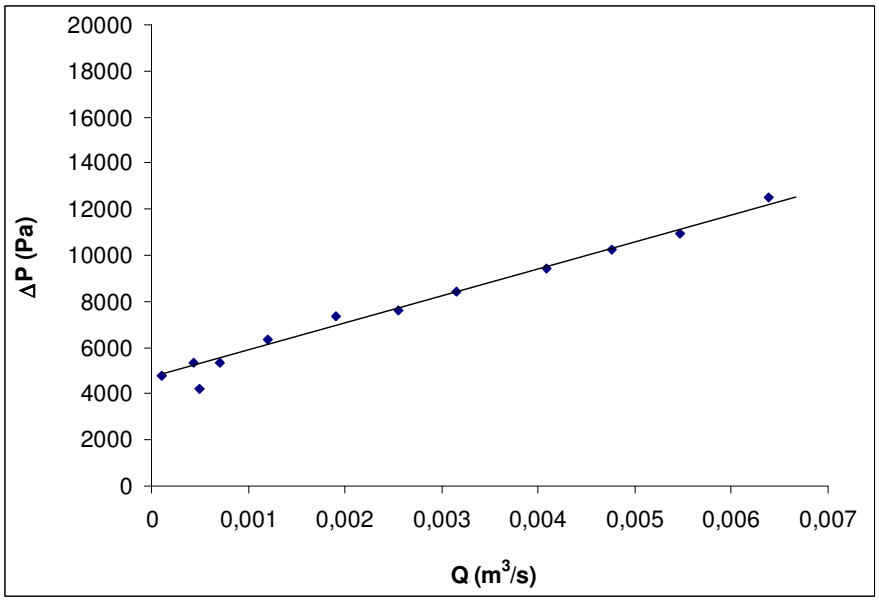

Figura 23: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo anular de razão 2" e 3/4" para o fluido 4.

As tabelas 8 e 9 mostram os valores de Reynolds críticos calculados para os tubos circular e anular de razão 1 1/4" e 1/2", assim como os valores obtidos pelas correlações com os respectivos desvios em relação aos valores experimentais que são calculados utilizando a equação 60,

$$Erro(\%) = \frac{\mathrm{Re}\, c_{\exp} - \mathrm{Re}\, c_{cor}}{\mathrm{Re}\, c_{\exp}} \cdot 100 \quad , \tag{60}$$

os resultados para o modelo da potência com a utilização das equações de diâmetro hidráulico são mostrados na tabela 8 e a tabela 9 mostra resultados para o modelo de Casson. Para fluidos newtonianos o número de Reynolds que limita o regime laminar é 2100, pode-se observar que os valores de Rec obtidos são maiores que o valor 2100 demonstrando que há uma extensão do regime laminar.

Tabela 8: Reynolds críticos determinados experimentalmente e através de correlações para o modelo da potência.

Reynolds Crítico	Tubo					
	Circular	Anular 1 1/4"-1/2"				
		D_{H1}	D_{H2}	D_{H3}	D_{H4}	D_{H5}
Rec - experimental	7477	3057	3228	3060	3668	2901
Rec - Ryan e Jonhson (1959)	2301	2301	2301	2301	2301	2301
Rec - Mishra e T. (1971)	2870	2870	2870	2870	2870	2870
Erro(%) - Ryan e Jonhson (1959)	-69,2	-24,7	-28,7	-24,8	-37,3	-20,7
Erro(%) - Mishra e T. (1971)	-61,6	-6,1	-11,1	-6,2	-21,8	-1,1

Tabela 9: Reynolds críticos determinados experimentalmente e através de correlações para o modelo de Casson.

Reynolds Crítico	Tubo					
	Circular	Anular 1 1/4"-1/2"				
		D_{H1}	D_{H2}	D_{H3}	D_{H4}	D_{H5}
Rec - experimental	21597	6234	7640	6253	12324	5118
Rec - Hanks (1963)	6813	3925	4438	3933	6069	3514
Rec - Thomas (1963)	5935	2484	3044	2491	4910	2039
Rec - Craft. (1962)	1202	504	617	505	994	414
Erro(%)- Hanks (1963)	-68,5	-37,0	-41,9	-37,1	-50,8	-31,3
Erro(%) - Thomas (1963)	-72,5	-60,2	-60,2	-60,2	-60,2	-60,2
Erro(%) - Craft. (1962)	-94,4	-91,9	-91,9	-91,9	-91,9	-91,9

A partir dos dados de vazões criticas obtidas pelo método gráfico, o Reynolds crítico experimental é calculado utilizando as equações 23 e 25 para os modelos da potência e Casson respectivamente.

As correlações de Ryan e Jonhson (1959) e Mishra e Tripathi (1971) dependem apenas do índice de consistência do fluido, por isso os valores não se alteram com a mudança na geometria do escoamento.

Para o tubo circular, utilizando o modelo da potência e de Casson, nenhuma das correlações tem desvio satisfatório. Todos os erros são maiores que 60% e as correlações subestimam os valores experimentais.

No tubo anular 1 1/4" e 1/2" utilizando o modelo da potência, a equação de Mishra e Tripathi (1971) apresenta bons resultados, pois os desvios são pequenos, da ordem de 6% utilizando a equação de diâmetro hidráulico D_{H1} e D_{H3}, 11% utilizando a equação D_{H2} e 1% utilizando a correlação D_{H5}.

Utilizando o modelo de Casson para o tubo anular, nenhuma das correlações propostas tem bom desempenho e todas subestimam os valores experimentais.

4.1.2 Fluido 5

Para o fluido 5, as figuras 24, 25 e 26 mostram os gráficos de diferença de pressão contra vazão volumétrica identificando as vazões criticas 0,00129 m^3/s, 0,00156 m^3/s e 0,00337 m^3/s para os tubos circular, anular de razão de diâmetros 1 1/4" e 1/2" e anular de razão de diâmetros 2" e 3/4" respectivamente.

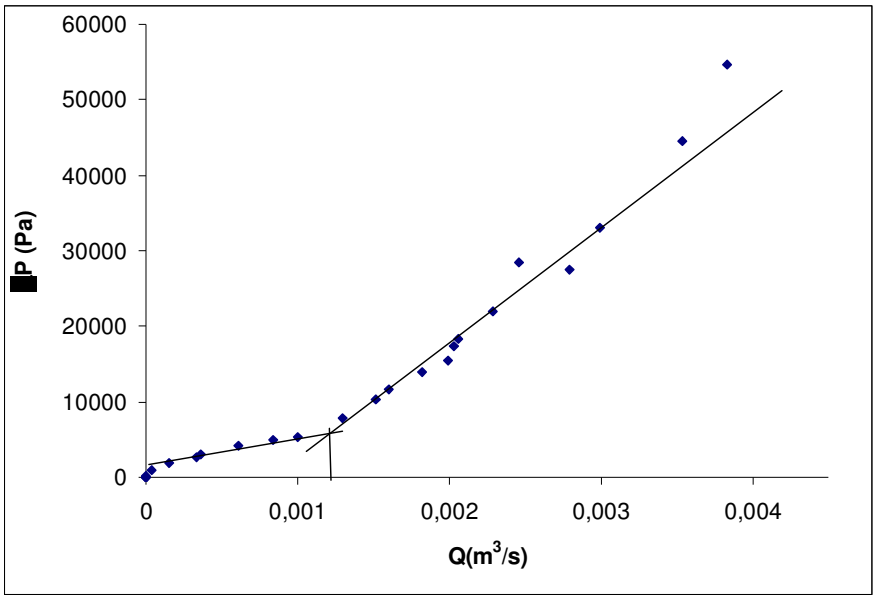

Figura 24: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo circular para o fluido 5.

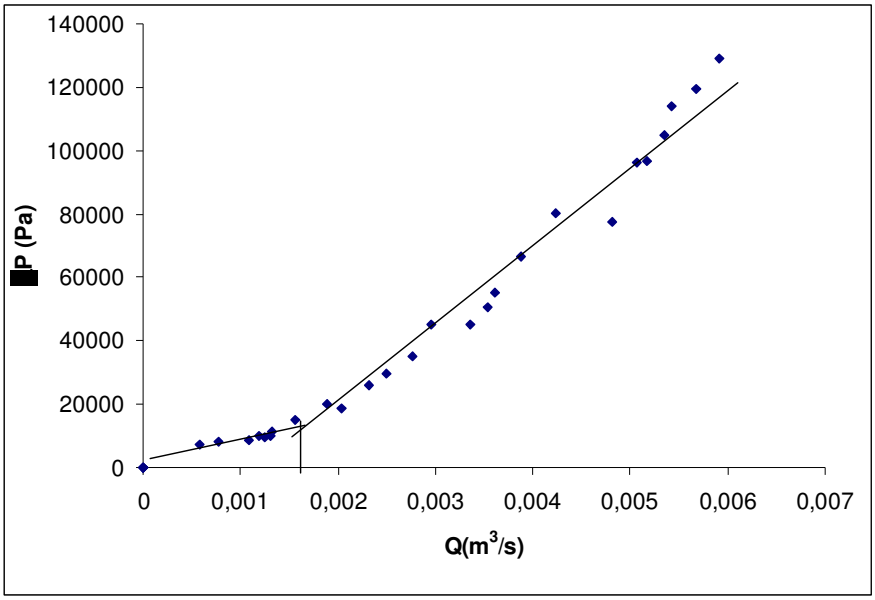

Figura 25: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo anular de razão 1 1/4" e 1/2" para o fluido 5.

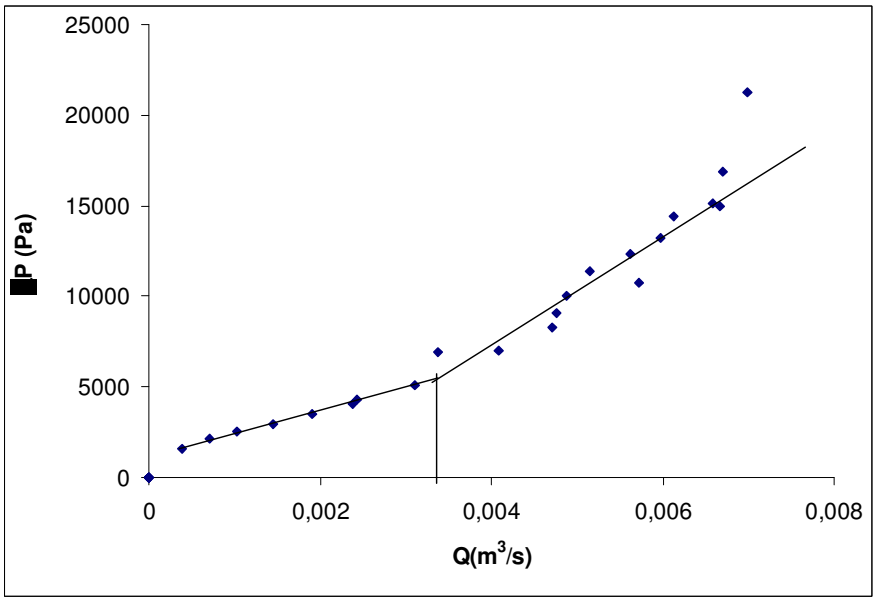

Figura 26: Determinação experimental da velocidade crítica do escoamento no tubo anular de razão 2" e 3/4" para o fluido 5.

Assim como ocorrido com o fluido 4, os dados obtidos apontam apenas duas retas demonstrando assim que não houve a caracterização do regime de transição.

As tabelas 10 e 11 mostram os valores de Reynolds críticos calculados para os tubos circular, anular de razão 1 1/4" e 1/2" e anular de razão 2" e 3/4".

Tabela 10: Reynolds críticos determinados experimentalmente e através de correlações para o modelo da potência.

Reynolds Crítico	Tubo									
	Circular	Anular 1 1/4"-1/2"					Anular 2"-3/4"			
		D_{H1}	D_{H2}	D_{H3}	D_{H4}	D_{H5}	D_{H1}	D_{H2}	D_{H3}	D_{H4}	D_{H5}
Rec - experimental	3018	2246	2457	2249	3033	2059	2370	2588	2374	3049	2178
Rec - Ryan e Jonhson (1959)	2394	2394	2394	2394	2394	2394	2394	2394	2394	2394	2394
Rec - Mishra e T. (1971)	2533	2533	2533	2533	2533	2533	2533	2533	2533	2533	2533
Erro(%) - Ryan e Jonhson (1959)	-22,7	6,6	-2,5	6,5	-21,1	16,3	1,0	-7,5	0,9	-21,5	9,9
Erro(%) - Mishra e T. (1971)	-16,1	12,8	3,1	12,6	-16,5	23,0	6,9	-2,1	6,7	-16,9	16,3

Tabela 11: Reynolds críticos determinados experimentalmente e através de correlações para o modelo de Casson.

Reynolds Crítico	Tubo									
	Circular	Anular 1 1/4"-1/2"					Anular 2"-3/4"			
		D_{H1}	D_{H2}	D_{H3}	D_{H4}	D_{H5}	D_{H1}	D_{H2}	D_{H3}	D_{H4}	D_{H5}
Rec - experimental	7045	3400	4167	3410	6721	2791	5492	6731	5517	9820	4523
Rec - Hanks (1963)	3520	2573	2757	2575	3421	2438	3111	3443	3118	4274	2858
Rec - Thomas (1963)	2083	985	1207	988	1947	808	1610	1973	1617	2878	1325
Rec - Craft. (1962)	423	335	369	336	491	310	435	496	436	652	388
Erro(%)- Hanks (1963)	-50,0	-24,3	-33,9	-24,5	-49,1	-12,62	-43,4	-48,8	-43,5	-56,47	-36,8
Erro(%) - Thomas (1963)	-70,4	-71,0	-71,0	-71,0	-71,0	-71,0	-70,7	-70,7	-70,7	-70,7	-70,7
Erro(%) - Craft. (1962)	-94,0	-90,1	-91,1	-90,2	-92,7	-88,89	-92,1	-92,6	-92,1	-93,4	-91,4

Para o tubo circular, assim como o fluido 4, nenhuma das correlações tem desvio satisfatório e todas subestimam os valores experimentais. A equação de Mishra e Tripathi (1971) é a que tem um desempenho melhor, pois obtém um desvio de 16%.

Nos tubos anular de razão 1 1/4" e 1/2" e anular de razão 2" e 3/4" utilizando o modelo da potência, a equação de Ryan e Jonhson (1959) obtém melhor desempenho nas três primeiras equações de diâmetro hidráulico, para as outras duas correlações os desvios são grandes. Já a equação de Mishra e Tripathi (1971) resulta em desvios maiores, destacando que a equação de D_{H2} foi a que teve menor desvio.

Utilizando o modelo de Casson nos tubos anular de razão 1 1/4" e 1/2" e anular de razão 2" e 3/4", nenhuma das correlações propostas tem desempenho satisfatório e subestimam os valores experimentais.

A tabela 12 mostra um resumo dos valores de Reynolds críticos obtido experimentalmente para os fluidos 4 e 5 utilizando os modelos reológicos da potência e Casson.

Tabela 12: Valores de Reynolds crítico para os fluidos 4 e 5.

Geometria	Diâmetro hidráulico	Fluido			
		4		5	
		Potência	Casson	Potência	Casson
Circular	-	7477	21597	3018	7045
Anular 1 1/4" e 1/2"	D_{H1}	3057	6234	2246	3400
	D_{H2}	3228	7640	2457	4167
	D_{H3}	3060	6253	2249	3410
	D_{H4}	3668	12324	3033	6721
	D_{H5}	2901	5118	2059	2791
Anular 2" e 3/4"	D_{H1}	-	-	2370	5492
	D_{H2}	-	-	2588	6731
	D_{H3}	-	-	2374	5517
	D_{H4}	-	-	3049	9820
	D_{H5}	-	-	2178	4523

Através desta tabela pode-se destacar que há um deslocamento no número de Reynolds para o modelo reológico de Casson, isto se deve ao fato do modelo apresentar uma estrutura diferente para o cálculo do Reynolds.

Para definir o regime de escoamento, são utilizados os dados obtidos pelo método experimental de avaliação de regime devido ao baixo desempenho das correlações.

4.2 Avaliação das Correlações de Diâmetro Hidráulico Para Cada Modelo Reológico

O diâmetro hidráulico foi calculado de acordo com as equações mostradas no capítulo 2.4. A tabela 13 mostra os valores obtidos para cada correlação.

Tabela 13: Valor do diâmetro hidráulico para os anulares.

Correlação	Anular 1 1/4" e 1/2"	Anular 2" e 3/4"
Slot (D_{H1})	0,0122	0,0220
Raio hidráulico (D_{H2})	0,0150	0,0270
LAMB (D_{H3})	0,0123	0,0221
Crittendon (D_{H4})	0,0242	0,0394
Serth (D_{H5})	0,0100	0,0181

Pode-se observar que os valores de diâmetro hidráulico D_{H1} e D_{H3} são praticamente idênticos, com o objetivo de avaliar se este comportamento ocorre para toda faixa de razoes de diâmetro β (equação 61) a figura 27 mostra o cálculo de diâmetro hidráulico para diferentes razões de diâmetros e demonstra que os valores de D_{H1} e D_{H3} são sempre muito semelhantes para toda faixa de β,

$$\beta = \frac{D_1}{D_2} \tag{61}$$

onde D_1 é o diâmetro externo do tubo interno e D_2 é o diâmetro interno do tubo externo.

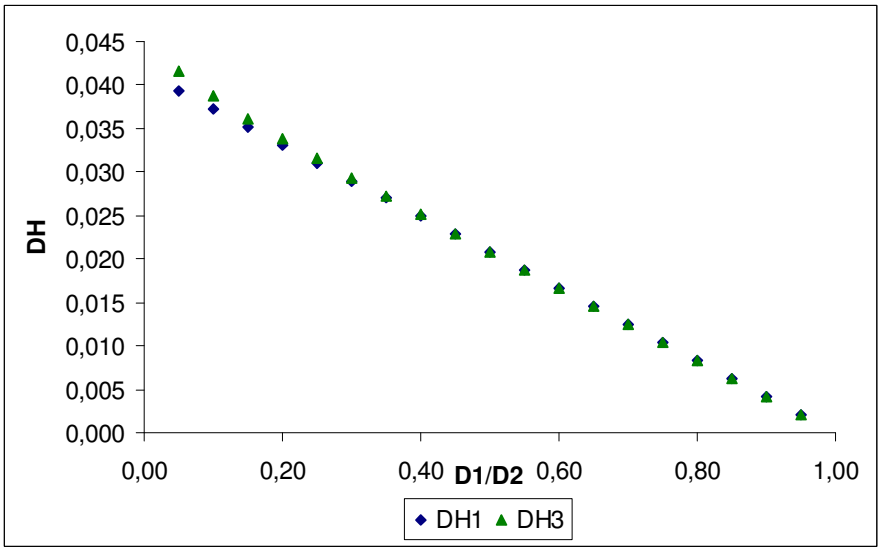

Figura 27: Avaliação das correlações de diâmetro hidráulico D_{H1} e D_{H3}.

Para avaliar as equações de diâmetro hidráulico, são construídos gráficos de diferença de pressão contra vazão volumétrica, onde são plotados os dados medidos experimentalmente e os dados calculados utilizando a equação 16 de acordo com a equação de diâmetro hidráulico a ser testada.

É necessário calcular o fator de atrito para utilizar a equação 16, por isso são utilizados apenas os dados no regime laminar, já que no regime turbulento existem diversas correlações tornando difícil assim a verificação de qual equação de diâmetro hidráulico tem melhores resultados.

Como o cálculo do fator de atrito depende do modelo reológico utilizado, deve-se fazer a avaliação das equações de diâmetro hidráulico para cada modelo reológico. Para o modelo da potência, utiliza a equação 22 para calcular o fator de atrito e para o modelo e Casson utiliza a equação 24.

4.2.1 Fluido 4 utilizando o modelo da potência

Nas figuras 28 e 29 encontram-se plotados os gráficos de diferença de pressão contra vazão volumétrica para o fluido 4, onde se utiliza o modelo reológico da potência para os tubos anulares concêntricos.

