

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

DISSERTAÇÃO

Determinação da Perda de Carga de Fluidos de Perfuração no Escoamento
Através de Acessórios Especiais

DANIELE CRISTINE ROCHA

2008



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

**DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA DE FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO NO ESCOAMENTO ATRAVÉS DE ACESSÓRIOS
ESPECIAIS**

DANIELE CRISTINE ROCHA

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
Junho de 2008

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

DANIELE CRISTINE ROCHA

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 26/06/2008

Prof. Luís Américo Calçada, D. Sc., DEQ/UFRRJ

Prof. Admilson Teixeira Franco, D. Sc., UTFPR

Prof. André de Almeida, D. Sc., DEQ/UFRRJ

Dedicado a minha família,
Especialmente ao meu pai.

RESUMO

ROCHA, Daniele Cristine. **Determinação da perda de carga de fluidos de perfuração no escoamento através de acessórios especiais.** 2008. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2008.

Neste trabalho é avaliada a perda de carga resultante do escoamento de fluidos de perfuração através de acessórios especiais, que estão presentes na coluna de perfuração de poços de petróleo e são denominados *tool joints*, estabilizador e ejetores. Os *tool joints* realizam a conexão entre os tubos da coluna de perfuração, os estabilizadores são peças posicionadas ao longo da coluna com o objetivo de auxiliar no direcionamento da perfuração e os ejetores são peças que simulam os jatos da broca de perfuração. Para realizar essa avaliação foi construída uma unidade piloto objetivando a simulação de sistemas de prospecção de petróleo, com escoamento em peças com geometrias que simulam àquelas existentes em um sistema real, mantendo-se a similaridade dinâmica com número de Reynolds e a similaridade geométrica com relação às dimensões e às características dos escoamentos em unidades de perfuração. Através dos dados experimentais de reologia, vazão mássica e queda de pressão, obtidos na unidade piloto, foram determinados os coeficientes de perda de carga dos acessórios e testadas correlações existentes na literatura referentes ao cálculo da perda de carga no escoamento interno e externo aos *tool joints*. Os dados obtidos experimentalmente foram comparados com os dados obtidos através da simulação computacional, na qual foram utilizados os códigos comerciais de *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*), GAMBIT® e FLUENT®. Os fluidos de perfuração avaliados eram provenientes de sondas de perfuração, nas quais tinham sido previamente utilizados nas operações de perfuração. Esses fluidos eram constituídos de soluções poliméricas de base orgânica ou aquosa, e quanto às propriedades reológicas, eram fluidos não-Newtonianos e com comportamento pseudoplástico. O modelo reológico adotado foi o modelo da potência (*power law*). Os resultados revelaram que os coeficientes de descarga obtidos para os ejetores estão de acordo com a literatura e que os coeficientes de perda de carga (para *tool joints* e ejetor) variam em função do tipo de geometria e são pouco sensíveis ao tipo de fluido em escoamento. A reestimação dos parâmetros das correlações de perda de carga em *tool joints*, com escoamento interno e externo, possibilitou a obtenção de resultados concordantes com os dados experimentais e as simulações permitiram analisar os perfis de velocidade e pressão ao longo das tubulações.

Palavras chave: perda de carga, *tool joint*, simulação numérica

ABSTRACT

ROCHA, Daniele Cristine. **Determination of friction loss of drilling fluids during their flow thru special accessories.** 2008. 107p. Dissertation. (Master Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica , RJ, 2008.

The objective of this work is to evaluate the friction loss of drilling fluids during their flow thru special accessories, which are present in drilling columns of petroleum wells, named as: toll joints, stabilizer and ejectors. The tool joints are responsible for linking the tubes of the column, the stabilizers are pieces placed along the column helping giving drilling direction and the ejectors simulates the ejection of the drill. To make such evaluation it was built a pilot unit with the objective of simulate the prospection systems of petroleum, the flows were made in accessories that has similar geometry to the ones found in real systems, keeping the same dynamic similarly thru Reynolds and the geometric similarly according to the dimensions and characteristics of real petroleum unit flows. Thru the experimental data of rheology, flow rate and pressure drop, obtained in the pilot unit, it was determined the friction loss coefficient of the accessories and tested the existent correlations found in the literature referring to the calculus of friction loss during internal and external flow in tool joints. The experimental data obtained were compared to the data obtained thru computational simulation, which were used the following commercial codes CFD, GAMBIT[®] e FLUENT[®]. The evaluated drilling fluids were obtained from drilling probes, which were previously used in drilling operations. These fluids were constituted of polymeric solutions of organic or water base, and about their rheological properties, they were non-Newtonian fluids, pseudo plastics. The rheological model assumed was the power law model. The results revealed that the discharge coefficients obtained for the ejectors corroborates with the literature and the friction loss coefficients (for tool joints and ejector) vary according to the type of geometry and are very little sensitive to the type of fluid. The re-estimation of the parameters of the correlations of friction loss in tool joints, with internal and external flows, enabled to reach results in agreement with the experimental data and the simulations allowed analyzing the velocity and pressure profile along the tubes.

Key words: friction loss, tool joint, simulation

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Taxas de cisalhamento equivalentes às velocidades de rotação no viscosímetro FANN 35 A.	7
Tabela 3.1 – Diâmetros reais e nominais das tubulações.	29
Tabela 3.2 – Resultados dos erros percentuais obtidos na avaliação das equações de diâmetro hidráulico.	34
Tabela 3.3 – Avaliação das correlações de fator de atrito, em termos de erros percentuais médios absolutos.	34
Tabela 3.4 – Adequação das correlações de fator de atrito, de acordo com o fluido e geometria estudados.	35
Tabela 3.5 – Incerteza das variáveis experimentais.	36
Tabela 3.6 – Resumo do número de células por face e elementos por volume para cada acessório.	43
Tabela 3.7 – Dados de entrada na simulação do escoamento em tubo anular.	46
Tabela 3.8 – Dados de entrada na simulação do escoamento em <i>tool joints</i> .	47
Tabela 4.1 – Intervalo dos valores dos parâmetros reológicos obtidos para os fluidos de perfuração.	48
Tabela 4.2 – Ajuste do modelo <i>power law</i> aos fluidos estudados.	49
Tabela 4.3 – Incerteza média dos parâmetros estimados.	50
Tabela 4.4 – Valores de Reynolds críticos para o fluido BRCARB.	51
Tabela 4.5 – Valores de Reynolds críticos para o fluido Catiônico.	51
Tabela 4.6 – Valores de Reynolds críticos para o fluido BRMUL.	52
Tabela 4.7 – Valores de Reynolds críticos para o fluido BRSCOL.	53
Tabela 4.8 – Incerteza das variáveis calculadas.	54
Tabela 4.9 – Coeficientes de perda carga (K).	54
Tabela 4.10 – Incertezas médias dos coeficientes de descarga (C_D).	65
Tabela 4.11 – Coeficientes de descarga em função do diâmetro do ejetor e do fluido de perfuração.	65
Tabela 4.12 – Resultados da simulação do escoamento em tubo anular.	66
Tabela 4.13 – Resultados da simulação da queda de pressão em <i>tool joints</i> .	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática do escoamento unidirecional de um fluido.	4
Figura 2.2 – Curvas de comportamento para fluidos puramente viscosos e independentes do tempo, (a)-Bingham, (b)-Pseudoplástico, (c)-dilatante e (d)-Newtoniano.	5
Figura 2.3 – Viscosímetro FANN V. G. Metter modelo 35 A.	6
Figura 2.4 – Representação da janela operacional formada pela pressão de poros e pressão de fratura.	7
Figura 2.5 – Determinação experimental dos regimes de escoamento.	11
Figura 2.6 – Esquema do trajeto do fluido de perfuração no poço.	14
Figura 2.7 – Foto dos <i>tool joints</i> .	14
Figura 2.8 – Foto dos estabilizadores.	15
Figura 2.9 – Foto de um modelo de broca de perfuração.	15
Figura 2.10 – Esquema do escoamento interno a um <i>tool joint</i> simplificado.	16
Figura 2.11 – Esquema do escoamento externo a um <i>tool joint</i> simplificado.	16
Figura 2.12 – Regiões do <i>tool joint</i> onde se aplicam as correlações de SIMÕES	15
Figura 2.13 – Coeficiente de descarga versus número de Froude.	25
Figura 3.1 – Foto da unidade piloto.	28
Figura 3.2 – Esquema da unidade piloto.	28
Figura 3.3 – Foto do transdutor diferencial de pressão.	29
Figura 3.4 – Quadro de seleção das tubulações e dos transdutores de pressão.	30
Figura 3.5 – Esquema da peça real (a) e do protótipo (b), que representam o escoamento interno ao <i>tool joint</i> .	30
Figura 3.6 – Esquema da peça real (a) e do protótipo (b), que representam o escoamento externo ao <i>tool joint</i> .	31
Figura 3.7 – Foto do estabilizador.	31
Figura 3.8 – Foto do ejetor.	32
Figura 3.9 – Dimensões do tubo anular.	42
Figura 3.10 – Seção transversal das malhas do tubo anular e <i>tool joints</i> .	44
Figura 3.11 – Vista lateral da malha do <i>tool joint</i> com escoamento interno	44
Figura 3.12 – Vista lateral da malha do <i>tool joint</i> com escoamento externo	45
Figura 4.1 – Reograma típico dos fluidos de perfuração BRCARB (a) e Catiônico (b), obtidos para três temperaturas.	49
Figura 4.2 – Reograma típico dos fluidos de perfuração BRMUL (a) e BRSCOL (b), obtidos para três temperaturas.	49
Figura 4.3 – Determinação das vazões críticas de escoamento do fluido BRCARB no tubo circular (a) e no tubo anular de 1 ¼”- ½” (b).	50
Figura 4.4 – Determinação das vazões críticas de escoamento do fluido Catiônico no tubo circular (a) e no tubo anular de 1 ¼”- ½” (b).	51
Figura 4.5 – Determinação das vazões críticas de escoamento do fluido BRMUL no tubo circular (a) e no tubo anular de 1 ¼”- ½” (b).	52
Figura 4.6 – Determinação das vazões críticas de escoamento do fluido BRSCOL no tubo circular (a) e no tubo anular de 1 ¼”- ½” (b).	53
Figura 4.7 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento interno ($D_{iTJ}= 15,24\text{mm}$), para o fluido BRSCOL.	55
Figura 4.8 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento interno ($D_{iTJ}= 19,56\text{ mm}$), para o fluido BRSCOL.	55
Figura 4.9 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento externo ($\Theta_c=18^\circ/\Theta_e= 35^\circ$), para o fluido BRSCOL.	56

Figura 4.10 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento externo ($\Theta_c=90^\circ/ \Theta_e= 90^\circ$), para o fluido BRSCOL.	57
Figura 4.11 – Determinação do coeficiente de perda (K) do estabilizador, para o fluido BRSCOL.	58
Figura 4.12 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido BRMUL.	59
Figura 4.13 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=19,56$ mm), do fluido BRMUL.	60
Figura 4.14 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c=18^\circ/ \Theta_e= 35^\circ$), do fluido Catiônico.	61
Figura 4.15 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c=90^\circ/ \Theta_e= 90^\circ$), do fluido Catiônico.	61
Figura 4.16 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c=18^\circ/ \Theta_e= 35^\circ$), do fluido BRMUL.	62
Figura 4.17 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c=90^\circ/ \Theta_e= 90^\circ$), do fluido BRMUL.	62
Figura 4.18 – Vazão versus perda de carga para os ejetores, no escoamento do fluido Catiônico.	64
Figura 4.19 – Avaliação do coeficiente de descarga dos ejetores, no escoamento do fluido Catiônico.	64
Figura 4.20 – Comparação dos resultados simulados com as combinações 1 e 2 de algoritmos.	66
Figura 4.21 – Perfil de velocidade ao longo da tubulação, no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c=90^\circ/ \Theta_e= 90^\circ$), do fluido Catiônico.	67
Figura 4.22 – Perfil de velocidade ao longo da tubulação, no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido BRSCOL.	67
Figura 4.23 – Região de recirculação no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido BRCARB.	68
Figura 4.24 – Região de recirculação no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c=18^\circ/ \Theta_e= 35^\circ$), do fluido BRCARB.	69
Figura 4.25 –Contorno de pressão no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=19,56$ mm), do fluido BRCARB.	70
Figura 4.26 –Perfil de pressão no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c=18^\circ/ \Theta_e= 35^\circ$), do fluido Catiônico.	71
Figura 4.27 –Perfil de pressão no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido BRSCOL.	71
Figura 4.28 – Influência das incertezas dos parâmetros reológicos sobre a perda de carga simulada no escoamento do fluido BRCARB em <i>tool joints</i> .	73
Figura 4.29 – Influência das incertezas dos parâmetros reológicos sobre a perda de carga simulada no escoamento do fluido Catiônico em <i>tool joints</i> .	74
Figura 4.30 – Influência das incertezas dos parâmetros reológicos sobre a perda de carga simulada no escoamento do fluido BRMUL em <i>tool joints</i> .	74
Figura 4.31 – Influência das incertezas dos parâmetros reológicos sobre a perda de carga simulada no escoamento do fluido BRSCOL em <i>tool joints</i> .	75
Figura 8.1 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento interno ($D_{iTJ}= 15,24$ mm), para o fluido BRCARB.	82
Figura 8.2 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento interno ($D_{iTJ}= 19,56$ mm), para o fluido BRCARB.	82
Figura 8.3 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento interno ($D_{iTJ}= 15,24$ mm), para o fluido Catiônico.	83

Figura 8.4 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento interno ($D_{iTJ}= 19,56$ mm), para o fluido Catiônico.	83
Figura 8.5 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento interno ($D_{iTJ}= 15,24$ mm), para o fluido BRMUL.	84
Figura 8.6 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento interno ($D_{iTJ}= 19,56$ mm), para o fluido BRMUL.	84
Figura 8.7 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento externo ($\Theta_c=18^\circ/ \Theta_e= 35^\circ$), para o fluido BRCARB.	85
Figura 8.8 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento externo ($\Theta_c=90^\circ/ \Theta_e= 90^\circ$), para o fluido BRCARB.	85
Figura 8.9 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento externo ($\Theta_c=18^\circ/ \Theta_e= 35^\circ$), para o fluido Catiônico.	86
Figura 8.10 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento externo ($\Theta_c=90^\circ/ \Theta_e= 90^\circ$), para o fluido Catiônico.	86
Figura 8.11 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento externo ($\Theta_c=18^\circ/ \Theta_e= 35^\circ$), para o fluido BRMUL.	87
Figura 8.12 – Determinação do coeficiente de perda (K) do <i>tool joint</i> com escoamento externo ($\Theta_c=90^\circ/ \Theta_e= 90^\circ$), para o fluido BRMUL.	87
Figura 8.13 – Determinação do coeficiente de perda (K) do estabilizador, para o fluido BRCARB.	88
Figura 8.14 – Determinação do coeficiente de perda (K) do estabilizador, para o fluido Catiônico.	88
Figura 8.15 – Determinação do coeficiente de perda (K) do estabilizador, para o fluido BRMUL.	89
Figura 8.16 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido BRCARB.	90
Figura 8.17 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=19,56$ mm), do fluido BRCARB.	90
Figura 8.18 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido Catiônico.	91
Figura 8.19 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=19,56$ mm), do fluido Catiônico.	91
Figura 8.20 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido BRSCOL.	92
Figura 8.21 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao <i>tool joint</i> ($D_{iTJ}=19,56$ mm), do fluido BRSCOL.	92
Figura 8.22 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c=18^\circ/ \Theta_e= 35^\circ$), do fluido BRCARB.	93
Figura 8.23 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c=90^\circ/ \Theta_e= 90^\circ$), do fluido BRCARB.	93
Figura 8.24 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c=18^\circ/ \Theta_e= 35^\circ$), do fluido BRSCOL.	94
Figura 8.25 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao <i>tool joint</i> ($\Theta_c= 90^\circ/ \Theta_e= 90^\circ$), do fluido BRSCOL	94
Figura 8.26 – Vazão versus perda de carga para os ejetores de, no escoamento do fluido BRCARB.	105
Figura 8.27 – Avaliação do coeficiente de descarga dos ejetores, no escoamento do fluido BRCARB.	105
Figura 8.28 – Vazão versus perda de carga para os ejetores, no escoamento do fluido BRMUL.	106

- Figura 8.29** – Avaliação do coeficiente de descarga dos ejetores, no escoamento do fluido BRMUL. 106
- Figura 8.30** – Vazão versus perda de carga para os ejetores de, no escoamento do fluido BRSCOL. 107
- Figura 8.31** – Avaliação do coeficiente de descarga dos ejetores, no escoamento do fluido BRSCOL. 107

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

A	rea da seção transversal	(m ²)
A ₁	rea da seção transversal 1	(m ²)
A ₂	rea da seção transversal 2	(m ²)
C	Parâmetro das Equações 4.2 e 4.3	(adm.)
C ₁	Algoritmos: 'SIMPLE', 'Standard' e 'First-order-upwind'	(adm.)
C ₂	Algoritmos: 'SIMPLE', 'PRESTO!' e 'QUICK'	(adm.)
C _D	Coefficiente de descarga	(adm.)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>	(adm.)
D	Parâmetro da Equação 4.4	(adm.)
D	Diâmetro	(m)
D ₀	Diâmetro do orifício	(m)
D _H	Diâmetro hidráulico	(m)
D ₁	Diâmetro do tubo interno	(m)
D ₂	Diâmetro do tubo externo	(m)
D ^{TJ}	Diâmetro da seção reta do <i>tool joint</i> com escoamento interno	(m)
D ^D	Diâmetro do tubo circular	(m)
D _{cas}	Diâmetro do tubo externo	(m)
D _{eff}	Diâmetro efetivo	(m)
D _{tubo}	Diâmetro do tubo	(m)
f	Fator de atrito	(adm.)
f _{calc}	Fator de atrito calculado	(adm.)
f _{exp}	Fator de atrito experimental	(adm.)
f _{calc(lam)}	Fator de atrito calculado no regime laminar	(adm.)
f _{calc(turb)}	Fator de atrito calculado no regime turbulento	(adm.)
f _{calc(turb)DM}	Fator de atrito calculado no regime turbulento pela Equação 2.19	(adm.)
f _{calc(turb)FS}	Fator de atrito calculado no regime turbulento pela Equação 2.20	(adm.)
f _{calc(turb)OW}	Fator de atrito calculado no regime turbulento pela Equação 2.21	(adm.)
f _{calc(turb)EL}	Fator de atrito calculado no regime turbulento pela Equação 2.22	(adm.)
f _{calc(turb)CH}	Fator de atrito calculado no regime turbulento pela Equação 2.23	(adm.)
F _c	Perda de energia mecânica na região de contração	(adm.)
F _e	Perda de energia mecânica na região de expansão	(m ² .s ⁻²)
G	Parâmetro da Equação 2.41	(adm.)
g	Aceleração da gravidade	(m.s ⁻²)
K	Coefficiente de perda de carga	(adm.)
k	ndice de consistência de <i>power law</i>	(Kg.m ⁻¹ .s ⁿ⁻¹)
K _{c,1}	Coefficiente de perda de carga na região de contração	(adm.)
K _{e,2}	Coefficiente de perda de carga na região de expansão	(adm.)
L	Comprimento da seção reta	(m)
L _{tj}	Comprimento do <i>tool joint</i>	(m)
L _c	Comprimento da seção de contração	(m)
L _e	Comprimento da seção de expansão	(m)
l ₁	Comprimento da região de contração	(m)
l ₂	Comprimento da região de expansão	(m)
m	Massa	(Kg)
n	ndice de comportamento de <i>power law</i>	(adm.)
N	Parâmetro da Equação 2.48	(adm.)

Q	Vazão volumétrica	(m ³ .s ⁻¹)
r	Coordenada radial	(adm.)
R	Coeficiente de correlação de Pearson	(adm.)
R ²	Coeficiente de determinação	(adm.)
Re _c	Número de Reynolds crítico	(adm.)
Re _{c cor}	Número de Reynolds crítico fornecido por correlação	(adm.)
Re _{c exp}	Número de Reynolds crítico experimental	(adm.)
Re _p	Número de Reynolds generalizado – Modelo power law	(adm.)
R _H	Raio hidráulico	(m)
t _i	tempo i	(s)
v	Velocidade média	(m.s ⁻¹)
v _r	Velocidade na direção radial	(m.s ⁻¹)
v _θ	Velocidade na direção tangencial	(m.s ⁻¹)
v _z	Velocidade na direção axial	(m.s ⁻¹)
x _i	Variável x experimental no ponto i	(adm.)
x	Variável x calculada	(adm.)
y _i	Variável y experimental no ponto i	(adm.)
y	Variável y calculada	(adm.)
Y	Parâmetro da Equação 2.39	(adm.)
z	Coordenada axial	(adm.)
Z	Parâmetro da Equação 2.40	(adm.)

Letras gregas

β	Razão entre os diâmetros interno e externo	(adm.)
ε	Rugosidade relativa do tubo	(adm.)
φ	Diâmetro	(m)
γ	Taxa de deformação	(s ⁻¹)
φ	Ângulo	(°)
μ _{ap}	Viscosidade aparente	(Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
θ	Coordenada tangencial	(adm.)
Θ _c	Ângulo da região de contração	(°)
Θ _e	Ângulo da região de expansão	(°)
ρ	Massa específica do fluido	(Kg.m ⁻³)
σ	Desvio padrão	(adm.)
τ	Tensão cisalhante	(Kg.m ⁻¹ .s ⁻²)
ω	Velocidade angular	(rpm)
ΔP	Queda de pressão	(Pa)
ΔL	Comprimento da seção de teste	(m)
ΔP _{calc}	Queda de pressão calculada analiticamente	(Pa)
ΔP _{cont,c}	Queda de pressão da região de expansão	(Pa)
ΔP _{corr}	Queda de pressão fornecida por correlação	(Pa)
ΔP _{exp,e}	Queda de pressão da região de expansão	(Pa)
ΔP _E	Queda de pressão no ejetor	(Pa)
ΔP _{exper}	Perda de carga experimental	(Pa)
ΔP _{exper(lam)}	Queda de pressão experimental no regime laminar	(Pa)
ΔP _{exper(turb)}	Queda de pressão experimental no regime turbulento	(Pa)
ΔP _m	Queda de pressão obtida através de manômetro de Bourdon	(Pa)

ΔP_{sim}	Perda de carga simulada	(Pa)
ΔP_t	Queda de pressão obtida através de transdutor diferencial de pressão	(Pa)
Δt	Varição de tempo	(s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	Utilidades dos Fluidos de Perfuração	3
2.2	Fluidos Newtonianos	4
2.3	Fluidos não-Newtonianos	4
2.3.1	Modelo <i>power law</i>	5
2.3.2	Viscosimetria	6
2.4	Balanco de Pressões em Poços de Petróleo	7
2.5	Balanco de Energia no Escoamento de Fluidos	8
2.5.1	Coefficiente de perda de carga localizada, h_s	8
2.5.2	Coefficiente de perda de carga distribuída, h_d	9
2.6	Critérios de Transição entre os Regimes de Escoamento	9
2.6.1	Determinação teórica dos regimes de escoamento	10
2.6.2	Determinação experimental dos regimes de escoamento	10
2.7	Equações para Cálculo do Fator de Atrito	11
2.7.1	Regime laminar	11
2.7.2	Regime turbulento	11
2.8	Equações de Diâmetro Hidráulico	12
2.9	Acessórios Presentes na Coluna de Perfuração	14
2.10	Perda de Carga em <i>Tool Joints</i>	15
2.10.1	Perda de carga no escoamento externo ao <i>tool joint</i>	16
2.10.2	Perda de carga no escoamento interno ao <i>tool joint</i>	23
2.11	Perda de Carga na Broca de Perfuração	24
2.12	Incertezas nas Determinações Experimentais	25
2.13	Simulação Utilizando Técnicas de CFD	26
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Descrição da Unidade Piloto	27
3.1.1	Acessórios: <i>tool joints</i> , estabilizador e ejetores	30
3.2	Metodologia	32
3.3	Caracterização dos Fluidos	32
3.3.1	Ensaio de reologia	33
3.3.2	Avaliação do modelo reológico	33
3.4	Avaliação dos Regimes de Escoamento	33
3.5	Correlações de Diâmetro Hidráulico	34
3.6	Correlações de Fator de Atrito para o Regime Turbulento	34
3.7	Determinação do Coeficiente de Perda de Carga (K) e do Coeficiente de Descarga (C_D)	35
3.8	Teste da Correlação de Perda de Carga para <i>Tool Joints</i>	35
3.9	Incertezas nas Determinações Experimentais	35
3.9.1	Tratamento das incertezas experimentais	36
3.9.2	Propagação de erros (incertezas calculadas)	36
3.9.3	Desvio padrão dos parâmetros reológicos (incertezas estimadas)	40
3.10	Simulação Computacional	40
3.10.1	Modelagem do escoamento	41
3.10.2	Montagem das malhas	42
3.10.3	Parâmetros de simulação	45
3.10.4	Condições de simulação	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48

4.1 Propriedades Físicas dos Fluidos	48
4.1.1 Incertezas estimadas dos parâmetros reológicos k e n	50
4.2 Resultados da Avaliação dos Regimes de Escoamento	50
4.2.1 Resultados para o fluido BRCARB	50
4.2.2 Resultados para o fluido Catiônico	51
4.2.3 Resultados para o fluido BRMUL	52
4.2.4 Resultados para o fluido BRSCOL	52
4.3 Coeficientes de Perda de Carga (K) dos <i>tool joints</i> e Estabilizador	53
4.3.1 Escoamento interno ao <i>tool joint</i>	54
4.3.2 Escoamento externo ao <i>tool joint</i>	56
4.3.3 Escoamento em estabilizadores	57
4.4 Resultados dos Testes da Correlação de Perda de Carga para Escoamento Interno ao <i>Tool Joint</i>	58
4.5 Resultados dos Testes das Correlações de Perda de Carga para Escoamento Externo ao <i>Tool Joint</i>	60
4.5.1 Resultados dos testes da correlação proposta por JEONG e SHAH (2004)	60
4.5.2 Resultados dos testes da correlação proposta por SIMÕES (2005)	63
4.6 Resultado da Determinação dos Coeficientes de Descarga (C_D) dos Ejetores	63
4.7 Resultados das Simulações	65
4.7.1 Simulação da queda de pressão em região anular	65
4.7.2 Análise do perfil de velocidade axial	67
4.7.3 Análise de regiões de recirculação	68
4.7.4 Resultados de perda de carga simulada	70
5 CONCLUSÕES	76
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
8 ANEXOS	81

1 INTRODUÇÃO

Os fluidos de perfuração são utilizados nas operações de perfuração de poços de petróleo para diversas finalidades, como por exemplo, remover os cascalhos formados durante a perfuração. O fluido é bombeado por uma coluna de perfuração e após remover os cascalhos retorna a superfície para ser reciclado. Durante esse trajeto ocorre perda de energia mecânica do fluido devido ao atrito e à presença de peças ao longo da coluna de perfuração.