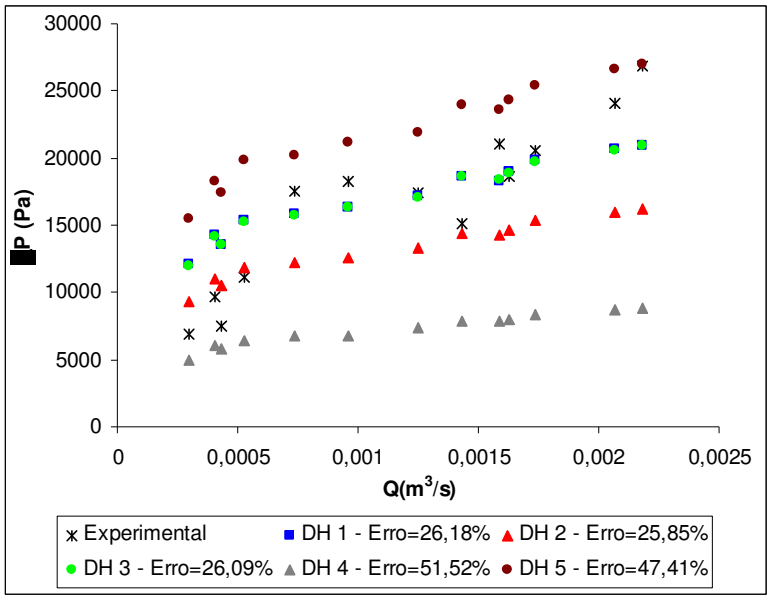

Figura 28: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 4 utilizando o modelo da potência.

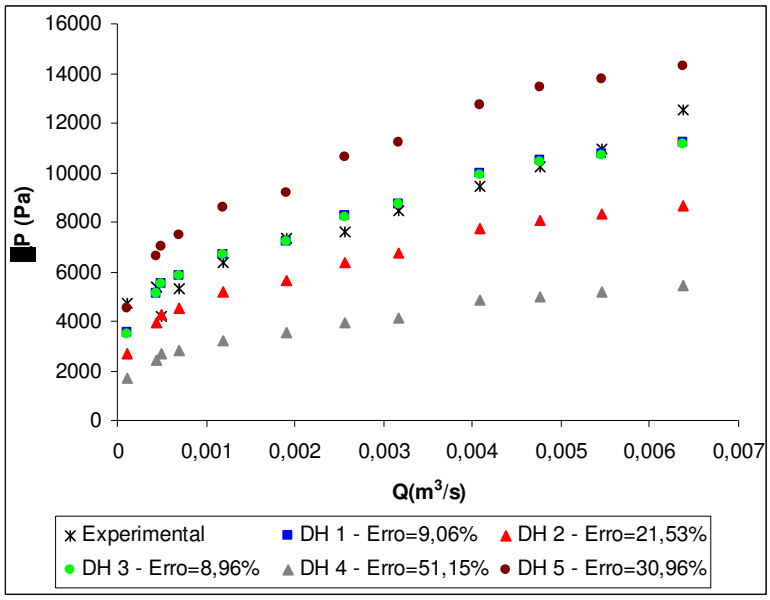

Figura 29: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 4 utilizando o modelo da potência.

Para melhor avaliação das correlações, é utilizada a equação 62 para calcular os desvios absolutos dos pontos obtidos pela correlação e os pontos experimentais, a tabela 14 mostra a média dos desvios absolutos para cada tubo.

$$Erro(\%) = \frac{\left|\Delta P_{\exp} - \Delta P_{cor}\right|}{\Delta P_{\exp}} \cdot 100 \qquad (62)$$

Tabela 14: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico.

Geometria	D_{H1} (%)	D_{H2} (%)	D_{H3} (%)	D_{H4} (%)	D_{H5} (%)
Anular 1 1/4"-1/2"	26,18	25,85	26,09	51,52	47,41
Anular 2"-3/4"	9,06	21,53	8,96	51,15	30,96
Média	17,62	23,69	17,50	51,34	39,19

Nestes gráficos e na tabela 14 pode-se observar que para o tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4"-1/2" os pontos experimentais estão muito dispersos, fazendo com que as equações D_{H1}, D_{H2} e D_{H3} obtenham desvios muito próximos. Isto torna possível a escolha de qualquer uma das três equações para os cálculos posteriores. Já no anular de 2" e 3/4" as equações D_{H1} e D_{H3} obtêm melhores resultados.

4.2.2 Fluido 5 utilizando o modelo da potência

Os gráficos representando os resultados da avaliação das equações de diâmetro hidráulico para o fluido 5 ajustado pelo modelo da potência encontram-se nas figuras 30 e 31.

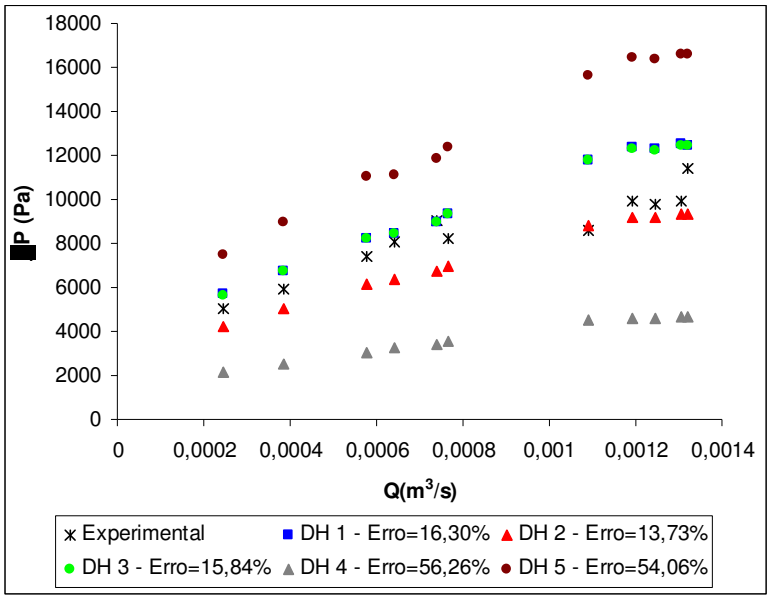

Figura 30: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 5 utilizando o modelo da potência.

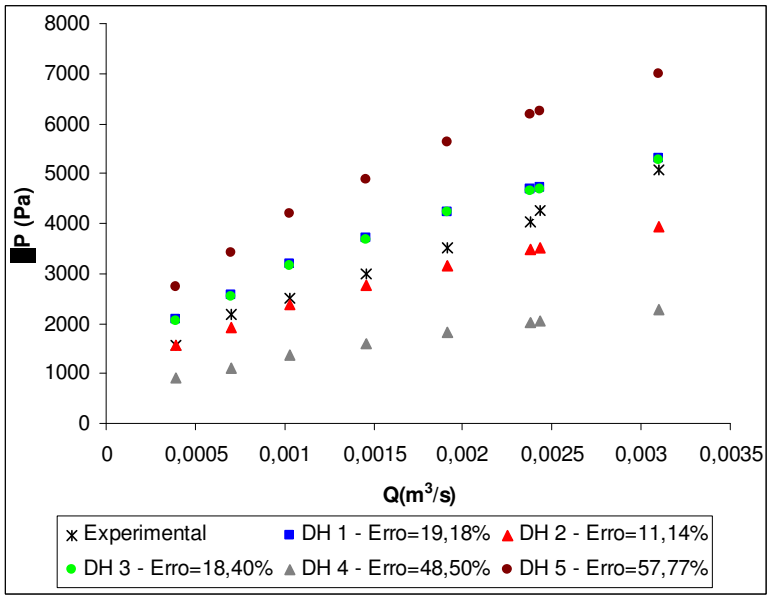

Figura 31: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 5 utilizando o modelo da potência.

Para melhor visualização dos dados, a tabela 15 mostra a média dos desvios absolutos para cada tubo.

Tabela 15: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico.

Geometria	D_{H1} (%)	D_{H2} (%)	D_{H3} (%)	D_{H4} (%)	D_{H5} (%)
Anular 1 1/4"-1/2"	16,30	13,73	15,84	56,26	54,06
Anular 2"-3/4"	19,18	11,14	18,40	48,50	57,77
Média	17,72	12,44	17,12	52,38	55,92

Nestes gráficos e na tabela pode-se observar que a equações D_{H2} obtêm os menores desvios para ambos os anulares concêntricos.

4.2.3 Fluido 4 utilizando o modelo de Casson

Conforme o procedimento adotado no item anterior para analisar as correlações de diâmetro hidráulico. Nas figuras 32 e 33 são apresentados os resultados da avaliação das correlações de diâmetro hidráulico aplicados no cálculo da perda de carga em anulares concêntricos para o fluido 4 utilizando o modelo reológico de Casson.

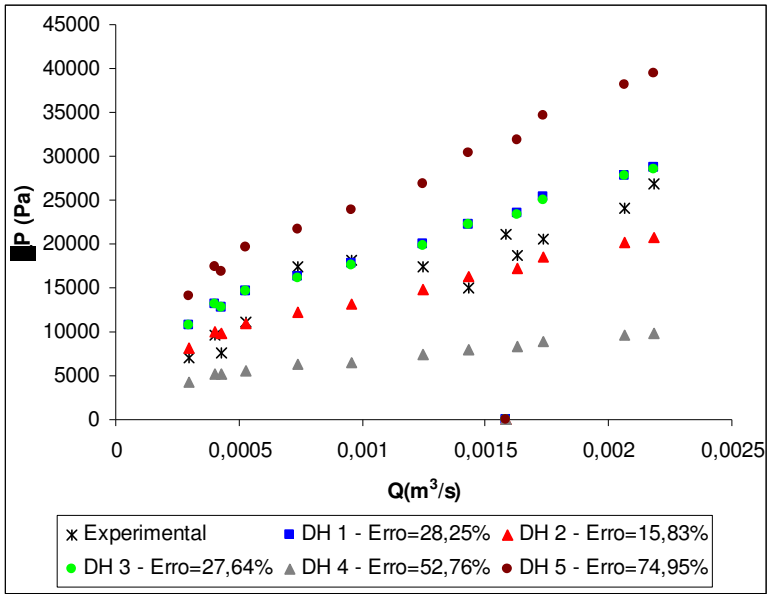

Figura 32: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 4 utilizando o modelo de Casson.

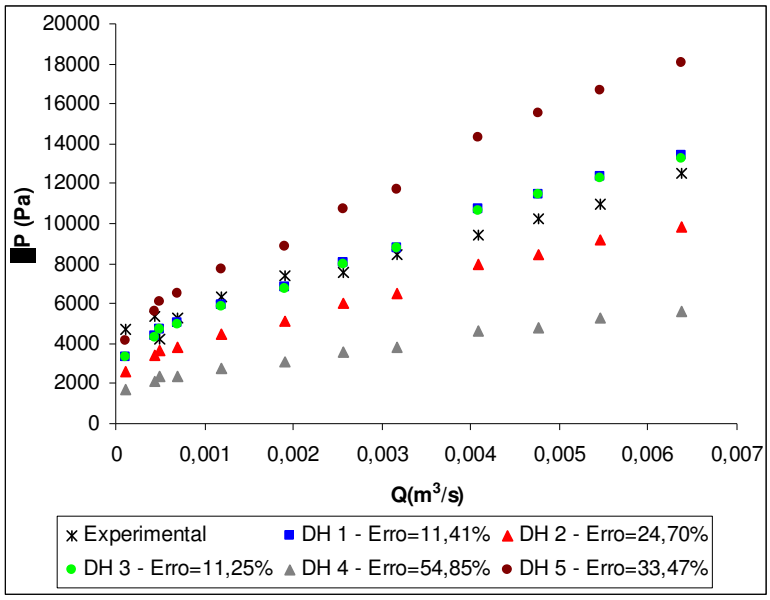

Figura 33: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 4 utilizando o modelo de Casson.

Para melhor visualização dos dados, a tabela 16 mostra a média dos desvios absolutos para cada tubo.

Tabela 16: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico.

Geometria	D_{H1} (%)	D_{H2} (%)	D_{H3} (%)	D_{H4} (%)	D_{H5} (%)
Anular 1 1/4"-1/2"	28,25	15,83	27,64	52,76	74,95
Anular 2"-3/4"	11,41	24,70	11,25	54,85	33,47
Média	19,83	20,27	19,40	53,81	54,21

Nestes gráficos e na tabela pode-se observar que a equação D_{H2} obtém os menores desvios para o tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4"-1/2" e as equações D_{H1} e D_{H3} obtêm os menores desvios para o tubo anular de 2" e 3/4".

4.2.4 Fluido 5 utilizando o modelo de Casson

As figuras 34 e 35 apresentam os resultados da avaliação das correlações de diâmetro hidráulico aplicado no cálculo da perda de carga em anulares concêntricos para o fluido 5.

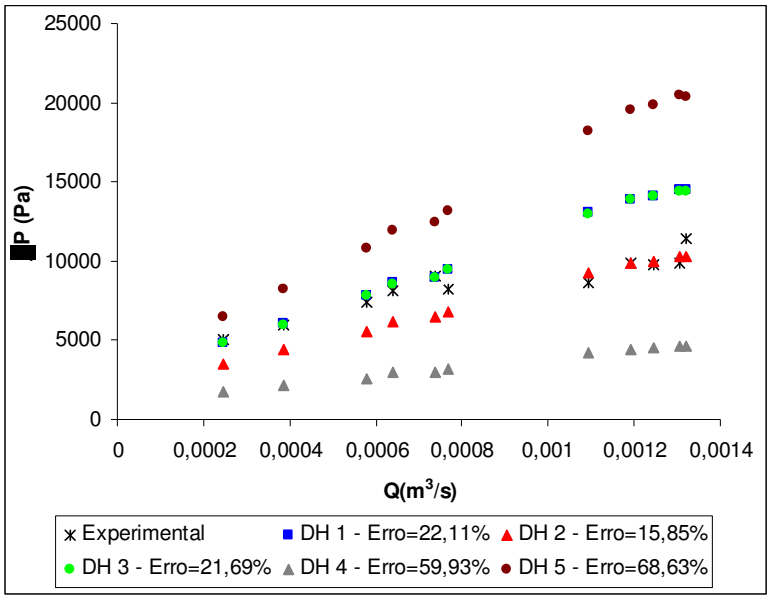

Figura 34: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 5 utilizando o modelo de Casson.

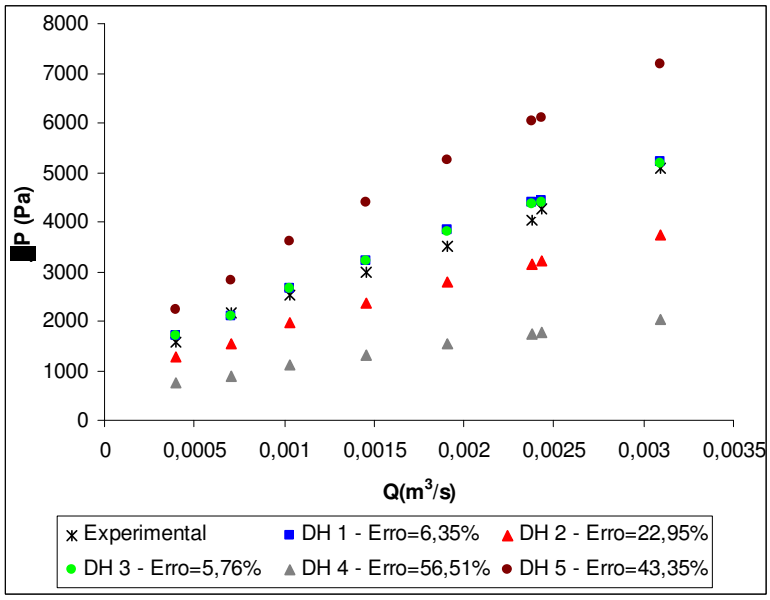

Figura 35: Avaliação do diâmetro hidráulico do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 5 utilizando o modelo de Casson.

Para melhor visualização dos dados, a tabela 17 mostra a média dos desvios absolutos para cada tubo.

Tabela 17: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico.

Geometria	D_{H1} (%)	D_{H2} (%)	D_{H3} (%)	D_{H4} (%)	D_{H5} (%)
Anular 1 1/4"-1/2"	22,11	15,85	21,69	59,93	68,63
Anular 2"-3/4"	6,35	22,95	5,76	56,51	43,35
Média	13,88	19,75	13,46	58,22	55,99

Nestes gráficos e na tabela pode-se observar que a equação D_{H2} obtém os menores desvios para o tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4"-1/2" e as equações D_{H1} e D_{H3} obtêm os menores desvios para o tubo anular de 2" e 3/4", tendo comportamento similar ao do fluido 4.

Cabe destacar que para os dois modelos reológicos para os fluidos estudados, os resultados de queda de pressão utilizando as correlações D_{H1} e D_{H3} são muito próximos já que os próprios valores de diâmetros hidráulicos são muito próximos.

A tabela 18 mostra um resumo de qual equação de diâmetro hidráulico tem melhor desempenho para cada modelo reológico adotado e geometria de tubo utilizada.

Tabela 18: Resumo da avaliação do diâmetro hidráulico.

Fluido	Modelo reológico	Geometria	Melhor equação de diâmetro hidráulico
4	potência	Anular 1 1/4"-1/2"	D_{H1}
		Anular 2"-3/4"	D_{H1}
	Casson	Anular 1 1/4"-1/2"	D_{H2}
		Anular 2"-3/4"	D_{H1}
5	potência	Anular 1 1/4"-1/2"	D_{H2}
		Anular 2"-3/4"	D_{H2}
	Casson	Anular 1 1/4"-1/2"	D_{H2}
		Anular 2"-3/4"	D_{H1}

De acordo com o resumo, cabe ressaltar que o desempenho das equações de diâmetro hidráulico se alterna de acordo com o fluido e modelo reológico adotado. Para o fluido 4, de modo geral, a equação D_{H1} obtém o melhor desempenho, enquanto que para o fluido 5, a correlação que tem menores desvios é a D_{H2}.

A dependência do diâmetro hidráulico com o tipo de fluido avaliado e modelo reológico adotado foi relatada por Bailey e Peden (2000). Segundo o trabalho destes autores as equações de diâmetro hidráulico físicas devem sofrer uma correção de acordo com o

modelo reológico empregado. Tal correção é realizada através do que os autores definem como diâmetro efetivo de escoamento.

4.2.5 Avaliação do diâmetro efetivo de escoamento

Uma outra abordagem da literatura (BAILEY e PEDEN, 2000) é a utilização do diâmetro efetivo que representa o escoamento do fluido de perfuração. A equação 56 é utilizada para obter a correção.

Para utilizar esta equação é necessário conhecer o valor do parâmetro generalizado *n'*, que conforme demonstrado no anexo A tem o mesmo valor que o índice de comportamento *n* do modelo da potência.

Para avaliar o efeito do diâmetro efetivo é utilizado o mesmo procedimento para avaliar as equações de diâmetro hidráulico. As figuras 36 e 37 mostram os valores de perda de carga calculados com as equações de diâmetro hidráulico e com as correções dos diâmetros efetivos para o fluido 4.

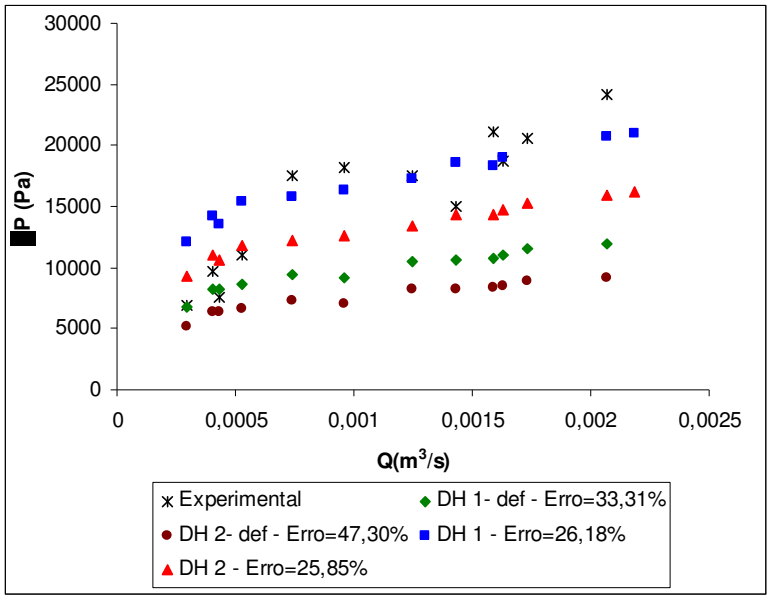

Figura 36: Avaliação do diâmetro efetivo do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 4.