A perda de carga é uma parcela significativa no balanço de energia no interior do poço, em relação à energia total necessária para manter o fluido em circulação. Portanto é necessário quantificar as perdas ocorridas para projetar, garantir o controle da pressão total e otimizar o consumo de energia durante as operações de perfuração.

A coluna de perfuração é constituída basicamente pelas tubulações e por acessórios que possuem diversas finalidades. Dentre esses acessórios estão os *tool joints*, estabilizador e os ejetores. Os *tool joints* são peças que permitem conectar as tubulações que compõem a coluna. Os estabilizadores têm a finalidade de auxiliar no direcionamento da perfuração e os ejetores permitem a formação dos jatos da broca, que têm a finalidade de remover os cascalhos depositados no fundo do poço.

O cálculo da perda de carga de fluidos de perfuração para os acessórios específicos da coluna foi pouco abordado pela literatura, que apresenta poucos trabalhos sobre o escoamento em peças com geometrias semelhantes aos *tool joints* e ejetores e nenhum trabalho sobre o escoamento em estabilizadores. Esse fato motivou a execução deste trabalho.

Este trabalho consiste no estudo experimental e teórico da perda de carga de fluidos de perfuração no escoamento em acessórios presentes na coluna de perfuração, denominados: *tool joints*, estabilizador e ejetores. Para o estudo experimental, foi construída uma unidade piloto objetivando a simulação de sistemas de prospecção de petróleo. O dimensionamento da unidade piloto foi feito buscando-se manter as características operacionais presentes em uma unidade real de perfuração. Os diâmetros dos tubos, e as dimensões do estabilizador e dos *tool joints* foram calculados mantendo-se a similaridade dinâmica com relação ao número de Reynolds e a similaridade geométrica com relação às dimensões do poço e da coluna de perfuração.

Os experimentos permitiram a obtenção de dados de queda de pressão nos acessórios em função da vazão de escoamento, e do comportamento reológico do fluido. Através desses dados foi possível determinar coeficientes de perda de carga localizada nos *tool joints*, estabilizador e ejetores. Além disso, foi possível testar correlações presentes na literatura referentes à perda de carga em *tool joints* e ejetores. A metodologia experimental foi avaliada pela determinação do efeito das incertezas das variáveis experimentais sobre as variáveis calculadas.

No caso dos *tool joints*, o estudo de perda de carga também foi feito utilizando-se os pacotes comerciais de *CFD*, FLUENT® e GAMBIT®, com o objetivo de complementar o conhecimento sobre o comportamento hidrodinâmico do fluido de perfuração ao escoar nesses acessórios.

Os resultados revelaram que os valores dos coeficientes de perda de carga variam de acordo com a geometria do escoamento e são pouco sensíveis ao tipo de fluido. Quanto às correlações testadas, foi necessário adequá-las aos fluidos estudados através da reestimação de parâmetros, utilizando-se pacotes computacionais. Dessa forma essas equações mostraram-se eficientes na previsão da perda de carga em *tool joints* e ejetores.

O estudo realizado através da simulação computacional permitiu analisar fenômenos significativos para o escoamento, tais como: desenvolvimento do perfil de velocidade e

formação de vórtex em regiões com variação brusca de geometria. Os resultados mostraram que a unidade piloto estava corretamente dimensionada, quanto ao comprimento da região de entrada necessário para estabelecer completamente o perfil de velocidade, garantindo a obtenção de dados experimentais consistentes para o escoamento laminar dos fluidos de perfuração em torno de *tool joints*. Além disso, essas análises mostraram que os resultados de queda de pressão são influenciados significativamente pela reologia do fluido, exigindo portanto uma determinação precisa dos parâmetros reológicos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentadas as funções e características dos fluidos de perfuração, os tipos de perda de carga resultante do escoamento desses fluidos em colunas de perfuração e métodos experimentais, teóricos e numéricos de quantificar essa perda de carga.

Os fluidos de perfuração são classificados quanto ao comportamento reológico e o método experimental de determinação dos parâmetros reológicos, aplicado em unidades de perfuração, é abordado. Através do balanço total de pressões em poços de petróleo é explicada a importância da quantificação da perda de carga distribuída e localizada em acessórios pertencentes à coluna de perfuração.

É apresentado o método experimental de quantificação da perda de carga, feito a partir da determinação de coeficientes de perda de carga. Esse método requer uma avaliação prévia da região de transição entre os regimes de escoamento e de correlações destinadas ao cálculo de fator de atrito e diâmetro hidráulico, portanto inicialmente mostra-se de que forma pode ser realizada essa avaliação prévia.

São apresentadas algumas correlações empíricas e semi-empíricas presentes na literatura para determinar a perda de carga em acessórios e, além disso, os simuladores numéricos são apresentados como uma alternativa na análise dinâmica dos fluidos.

2.1 Utilidades dos Fluidos de Perfuração

Segundo MACHADO (2002), os fluidos de perfuração são utilizados para auxiliar nas operações de perfuração dos poços de petróleo, removendo os cascalhos formados durante a perfuração, fazendo a lubrificação da broca e o resfriamento e limpeza da região de corte. Além disso, eles são utilizados para manter a estabilidade mecânica do poço, através da pressão hidrostática que exercem sobre as paredes da formação rochosa e proporcionam resistência aos fluidos da formação (ar e água), impedindo-os de penetrar pela parede do poço.

Existem essencialmente três principais categorias de fluidos de perfuração: a base de óleo (OBF, *oil based fluids*), sintético (SBF, *synthetic based fluid*) e a base de água (WBF, *water based fluid*).

Os OBF destacam-se pela temperatura de estabilidade e pelo alto desempenho na perfuração (alta lubrificidade e atributos de estabilização do poço). Contudo, possuem características que limitam suas aplicações, como altos custos, necessidades especiais de manuseio e sobretudo pelo apelo ambiental em relação à toxicidade e à tendência residual.

Os SBF têm sido desenvolvidos para prover melhores desempenhos na perfuração, similares ao OBF no que diz respeito à estabilidade do poço e com melhorias nos parâmetros ambientais como a biodegradabilidade.

Os fluidos a base de água (WBF) geralmente não possuem desempenho de perfuração otimizado, entretanto têm natureza atóxica e destacados níveis de biodegradabilidade. Outro aspecto favorável é o baixo custo quando comparado às demais categorias. Na classe WBF, a bentonita é utilizada para produzir propriedades desejáveis, como aumento das propriedades de limpeza e manutenção da estabilidade do poço. Contudo a bentonita em baixas concentrações é incapaz de prover propriedades reológicas satisfatórias e precisa ser conjugada com aditivos de espessamento.

Os espessantes são aditivos que visam modificar a reologia dos fluidos de perfuração, principalmente aumentando a viscosidade em baixas taxas de deformação. Essa propriedade é importante para manter os sólidos em suspensão quando o fluido não está em movimento.

Além dessa, outras propriedades desejáveis estão presentes principalmente em fluidos que apresentam comportamento não-Newtoniano, pseudoplástico.

2.2 Fluidos Newtonianos

A Figura 2.1 apresenta o esquema de um fluido contido entre duas placas planas e paralelas separadas por uma distância dy . Em estado permanente, se este fluido for submetido a uma tensão a partir da aplicação de uma força F em uma das placas, a placa fixa irá oferecer resistência ao escoamento do fluido pela força de atrito, com igual intensidade e sentido oposto.

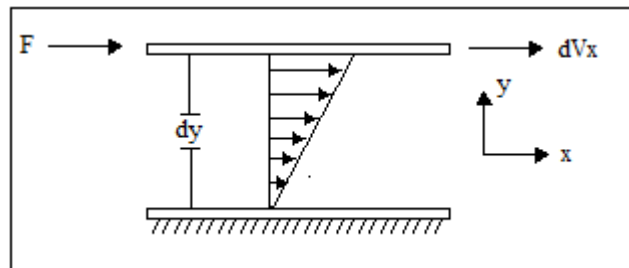


Figura 2.1 – Representação esquemática do escoamento unidirecional de um fluido.

A tensão cisalhante (τ) é uma medida de resistência ao movimento do fluido e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), neste caso, pode ser expressa pela razão entre a variação de velocidade (dV_x) e a distância (dy). Os fluidos Newtonianos são os que apresentam uma relação linear entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação, cuja constante de proporcionalidade é a viscosidade newtoniana (μ), como mostra a Equação 2.1, (BIRD, 2003).

$$\tau = \mu \frac{dV_x}{dy} \quad (2.1)$$

2.3 Fluidos não-Newtonianos

Os fluidos cuja relação entre a tensão cisalhante e taxa de deformação não é linear ou requer uma tensão mínima para iniciar a deformação, a uma dada temperatura e pressão é denominado não-Newtoniano. METZNER (1965) classificou esses fluidos em três grupos: fluidos puramente viscosos, fluidos dependentes do tempo e fluidos viscoelásticos.

Fluidos puramente viscosos são os que apresentam taxas de deformação num ponto dependente apenas da tensão cisalhante instantânea aplicada nesse mesmo ponto. Os fluidos Newtonianos podem ser uma subclasse dos fluidos puramente viscosos. Outras subclasses dos fluidos puramente viscosos são: pseudoplásticos, dilatante e de Bingham. A Figura 2.2 mostra o comportamento reológico desses fluidos.

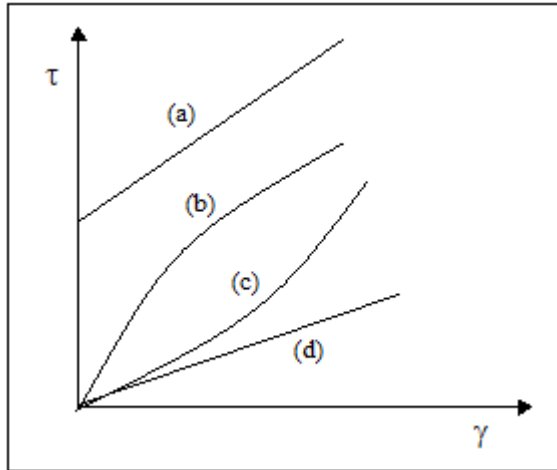


Figura 2.2 – Curvas de comportamento para fluidos puramente viscosos e independentes do tempo, (a)-Bingham, (b)-Pseudoplástico, (c)-Dilatante e (d)-Newtoniano.

Segundo a Figura 2.2, os fluidos de Bingham são os que requerem uma tensão limite para começar a escoar. Nos fluidos dilatantes a tensão é diretamente proporcional a taxa de deformação e nos pseudoplásticos a tensão é inversamente proporcional a taxa de deformação.

Os fluidos dependentes do tempo são aqueles que apresentam viscosidade aparente dependente do tempo de aplicação da taxa de cisalhamento. Esses fluidos são classificados em reopéticos e tixotrópicos. Os tixotrópicos apresentam uma diminuição da viscosidade aparente com o tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante até alcançar um equilíbrio. Já os fluidos reopéticos têm comportamento oposto, a viscosidade aparente aumenta com o tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante.

Uma classe mais complexa dos fluidos não-Newtonianos é a dos fluidos viscoelásticos, que são os que apresentam propriedades viscosas e elásticas, ou seja, uma parte da energia recebida na sua deformação é armazenada, como nos sólidos elásticos, e a outra parte é dissipada, como nos fluidos puramente viscosos.

2.3.1 Modelo *power law*

Dentre os diversos modelos capazes de representar as propriedades reológicas dos fluidos não-Newtonianos puramente viscosos, destaca-se o modelo *power law* (Equação 2.2), pois a maior parte dos fluidos não-Newtonianos independentes do tempo com aplicabilidade na indústria apresenta comportamento de potência numa larga faixa de taxa de deformação (BIRD, 2003).

$$\tau = k\gamma^n \quad (2.2)$$

Onde τ é a tensão cisalhante aplicada a fluido e γ é a taxa de deformação, enquanto k e n são os índices de consistência e comportamento do fluido, respectivamente. Dessa forma, a viscosidade aparente do fluido (μ_{ap}) é dada pela Equação 2.3.

$$\mu_{ap} = k\gamma^{n-1} \quad (2.3)$$

O valor de n igual a 1 caracteriza os fluidos Newtonianos, n entre 0 e 1 caracteriza os fluidos do tipo pseudoplásticos, e n maior que 1 caracteriza os fluidos dilatantes. Neste caso, k

é a viscosidade dinâmica. Os valores dos parâmetros k e n são característicos para cada fluido e variam com a temperatura.

Os parâmetros viscosos do modelo *power law* podem ser obtidos por ensaio de viscosimetria, que consiste na prática experimental de medir a resposta reológica dos fluidos, considerados puramente viscosos, onde a componente elástica pode ser desprezada.

2.3.2 Viscosimetria

Os ensaios de viscosimetria são realizados em equipamentos denominados viscosímetros, que são equipamentos projetados para medir a viscosidade ou os parâmetros viscosos dos fluidos, sob condição de cisalhamento contínuo. Segundo MACHADO (2002), para que um viscosímetro possa efetuar medições absolutas de viscosidade é necessário que o perfil de fluxo seja conhecido e esteja bem definido, a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento possam ser calculadas e os fatores condicionantes estejam controlados. Dentre os fatores condicionantes, destaca-se a temperatura do fluido, pois os parâmetros reológicos são bastante sensíveis às variações de temperatura.

Os projetos mais usuais de viscosímetros se baseiam em escoamentos através de geometrias bem definidas: esfera, tubular, capilar de vidro, rotativo de cilindros coaxiais, rotativo de cone-placa e rotativo de placa-placa. O viscosímetro FANN 35 A (Figura 2.3) é do tipo rotativo de cilindros coaxiais, e seu desenvolvimento foi baseado no projeto original da *Socony-Mobil Oil Company*, cuja intenção era medir as viscosidades aparente e plástica e o limite de escoamento dos fluidos de perfuração nos campos de petróleo (MACHADO, 2002).



Figura 2.3 – Viscosímetro FANN V. G. Metter modelo 35 A.

Nesse viscosímetro, o sistema Couette é aplicado aos cilindros, isto é, o cilindro externo gira enquanto o interno permanece parado. O cilindro gira a uma rotação (em rpm) constante e pré-selecionada, gerando uma força de arraste que é transmitida pelo fluido e age sobre o cilindro interno. O cilindro interno está conectado a uma mola de torção, que ao ser tensionada fornece um ângulo de torção na escala (em graus) do equipamento.

A viscosidade aparente e a taxa de cisalhamento são funções dos parâmetros de projeto do viscosímetro: constante de torção da mola, altura equivalente de imersão e raios dos cilindros interno e externo. Dessa forma, de acordo com as dimensões e propriedades do

viscosímetro citado, a viscosidade aparente e a taxa de cisalhamento podem ser obtidas pela Equação 2.4 e pela Tabela 2.1, respectivamente.

$$\mu_{ap} = \frac{300\varphi}{\omega} \quad (2.4)$$

Tabela 2.1 – Taxas de cisalhamento equivalentes às velocidades de rotação no viscosímetro FANN 35 A.

Vel. de rotação (φ), rpm	3	6	100	200	300	600
Taxa de cisalham. (γ), s ⁻¹	5,1	10,2	170,3	340,6	511,0	1022,0

2.4 Balanço de Pressões em Poços de Petróleo

Atualmente os sistemas de perfuração de poços de petróleo se caracterizam pela relação entre a pressão dinâmica exercida pelo fluido de perfuração contra a parede do poço e a pressão de poros na área da formação próxima àquela parede, que é a pressão abaixo da qual os fluidos da formação percolam para dentro do poço.

Quando a pressão dentro do poço é maior que a pressão da formação, a perfuração é dita *overbalanced* ou convencional. Nos casos em que a pressão no interior do poço é mantida intencionalmente menor que a pressão da formação, a perfuração é definida como *underbalanced*.

Na perfuração convencional, a pressão dentro do poço não deve ultrapassar o valor da pressão de fratura da formação, que é definida como aquela que produz falha mecânica de uma formação com resultante perda de fluido (SANTOS, 2006).

A pressão de fratura e a pressão de poros definem os limites da faixa operacional da pressão no interior do poço, conhecida como janela operacional (Figura 2.4). Manter a pressão do poço dentro dos limites da janela operacional é de fundamental importância para a segurança nas operações em poços de petróleo.

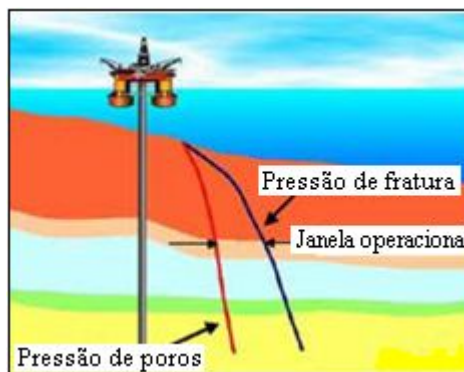


Figura 2.4 – Representação da janela operacional formada pela pressão de poros e pressão de fratura.

A pressão no interior de um poço *off-shore* ($P_{poço}$) é definida como:

$$P_{poço} = P_{sup} + P_{hidr} + P_{bombeio} \quad (2.5)$$

Sendo P_{sup} a pressão na superfície, P_{hidr} a soma da pressão hidrostática da lâmina d'água acima do poço e do fluido de perfuração presente no poço e P_{bombeio} a pressão de bombeio do fluido de perfuração, definida por:

$$P_{\text{bombeio}} \cong \sum \Delta P_{\text{fricção}} \quad (2.6)$$

Onde o $\Delta P_{\text{fricção}}$ é o somatório de toda a perda de energia mecânica, ocorrida durante o escoamento do fluido de perfuração pelo poço. Dessa forma, o conhecimento da perda de carga do fluido de perfuração é fundamental para os projetos e para a segurança dos poços de petróleo.

2.5 Balanço de Energia no Escoamento de Fluidos

A energia mecânica no escoamento isotérmico e estacionário de um fluido incompressível entre pontos quaisquer entre os quais não há fornecimento de energia, neste caso 1 e 2, pode ser analisada macroscopicamente através da equação de Bernoulli modificada (BIRD, 2003), dada por:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_t, \quad (2.7)$$

Onde P_1 e P_2 , v_1 e v_2 , z_1 e z_2 são as pressões, as velocidades médias e as cotas nos pontos 1 e 2, respectivamente. h_t é o somatório de todas as perdas de carga existentes entre os pontos 1 e 2, g é a aceleração da gravidade e ρ é a massa específica do fluido.

Experimentalmente a perda de carga total, h_t , pode ser calculada conhecendo todos os outros termos da Equação 2.7. Incluem-se em h_t as perdas provocadas pelo atrito existente na parede da tubulação reta, h_d , e as perdas de cargas ocasionadas pelos acessórios que compõem um sistema de tubulação, h_s . 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 acessório.

2.5.1 Coeficiente de perda de carga localizada, h_s

A perda de carga em acidentes é resultado do atrito da parede, da alteração na direção do escoamento, obstruções na trajetória do fluido e mudanças abruptas ou graduais na área de escoamento. Na maioria dos acidentes a contribuição devida ao atrito é menor que as outras três (CRANE COMPANY, 1976).

As perdas de carga localizada, h_s , em qualquer tipo de acidente podem ser expressas pelo coeficiente de perda de carga K (BIRD, 2003), que é calculado pela Equação 2.8.

$$K = \frac{h_s}{v^2/2g} \quad (2.8)$$

Considerando-se o escoamento horizontal por uma seção com área de escoamento constante, sem bomba e que os pontos de referência (1 e 2) estejam imediatamente antes e após o acidente, a Equação 2.7 pode ser simplificada à:

$$h_s = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (2.9)$$

Experimentalmente, conhecendo-se a queda de pressão (ΔP_{exper}), a aceleração da gravidade (g), a velocidade média (v) e a massa específica do fluido (ρ), pode-se determinar o coeficiente K , pela expressão:

$$K = \frac{2\Delta P_{\text{exper}}}{v^2 \rho} \quad (2.10)$$

2.5.2 Coeficiente de perda de carga distribuída, h_d

Na hipótese de escoamento horizontal por uma seção de tubo reto com área de escoamento constante, sem bomba e na ausência de qualquer forma de acidentes, a Equação 2.7 pode ser simplificada à:

$$h_d = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (2.11)$$

A queda de pressão ao longo de tubulação reta pode ser dada por (FOX, 2004):

$$\Delta P = 2\rho f \frac{L}{D} v^2. \quad (2.12)$$

Onde f é o fator de atrito de Fanning, mas é comum encontrar na literatura a definição do fator de atrito de Darcy, f_D . No entanto, as duas definições são correlacionadas por $f_D = 4f$. Experimentalmente, conhecendo-se a queda de pressão (ΔP_{exper}), a velocidade média (v), a massa específica do fluido (ρ), o comprimento da seção reta (L) e o diâmetro da tubulação (D), pode-se determinar o fator de atrito experimental (f_{exp}), pela expressão:

$$f_{\text{exp}} = \frac{2\Delta P_{\text{exper}} D}{\rho L v^2} \quad (2.13)$$

No entanto, no caso do regime laminar existe solução analítica para o cálculo do fator de atrito e no caso do regime turbulento, há diversas correlações na literatura para a determinação do fator de atrito. Portanto, inicialmente é necessário determinar o regime de escoamento antes de calcular o fator de atrito.

2.6 Critérios de Transição entre os Regimes de Escoamento

O regime de escoamento laminar é caracterizado pelo movimento das partículas fluidas em camadas lisas, ou lâminas e o regime turbulento é aquele no qual as partículas fluidas rapidamente se misturam enquanto se movimentam ao longo do escoamento, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidade. A passagem do regime laminar para o turbulento ocorre pela região denominada região de transição.

Para todos os fluidos, a natureza do escoamento é governada pela ação entre forças viscosas e inerciais. Para fluidos Newtonianos, o balanço entre essas forças é traduzido pelo

número adimensional de Reynolds. O número de Reynolds para fluidos Newtonianos que caracteriza o início da transição (final do regime laminar), freqüentemente utilizado pela literatura, é igual a 2100 e o final da transição (início do regime turbulento) está em torno de 4000.

No caso de fluidos não-Newtonianos, são necessários outros parâmetros, além do número de Reynolds, para definir a transição entre os regimes. Normalmente, segundo as inúmeras correlações presentes na literatura, os parâmetros reológicos do fluido aliados ao número de Reynolds (modificado em função do modelo reológico) são suficientes para estabelecer os regimes de escoamento.

2.6.1 Determinação teórica dos regimes de escoamento

RYAN e JONHSON (1959) estabeleceram que o início da transição, para fluidos não-Newtonianos do tipo *power law*, é dado por um número de Reynolds crítico, segundo a Equação 2.14.

$$Re_c = \frac{6464n}{(1+3n)^2(2+n)^{\frac{(2+n)}{(1+n)}}} \quad (2.14)$$

MISHRA e TRIPATHI (1970) utilizaram dados experimentais disponíveis na literatura para desenvolver uma equação para caracterizar o início da transição a partir da análise de grupos adimensionais. Segundo esses autores, o número de Reynolds crítico é dado pela Equação 2.15.

$$Re_c = 2100 \frac{(4n+2)(5n+3)}{3(3n+1)^2} \quad (2.15)$$

DODGE e METZNER (1959) reportaram que o início da transição ocorre para $Re_p = 3100$ (para fluidos com $n = 0,38$) e $Re_p = 2700$ (para fluidos com $n = 0,73$). Re_p é o número de Reynolds de METZNER & REED, (1955), definido por:

$$Re_p = \frac{Dv\rho}{k \left(\frac{8v}{D} \right)^{n-1} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n} \quad (2.16)$$

Contudo, numa análise mais ampla, alguns autores sugerem que, devido à complexa relação do Re_p e do índice de comportamento n , é aceitável considerar o fim do regime laminar na faixa de valores de $2000 < Re_p < 2500$. Não foi encontrada na literatura nenhuma correlação que determinasse o final do período de transição.

2.6.2 Determinação experimental dos regimes de escoamento

Além da determinação através de correlações, os regimes de escoamento podem ser definidos para qualquer sistema em que não há alteração das propriedades físicas do fluido

com o tempo, através de gráficos experimentais de vazão versus queda de pressão (SILVA, 1989), como mostra a Figura 2.5.

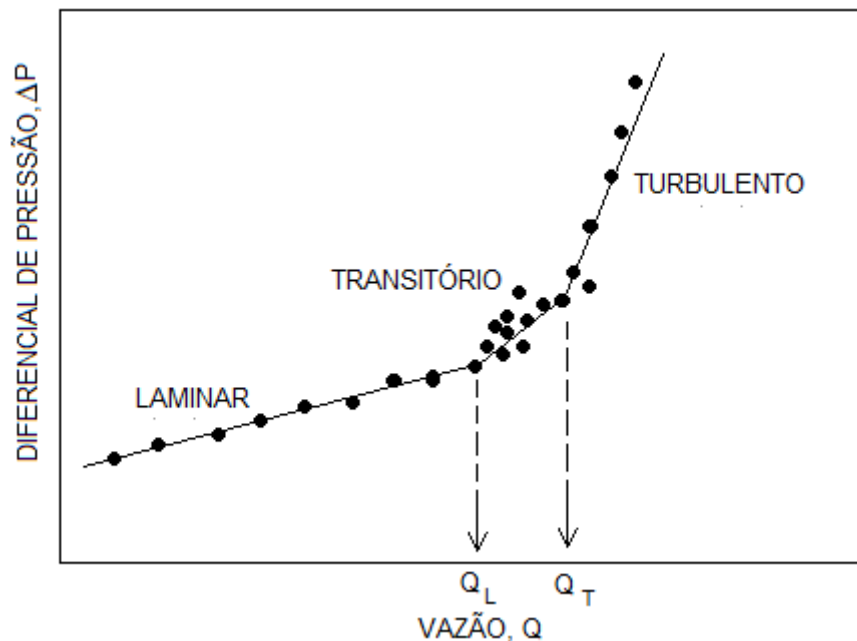


Figura 2.5 – Determinação experimental dos regimes de escoamento.