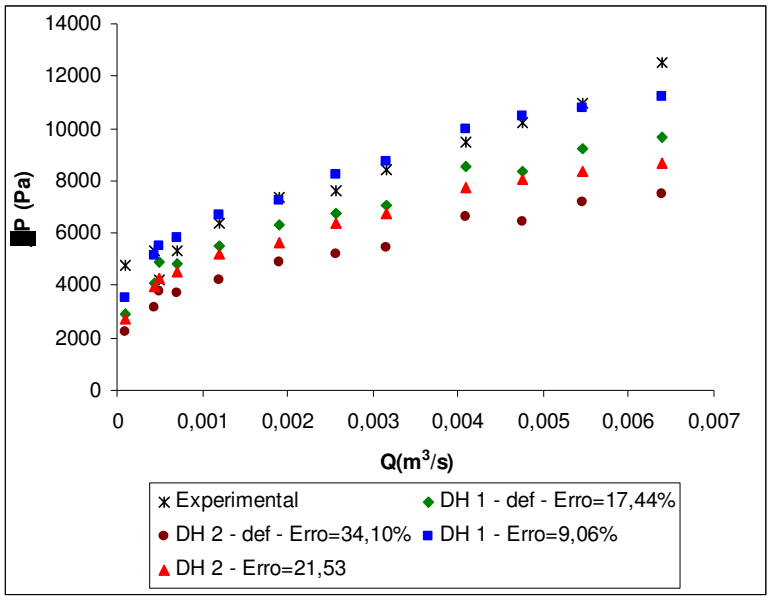

Figura 37: Avaliação do diâmetro efetivo do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 4.

Para melhor visualização dos dados, a tabela 19 mostra a média dos desvios absolutos para cada tubo.

Tabela 19: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico.

Geometria	D_{H1} (%)	D_{H2} (%)	D_{H1} – def (%)	D_{H2} – def (%)
Anular 1 1/4"-1/2"	26,18	25,85	33,31	47,30
Anular 2"-3/4"	9,06	21,53	17,44	34,10
Média	17,62	23,69	25,38	40,7

Pode-se observar pela tabela 19 que a utilização do diâmetro efetivo de escoamento contribui para aumentar os desvios, comprovando ser ineficaz para corrigir o diâmetro hidráulico no fluido 4.

As figuras 38 e 39 mostram os valores de perda de carga calculados com as equações de diâmetro hidráulico e com as correções dos diâmetros efetivos para o fluido 5.

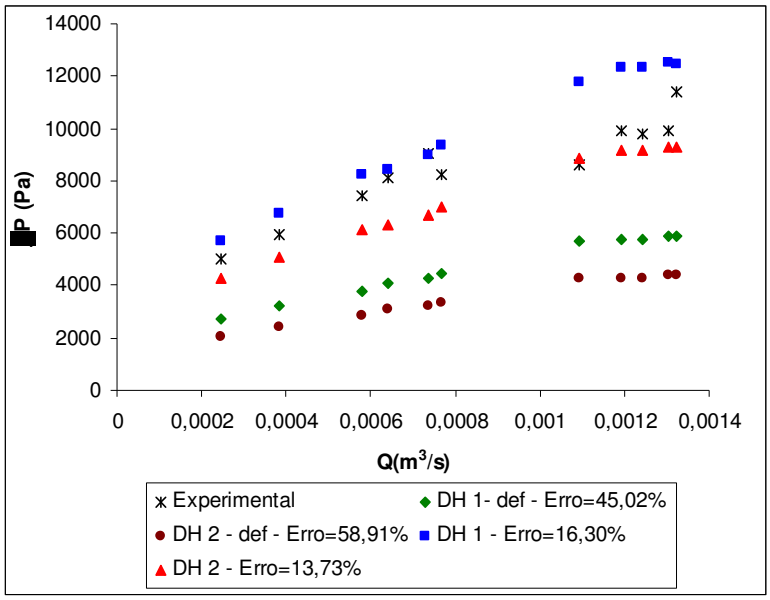

Figura 38: Avaliação do diâmetro efetivo do tubo anular de razão de diâmetro 1 1/4" e 1/2" para o fluido 5.

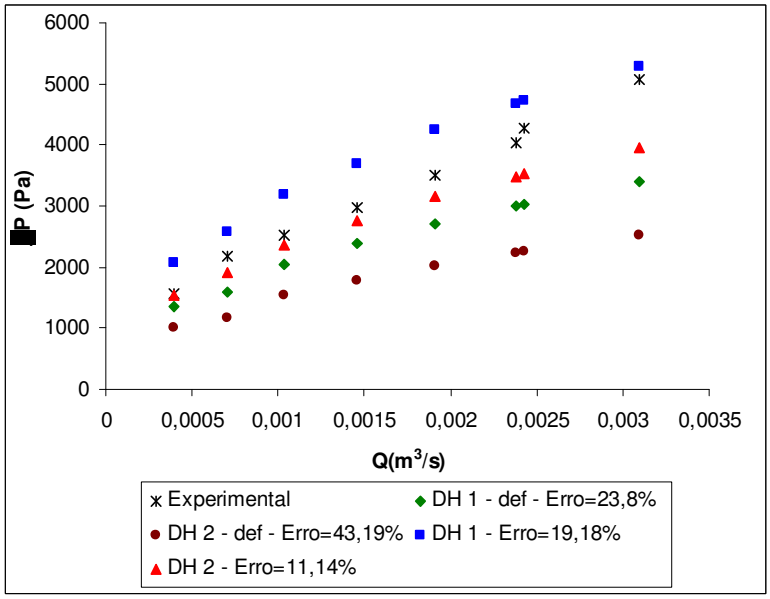

Figura 39: Avaliação do diâmetro efetivo do tubo anular de razão de diâmetro 2" e 3/4" para o fluido 5.

Para melhor visualização dos dados, a tabela 20 mostra a média dos desvios absolutos para cada tubo.

Tabela 20: Média dos desvios absolutos das equações de diâmetro hidráulico.

Geometria	D_{H1} (%)	D_{H2} (%)	D_{H1} – def (%)	D_{H2} – def (%)
Anular 1 1/4"-1/2"	16,26	13,73	45,02	58,91
Anular 2"-3/4"	19,18	11,14	23,8	43,19
Média	17,72	12,44	34,41	51,05

No fluido 5 é também observado que a utilização do diâmetro efetivo é ineficaz para corrigir o diâmetro hidráulico.

4.3 Avaliação das Correlações de Fator de Atrito

Para descrever o comportamento do fator de atrito no regime turbulento são propostas diversas correlações na literatura, na tabela 4 são apresentadas às correlações de fator de atrito avaliadas neste trabalho. A utilização das mesmas depende do modelo reológico adotado.

Com o ajuste dos dados reológicos pelo modelo da potência, avalia-se as equações de Gomes (1987) (equação 37), Ellis e George (1977) (equação 47) e Churchill (1977) (equação 48) que são compatíveis à estrutura do modelo apresentando *n* e/ou Re como parâmetro. No caso de ajuste pelo modelo de Casson avaliam-se as equações de Darby e Melson (1981) (equação 38), Darby *et al* (1992) (equação 45), Tomita (1959) (equação 43), Ellis e George (1977) e Churchill (1977) por possuírem o número de Hedstrom e/ou ser dependente de Reynolds.

Cabe acrescentar que o número de Reynolds é uma função do diâmetro hidráulico do tubo, o que ocasiona utilizar a equação de diâmetro hidráulico que obtém os menores desvios experimentais, neste caso foi utilizado a melhor equação de diâmetro hidráulico de acordo com o fluido e modelo reológico adotado conforme apontado pela a tabela 18.

O procedimento para avaliar as equações de fator de atrito determina-se experimentalmente o fator de atrito utilizando a equação 16, depois se compara com os resultados obtidos pelas correlações.

4.3.1 Avaliação de fator de atrito para o fluido 4 utilizando o modelo da potência

Tradicionalmente, para analisar equações de fator de atrito, são construídos gráficos em escala logarítmica de fator de atrito contra número de Reynolds. Os dados experimentais no regime laminar são apresentados em conjunto para garantir maior confiabilidade nos dados experimentais.

A figura 40 mostra os resultados experimentais de fator de atrito para o fluido 4 escoando no tubo circular. Na figura, a reta representativa do regime laminar foi calculada utilizando a equação 22. Pode-se observar que os pontos experimentais estão bem próximos da reta, garantindo maior confiabilidade nos dados do regime laminar.

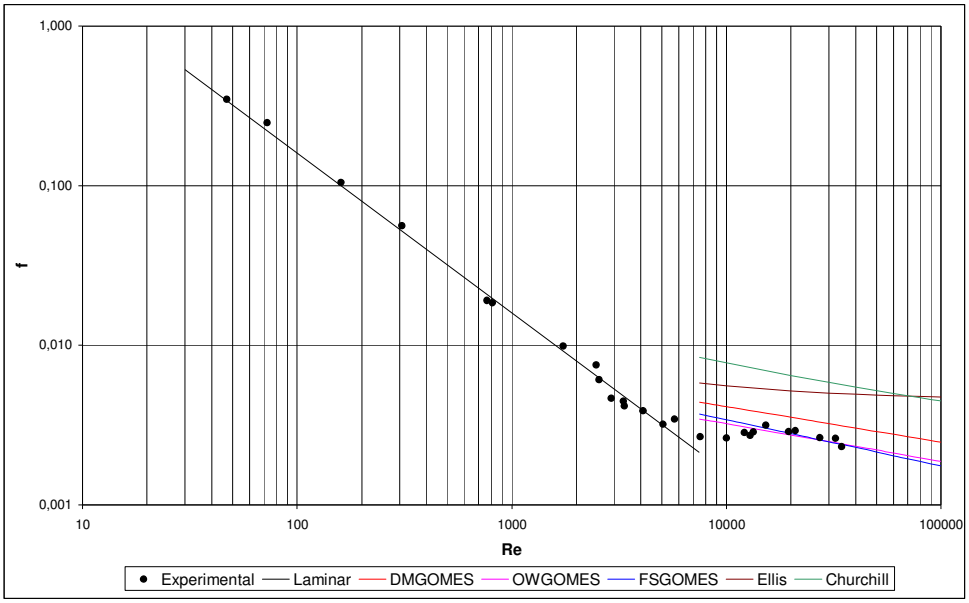

Figura 40: Diagrama de fator de atrito para o fluido 4 escoando no tubo circular.

Através deste gráfico nota-se que os dados experimentais no regime turbulento estão próximos das equações de Gomes (1987). Para demonstrar melhor, a figura 41 está em escala normal e representa apenas o regime turbulento.

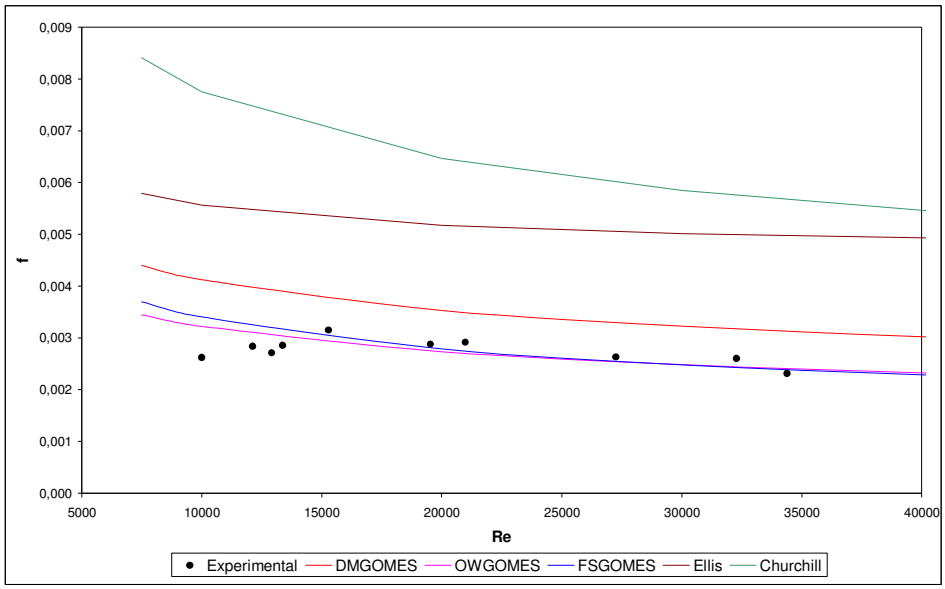

Figura 41: Dados experimentais do fluido 4 no regime turbulento escoando no tubo circular.

Para obter uma análise quantitativa, são calculados os desvios relativos dos dados experimentais em relação aos fornecidos pelas correlações de acordo com a equação 63. A figura 42 mostra os desvios relativos em função do fator de atrito obtido experimentalmente, logo, a correlação que apresentar os pontos mais próximos do valor 0 no eixo das ordenadas é a que melhor descreve o escoamento do fluido. Neste caso, a tabela 21 mostra os valores das médias dos desvios absolutos calculados para o tubo circular no regime laminar e para as equações de fator de atrito do regime turbulento.

$$Erro(\%) = \frac{f_{\exp} - f_{cor}}{f_{\exp}} \cdot 100 \qquad (63)$$

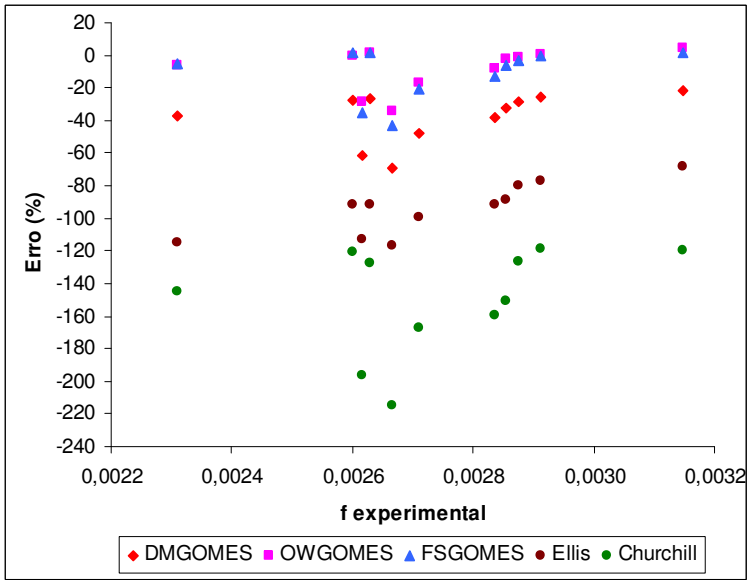

Figura 42: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo circular.

De acordo com as figuras 41 e 42 e a tabela 21, a equação OWGomes (1987) obtém os melhores resultados para descrever o fator de atrito no regime turbulento do escoamento do fluido 4 no tubo circular.

Tabela 21: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo circular.

Correlação para o fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
Regime laminar	8,46
DMGomes (1987)	37,89
OWGomes (1987)	9,39
FSGomes (1987)	11,95
Ellis e George (1977)	93,87
Churchill (1977)	149,67

A figura 43 mostra os resultados para os tubos anulares, a equação de diâmetro hidráulico utilizada para ambos os tubos é a D_{H1}. Para o tubo anular de razão de diâmetros de 2" e 3/4" só é possível analisar os dados do regime laminar, pois não há dados no regime turbulento.

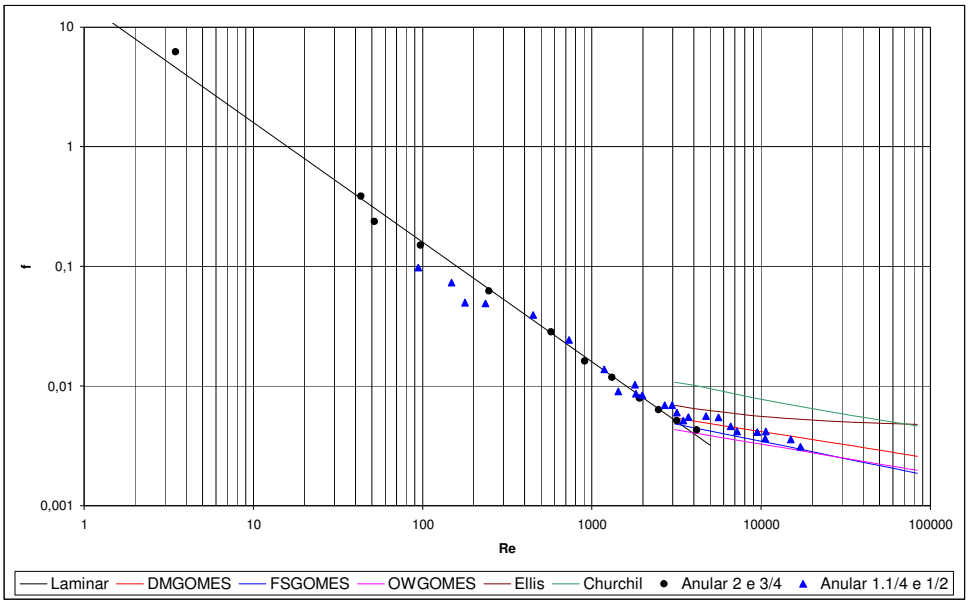

Figura 43: Diagrama de fator de atrito para o fluido 4 escoando nos tubos anulares.

Combinando a figura 43 com a figura 44, observa-se que a equação de DMGomes (1987) concentra os dados experimentais no regime turbulento.

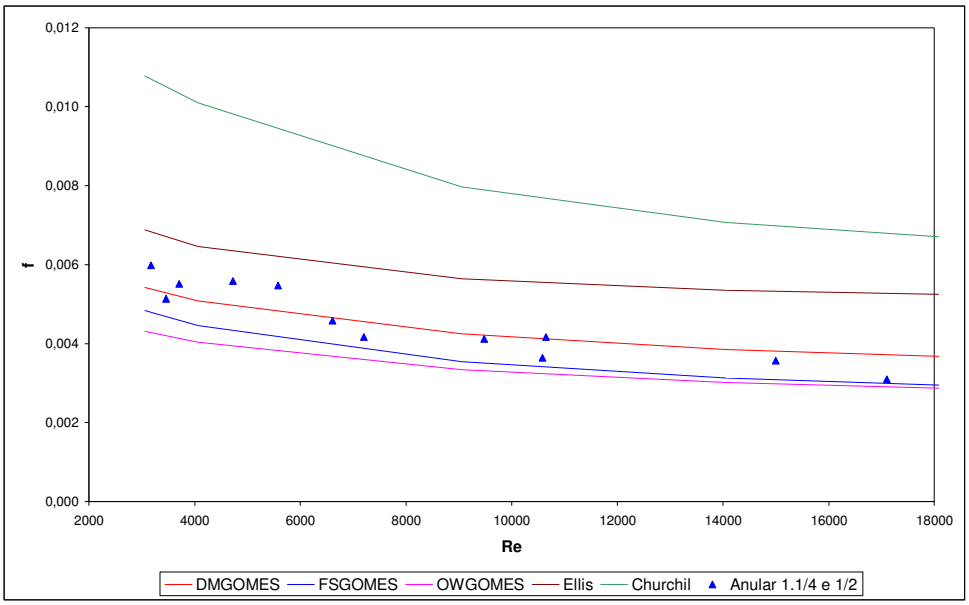

Figura 44: Dados experimentais do fluido 4 no regime turbulento escoando no tubo anular de 1 1/4" e 1/2" utilizando a equação D_{H1}.

A figura 45 mostra os desvios relativos em função do fator de atrito obtido experimentalmente.

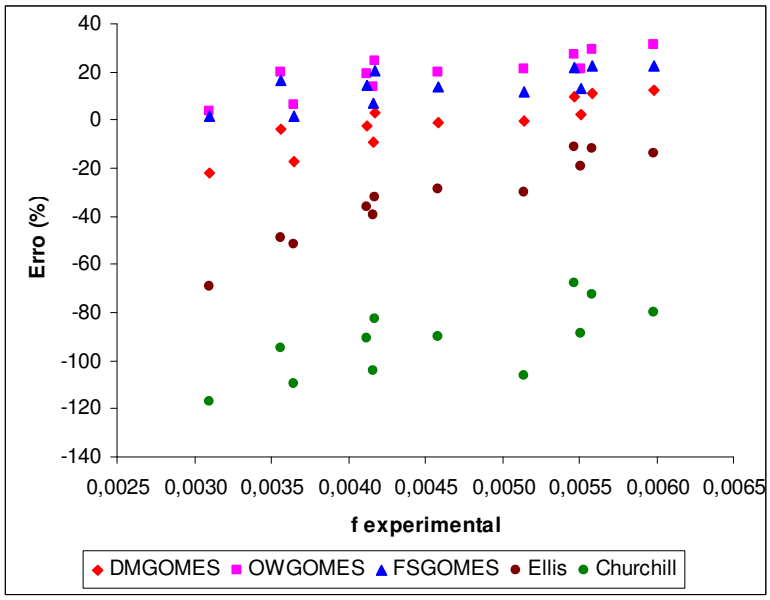

Figura 45: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 1 1/4" e 1/2".