De acordo com a Figura 2.5, a mudança de regime caracteriza-se pela alteração na inclinação da curva formada pelos dados experimentais. Para cada inflexão da curva é definida uma vazão crítica de escoamento, logo é possível calcular os Reynolds críticos a partir dessas vazões. É importante frisar que, com o método experimental, é possível determinar também o número de Reynolds que caracteriza o início da turbulência.

2.7 Equações para Cálculo do Fator de Atrito

2.7.1 Regime laminar

No regime laminar, o fator de atrito para o escoamento de fluidos não-Newtonianos que seguem o modelo reológico *power law*, pode ser obtido através da equação de Fanning (BIRD, 2003):

$$f = \frac{16}{Re_p} \quad (2.17)$$

A Equação 2.17 é resultado da solução analítica dos balanços de quantidade de movimento e energia combinados, para o escoamento em um duto circular. Re_p é o número de Reynolds modificado para o modelo *power law*, e é calculado pela Equação 2.16.

2.7.2 Regime turbulento

Existem na literatura diversas correlações para previsão de fator de atrito no regime turbulento. GOMES (1987) propôs a forma explícita da dupla potência para representar

equações implícitas para o cálculo de fator de atrito em fluxo turbulento de fluidos de *power law*, segundo forma geral:

$$f = an^b \text{Re}^c \quad (2.18)$$

As expressões propostas por GOMES (1987) para explicitar as correlações de Dodge e Metzner (DMGomes), Frank Schuh (FSGomes) e Ostwald Waale (OWGomes) foram as Equações 2.19, 2.20 e 2.21, respectivamente:

$$f = 0,060n^{0,462} \text{Re}^{-0,223} \quad (2.19)$$

$$f = 0,11n^{0,616} \text{Re}^{-0,287} \quad (2.20)$$

$$f = 0,069n^{0,666} \text{Re}^{-0,235} \quad (2.21)$$

A Equação 2.22 foi tradicionalmente utilizada por diversos autores, dentro dos quais ELLIS (1977), visando a estimar o fator de atrito de fluidos não-Newtonianos em regime turbulento.

$$f = 0,00454 + 0,645\text{Re}^{-0,70} \quad (2.22)$$

CHURCHILL (1977) desenvolveu a expressão para o cálculo do fator de atrito nos três regimes de escoamento em tubos lisos e rugosos, através da combinação de equações existentes na literatura. A expressão proposta foi:

$$f = 2 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (2.23)$$

Onde,

$$A = \left[2,457 \ln \frac{1}{\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \frac{\varepsilon}{D}} \right] \quad (2.24)$$

$$B = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16} \quad (2.25)$$

2.8 Equações de Diâmetro Hidráulico

O diâmetro da tubulação é uma variável presente no cálculo de outras variáveis, como por exemplo fator de atrito e número de Reynolds, que são fundamentais para a determinação

da perda de carga em trechos retos e acidentes. No entanto, quando se trata de região anular é necessário adotar uma medida equivalente ao diâmetro, como por exemplo o diâmetro hidráulico. Algumas correlações foram desenvolvidas, analiticamente ou empiricamente, para calcular o diâmetro hidráulico das regiões anulares.

A Equação 2.26 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, 1991).

$$D_{H1} = 0,816(D_2 - D_1) \quad (2.26)$$

Na Equação 2.27, desenvolvida analiticamente a partir da teoria do raio hidráulico, 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 (BOURGOYNE, 1991).

$$D_{H2} = 4R_H = (D_2 - D_1) \quad (2.27)$$

LAMB (1945) desenvolveu a Equação 2.28 a partir de equações para perda de carga de fluidos Newtonianos em tubos e anulares.

$$D_{H3} = \sqrt{D_2^2 + D_1^2 - \frac{D_2^2 - D_1^2}{\ln(D_2/D_1)}} \quad (2.28)$$

CRITTENDON (1959) desenvolveu a Equação 2.29 empiricamente a partir de um estudo feito para cem razões de diâmetros. Quando se utiliza essa equação é necessário adotar uma velocidade média fictícia, que é computada considerando-se a área da seção transversal da tubulação circular equivalente, ou seja, a área é calculada com base no diâmetro dado pela Equação 2.29.

$$D_{H4} = \frac{\sqrt[4]{D_2^4 - D_1^4 - \frac{(D_2^2 - D_1^2)^2}{\ln(D_2/D_1)}} + \sqrt{D_2^2 - D_1^2}}{2} \quad (2.29)$$

PILEHVARI e SERTH (2005) desenvolveram a Equação 2.30 a partir da solução da equação de Navier-Stokes para anulares concêntricos, e também da definição de diâmetro hidráulico proposta por LAMB, 1945 (Equação 2.28).

$$D_{H5} = (D_2 - D_1) \frac{\left[1 + (D_1/D_2)^2 + \frac{(1 - (D_1/D_2)^2)^2}{\ln(D_1/D_2)} \right]}{(1 - (D_1/D_2)^2)} \quad (2.30)$$

2.9 Acessórios Presentes na Coluna de Perfuração

Durante as operações de perfuração, o fluido é bombeado através da coluna de perfuração e após ser ejetado pela broca, retorna à superfície pela região anular formada entre a formação rochosa e a coluna de perfuração, como mostra a Figura 2.6.

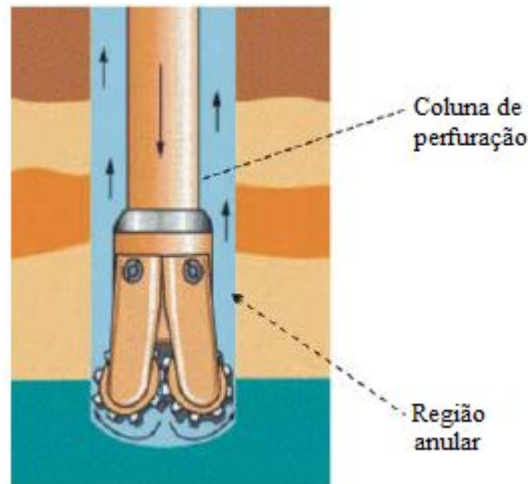


Figura 2.6 – Esquema do trajeto do fluido de perfuração no poço.

Nesse trajeto o fluido perde energia em seções de trecho reto e em acessórios presentes na coluna de perfuração, dentre os quais estão os *tool joints*, estabilizador e broca de perfuração.

Os *tool joints* (Figura 2.7) são formados pela união de luvas e machos existentes nas extremidades dos *drill pipes*, fornecendo assim a conexão entre os tubos da coluna de perfuração. Desta forma, o fluido de perfuração escoar através do *tool joint* durante a descida pelo tubo circular formado pela coluna de perfuração, e também pelo ânulo formado entre a parede do poço e a coluna durante a subida para superfície, caracterizando duas configurações de *tool joints*, um de escoamento interno e outro externo, respectivamente.



Figura 2.7 – Foto dos *tool joints*.

Os estabilizadores (Figura 2.8) são ferramentas que dão maior rigidez à coluna, e por possuírem diâmetro igual da broca, auxiliam a manter o diâmetro (calibre) do poço

(THOMAS, 2004). Essas peças provocam um escoamento helicoidal do fluido, e 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.



Figura 2.8 – Foto dos estabilizadores.

A broca de perfuração (Figura 2.9) é a peça que promove o corte da formação. No interior da broca existem canais com contrações bruscas nas diversas seções que a compõem. Esses canais permitem a passagem do fluido da coluna de perfuração para a região anular do poço, formando os jatos de broca no instante da passagem do fluido pelos orifícios da broca.

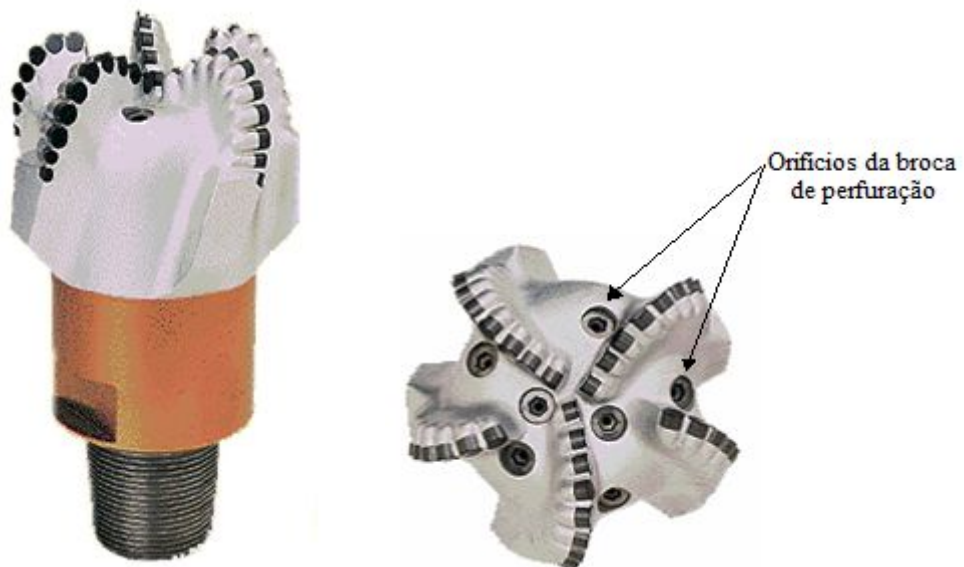


Figura 2.9 – Foto de um modelo de broca de perfuração.

2.10 Perda de Carga em *Tool Joints*

Os *tool joints* são frequentemente tratados pela literatura como uma geometria simplificada composta de: uma região de contração súbita, um trecho reto e uma região de expansão súbita. As Figuras 2.10 e 2.11 ilustram os esquemas simplificados dos escoamentos interno e externo ao *tool joint*, respectivamente.

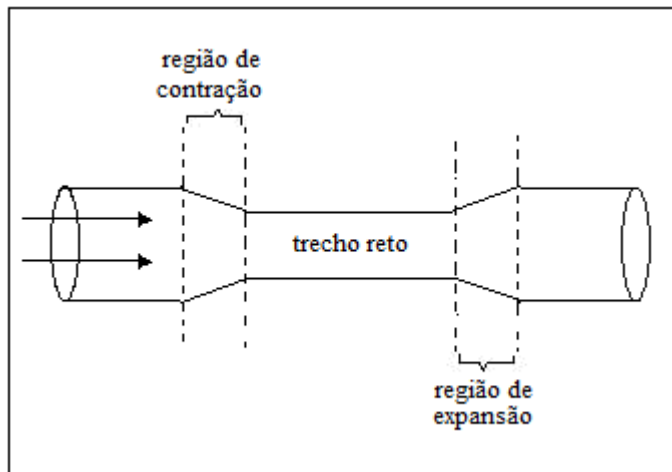


Figura 2.10 – Esquema do escoamento interno a um *tool joint* simplificado.

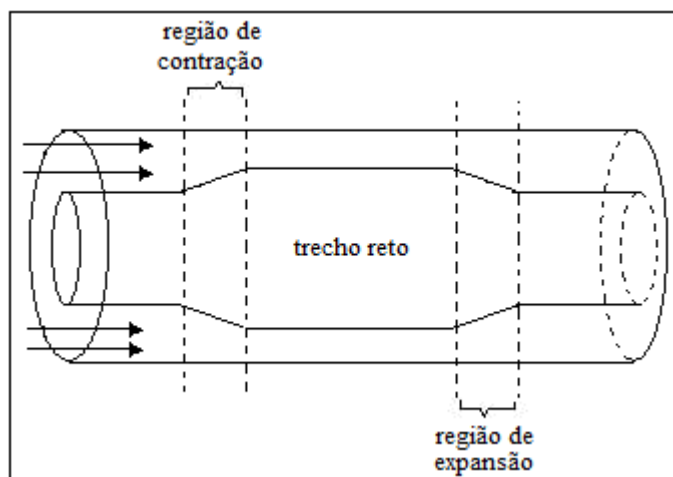


Figura 2.11 – Esquema do escoamento externo a um *tool joint* simplificado.

MENDES *et al.* (2007) estudaram o escoamento de fluidos viscoplásticos através de contrações seguidas de expansões axissimétricas. Eles concluíram que este tipo de escoamento é dependente dos parâmetros reológicos do fluido, da geometria de escoamento e da velocidade do fluido. A mesma conclusão foi feita por CORADIN *et al.* (2006), quando apresentaram uma solução numérica para o escoamento laminar de fluido não-Newtoniano através de contração brusca axissimétrica.

2.10.1 Perda de carga no escoamento externo ao *tool joint*

JEONG e SHAH (2004) apresentaram dados experimentais de testes de queda de pressão em região anular com presença de *tool joints* com escoamento externo. Foram utilizados nesses testes dois tipos de soluções poliméricas Não-newtonianas.

Esses autores adotaram a proposta de simplificação da geometria do *tool joint*, como foi apresentado na Figura 2.10, e propuseram uma formulação teórica para o cálculo da perda de carga em *tool joints*, cujas fórmulas e considerações serão apresentadas a seguir.

A perda de energia mecânica entre dois espaços anulares sucessivos foi expressa aplicando-se a equação de Bernoulli em dois pontos. A perda de carga em uma expansão súbita, para o escoamento turbulento pôde então ser determinada pela Equação 2.31:

$$F_e = \frac{(v_2 - v_1)^2}{2} = \frac{v_2^2}{2} \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2 = K_e \frac{v_2^2}{2} \quad (2.31)$$

A perda de carga em uma contração súbita, para o escoamento turbulento, pode ser dada pela Equação 2.32:

$$F_c = K_c \frac{v_2^2}{2} \quad (2.32)$$

O coeficiente de perda na contração (K_c) pode ser obtido através da equação do movimento combinada com a equação de Bernoulli. A queda de pressão então é calculada multiplicando-se a densidade do fluido pela perda de carga na contração ou na expansão, como mostra a Equação 2.33.

$$\Delta P_{c,e} = F_{c,e} \times \rho \quad (2.33)$$

Equações para o cálculo de K_c e K_e são mostradas a seguir:

$$K_c = 0,5 \sqrt{\text{sen} \frac{\theta_c}{2} (1 - \beta^2)} \quad (2.34)$$

$$K_e = (1 - \beta^2)^2 \quad (2.35)$$

A Equação 2.34 é válida somente para o intervalo: $45^\circ < \theta_c < 180^\circ$.

SIMÕES (2005) simulou o escoamento de água e soluções poliméricas de comportamento não-Newtoniano, através de duas configurações diferentes de escoamento externo ao *tool joint*, um com ângulos $\theta_c=18^\circ$ e $\theta_e=35^\circ$ e o outro com ângulos $\theta_{c,e}=90^\circ$. As simulações foram feitas no pacote comercial FLUENT[®]. Com base nos dados simulados nesse pacote, foram propostas correlações para o cálculo da perda de carga no escoamento externo ao *tool joint*. As correlações propostas foram definidas a partir da divisão da peça em regiões distintas, como mostra a Figura 2.12:

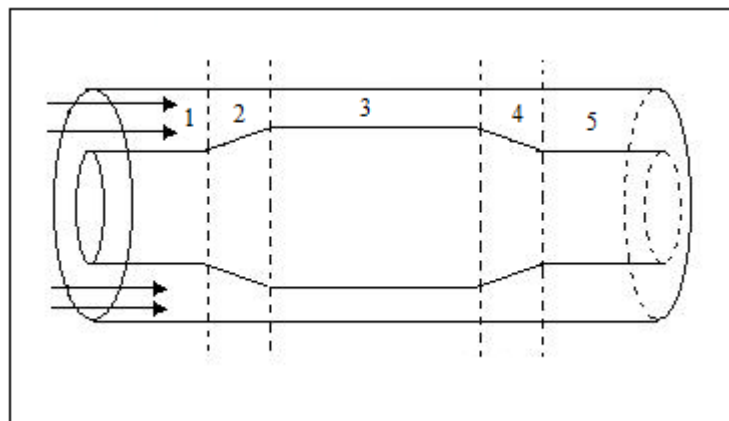


Figura 2.12 – Regiões do *tool joint* onde se aplicam as correlações de SIMÕES.

- Região 1 : Consiste no ânulo formado entre o tubo externo e o tubo interno, na região de entrada do fluido. Os grupos adimensionais utilizados no cálculo da perda de carga, dessa região, foram:

- Grupo 1: ε

$$\text{- Grupo 2: } \text{Re} = \frac{D_{eff1}^n v_1^{2-n} \rho}{k 8^{n-1}} \quad (2.36)$$

$$\text{- Grupo 3: } f_1 = \frac{D_{H1} \Delta P / \Delta L}{\rho v_1^2} \quad (2.37)$$

Onde, DH_1 é definido por:

$$DH_1 = D_{cas} - D_{tubo} \quad (2.38)$$

D_{eff1} é o diâmetro efetivo da região anular, calculado através das equações obtidas por REED e PILEHVARI, 1993:

$$Y = 0,37n^{-0,14} \quad (2.39)$$

$$Z = 1 - \left[1 - \left(\frac{D_{tubo}}{D_{cas}} \right)^Y \right]^{1/Y} \quad (2.40)$$

$$G = \frac{\left(1 + \frac{Z}{2} \right) [(3 - Z)n + 1]}{n(4 - Z)} \quad (2.41)$$

$$D_{eff1} = \frac{DH_1}{G} \quad (2.42)$$

E v_1 é calculado por:

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi(D_{cas}^2 - D_{tubo}^2)} \quad (2.43)$$

As correlações para os regimes laminar e turbulento foram obtidos a partir do *software* STATISTICA. Para o regime laminar a correlação obtida foi:

$$f = 26,56385e^{-0,236736\varepsilon} \text{Re}^{-0,956924} \quad (2.44)$$

A Equação 2.44 é válida para números de Reynolds $78 < \text{Re} < 850$.

Para o regime turbulento, a correlação obtida, para o intervalo $20170 < Re < 107300$, foi:

$$f = 0,10726e^{-0,106704\varepsilon} Re^{-0,217854} \quad (2.45)$$

- Região de contração: Essa região foi modelada separadamente para duas configurações de *tool joints*, e consiste na seção anular com presença de uma contração súbita.

1) *Tool joints* com ângulo de contração igual a 90° . Os grupos adimensionais, neste caso são:

- Grupo 1: ε

$$\text{- Grupo 2: } Re = \frac{D_{eff}^n v_1^{2-n} \rho}{k 8^{n-1}} \quad (2.46)$$

$$\text{- Grupo 3: } f_c = \frac{\Delta P_{cont}}{\rho v^2} \quad (2.47)$$

$$\text{- Grupo 4: } N = \frac{\rho Q (v_2 - v_1)}{k \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8v}{D_{eff}} \right)^n A_c} \quad (2.48)$$

Sendo que N considera o efeito da aceleração do fluido. D_{eff} , v e A_c são definidos por:

$$D_{eff} = \frac{D_{eff1} + D_{eff2}}{2} \quad (2.49)$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.50)$$

$$A_c = \frac{\pi}{4} (D_{TJ}^2 - D_{tubo}^2) \quad (2.51)$$

No cálculo de D_{eff2} utilizam-se as equações:

$$Z = 1 - \left[1 - \left(\frac{D_{TJ}}{D_{cas}} \right)^Y \right]^{1/Y} \quad (2.52)$$

$$D_{eff2} = \frac{DH_2}{G} \quad (2.53)$$

Sendo DH_2 e v_2 definidos por:

$$DH_2 = D_{cas} - D_{TJ} \quad (2.54)$$

$$v_2 = \frac{4Q}{\pi(D_{cas}^2 - D_{TJ}^2)} \quad (2.55)$$

Para a região laminar, no intervalo $90 < Re < 1190$, a equação de fator de atrito é:

$$f = Re^{17,39874} N^{-17,4820} \quad (2.56)$$

Para regime turbulento, no intervalo $19500 < Re < 178500$, a equação utilizada é:

$$f = Re^{19,04302} N^{-19,2704} \quad (2.57)$$

2) *Tool joints* com ângulo de contração menor que 90° . Os grupos adimensionais, neste caso são:

- Grupo 1: ε

$$\text{- Grupo 2: } Re = \frac{D_{eff}^n v_1^{2-n} \rho}{k 8^{n-1}} \quad (2.58)$$

$$\text{- Grupo 3: } f_c = \frac{D_H \Delta P / \Delta L}{\rho v_1^2} \quad (2.59)$$

- Grupo 4:

$$N = \frac{\rho l_1}{k \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8v}{D_{eff}} \right)^n} \left[\frac{Q(2D_{H1} \tan \theta_c - l_1 \tan^2 \theta_c)}{\pi \left(D_{H1}^2 - D_{H1} l_1 \tan \theta_c + \frac{l_1^2}{4} \tan^2 \theta_c \right)^2} \right] \quad (2.60)$$

Sendo D_H definido por:

$$D_H = \frac{D_{H1} + D_{H2}}{2} \quad (2.61)$$

As correlações para o cálculo do fator de atrito para regimes laminar e turbulento, nos intervalos $90 < Re < 1190$ e $19500 < Re < 178500$, são dadas pelas Equações 2.62 e 2.63, respectivamente.

$$f = 0,0782836 e^{-0,060226\varepsilon} Re^{0,654192} N^{-0,125320} \quad (2.62)$$

$$f = 0,000076 e^{-0,000014\varepsilon} Re^{2,818308} N^{1,409154} \quad (2.63)$$

- Região 2: Consiste no anulo formado pelo tubo externo e o *tool joint*. Os grupos adimensionais dessa região são:

- Grupo 1: ε

- Grupo 2: $\frac{L_{tj}}{D_{H2}}$ (2.64)

- Grupo 3: $Re = \frac{D_{eff}^n v_2^{2-n} \rho}{k 8^{n-1}}$ (2.65)

- Grupo 4: $f_2 = \frac{D_{H2} \Delta P / \Delta L}{\rho v_2^2}$ (2.66)

As correlações para o cálculo do fator de atrito para regimes laminar e turbulento, nos intervalos $78 < Re < 1600$ e $17780 < Re < 231250$, são dadas pelas Equações 2.67 e 2.68, respectivamente.

$$f = 16,97019 e^{0,050034\varepsilon} Re^{-0,873025} \left(\frac{L_{tj}}{D_{H2}} \right)^{-0,00675} \quad (2.67)$$

$$f = 2,93785 e^{-0,032261\varepsilon} Re^{-0,339085} \left(\frac{L_{tj}}{D_{H2}} \right)^{-1,03427} \quad (2.68)$$

- Região de expansão: Assim como na região de contração, a expansão também foi modelada separadamente. Essa região consiste em uma região anular com presença de uma expansão súbita.

1) *Tool joints* com ângulo de contração igual a 90° . Os grupos adimensionais, neste caso são:

- Grupo 1: ε

- Grupo 2: $Re = \frac{D_{eff}^n v^{2-n} \rho}{k 8^{n-1}}$ (2.69)

- Grupo 3: $f_c = \frac{\Delta P_{exp}}{\rho v^2}$ (2.70)

- Grupo 4: $N = \frac{\rho Q (v_3 - v_2)}{k \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8v}{D_{eff}} \right)^n A_e}$ (2.71)

Sendo que N considera o efeito de desaceleração. E D_{eff} , v e A_e são definidos por:

$$D_{eff} = \frac{D_{eff2} + D_{eff3}}{2} \quad (2.72)$$

$$v = \frac{v_2 + v_3}{2} \quad (2.73)$$

$$A_e = \frac{\pi}{4} (D_{TJ}^2 - D_{tubo}^2) \quad (2.74)$$

As correlações para o cálculo do fator de atrito para regimes laminar e turbulento, nos intervalos $87 < Re < 1200$ e $19500 < Re < 178450$, são dadas pelas Equações 2.75 e 2.76, respectivamente.

$$f = Re^{6,191806} N^{-6,17465} \quad (2.75)$$

$$f = Re^{18,99065} N^{-19,2257} \quad (2.76)$$

2) *Tool joints* com ângulo de contração menor que 90° . Os grupos adimensionais, neste caso são:

- Grupo 1: ε

$$\text{- Grupo 2: } Re = \frac{D_{eff}^n v^{2-n} \rho}{k 8^{n-1}} \quad (2.77)$$

$$\text{- Grupo 3: } f_c = \frac{D_H \Delta P / \Delta L}{\rho v_2^2} \quad (2.78)$$

- Grupo 4:

$$N = \frac{\rho l_2}{k \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8v}{D_{eff}} \right)^n} \left[\frac{Q(2D_{DH3} \tan \theta_e - l_2 \tan^2 \theta_e)}{\pi \left(D_{H3}^2 - D_{H3} l_2 \tan \theta_e + \frac{l_2^2}{4} \tan^2 \theta_e \right)^2} \right] \quad (2.79)$$

As correlações para o cálculo do fator de atrito para regimes laminar e turbulento, nos intervalos $87 < Re < 1200$ e $19500 < Re < 178450$, são dadas pelas Equações 2.80 e 2.81, respectivamente.

$$f = 0,141479 e^{-0,065555\varepsilon} Re^{0,603822} N^{-0,117522} \quad (2.80)$$

$$f = 0,000028 e^{-0,00007\varepsilon} Re^{3,002915} N^{1,501462} \quad (2.81)$$

- Região 3: Consiste no anulo formado pelo tubo externo e pelo tubo interno, na saída do sistema. Os grupos adimensionais para essa região são:

- Grupo 1: ε

$$\text{- Grupo 2: } \text{Re} = \frac{D_{eff3}^n v_3^{2-n} \rho}{k 8^{n-1}} \quad (2.82)$$

$$\text{- Grupo 3: } f_3 = \frac{D_{H3} \Delta P / \Delta L}{\rho v_3^2} \quad (2.83)$$

Sendo D_{H3} definido por:

$$D_{H3} = D_{cas} - D_{tubo} \quad (2.84)$$

As correlações para o cálculo do fator de atrito para regimes laminar e turbulento, nos intervalos $78 < \text{Re} < 850$ e $20170 < \text{Re} < 107300$, são dadas pelas Equações 2.85 e 2.86, respectivamente.

$$f = 0,37296 e^{-0,246193\varepsilon} \text{Re}^{-0,331228} \quad (2.85)$$

$$f = 30,10606 e^{-0,258237\varepsilon} \text{Re}^{-0,986856} \quad (2.86)$$

2.10.2 Perda de carga no escoamento interno ao *tool joint*

McCAIN (1994) desenvolveu equações para a perda de carga no escoamento interno ao *tool joint*. Segundo esse autor, a queda de pressão nas regiões de contração e expansão é calculada pelas Equações 2.87 e 2.90, respectivamente.