A tabela 22 mostra os valores das médias dos desvios absolutos calculados para os tubos anulares no regime laminar e para as equações de fator de atrito do regime turbulento.

Tabela 22: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para os tubos anulares.

Geometria	Correlação para o fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
Anular de 1 1/4" e 1/2"	Regime laminar	16,93
	DMGomes (1987)	7,97
	OWGomes (1987)	19,71
	FSGomes (1987)	13,89
	Ellis e George (1977)	32,81
	Churchill (1977)	92,03
Anular de 2" e 3/4"	Regime laminar	9,06

De acordo com as figuras 44 e 45 e a tabela22, a equação DMGomes (1987) obtém os melhores resultados para descrever o fator de atrito no regime turbulento do escoamento do fluido 4 no tubo Anular de 1 1/4" e 1/2".

4.3.2 Avaliação de fator de atrito para o fluido 5 utilizando o modelo da potência

A avaliação das correlações de fator de atrito para o fluido 5 é realizada do mesmo modo que o fluido 4. A figura 46 mostra os resultados para o tubo circular.

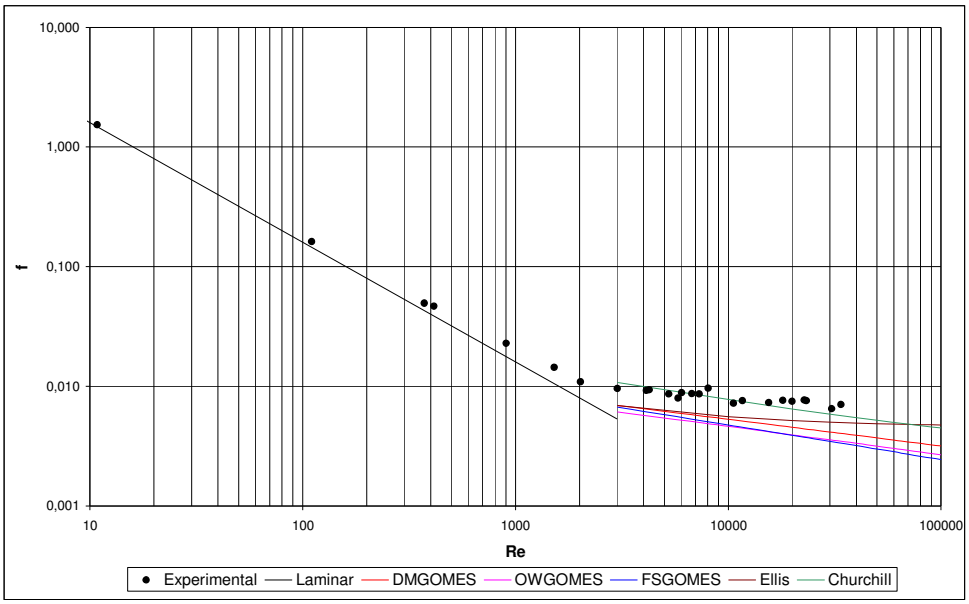

Figura 46: Diagrama de fator de atrito para o fluido 5 escoando no tubo circular.

Através deste gráfico é observado que os dados experimentais no regime turbulento estão próximos da equação de Churchill (1977), sendo demonstrado melhor na figura 47.

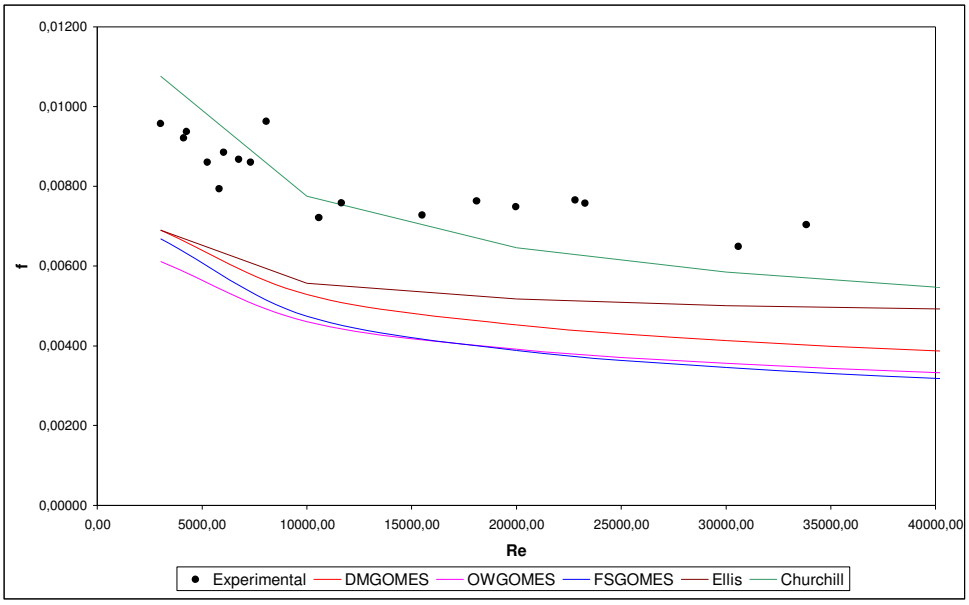

Figura 47: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo circular.

A figura 48 mostra os desvios relativos em função do fator de atrito obtido experimentalmente.

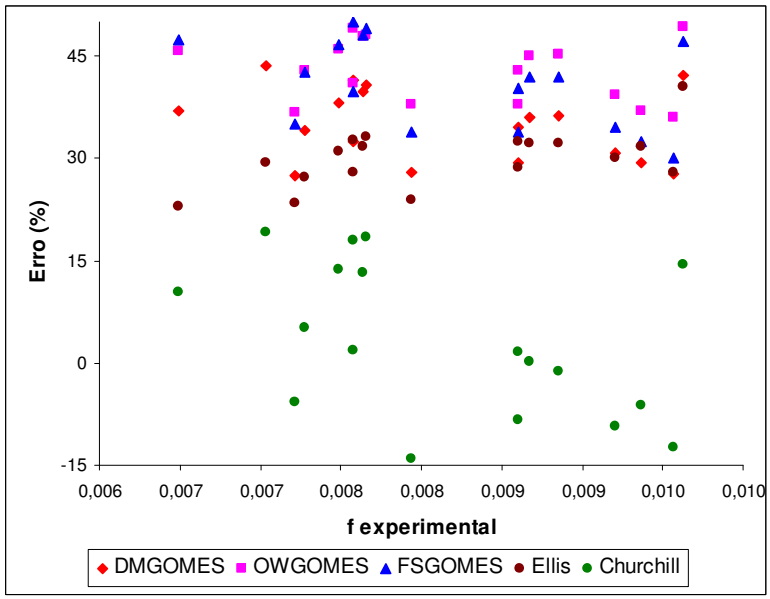

Figura 48: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo circular.

A tabela 23 mostra os valores das médias dos desvios absolutos calculados para o tubo circular no regime laminar e para as equações de fator de atrito do regime turbulento.

Tabela 23: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo circular.

Correlação para o fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
Regime laminar	17,46
DMGomes (1987)	33,69
OWGomes (1987)	42,09
FSGomes (1987)	39,75
Ellis e George (1977)	30,10
Churchill (1977)	8,97

De acordo com os resultados mostrados, observa-se que a equação de Churchill (1977) obtém os melhores resultados para descrever o fator de atrito no regime turbulento do escoamento do fluido 5 no tubo circular.

A figura 49 mostra os resultados para os tubos anulares, a equação de diâmetro hidráulico utilizada para ambos os tubos é a D_{H2}. Para analisar melhor os dados, os anulares são avaliados individualmente.

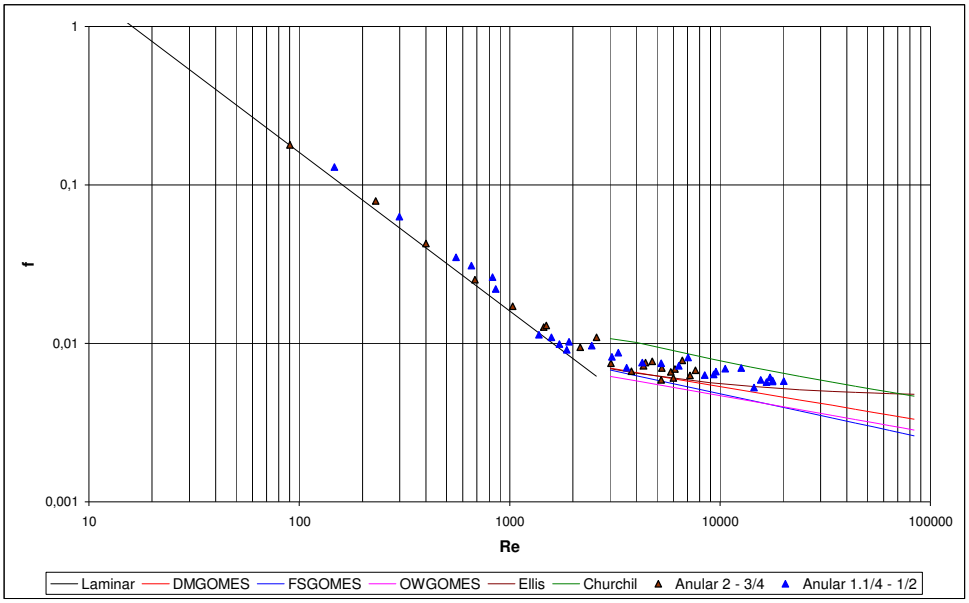

Figura 49: Diagrama de fator de atrito para o fluido 5 escoando nos tubos anulares.

De acordo com a figura 50, observa-se que os dados experimentais do tubo anular de 1 1/4" e 1/2" estão localizados entre as equações de DMGomes (1987), Churchill (1977) e Ellis e George (1977).

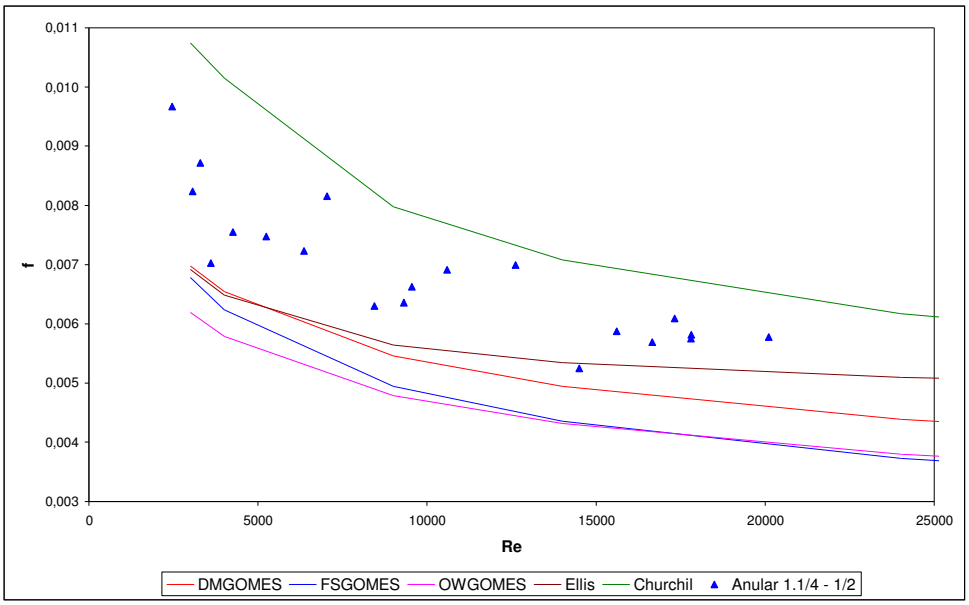

Figura 50: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo anular de 1 1/4" e 1/2".

A figura 51 mostra os desvios relativos em função do fator de atrito obtido experimentalmente.

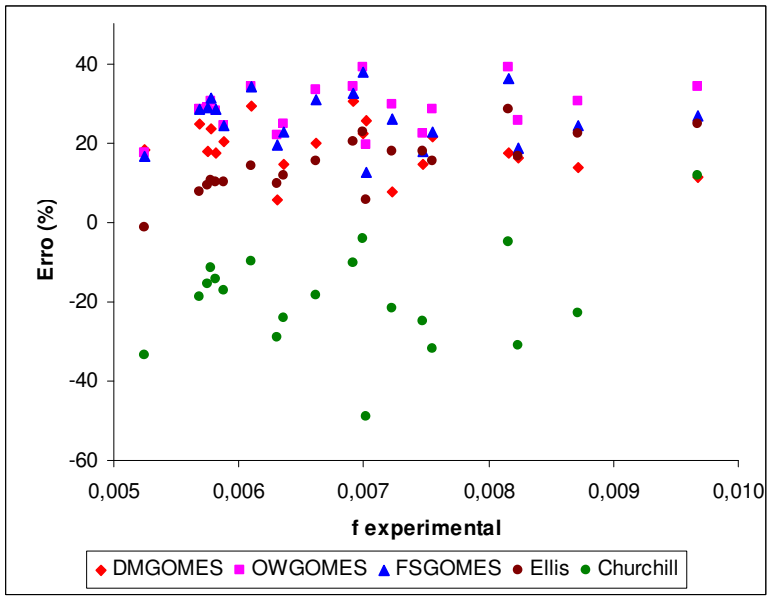

Figura 51: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 1 1/4" e 1/2".

A tabela 24 mostra os valores das médias dos desvios absolutos calculados para o tubo anular 1 1/4" e 1/2" no regime laminar e para as equações de fator de atrito do regime turbulento.

Tabela 24: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo anular 1 1/4" e 1/2".

Correlação para o fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
Regime laminar	13,73
DMGomes (1987)	18,59
OWGomes (1987)	28,66
FSGomes (1987)	25,99
Ellis e George (1977)	14,57
Churchill (1977)	20,29

De acordo com os resultados mostrados, a equação que melhor descreve o fator de atrito no regime turbulento do escoamento do fluido 5 no tubo anular 1 1/4" e 1/2" é a equação de Ellis e George (1977).

A figura 52 mostra os valores experimentais para o tubo anular de 2" e 3/4", evidenciando que os dados experimentais estão localizados entre as equações de DMGomes (1987), Churchill (1977) e Ellis e George (1977), assim como no tubo mostrado anteriormente.

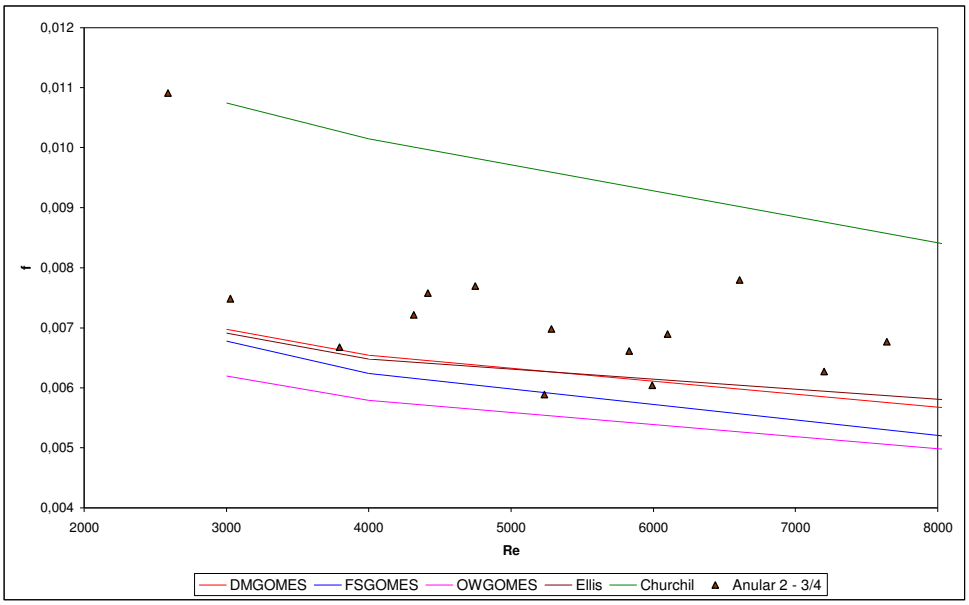

Figura 52: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo anular de 2" e 3/4".

A figura 53 mostra os desvios relativos em função do fator de atrito obtido experimentalmente.

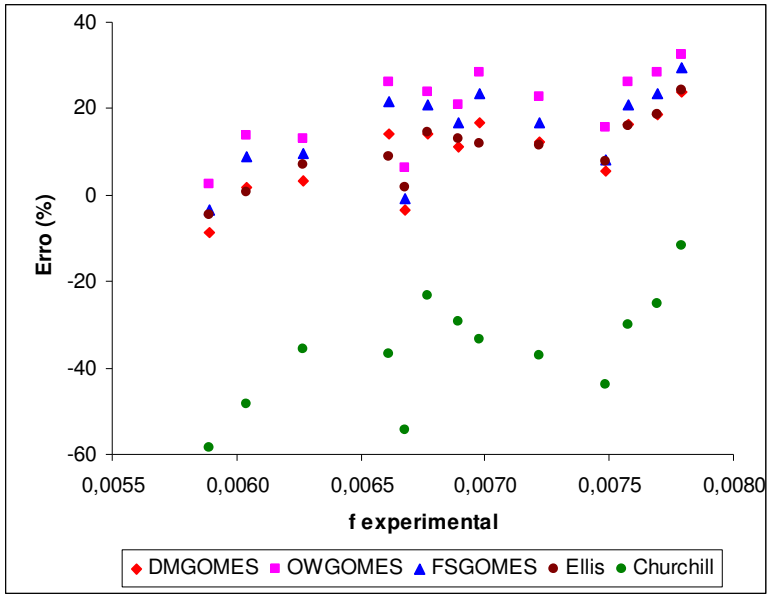

Figura 53 Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 2" e 3/4".

A tabela 25 mostra os valores das médias dos desvios absolutos calculados para o tubo anular 2" e 3/4" no regime laminar e para as equações de fator de atrito do regime turbulento.

Tabela 25: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo anular 2" e 3/4".

Correlação para o fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
Regime laminar	13,76
DMGomes (1987)	13,27
OWGomes (1987)	21,66
FSGomes (1987)	17,18
Ellis e George (1977)	12,53
Churchill (1977)	34,49

De acordo com os resultados mostrados, a equação que melhor descreve o fator de atrito no regime turbulento do escoamento do fluido 5 no tubo anular 2" e 3/4" é a equação de Ellis e George (1977), assim como o anular 1 1/4" e 1/2".

4.3.3 Avaliação de fator de atrito para o fluido 4 utilizando o modelo de Casson

Para o modelo de Casson, é utilizado o mesmo procedimento do modelo da potência. A avaliação das correlações de fator de atrito para o fluido 4 escoando no tubo circular se encontra na figura 54.

A fim de calcular o fator de atrito experimental, é utilizada a equação 24, que é função do número de Reynolds e do número de Hedstrom, por isso o fator de atrito teórico no regime laminar não é mais representado por uma reta, mas por pontos.