- Região de contração:

$$\Delta P_C = 0,8710 \cdot K_1 \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{D_I^{TJ^4}} \quad (2.87)$$

Onde, se $x \leq 0,57$,

$$K_1 = 0,1508x^2 + 0,0341x \quad (2.88)$$

E Se $x > 0,57$, $K_1=0,07$. Sendo x dado pela Equação 2.89.

$$x = \frac{D_I^{DP} - D_I^{TJ}}{2L_c} \quad (2.89)$$

- Região de expansão:

$$\Delta P_E = 0,8710 \cdot K_2 \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{D_I^{T^4}} \quad (2.90)$$

Onde, se $x \leq 0,8$,

$$K_2 = 52,0648x^6 - 165,2404x^5 + 214,2392x^4 - 140,7675x^3 + 44,4707x^2 - 3,4526x + 0,2188 \quad (2.91)$$

E se $x > 0,8$, $K_2=1,1$. Sendo x dado pela Equação 2.92.

$$x = \frac{D_I^{DP} - D_I^{TJ}}{2L_e} \quad (2.92)$$

2.11 Perda de Carga na Broca de Perfuração

A formação dos jatos da broca de perfuração ocorre devido à passagem do fluido por reduções bruscas ao longo da broca até que seja ejetado pelos orifícios (ejetores).

Segundo PERRY e GREEN (1999), o escoamento incompressível através de um orifício em uma tubulação é comumente descrita por uma equação da vazão volumétrica (Q) em termos da queda de pressão (ΔP_E) e área do orifício (A_0), da área da tubulação (A) e da massa específica do fluido (ρ), como mostra a Equação 2.93.

$$Q = C_D A_0 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_E / \rho}{[1 - (A_0 / A)^2]}} \quad (2.93)$$

O coeficiente de descarga (C_D) considera o efeito causado pela aceleração do fluido na passagem pelos orifícios.

O valor de C_D é aproximadamente igual a 0,62 para números de Reynolds maiores que 20000, embora os valores entre 0,60 e 0,70 sejam freqüentemente utilizados. Entretanto quando o fluido é ejetado verticalmente pelos orifícios, a gravidade aumenta o valor de C_D . A Figura 2.13 mostra esse efeito em termos do número de Froude modificado (Equação 2.94).

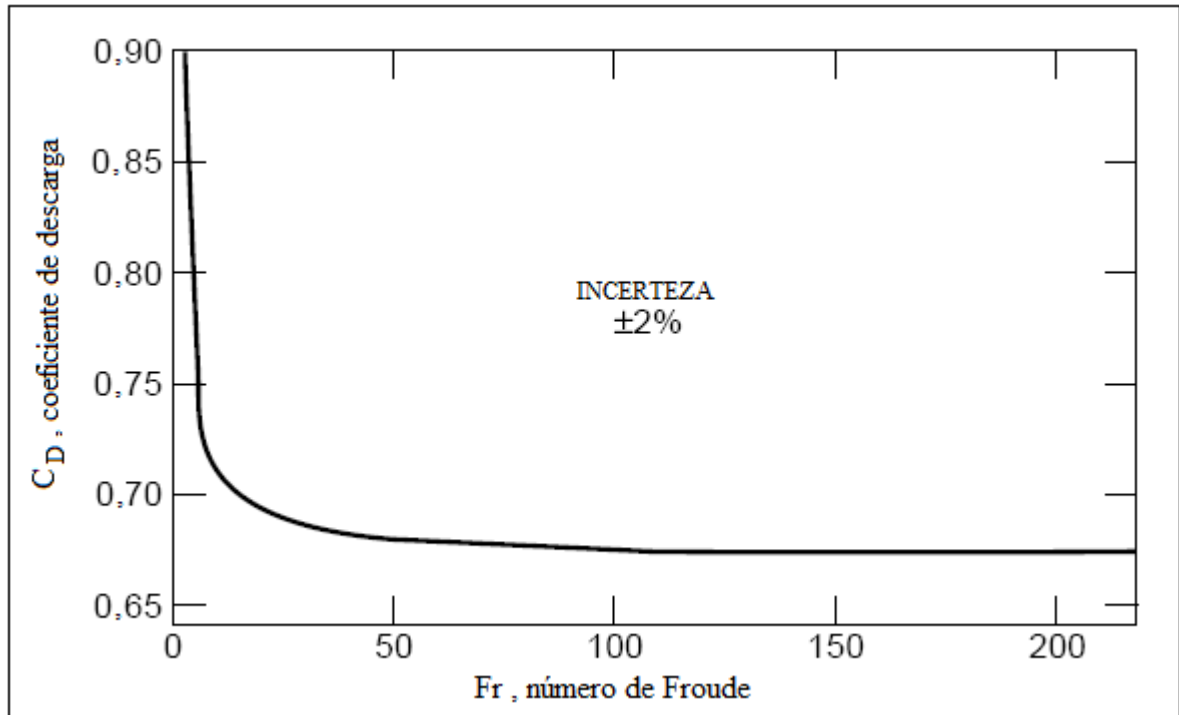


Figura 2.13 – Coeficiente de descarga versus número de Froude.

$$F_r = \frac{\rho g \Delta P}{D_0} \quad (2.94)$$

Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho que abordasse a perda de carga em estabilizadores ou em peças com geometrias semelhantes.

2.12 Incertezas nas Determinações Experimentais

As medidas das grandezas experimentais podem ser avaliadas segundo um intervalo de confiança determinado pelas incertezas experimentais. Essas incertezas são úteis também para determinar o número de algarismos significativos de uma variável.

As análises das incertezas envolvem o cálculo do erro aleatório, ou seja, do desvio padrão (σ) dos dados experimentais. O fator de abrangência (ψ), na análise das incertezas (δ), mede o nível de confiança dos resultados obtidos. Essas variáveis estão correlacionadas da seguinte forma:

$$\delta y = \psi \sigma \quad (2.95)$$

Onde y é a variável experimental de interesse.

Quando se emprega, por exemplo, o fator de abrangência (ψ) igual a 2, esse valor associa ao resultado obtido um nível de confiança de aproximadamente 95% (BARTHEM, 1995).

A propagação das incertezas das variáveis experimentais sobre as variáveis calculadas pode ser analisada. Essa análise é feita da seguinte forma:

Seja Y uma variável calculada a partir dos dados experimentais de X e Z que apresentam as incertezas δ_x e δ_z respectivamente. No cálculo de $Y=Y(X,Z)$, haverá uma propagação dos erros experimentais, cujo desvio padrão será calculado pela Equação 2.96.

$$\delta_Y^2 = \left[\frac{\partial Y}{\partial X}\right]^2 \delta_X^2 + \left[\frac{\partial Y}{\partial Z}\right]^2 \delta_Z^2 + \left[\frac{\partial Y}{\partial X}\right]\left[\frac{\partial Y}{\partial Z}\right]\delta_X \delta_Z \quad (2.96)$$

O terceiro termo, $\delta_x\delta_z$, considera o efeito cruzado das incertezas, e ele só é considerado quando a determinação de um dado experimental sofre influência de outros.

2.13 Simulação Utilizando Técnicas de CFD

Os pacotes de CFD são utilizados com frequência em atividades de pesquisa, pois são importantes ferramentas na investigação numérica da dinâmica de fluidos. Esta tecnologia tem permitido a modelagem de sistemas físicos complexos, que no passado eram extremamente difíceis de serem executadas.

As técnicas de CFD são um meio mais econômico de investigação de sistemas fluidodinâmicos, pois podem prover resultados mais rápidos, e têm a capacidade de prever o que aconteceria no caso em que um ou mais parâmetros do escoamento fossem alterados.

PEREIRA (2006) utilizou técnicas de CFD para avaliar a queda de pressão em região anular. Um dos objetivos desse trabalho foi avaliar o comprimento de entrada necessário para estabelecer o perfil de velocidade no escoamento de fluidos não-Newtonianos.

Em geral, os pacotes CFD têm sido utilizados para descrever o escoamento de fluidos não-Newtonianos em geometrias complexas, para as quais não há solução analítica. CORADIN et al. (2006) estudaram o escoamento de fluidos viscoplásticos através de contração brusca axissimétrica, a partir do programa comercial PHOENICS CFD.

Embora os *tool joints* apresentem geometria relativamente simples, o escoamento através deles apresenta grande complexidade e não possui solução analítica, e portanto a utilização de técnicas de CFD tornam-se importantes na compreensão do fenômeno de perda de carga nessas geometrias.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo será descrita a unidade experimental utilizada na obtenção dos dados de perda de carga em *tool joints*, estabilizador e ejetores, bem como a metodologia experimental adotada quanto à caracterização dos fluidos e a aquisição de dados de perda de carga em função da vazão mássica de escoamento através dessas geometrias.

Os métodos empregados para avaliar a transição entre os regimes laminar e turbulento e as equações utilizadas no cálculo do diâmetro hidráulico e do fator de atrito em regime turbulento serão apresentados. Mostra-se também a aplicação das equações referentes ao cálculo dos coeficientes de perda de carga e de descarga apresentadas no capítulo 2, além das circunstâncias em que foram testadas as correlações de perda de carga no escoamento interno e externo aos *tool joints*.

A metodologia de análise do escoamento em torno de *tool joints* também será abordada, com relação à simulação numérica computacional, no que se refere à modelagem do escoamento, parâmetros relevantes e condições de simulação.

Também será mostrado o tratamento do efeito das incertezas das variáveis medidas experimentalmente sobre as variáveis calculadas.

3.1 Descrição da Unidade Piloto

Os dados experimentais de perda de carga foram obtidos em uma unidade piloto que operava em circuito fechado, composta de tubos de ferro galvanizado, dispostos em 7 linhas de escoamento independentes. As linhas eram compostas de um tubo circular de 1" de diâmetro, de anulares concêntricos em duas razões de diâmetro (ânulos formados pelos tubos de 2" - 3/4", e 1 1/4" - 1/2"), em contrações e expansões abruptas (simulação dos *tool joints*) e em um estabilizador, que ficava localizado na região anular formada por tubos de diâmetros externo e interno de 1 1/4" e 1/2", respectivamente. O sistema de dutos encontrava-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, foi proporcionado por uma bomba de deslocamento positivo do tipo helicoidal de 25HP da marca GEREMIAS (WEATHERFORD), operando com vazões de até 20m³/h e pressão de recalque da ordem de 12kgf/cm². As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam uma foto e um esquema da unidade piloto, respectivamente.



Figura 3.1 – Foto da unidade piloto.

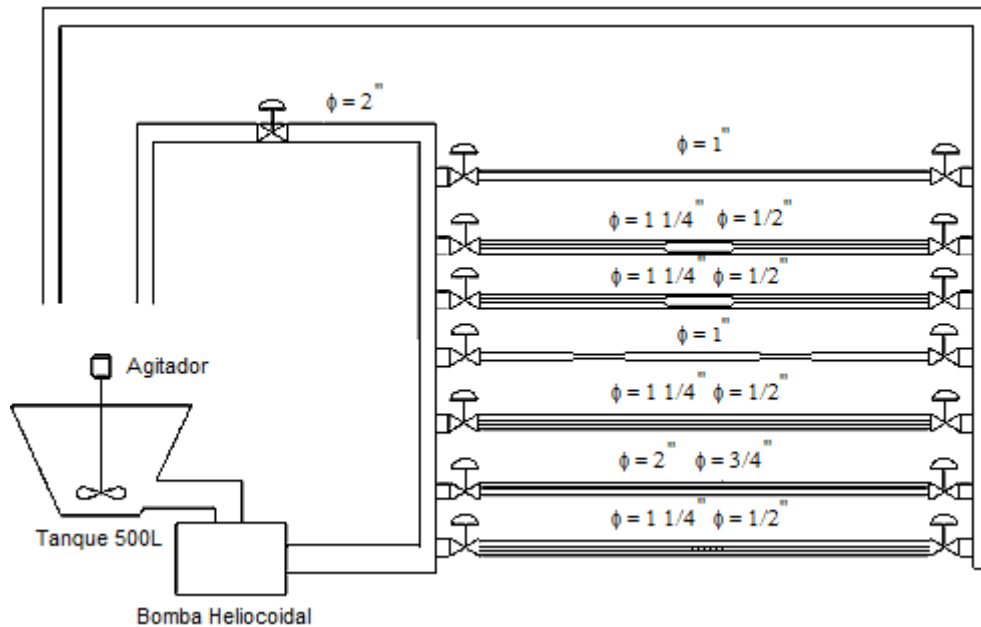


Figura 3.2 – Esquema da unidade piloto.