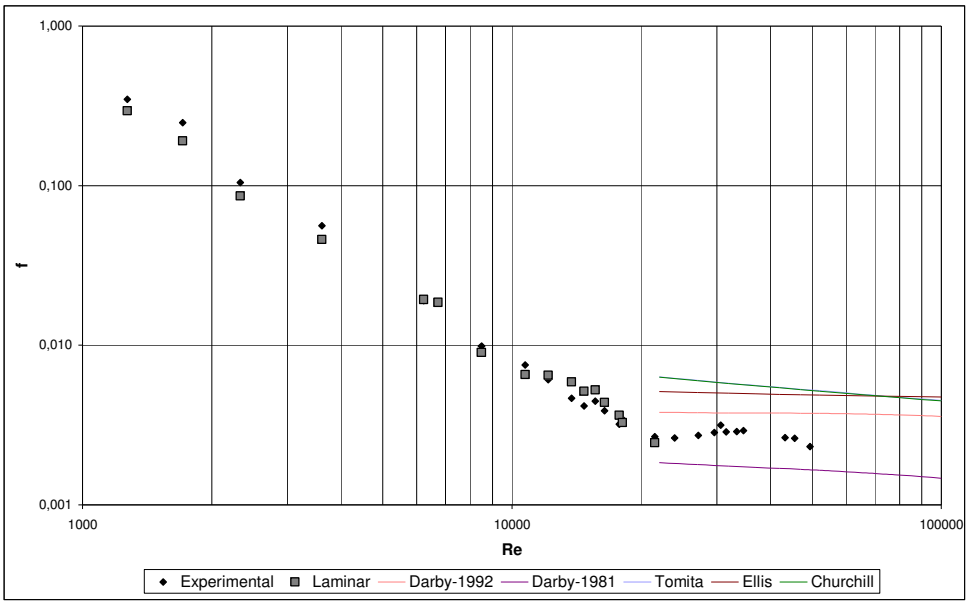

Figura 54: Diagrama de fator de atrito para o fluido 4 escoando no tubo circular.

De acordo com a figura 55, observa-se que os dados experimentais do tubo anular de 1 1/4" e 1/2" estão localizados entre as equações de Darby *et al* (1992) e Darby e Melson (1981).

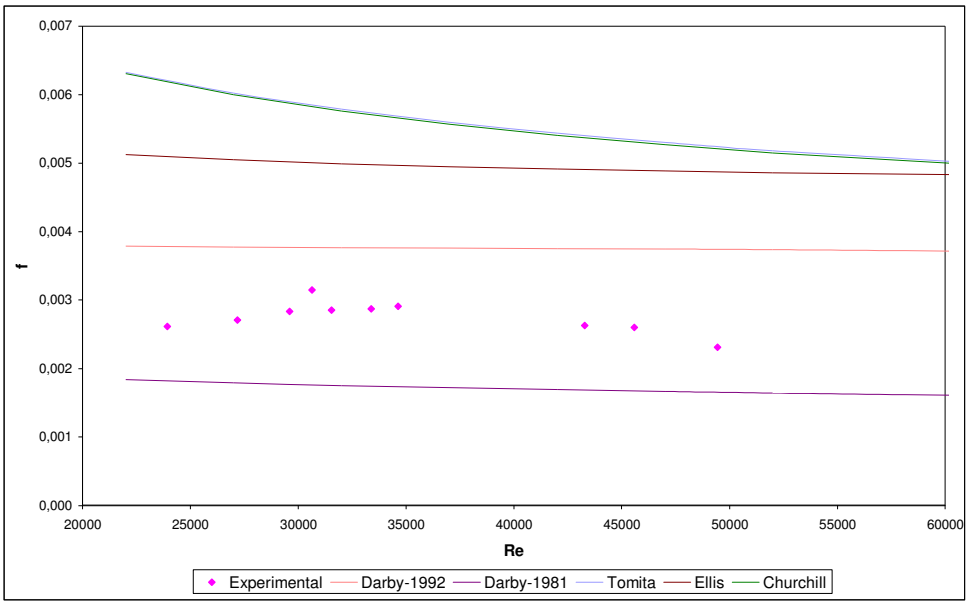

Figura 55: Dados experimentais do fluido 4 no regime turbulento escoando no tubo circular.

A figura 56 mostra os desvios relativos em função do fator de atrito obtido experimentalmente.

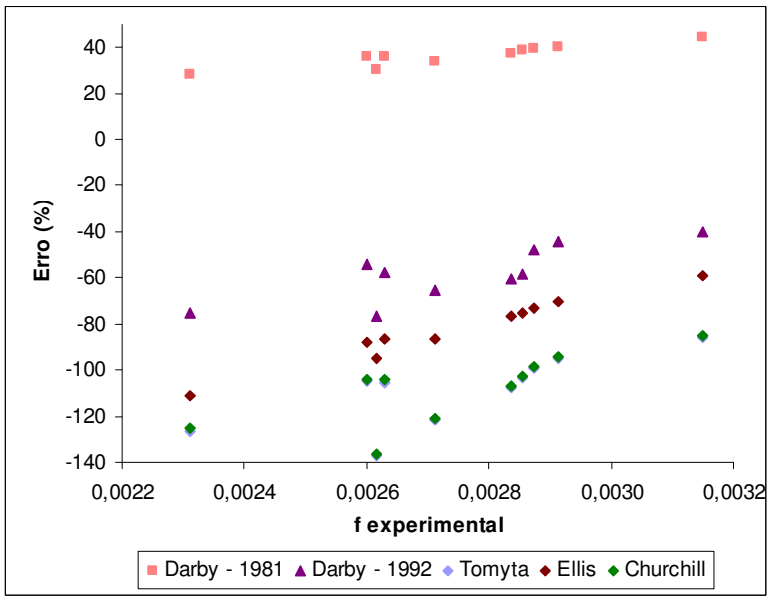

Figura 56: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo circular.

A tabela 26 mostra os valores das médias dos desvios absolutos calculados para o tubo circular no regime laminar e para as equações de fator de atrito do regime turbulento.

Tabela 26: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo circular.

Correlação para o fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
Regime laminar	13,35
Tomita (1959)	108,71
Darby e Melson (1981)	36,40
Darby *et al* (1992)	58,02
Ellis e George (1977)	82,13
Churchill (1977)	107,67

De acordo com os resultados mostrados, nenhuma das equações foi eficaz para descrever o fator de atrito no regime turbulento para o tubo circular. A equação que obtém os menores desvios para o fator de atrito é a equação de Darby e Melson (1981).

A figura 57 mostra os resultados para o tubo anular 1 1/4" e 1/2", a equação de diâmetro hidráulico utilizada é a D_{H2}.

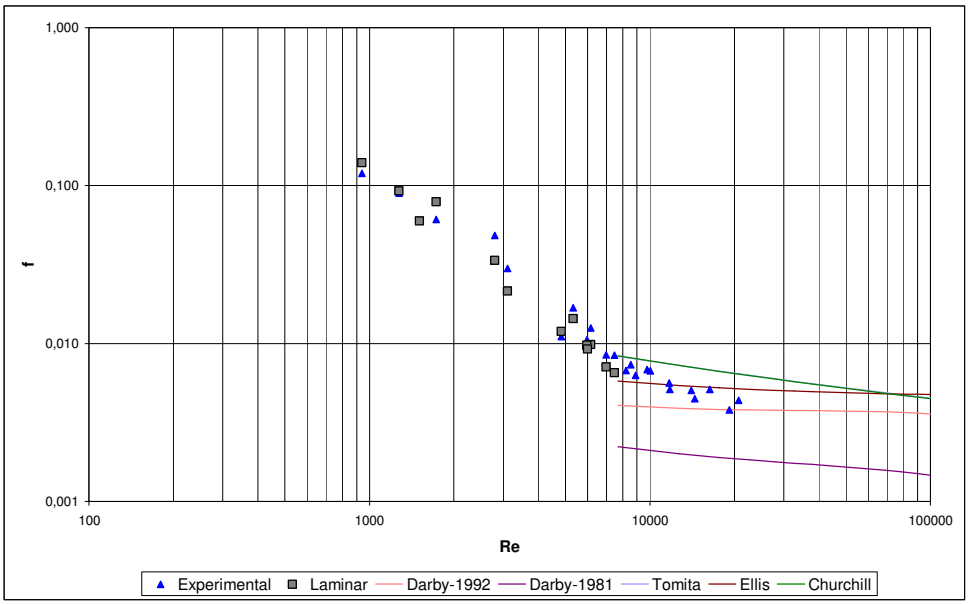

Figura 57: Diagrama de fator de atrito para o tubo anular de 1 1/4" e 1/2".

Observando a figura 58, pode-se destacar que os pontos experimentais do tubo anular de 1 1/4" e 1/2" estão localizados entre as equações de Darby *et al* (1992) e Ellis e George (1977).

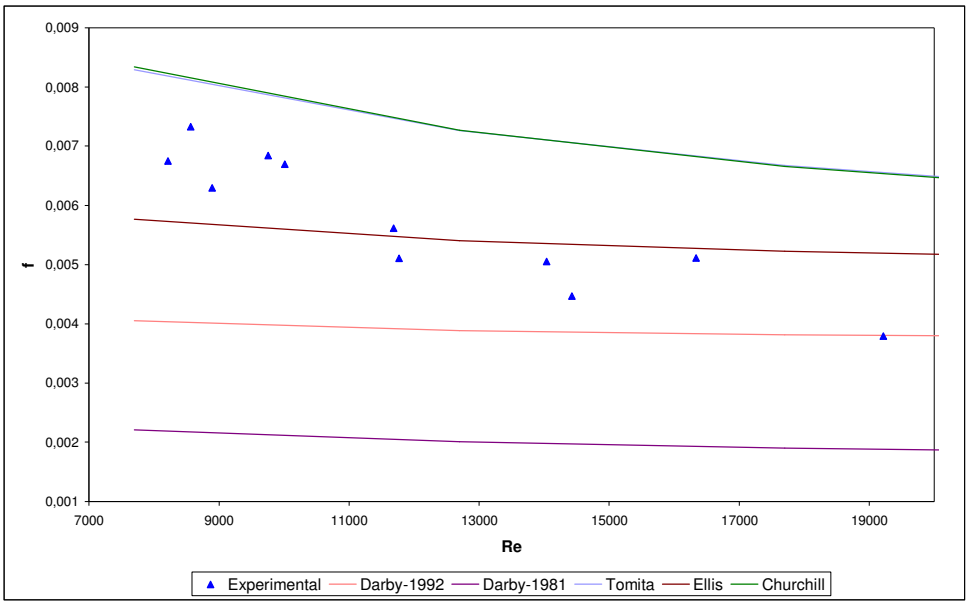

Figura 58: Dados experimentais do fluido 4 no regime turbulento escoando no tubo anular de 1 1/4" e 1/2".

A figura 59 mostra os desvios relativos em função do fator de atrito obtido experimentalmente.

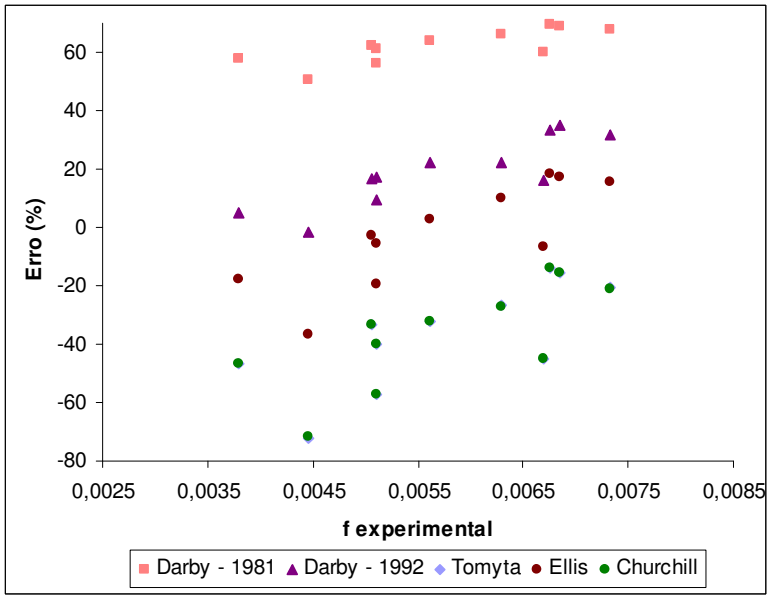

Figura 59: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 1 1/4" e 1/2".

A tabela 27 mostra os valores das médias dos desvios absolutos calculados para o tubo anular 1 1/4" e 1/2" no regime laminar e para as equações de fator de atrito do regime turbulento.

Tabela 27: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo anular 1 1/4" e 1/2".

Geometria	Correlação para o fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
Anular de 1 1/4" e 1/2"	Regime laminar	15,78
	Tomita (1959)	34,41
	Darby e Melson (1981)	62,78
	Darby *et al* (1992)	20,30
	Ellis e George (1977)	14,66
	Churchill (1977)	34,56
Anular de 2" e 3/4"	Regime laminar	11,47

De acordo com os resultados mostrados, a correlação que obtém os menores desvios para o fator de atrito é a equação de Ellis e George (1977).

Para o tubo anular de razão de diâmetros de 2" e 3/4"só é possível analisar os dados do regime laminar, pois não há dados no regime turbulento.

4.3.4 Avaliação de fator de atrito para o fluido 5 utilizando o modelo de Casson

A avaliação das correlações para o fluido 5 utiliza o mesmo procedimento que o fluido 4 e a figura 60 mostra os resultados para o fluido escoando no tubo circular.

De acordo com a figura 61, observa-se que os dados experimentais do tubo anular de 1 1/4" e 1/2" estão acima das equações de Tomita (1959) e Churchill (1977).

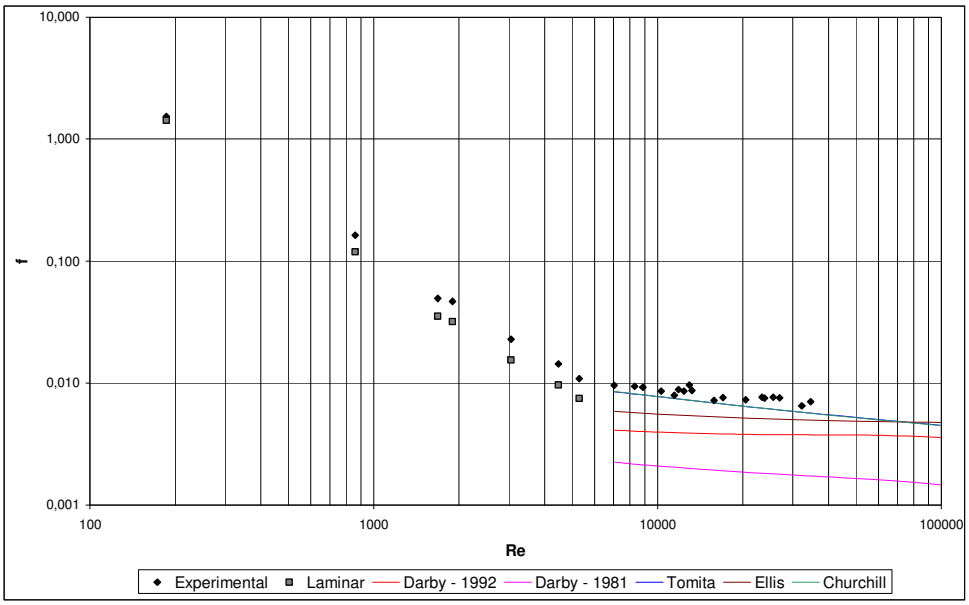

Figura 60: Diagrama de fator de atrito para o fluido 5 escoando no tubo circular.

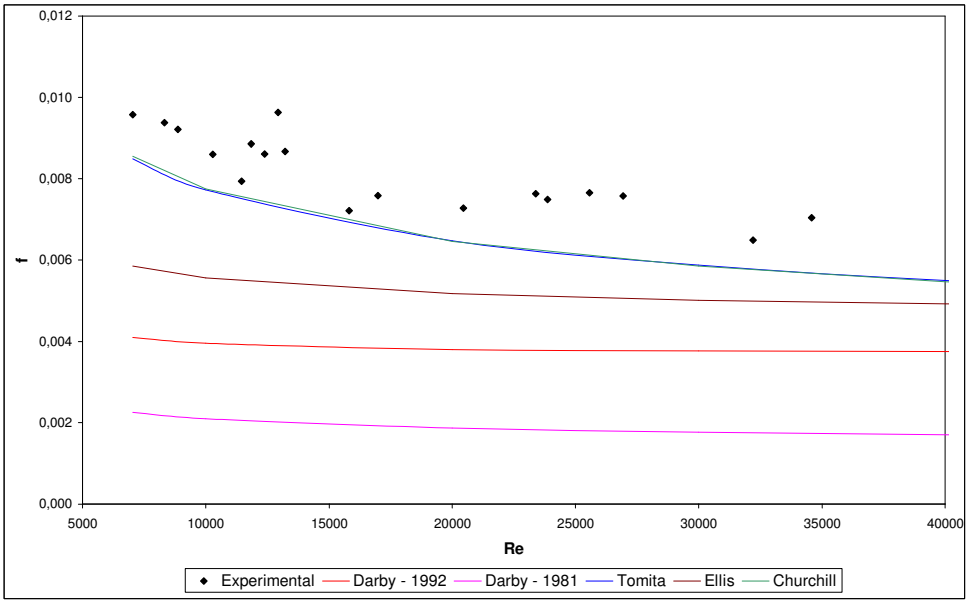

Figura 61: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo circular.

A figura 62 mostra os desvios relativos em função do fator de atrito obtido experimentalmente.

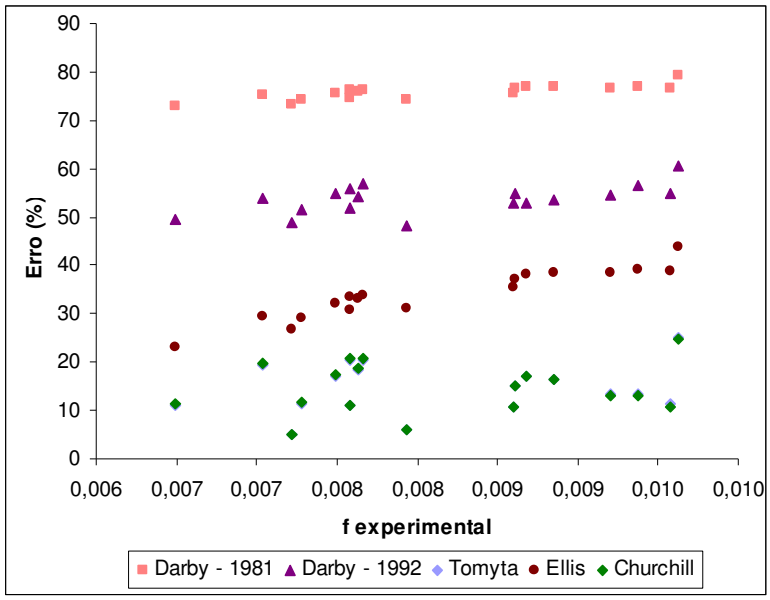

Figura 62: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo circular.

A tabela 28 mostra os valores das médias dos desvios absolutos calculados para o tubo circular no regime laminar e para as equações de fator de atrito do regime turbulento.

Tabela 28: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo circular.

Correlação para o fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
Regime laminar	27,30
Tomita (1959)	13,92
Darby e Melson (1981)	75,95
Darby *et al* (1992)	53,80
Ellis e George (1977)	34,86
Churchill (1977)	13,87

De acordo com os resultados mostrados, as correlações de Churchill (1977) e Tomita (1959) são equivalentes e obtém os menores desvios para o fator de atrito.

A figura 63 mostra os resultados para o tubo anular 1 1/4" e 1/2", a equação de diâmetro hidráulico utilizada é a D_{H2}.

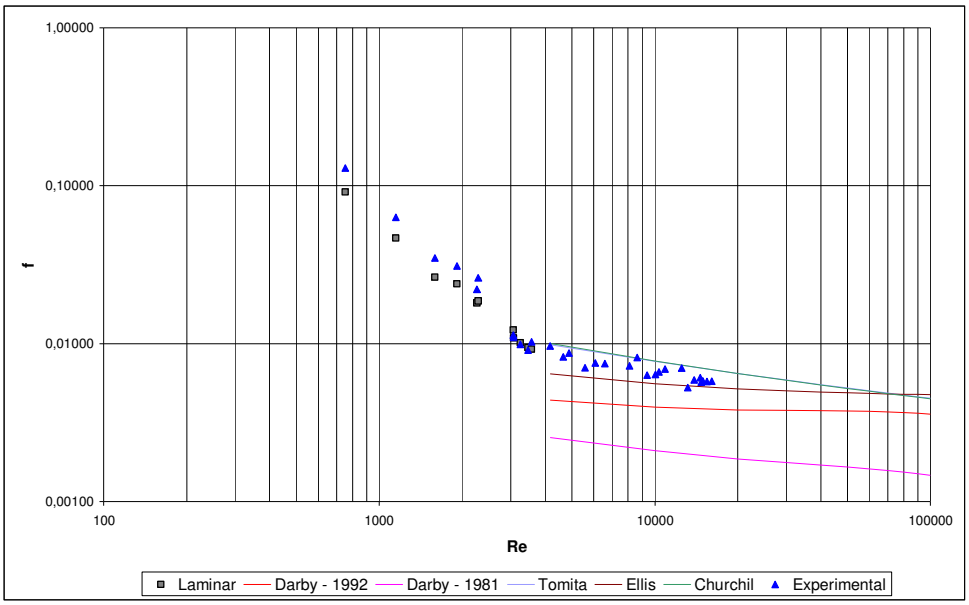

Figura 63: Diagrama de fator de atrito para o fluido 5 escoando no tubo anular de 1 1/4" e 1/2".

De acordo com a figura 64, os pontos experimentais se encontram entre as equações de Churchil, Tomita (1959) e Ellis e George (1977).

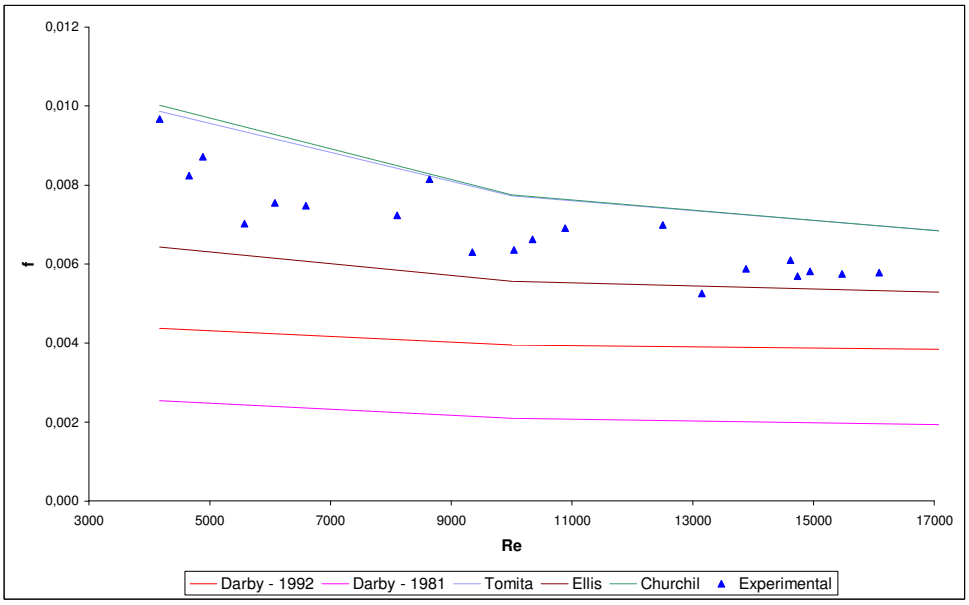

Figura 64: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo anular de 1 1/4" e 1/2".

A figura 65 mostra os desvios relativos em função do fator de atrito obtido experimentalmente.

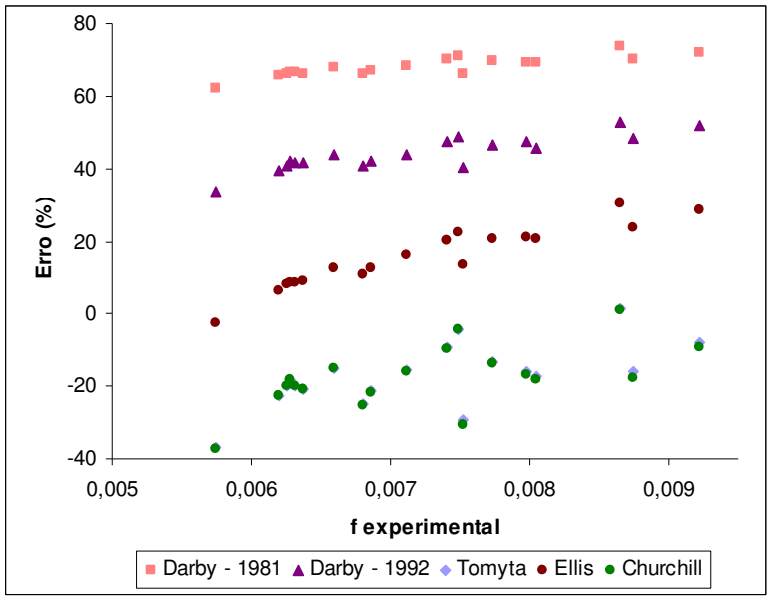

Figura 65: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 1 1/4" e 1/2".

A tabela 29 mostra os valores das médias dos desvios absolutos calculados para o tubo anular 1 1/4" e 1/2" no regime laminar e para as equações de fator de atrito do regime turbulento.

Tabela 29: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo anular 1 1/4" e 1/2".

Correlação para o fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
Regime laminar	15,85
Tomita (1959)	16,57
Darby e Melson (1981)	68,41
Darby *et al* (1992)	44,69
Ellis e George (1977)	16,56
Churchill (1977)	17,03

De acordo com os resultados mostrados, as correlações de Tomita (1959), Ellis e George (1977) e Churchill (1977) obtêm as médias dos desvios absolutos muito próximas, sendo que a equação de Ellis e George (1977) é a que possui menores desvios.

A figura 66 mostra os resultados para o tubo anular 2" e 3/4", a equação de diâmetro hidráulico utilizada é a D_{H1}.

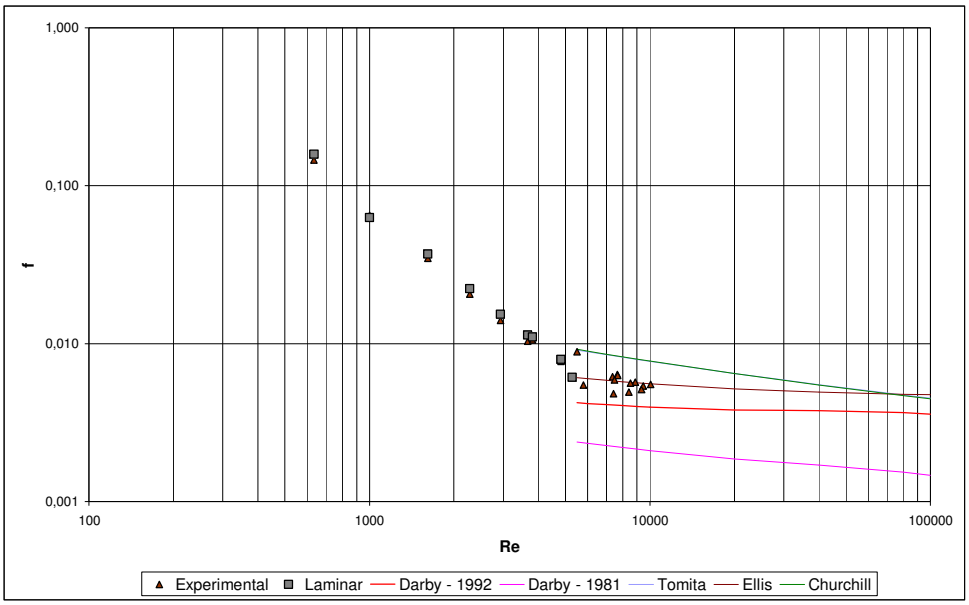

Figura 66: Diagrama de fator de atrito para o tubo anular de 2" e 3/4".

A figura 67 mostra que os pontos experimentais estão localizados próximos a curva gerada pela equação de Ellis e George (1977).

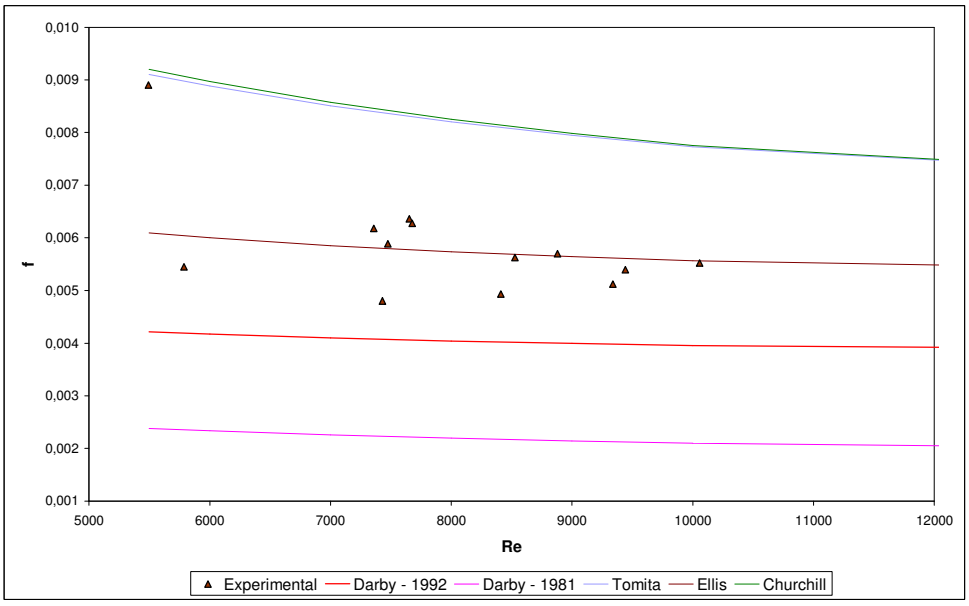

Figura 67: Dados experimentais do fluido 5 no regime turbulento escoando no tubo anular de 2" e 3/4".

A figura 68 mostra os desvios relativos em função do fator de atrito obtido experimentalmente.

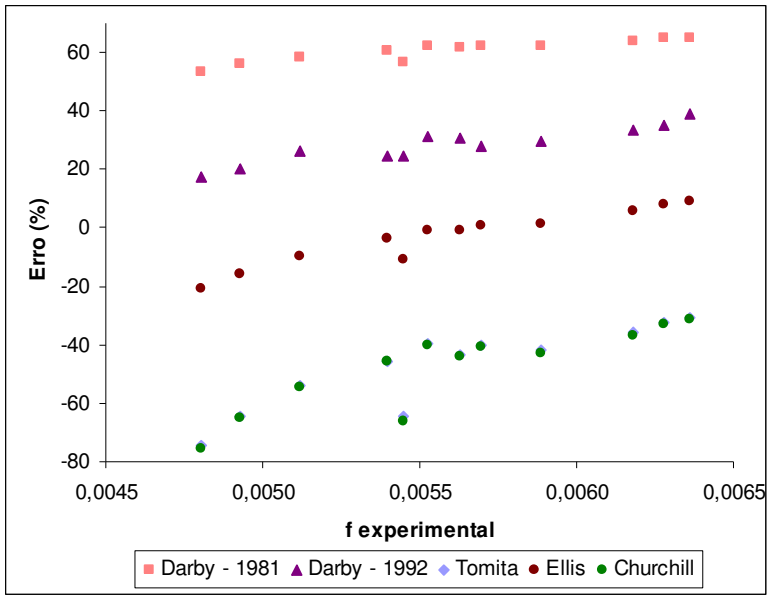

Figura 68: Avaliação dos desvios das correlações no regime turbulento para o tubo anular de 2" e 3/4".

A tabela 30 mostra os valores das médias dos desvios absolutos calculados para o tubo anular 2" e 3/4" no regime laminar e para as equações de fator de atrito do regime turbulento.

Tabela 30: Média dos desvios absolutos das equações de fator de atrito para o tubo anular 2" e 3/4".

Correlação para o fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
Regime laminar	5,17
Tomita (1959)	43,70
Darby e Melson (1981)	61,60
Darby *et al* (1992)	30,08
Ellis e George (1977)	9,19
Churchill (1977)	44,54

De acordo com os resultados mostrados, a correlação de Ellis e George (1977) obtém a menor média dos desvios absolutos, indicando ser uma boa correlação.

4.3.5 Resumo dos Resultados Obtidos

A tabela 31 mostra os melhores resultados obtidos das equações de fator de atrito para os fluidos estudados.

Tabela 31: Melhores resultados obtidos para as equações de fator de atrito no regime turbulento.

Fluido	Modelo Reológico	Geometria	Melhor equação de fator de atrito	Média dos desvios absolutos (%)
4	potência	Circular	OWGomes (1987)	9,39
		Anular 1 1/4" e 1/2" com D_{H1}	DMGomes (1987)	7,97
	Casson	Circular	Darby e Melson (1981)	36,40
		Anular 1 1/4" e 1/2" com D_{H2}	Ellis e George (1977)	14,66
5	potência	Circular	Churchill (1977)	8,97
		Anular 1 1/4" e 1/2" com D_{H2}	Ellis e George (1977)	14,57
		Anular 2" e 3/4" com D_{H2}	Ellis e George (1977)	12,53
	Casson	Circular	Churchill (1977)	13,87
		Anular 1 1/4" e 1/2" com D_{H2}	Ellis e George (1977)	16,56
		Anular 2" e 3/4" com D_{H1}	Ellis e George (1977)	9,19

Observando os resultados, pode-se notar que as equações de fator de atrito com menores desvios para o tubo circular não tem os menores desvios para os tubos anulares com um mesmo fluido utilizando o mesmo modelo reológico. Tal comportamento explica-se pelo fato das equações de fator de atrito não levarem em consideração a geometria do tubo diretamente, mas todas são funções do número de Reynolds que é fortemente dependente da equação de diâmetro hidráulico utilizada, gerando essa diferença nos resultados para os tubos.

Pode-se observar que o fluido 5 é o que gera maior perda de carga escoando, pois as correlações que tem menores erros são as de Ellis e George (1977) e Churchill (1977), dependendo da geometria, as quais possuem os maiores valores de fator de atrito. O fluido 4 por sua vez gera menor perda de carga, já que as equações de fator de atrito mais eficazes são as que produzem menores valores para o fator de atrito.

Comparando os valores das médias dos desvios no cálculo do fator de atrito no regime turbulento utilizando o modelo da potência e Casson para os fluidos 4 e 5, observa-se que o modelo reológico da potência tem menores desvios percentuais, exceto no tubo anular 2" e 3/4".

Uma das razões para a escolha do modelo de Casson é a presença do parâmetro limite de escoamento. É interessante observar que as correlações de fator de atrito que obtiveram os menores erros para este modelo são as que não apresentam o número de Hedstrom em sua estrutura, o que indica que o limite de escoamento do fluido não é significante para avaliação do fator de atrito.

4.4 Proposta de Novas Correlações Para o Cálculo de Fator de Atrito

A fim de obter melhores resultados para o cálculo do fator de atrito no regime turbulento, é proposto calcular novos parâmetros para uma das correlações utilizadas. A equação de Ellis e George (1977) é a escolhida, pois de forma geral é a que mais se adequa aos fluidos estudados e tem uma forma muito simples conforme demonstra a equação 64, onde A, B e C são seus parâmetros.

$$f = A + B \cdot \mathrm{Re}^{C} \tag{64}$$

A reestimação dos parâmetros foi feita utilizando o software estatístico *Statistica*, onde é feita uma regressão não linear dos dados utilizando o método dos mínimos quadrados.

As avaliações das novas correlações são realizadas do mesmo modo que as correlações antigas, onde as novas equações calculam o valor do fator de atrito e determina-se o desvio em relação ao dado experimental.

4.4.1 Resultados do Fluido 4 utilizando o modelo da potência

As figuras 69 e 70 mostram os dados experimentais de fator de atrito e a reta vermelha indica os dados previstos pelas novas correlações para o fluido 4 utilizando o modelo da potência.

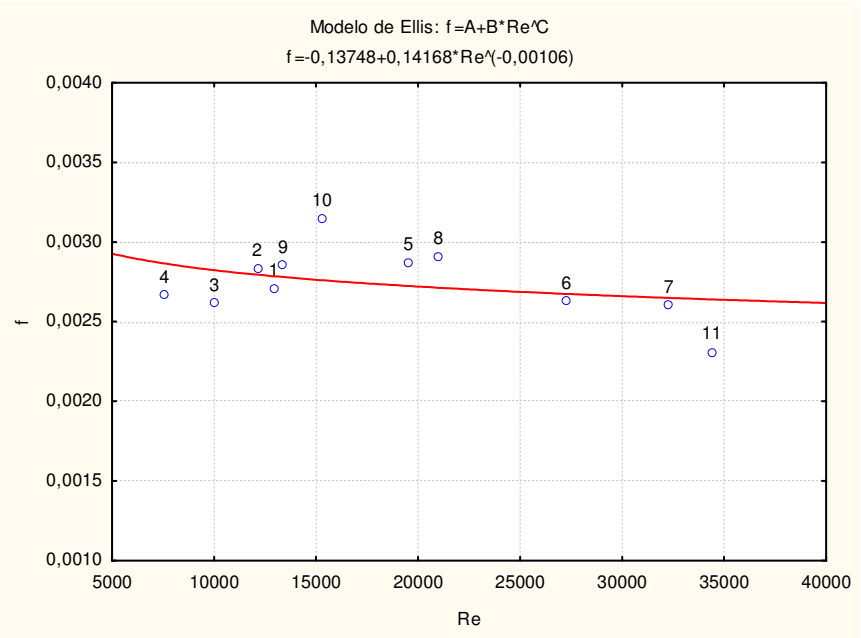

Figura 69: Dados experimentais do fluido 4 no tubo circular usando modelo da potência com nova correlação.

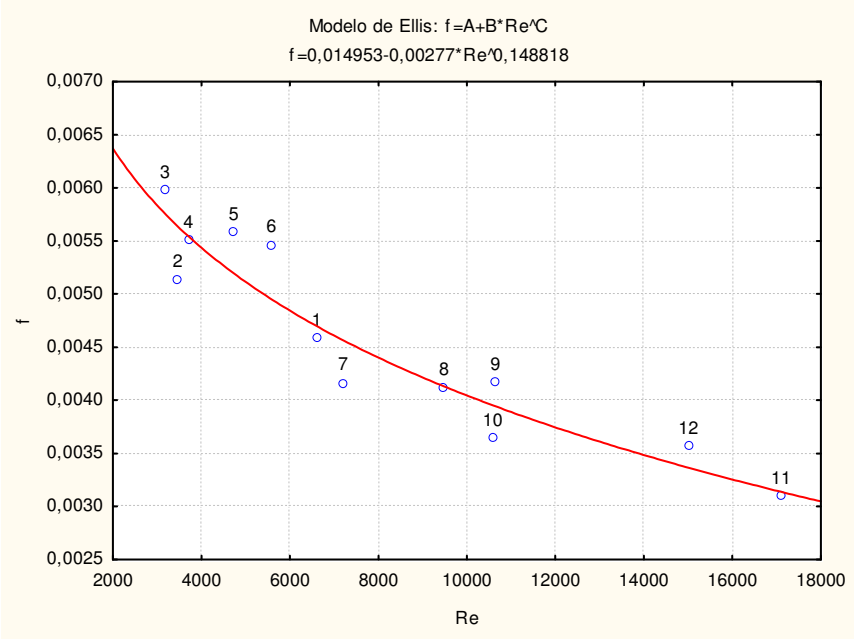

Figura 70: Dados experimentais do fluido 4 no tubo anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H1}) usando modelo da potência com nova correlação.

A tabela 32 mostra os valores dos parâmetros reestimados, a faixa de Reynolds em que foram obtidos os parâmetros da correlação, a média dos desvios absolutos dos dados de fator de atrito calculados com os novos parâmetros e a média dos desvios absolutos com a melhor correlação obtida anteriormente. Pode-se observar que com os novos parâmetros, há uma melhora nos resultados, pois para ambos os casos verificam-se uma redução na média dos desvios absolutos.

É interessante observar que os parâmetros calculados para o tubo circular são completamente diferentes dos calculados para o tubo anular.

Tabela 32: Parâmetros da nova correlação e média dos desvios absolutos para o fluido 4 utilizando o modelo da potência.

Geometria	Parâmetro			Média dos desvios absolutos da nova correlação (%)	Média dos desvios absolutos da melhor correlação (%)	Faixa de Reynolds
	A	B	C			
Circular	0,137	0,142	-0,00106	5,86	9,39	7556-34391
Anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H1})	0,0150	-0,00277	0,149	5,30	7,73	3176-17098

4.4.2 Resultados do Fluido 5 utilizando o modelo da potência

Para analisar as novas correlações do fluido 5 utilizando o modelo da potência, as figuras 71, 72 e 73 mostram os dados experimentais de fator de atrito e os dados previstos pelas novas correlações.

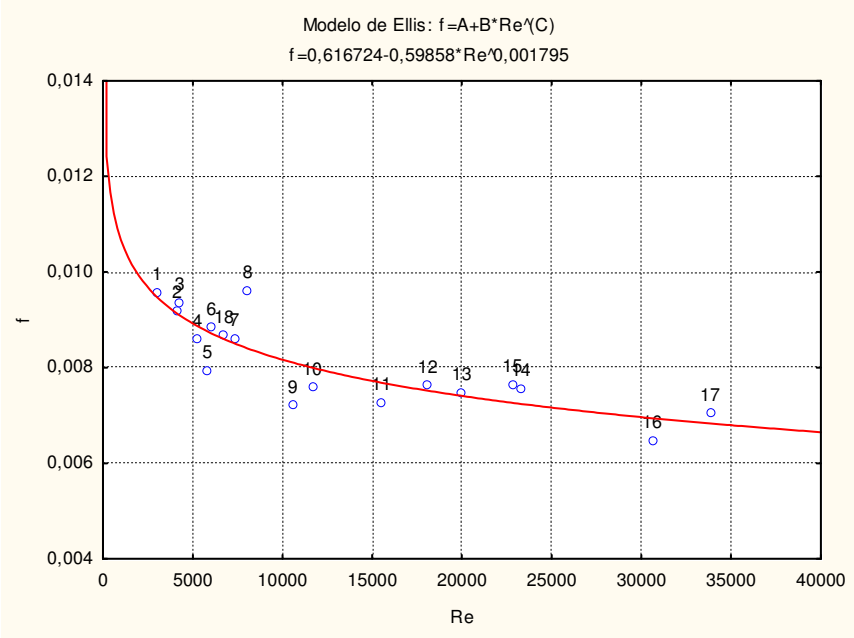

Figura 71: Dados experimentais do fluido 5 no tubo circular usando modelo da potência com nova correlação.

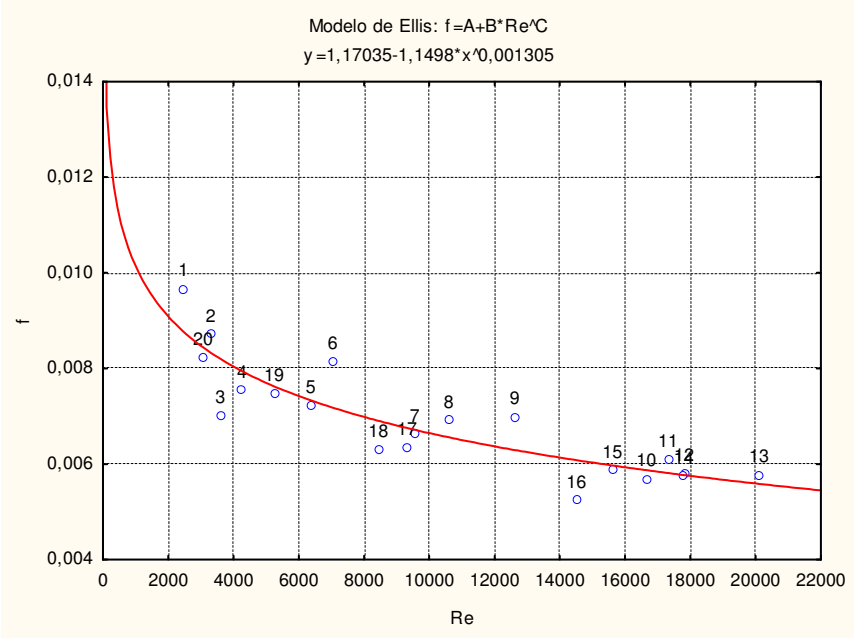

Figura 72: Dados experimentais do fluido 5 no tubo anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H2}) usando modelo da potência com nova correlação.

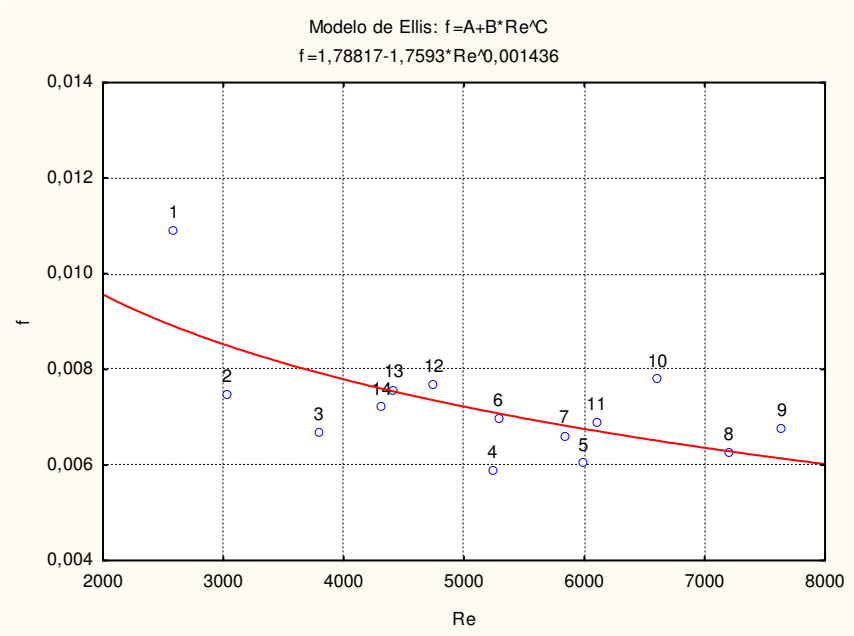

Figura 73: Dados experimentais do fluido 5 no tubo anular 2" e 3/4" (D_{H2}) usando modelo da potência com nova correlação.

A tabela 33 mostra os valores dos parâmetros reestimados e a média dos desvios absolutos dos dados de fator de atrito calculados com os novos parâmetros. Os menores desvios das correlações avaliadas anteriormente são 8,97%, 14,57% e 12,53% para os tubos circular, Anular 1 1/4" e 1/2" e Anular 2" e 3/4" respectivamente. Com as novas correlações os desvios são menores identificando melhora nos resultados obtidos.

Observa-se neste caso, que mudando a geometria dos tubos, os parâmetros reestimados têm valores próximos.

Tabela 33: Parâmetros da nova correlação e média dos desvios absolutos para o fluido 5 utilizando o modelo da potência.

Geometria	Parâmetro			Média dos desvios absolutos da nova correlação (%)	Média dos desvios absolutos da melhor correlação (%)	Faixa de Reynolds
	A	B	C			
Circular	0,617	-0,599	0,00180	4,58	8,97	3018-33826
Anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H2})	1,17	-1,15	0,00130	5,88	14,57	2457-20103
Anular 2" e 3/4" (D_{H2})	1,79	-1,76	0,00144	9,06	12,53	2588-7641

4.4.3 Resultados do Fluido 4 utilizando o modelo de Casson

As figuras 74 e 75 mostram os dados experimentais de fator de atrito e os dados previstos pelas novas correlações para analisar os resultados do fluido 4 utilizando o modelo de Casson.

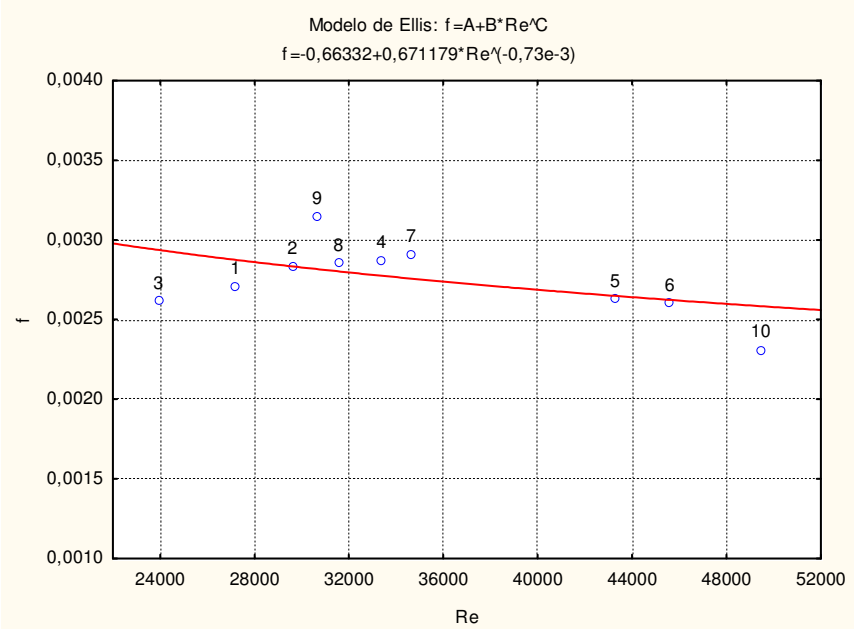

Figura 74: Dados experimentais do fluido 4 no tubo circular usando modelo de Casson com nova correlação.

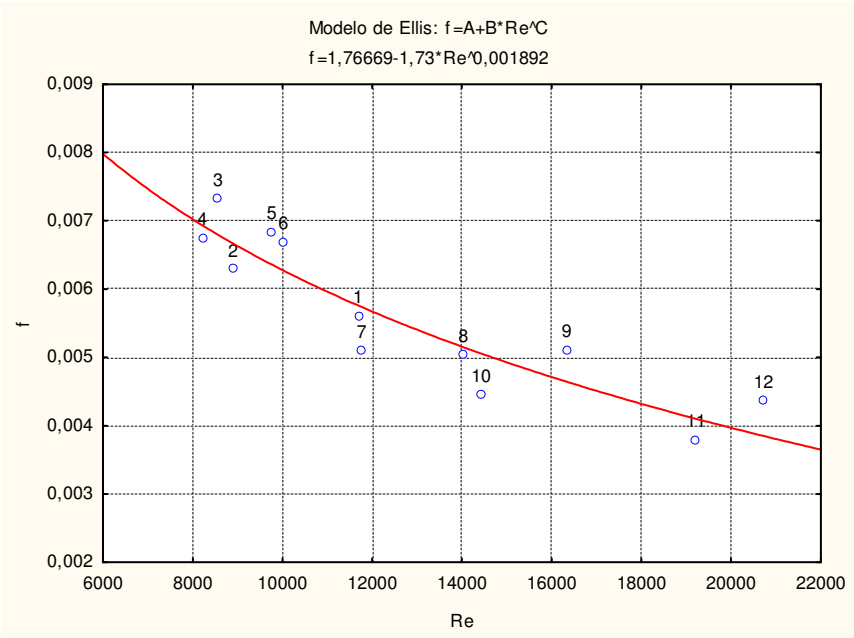

Figura 75: Dados experimentais do fluido 4 no tubo anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H2}) usando modelo de Casson com nova correlação.

A tabela 34 mostra os valores dos parâmetros reestimados e a média dos desvios absolutos dos dados de fator de atrito calculados com os novos parâmetros.

Tabela 34: Parâmetros da nova correlação e média dos desvios absolutos para o fluido 4 utilizando o modelo de Casson.

Geometria	Parâmetro			Média dos desvios absolutos da nova correlação (%)	Média dos desvios absolutos da melhor correlação (%)	Faixa de Reynolds
	A	B	C			
Circular	-0,663	0,671	-0,000730	5,30	36,40	23929-49445
Anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H2})	1,77	-1,73	0,00189	7,37	14,66	8212-20718

Para o tubo circular no regime turbulento, nenhuma das equações de fator de atrito obtém valores satisfatórios, a menor média dos desvios é 36,40%, com novos parâmetros na equação de Ellis e George (1977) a média dos desvios é 5,30%.

Para o tubo anular, a melhor equação foi a de Ellis e George (1977) com desvios de 14,66% obtendo uma redução para 7,37% com a obtenção dos novos parâmetros.

Vale ressaltar que os parâmetros obtidos para o tubo circular diferem bastante dos obtidos para o tubo anular, assim como para os obtidos para o modelo reológico da potência.

4.4.4 Resultados do Fluido 5 utilizando o modelo de Casson

Os resultados do Fluido 5 utilizando o modelo de Casson são mostrados nas figuras 76, 77 e 78.

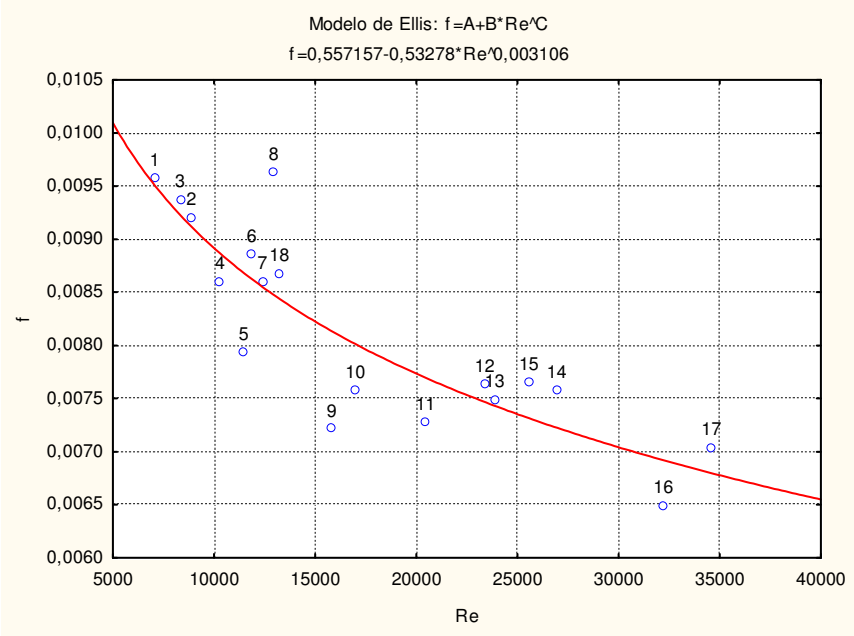

Figura 76: Dados experimentais do fluido 5 no tubo circular usando modelo de Casson com nova correlação.

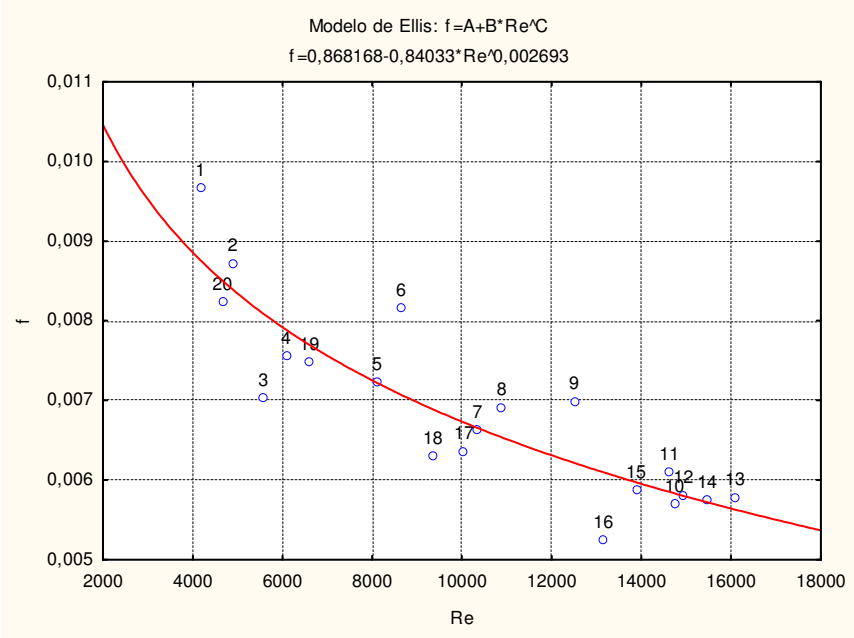

Figura 77: Dados experimentais do fluido 5 no tubo anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H2}) usando modelo de Casson com nova correlação.

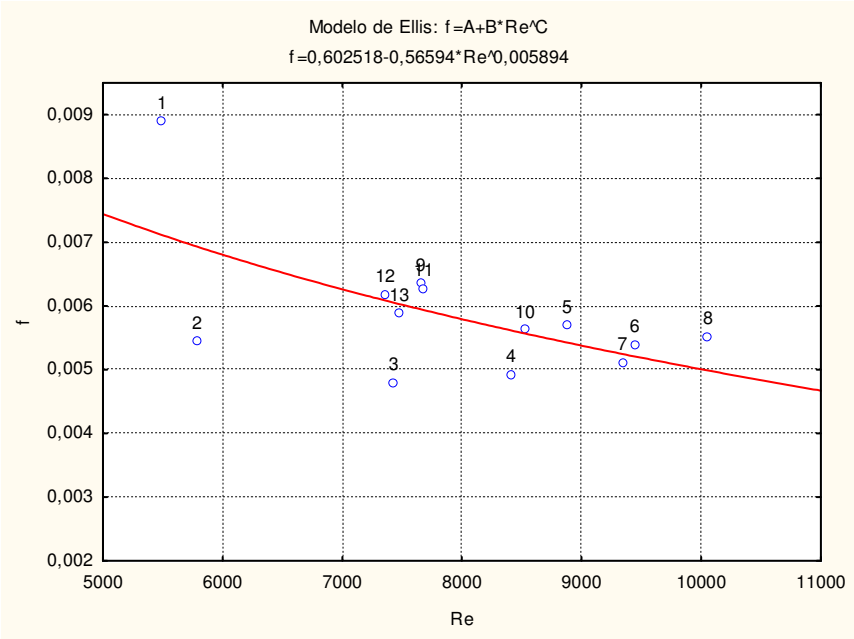

Figura 78: Dados experimentais do fluido 5 no tubo anular 2" e 3/4" (D_{H1}) usando modelo de Casson com nova correlação.

A tabela 35 mostra os valores dos parâmetros reestimados e a média dos desvios absolutos dos dados de fator de atrito calculados com os novos parâmetros.

Tabela 35: Parâmetros da nova correlação e média dos desvios absolutos para o fluido 5 utilizando o modelo de Casson.

Geometria	Parâmetro			Média dos desvios absolutos da nova correlação (%)	Média dos desvios absolutos da melhor correlação (%)	Faixa de Reynolds
	A	B	C			
Circular	0,557	-0,533	0,00311	4,47	13,87	7045-34575
Anular 1 1/4" e 1/2" (D_{H2})	0,868	-0,840	0,00269	5,60	16,56	4167-16083
Anular 2" e 3/4" (D_{H1})	0,603	-0,566	0,00589	9,58	9,19	5492-10055

Para os tubos circular e Anular 1 1/4" e 1/2" há uma significativa redução dos erros para o cálculo do fator de atrito em relação às equações de Churchill (1977) e Ellis e George

(1977) com os parâmetros originais, que apresenta respectivamente 13,87% e 16,56% como médias dos desvios.

Para o tubo Anular 2" e 3/4", o resultado gera um pequeno aumento na média dos desvios. A equação de Ellis e George (1977) com parâmetros originais obtém 9,19% enquanto com os novos parâmetros obtém 9,58%, o que ainda é um bom resultado.

É interessante notar que todos os novos parâmetros obtidos para o fluido 5 têm valores próximos, independente da geometria e modelo reológico.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste estudo pode-se concluir que o modelo reológico da potência se adequa melhor aos dois fluidos estudados, pois o coeficiente de correlação é maior que o de Casson.

De um modo geral, as equações de Reynolds crítico não foram boas para caracterizar os regimes de escoamento. O método experimental de avaliação de regime de escoamento é o utilizado para caracterizar os regimes, embora seja suscetível à falhas por ser um método gráfico.

A escolha da equação de diâmetro hidráulico varia de acordo com o fluido estudado, o modelo reológico utilizado e a geometria do tubo.

As equações D_{H1} e D_{H3} obtêm valores de diâmetro hidráulico muito próximos. As equações D_{H4} e D_{H5} não apresentam bons resultados para os fluidos estudados. O desempenho das equações de diâmetro hidráulico D_{H1}, D_{H2} e D_{H3} se alterna de acordo com o fluido e modelo reológico adotado.

O uso do diâmetro efetivo de escoamento proposto por Bailey e Peden (2000) é ineficaz para corrigir as equações de diâmetro hidráulico utilizada nos fluidos de perfuração estudados.

Para a análise das correlações de fator de atrito no regime turbulento, conclui-se que o desempenho das equações depende do fluido estudado, do modelo reológico utilizado e da equação de diâmetro hidráulico.

As equações de OWGomes (1987) e DMGomes (1987) forneceram os melhores resultados quando utilizado o modelo da potência para o fluido 4, no caso do modelo de Casson, Darby e Melson (1981) e Ellis e George (1977) obtiveram os melhores resultados.

Para o fluido 5, os melhores resultados são obtidos pelas equações de Churchill (1977) para o tubo circular e Ellis e George (1977) para os tubos anulares utilizando os modelos reológicos da potência e de Casson.

Todos os novos parâmetros propostos para a correlação de Ellis e George (1977) foram bons para prever o fator de atrito no regime turbulento nos fluidos escoando nas três geometrias utilizando os dois modelos reológicos adotados.

Os resultados de perda de carga e fator de atrito calculados obtêm menores desvios em relação aos dados obtidos experimentalmente quando é adotado o modelo reológico de Casson.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos por este trabalho sugere-se as seguintes abordagens para estudos posteriores:

- Utilização de métodos mais precisos para caracterizar os regimes de escoamento dos fluidos de perfuração;
- Utilização de uma correlação de diâmetro hidráulico ou uma correção das correlações utilizadas no texto que obtenham menores erros no cálculo da perda de carga;
- Utilização de um instrumento mais preciso para fazer o ensaio reológico dos fluidos, como um reômetro;
- Utilização de controle de temperatura na unidade experimental para manter as propriedades reológicas constante;
- Utilização de um medidor de vazão mássica a fim de obter maiores vazões e consequentemente maior quantidade de dados no regime turbulento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAILEY, W.J.; PEDEN, J.M. "A Generalized and consistent pressure drop and flow regime transition model for drilling hydraulics.", SPE Drill & Completion Nº15, 2000.

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. (1991), "Applied drilling engineering". Second printing, Society of petroleum engineers, Richardson, Texas.

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

CRAFT, B. C. "well design, drilling and production". New Jersey, Prentice-hall, 1962.

CRITTENDON, B. C. (1959); "The mechanics of design and interpretation of hydraulic fracture treatments". Journal of Petroleum Technology, October, pp. 21-9.

DARBY, R. and MELSON, J. "How to predict the friction factor for the flow of Bingham plastics", Chem Eng, 28 Dec 1981, vol. 88, no. 26, pp. 59–61.

DARBY, R., MUN, D. V., BOGER, "Predict Friction Loss in Slurry Pipes", *Chemical Engineering*, v.9, p.116, 1992.

ELLIS, R. C. e GEORGE, D. S. "Practical interpretation on theology, annular displacing torces. How to avoid by passing mud during primary cementing". World Oil, 64-9, 1977.

FOX, R. W., McDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J. "Introduction to Fluid Mechanics", Six Edition, John Wiley & Sons Inc, 2004.

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.

LAMB H. S. (1945); "Hydrodynamics", New York, Dover Publications, pp. 586-187.

LEAL, A. B. "Estudo do Escoamento de Fluidos não-Newtonianos em Dutos." Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006.

MACHADO, J. C. V., 2002. "Reologia e Escoamento de Fluidos. Ênfase na Indústria do Petróleo." Interciência, Rio de Janeiro.

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.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. “Applied Statistics and Probability for Engineers”. John Wiley & Sons, 3rd ed, 2003.

PEREIRA, F. A. R. “Escoamento laminar de líquidos não-Newtonianos em seções anulares: estudos de CFD e abordagem experimental.” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. Perry’s Chemical Engineers’ Handbook. 7th ed. New York: McGrawHill, 1999.

PILEHVARI, A.; SERTH, R. “Generalized hydraulic calculation method using rational polynomial model”, J. Energy Res. Tech., 127, 2005.

REED, T. D.; PILEHVARI, A. A. “A new model for laminar, transitional, and turbulent flow of drilling fluids”, SPE 25456, Oklahoma, 1993.

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. (1989); “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.

THOMAS, D. G. “Non-Newtonian suspensions, Part I”. Ind. Eng. Chem., 55: 18-29, Nov. 1963.

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

TRIGGIA, A. A; *et al*, “Fundamentos de engenharia de petróleo.” Rio de Janeiro: Interciência/PETROBRAS, 2001.

8 ANEXOS

A – Relação entre o índice de consistência generalizado e o índice de consistência do modelo da potência.

B – Dados da calibração da unidade experimental com água.

Anexo A – Relação entre o índice de consistência generalizado e o índice de consistência do modelo da potência.

O número de Reynolds foi definido anteriormente para caracterizar o escoamento de um fluido Newtoniano pela equação 7. Para o escoamento em dutos o balanço de quantidade de movimento em regime permanente considerando as forças viscosas e o tensor tensão é dada pela equação abaixo,

$$\frac{dV_z(r)}{dr} = f(\tau_{rz}) = f(\tau_0 \frac{r}{R}) \qquad \text{Equação 65}$$

onde τ_0 seria a tensão em que a velocidade de escoamento é máxima e τ_{rz} seria a tensão em uma determinada posição radial *r* conforme mostram as equações 66 e 67.

$$\tau_0 = \frac{2\mu V_{\max}}{R} \qquad \text{Equação 66}$$

$$\tau_{rz} = \frac{r}{R}\tau_0 \qquad \text{Equação 67}$$

Se integrar a equação 65 de uma posição R até *r* obtém o perfil de velocidade (equação 68) em função da distancia radial *r*, que se multiplicar pela área da seção transversal ao escoamento ocasiona na equação 69 para o cálculo da vazão volumétrica do escoamento.

$$V_z(r) = \int_R^r f(\tau_0 \frac{r}{R}) \cdot dr \qquad \text{Equação 68}$$

$$Q = \pi \cdot R^2 \cdot \overline{V} = \int_0^R 2\pi r \cdot V_z(r) dr = \pi \int_0^R r^2 f(\tau_0 \cdot \frac{r}{R}) dr \qquad \text{Equação 69}$$

Combinando a equação anterior, onde a variável independente é *r*, com a equação 65 origina a equação de Rabinovitch (equação 70) em que substitui a variável *r* pelo tensor tensão τ_{rz}.

$$\frac{Q}{\pi R^3} = -\frac{1}{\tau_0^3} \cdot \int_0^{\tau_0} \tau_{rz}^2 \cdot f(\tau_{rz}) \cdot d(\tau_{rz}) \qquad \text{Equação 70}$$

A regra de Leibniz conforme demonstrado na equação 71 é utilizada para resolver a integral originando a equação 72.

$$\frac{d}{dz}\left\{\int_0^z zf(z)dz = z^2 f(z)\right. \qquad \text{Equação 71}$$

$$\frac{4Q}{\pi R^3}\frac{d\ln\left(Q/\pi R^3\right)}{4d\ln(-\Delta P\cdot R/2L)} + \frac{3Q}{\pi R^3} = f(\tau_0) = -\left(\frac{dVz}{dr}\right)_{r=R} \qquad \text{Equação 72}$$

Admitindo um novo parâmetro *n'* de acordo com a equação abaixo e efetuando as devidas substituições resulta na equação 73. (Bailey, 2000)

$$n' = \frac{d(\ln\tau_0)}{d(\ln\gamma_0)} \qquad \text{Equação 73}$$

$$\frac{4Q}{\pi R^3}\left[\frac{1}{4n'} + \frac{3}{4}\right] = \frac{4Q}{\pi R^3}\left[\frac{3n'+1}{4n'}\right] = -\left(\frac{dVz}{dr}\right)_{r=R} \qquad \text{Equação 74}$$

Onde para uma região pequena pode-se escrever a equação abaixo onde *k'* e *n'* são parâmetros que dependem do escoamento.

$$\frac{-\Delta P\cdot R}{2L} = k'\left(\frac{4Q}{\pi R^3}\right)^{n'} \qquad \text{Equação 75}$$

É importante ressaltar que esta equação não está definida para um modelo reológico, ela é uma equação generalizada, ou seja, é necessário conhecer apenas as dimensões do tubo, diferença de pressão e vazão volumétrica do fluido escoando e obter os parâmetros facilmente através de uma regressão linear.

Os parâmetros *k'* e *n'* são comumente chamados de índice de consistência generalizado e índice de comportamento generalizado e guardam informação sobre a reologia do fluido.

Podem ser relacionados com os parâmetros dos modelos reológicos, para o modelo da potência a resolução é de simples determinação e é descrita abaixo:

$$n = n' \qquad \text{Equação 76}$$

$$k' = k\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n \qquad \text{Equação 77}$$

Anexo B – Dados da calibração da unidade experimental com água.

Tabela 36: Calibração do tubo circular antes do experimento com o fluido 4.

Experimento	M (Kg)	t (s)	W (kg/s)	<w> (Kg/h)	T (°C)	DP (mmHg)	Re	f_{EXP}	f_{COR}	f_{EXP}/f_{COR}
1	1,400	18,36	0,076	276,0	24	0,47	3952,7	0,0119	0,0092	1,30
	1,480	19,24	0,077							
	1,460	19,01	0,077							
2	0,740	30,42	0,024	88,8	24	0,07	1271,7	0,0172	0,0126	1,37
	0,730	30,32	0,024							
	0,780	30,48	0,026							
3	0,775	30,07	0,026	93,7	25	0,05	1373,0	0,0110	0,0117	0,95
	0,790	29,92	0,026							
	0,775	29,93	0,026							
4	1,415	10,01	0,141	511,6	25	0,97	7497,0	0,0072	0,0078	0,92
	1,435	10,04	0,143							
	1,440	10,14	0,142							
5	1,020	10,24	0,100	354,2	25	0,57	5190,4	0,0088	0,0086	1,02
	0,980	9,95	0,098							
	1,015	10,46	0,097							
6	1,690	6,29	0,269	958,3	26	2,98	14365,8	0,0063	0,0067	0,94
	1,550	5,89	0,263							
	1,475	5,53	0,267							
7	1,480	3,32	0,446	1635,3	26	9,24	24515,6	0,0067	0,0058	1,15
	1,450	3,14	0,462							
	1,575	3,46	0,455							
8	1,705	2,86	0,596	2162,7	26	16,17	32421,6	0,0067	0,0054	1,23
	1,750	2,86	0,612							
	1,640	2,76	0,594							
9	2,045	1,87	1,094	4036,8	26	51,35	60516,6	0,0061	0,0046	1,31
	1,855	1,64	1,131							
	2,290	2,01	1,139							
10	2,250	1,58	1,424	5157,5	26	74,6	77318,0	0,0054	0,0044	1,24
	2,190	1,5	1,460							
	2,545	1,8	1,414							
11	1,565	25,04	0,063	224,6	27	0,27	3443,7	0,0104	0,0095	1,09
	1,635	25,32	0,065							
	1,515	25,2	0,060							

Tabela 37: Calibração do tubo anular 1 1/4" e 1/2" antes do experimento com o fluido 4.

Experimento	M (Kg)	t (s)	W (kg/s)	<w> (Kg/h)	T (°C)	DP (mmHg)	Re	f_{EXP}	f_{COR}	f_{EXP}/f_{COR}
1	0,265	7,480	0,035	130,5	24	0,16	717,4	0,0227	0,0223	1,02
	0,230	6,480	0,035							
	0,200	5,290	0,038							
2	0,265	4,860	0,055	199,6	24	0,32	1097,4	0,0194	0,0146	1,33
	0,335	6,040	0,055							
	0,410	7,280	0,056							
3	1,135	5,150	0,220	801,3	24	2,77	4406,3	0,0104	0,0097	1,08
	1,570	6,960	0,226							
	1,535	6,920	0,222							
4	0,690	6,180	0,112	401,5	24	0,76	2207,9	0,0114	0,0115	0,99
	0,790	7,020	0,113							
	0,805	7,290	0,110							
5	0,615	7,200	0,085	305,0	25	0,43	1716,0	0,0112	0,0093	1,20
	0,595	6,890	0,086							
	0,650	7,890	0,082							
6	2,550	7,100	0,359	1293,8	25	7,01	7279,7	0,0101	0,0086	1,18
	1,975	5,450	0,362							
	2,115	5,930	0,357							
7	2,515	4,870	0,516	1818,7	25	13,04	10232,6	0,0095	0,0079	1,21
	2,600	5,230	0,497							
	2,510	5,000	0,502							
8	3,585	4,560	0,786	2835,7	26	28,08	16320,5	0,0084	0,0070	1,21
	2,950	3,730	0,791							
	3,875	4,930	0,786							
9	3,800	4,020	0,945	3444,4	26	40,58	19823,7	0,0083	0,0067	1,24
	3,340	3,510	0,952							
	3,485	3,580	0,973							
10	5,715	3,530	1,619	5829,7	26	109,18	33552,4	0,0078	0,0058	1,33
	5,525	3,340	1,654							
	6,625	4,180	1,585							

Tabela 38: Calibração do tubo anular 2" e 3/4" antes do experimento com o fluido 4.

Experimento	M (Kg)	t (s)	W (kg/s)	<w> (Kg/h)	T (°C)	DP (mmHg)	Re	f_{EXP}	f_{COR}	f_{EXP}/f_{COR}
1	0,720	6,17	0,117	1666,7	26	0,07	1645,1	0,0121	0,0097	1,24
	0,675	6,20	0,109							
	0,515	4,78	0,108							
2	1,315	7,14	0,184	1825,1	26	0,2	2711,0	0,0127	0,0101	1,26
	1,305	7,01	0,186							
	1,045	5,84	0,179							
3	0,805	15,54	0,052	4472,0	26	0,02	759,4	0,0162	0,0211	0,77
	0,775	15,17	0,051							
	0,755	14,81	0,051							
4	1,340	10,21	0,131	3582,1	27	0,1	1980,1	0,0125	0,0081	1,54
	1,345	10,10	0,133							
	1,270	9,93	0,128							
5	2,155	3,14	0,686	2784,2	27	1,92	10617,1	0,0083	0,0078	1,07
	2,260	3,15	0,717							
	2,470	3,53	0,700							
6	4,305	2,87	1,500	1672,5	27	7,54	22299,6	0,0074	0,0065	1,15
	3,035	2,12	1,432							
	4,385	2,95	1,486							
7	4,135	1,95	2,121	2031,4	28	13,03	32413,5	0,0063	0,0059	1,08
	4,745	2,28	2,081							
	4,825	2,32	2,080							
8	5,135	2,40	2,140	1869,5	28	16,3	33286,1	0,0075	0,0058	1,28
	5,640	2,61	2,161							
	6,020	2,80	2,150							
9	5,920	2,02	2,931	1824,3	29	21,72	45024,3	0,0057	0,0054	1,05
	5,895	2,14	2,755							
	6,045	2,12	2,851							
10	0,970	16,39	0,059	12371,1	29	0,03	935,9	0,0183	0,0143	1,28
	0,955	16,26	0,059							
	0,640	10,75	0,060							
11	0,745	3,12	0,239	17718,1	23	0,34	3302,5	0,0127	0,0104	1,22
	0,805	3,53	0,228							
	0,895	3,58	0,250							
12	1,300	3,58	0,363	11076,9	23	0,64	5090,4	0,01	0,009	1,08
	1,350	3,67	0,368							
	1,290	3,45	0,374							

Tabela 39: Calibração do tubo circular antes do experimento com o fluido 5.

Experimento	M (Kg)	t (s)	W (kg/s)	<w> (Kg/h)	T (°C)	DP (mmHg)	Re	f_{EXP}	f_{COR}	f_{EXP}/f_{COR}
1	1,220	2,08	0,587	2143,3	33	11,49	37369,6	0,0048	0,0052	0,92
	1,495	2,47	0,605							
	1,450	2,44	0,594							
2	0,625	3,84	0,163	498,4	31	1,08	8333,8	0,0084	0,0076	1,10
	0,695	5,39	0,129							
	0,675	5,46	0,124							
3	5,100	2,56	1,992	7171,9	29	131,48	114889,4	0,0049	0,0040	1,25
	5,100	2,56	1,992							
	5,100	2,56	1,992							
4	1,385	3,33	0,416	1534,9	31	5,89	25664,6	0,0048	0,0058	0,84
	1,605	3,71	0,433							
	1,425	3,31	0,431							
5	1,370	1,57	0,873	3160,8	33	22,84	55110,8	0,0044	0,0048	0,93
	1,940	2,19	0,886							
	2,005	2,29	0,876							
6	1,405	1,42	0,989	3629,1	33	33,04	63276,7	0,0049	0,0046	1,06
	1,625	1,65	0,985							
	1,995	1,9	1,050							
7	0,535	14,9	0,036	125,1	33	0,06	2180,6	0,0074	0,0073	1,01
	0,555	14,46	0,038							
	0,440	14,7	0,030							
8	0,405	3,22	0,126	459,5	34	0,88	8177,3	0,0081	0,0077	1,05
	0,510	3,99	0,128							
	0,490	3,79	0,129							
9	0,835	2,86	0,292	1025,7	34	2,85	18254,3	0,0052	0,0063	0,84
	0,820	2,9	0,283							
	0,770	2,75	0,280							

Tabela 40: Calibração do tubo anular 1 1/4" e 1/2" antes do experimento com o fluido 5.

Experimento	M (Kg)	t (s)	W (kg/s)	<w> (Kg/h)	T (°C)	DP (mmHg)	Re	f_{EXP}	f_{COR}	f_{EXP}/f_{COR}
1	1,405	6,95	0,202	725,7	28	2,07	958,5	0,0095	0,0097	0,98
	1,655	8,15	0,203							
	1,610	8,07	0,200							
2	1,170	12,2	0,096	337,7	28	0,46	443,1	0,0098	0,0079	1,24
	0,820	8,86	0,093							
	0,820	8,82	0,093							
3	0,640	9,24	0,069	247,5	28	0,25	316,4	0,0099	0,0107	0,92
	0,715	10,36	0,069							
	0,410	6,03	0,068							
4	1,960	5,34	0,367	1322,3	28	6,02	1986,8	0,0083	0,0084	1,00
	1,455	4,04	0,360							
	1,750	4,67	0,375							
5	3,625	5,44	0,666	2370,2	29	17,81	3917,2	0,0077	0,0072	1,07
	2,980	4,47	0,667							
	1,265	1,97	0,642							
6	2,265	2,68	0,845	3065,5	30	30,33	4880,2	0,0078	0,0067	1,16
	2,190	2,51	0,873							
	1,540	1,84	0,837							
7	3,570	2,92	1,223	4331,9	30	55,04	7768,2	0,0071	0,0062	1,15
	2,790	2,36	1,182							
	2,615	2,17	1,205							
8	0,360	7,14	0,050	180,5	30	0,2	153,0	0,0149	0,0141	1,05
	0,350	6,9	0,051							
	0,320	6,5	0,049							

Tabela 41: Calibração do tubo anular 2" e 3/4" antes do experimento com o fluido 5.

Experimento	M (Kg)	t (s)	W (kg/s)	<w> (Kg/h)	T (°C)	DP (mmHg)	Re	f_{EXP}	f_{COR}	f_{EXP}/f_{COR}
1	0,530	2,48	0,214	791,0	27	0,02	3327,0	0,0009	0,0096	0,09
	0,515	2,34	0,220							
	0,480	2,13	0,225							
2	1,680	3,44	0,488	1744,5	29	0,79	7667,4	0,0072	0,0084	0,85
	1,925	3,92	0,491							
	1,755	3,7	0,474							
3	2,370	2,33	1,017	3679,8	29	3,73	16173,2	0,0076	0,0070	1,09
	2,615	2,61	1,002							
	2,430	2,32	1,047							
4	2,185	1,22	1,791	6416,6	29	9,19	28201,8	0,0062	0,0061	1,01
	3,535	2,03	1,741							
	2,450	1,35	1,815							
5	3,535	1,79	1,975	7373,1	29	12,16	32405,6	0,0062	0,0059	1,05
	2,905	1,41	2,060							
	2,320	1,1	2,109							
6	3,345	1,39	2,406	8682,5	31	16,39	39832,3	0,0060	0,0056	1,07
	2,950	1,21	2,438							
	2,630	1,1	2,391							
7	4,190	1,39	3,014	11056,8	31	27,19	50725,0	0,0061	0,0053	1,17
	4,240	1,42	2,986							
	3,985	1,24	3,214							
8	0,855	2,76	0,310	1081,0	32	0,37	5064,8	0,0087	0,0094	0,93
	0,575	1,94	0,296							
	0,940	3,19	0,295							
9	1,630	2,61	0,625	2304,1	33	1,53	11022,1	0,0080	0,0077	1,03
	1,435	2,18	0,658							
	1,230	1,93	0,637							