LEAL (2006) realizou experimentos com fluidos Newtonianos nessa unidade e mostrou que os tubos de ferro galvanizado têm rugosidade relativa (ϵ) aproximadamente igual a zero.

Cabe ressaltar que os valores dos diâmetros das tubulações apresentadas na Figura 3.2 são nominais. Os diâmetros reais, interno e externo considerando-se a espessura da tubulação, utilizados nos cálculos deste trabalho, foram obtidos a partir da medição das tubulações com um paquímetro, e seus valores estão na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Diâmetros reais e nominais das tubulações.

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

A unidade piloto foi instrumentada com um conjunto de três transmissores diferenciais de pressão (Figura 3.3), 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 3.3 – Foto do transdutor diferencial de pressão.

Estes transdutores permitiram 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, laminar e turbulento, em tubos foram 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.

A Figura 3.4 mostra uma foto do quadro montado para permitir a seleção da tubulação a ser estudada e do transdutor adequado a cada vazão de escoamento dos fluidos.

* Essas dimensões não foram medidas por serem irrelevantes aos cálculos efetuados.



Figura 3.4 – Quadro de seleção das tubulações e dos transdutores de pressão.

3.1.1 Acessórios: *tool joints*, estabilizador e ejetores

Os *tool joints* foram dimensionados e posteriormente divididos em duas peças distintas, simulando o escoamento interno e externo a estes acessórios separadamente.

As dimensões dos *tool joints* foram calculadas com base nas razões de diâmetro e ângulos apresentados no trabalho de SIMÕES (2005), e estão apresentadas nas Figuras 3.5 e 3.6.

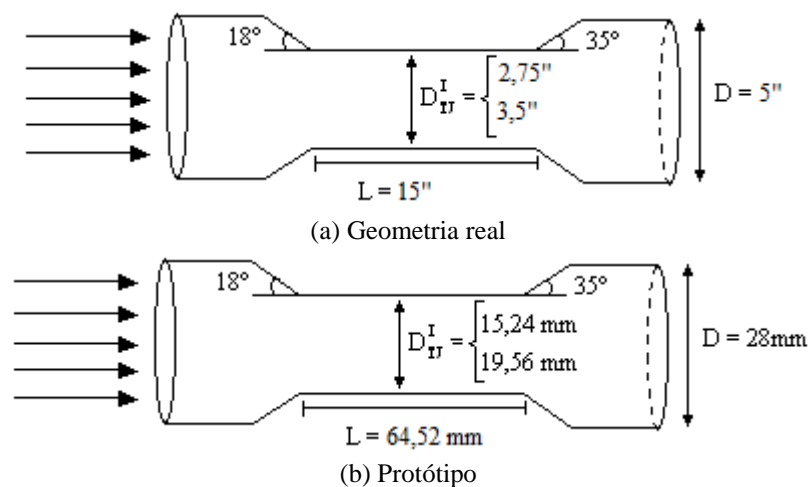


Figura 3.5 – Esquema da peça real (a) e do protótipo (b), que representam o escoamento interno ao *tool joint*.

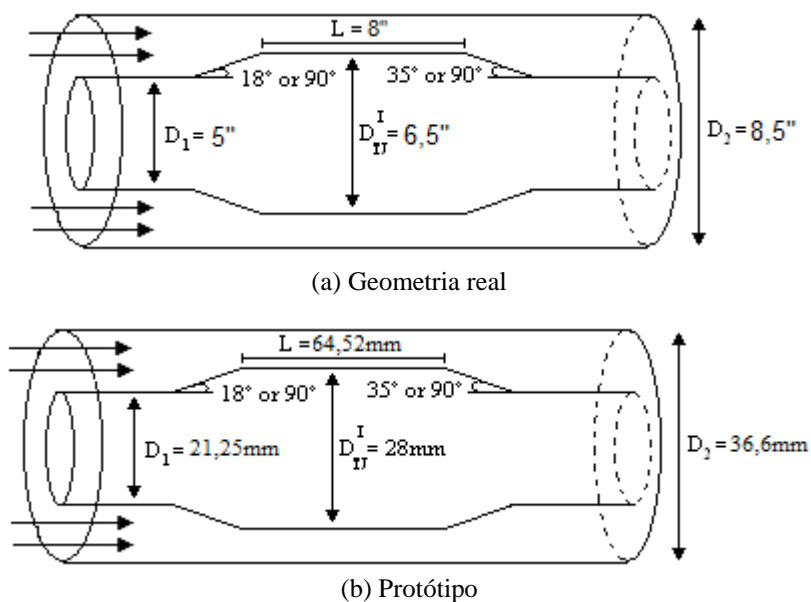


Figura 3.6 – Esquema da peça real (a) e do protótipo (b), que representam o escoamento externo ao *tool joint*.

No caso do estabilizador, as dimensões utilizadas para fabricar a peça foram obtidas no catálogo da *SMFI International*, onde foi escolhida uma das muitas geometrias existentes, vide Figura 3.7.

Esta peça foi fixada pelas extremidades no centro de uma tubulação de ferro galvanizado de 6m de comprimento e ½” de diâmetro. Essa tubulação que continha o estabilizador foi então posicionada no centro de outra tubulação de 1 ¼” de diâmetro, formando uma região de escoamento anular em torno do estabilizador.



Figura 3.7 – Foto do estabilizador.

Os simuladores de jatos de brocas foram adaptados ao retorno da linha de escoamento, onde a pressão foi medida por meio de um manômetro de Bourdon. A configuração define-se em uma redução brusca de 2” para os seguintes diâmetros de ejetores: ¾”, 1/2”, ¼” e 1/8”. A Figura 3.8 apresenta a foto de um ejetor.



Figura 3.8 – Foto do ejetor.

3.2 Metodologia

Para cada fluido de perfuração estudado, foram obtidos conjuntos de pontos de perda de carga em função da vazão para as tubulações de seção circular e anular, com ou sem a presença de *tool joints* ou estabilizador.

Após o sistema atingir o regime permanente, a vazão volumétrica era 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 possuía controle de temperatura, portanto, para garantir que os parâmetros reológicos fossem correspondentes à temperatura do fluido em escoamento, os ensaios de reologia eram feitos no viscosímetro FANN 35 A, para cada ponto experimental.

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

Através dos dados experimentais de queda de pressão, vazão e reologia dos fluidos de perfuração, foram determinados os coeficientes de perda de carga localizada para os *tool joints*, ejetores e estabilizador e foram testadas correlações presentes na literatura para o cálculo da perda de carga em *tool joints*. Os dados foram utilizados ainda para comparar os resultados obtidos através de simulação numérica com pacote CFD.

Para avaliar a perda de carga nesses acessórios, foi necessário caracterizar o regime de escoamento através de correlações presentes na literatura e de determinação experimental.

O procedimento experimental foi analisado a partir da determinação das incertezas nas variáveis experimentais e da propagação dessas nas variáveis calculadas.

3.3 Caracterização dos Fluidos

As amostras dos fluidos utilizados neste trabalho foram cedidas pelo Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES). Foram estudados quatro fluidos de reologia Não-

newtoniana, todos pseudoplásticos e denominados: BRCARB, Catiônico, BRMUL e BRSCOL. Esses fluidos eram constituídos de soluções à base de água, exceto o BRMUL que é de base orgânica. As concentrações de cada componente na solução eram desconhecidas.

Os valores das massas específicas foram obtidos através de ensaios de picnometria e os valores encontrados para os fluidos BRCARB, Catiônico, BRMUL e BRSCOL foram 1065,50 Kg/m³ e 1132,75 Kg/m³, 974,7 Kg/m³ e 1150,00 Kg/m³, respectivamente. O modelo reológico adotado foi o modelo *power law* (Equação 2.2).

3.3.1 Ensaios de reologia

Os parâmetros reológicos do modelo *power law* foram determinados através de ensaios de viscosimetria realizados no viscosímetro FANN, modelo 35 A. Em razão de os parâmetros reológicos serem variáveis com a temperatura, os ensaios de reologia foram feitos para cada ponto experimental de vazão versus queda de pressão. Esse procedimento foi adotado para garantir que os parâmetros fossem correspondentes à temperatura do fluido em escoamento, já que o sistema não possuía controle da temperatura, que variava significativamente ao longo dos experimentos.

Nesses ensaios, foram coletados dados de ângulo de torção (φ) para cada um das seis possíveis velocidades de rotação (ω). Esses dados permitiram a obtenção da viscosidade aparente, através da Equação 2.4 e da taxa de cisalhamento (γ) pela Tabela 2.1.

Através da linearização da Equação 2.3, que relaciona viscosidade aparente com taxa de cisalhamento, os parâmetros k e n foram obtidos graficamente pela determinação dos coeficientes linear e angular da equação, respectivamente.

3.3.2 Avaliação do modelo reológico

O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para verificar a adequação do modelo *power law* aos dados experimentais. Esse coeficiente é dado pelo quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, que é calculado através da Equação 3.1.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

O valor de R varia num intervalo de zero a um, sendo que $R^2=1$ significa uma correlação perfeita entre as variáveis e $R^2=0$ significa que as duas variáveis não dependem uma da outra.

3.4 Avaliação dos Regimes de Escoamento

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

Os resultados gerados pela avaliação experimental foram utilizados como base na determinação do Reynolds crítico e os resultados gerados pelas correlações serviram para corroborar os resultados experimentais.

3.5 Correlações de Diâmetro Hidráulico

A Equação de diâmetro hidráulico D_{H1} (Equação 2.26) foi escolhida para o cálculo do diâmetro de regiões anulares, com base no trabalho de SCHEID *et al* (2007). A Tabela 3.2 mostra o resultado dos erros percentuais obtidos nesse trabalho, para as Equações 2.26 a 2.30 no escoamento em região anular de diâmetros interno e externo iguais a 1/2" e 1 1/4", respectivamente.

Tabela 3.2 – Resultados dos erros percentuais obtidos na avaliação das equações de diâmetro hidráulico.

Fluido	Erros percentuais na avaliação das correlações de diâmetro hidráulico				
	D_{H1}	D_{H2}	D_{H3}	D_{H4}	D_{H5}
BRCARB	15,34	16,88	15,06	57,45	45,83
Catiônico	28,52	12,43	28,06	44,50	63,93
BRMUL	19,37	27,20	21,20	61,57	31,37
BRSCOL	26,18	25,90	26,11	51,56	47,29

Observa-se na Tabela 3.2 que a equação D_{H3} apresentou resultados muito semelhantes a equação D_{H1} , e por ser mais difundida na literatura a equação D_{H1} foi adotada no presente trabalho, embora a equação D_{H2} tenha sido melhor no caso do fluido Catiônico.

3.6 Correlações de Fator de Atrito para o Regime Turbulento

A escolha das equações de fator de atrito para o regime turbulento foi baseada no trabalho de SCHEID *et al* (2007), de acordo com a geometria de escoamento e com o fluido estudado. Nesse trabalho, as Equações 2.19 a 2.23 foram testadas no escoamento em regiões circulares e anulares, e os desempenhos obtidos por elas estão na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Avaliação das correlações de fator de atrito, em termos de erros percentuais médios absolutos.

Geometrias		Percentual médio dos erros nas correlações de fator de atrito				
		DMGomes	OWGomes	FSGomes	Ellis	Churchill
BRCARB	Circular	11,95	7,82	10,01	11,90	65,64
	Anular 1.1/4"-1/2"	17,92	3,85	13,99	19,85	61,01
Catiônico	Circular	22,63	6,07	0,90	73,22	49,76
	Anular 1.1/4"-1/2"	20,86	6,85	4,90	64,14	27,57
BRMUL	Circular	27,12	40,80	37,42	12,80	25,74
	Anular 1.1/4"-1/2"	39,73	50,33	46,24	28,38	7,43
BRSCOL	Circular	37,85	9,45	12,12	93,31	150,73
	Anular 1.1/4"-1/2"	7,94	22,81	13,87	32,85	92,09

Mediante o exposto na Tabela 3.3, as equações de fator de atrito adequadas ao cálculo da perda de carga no regime turbulento foram escolhidas de acordo com o fluido e o tubo a ser tratado, e a utilização delas seguiu a indicação da Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Adequação das correlações de fator de atrito, de acordo com o fluido e geometria estudados.

	BRCARB	Catiônico	BRMUL	BRSCOL
Circular	OWGomes	FSGomes	Ellis	OWGomes
Anular 1.1/4”-1/2”	OWGomes	FSGomes	Churchill	DMGomes

É importante frisar que os pontos obtidos na região de transição foram considerados turbulentos, e portanto foi necessário utilizar uma das equações citadas na Tabela 3.4 nessa situação.

3.7 Determinação do Coeficiente de Perda de Carga (K) e do Coeficiente de Descarga (C_D)

Os coeficientes de perda de carga localizada (K) dos *tool joints* e do estabilizador foram calculados pela Equação 2.10. No cálculo desses coeficientes foi necessário subtrair a perda de carga ocorrida nos trechos retos de 50cm antes e depois da peça.

O desconto foi feito subtraindo-se a perda de carga total, obtida experimentalmente, da perda de carga em 1m de trecho reto, calculado a partir do fator de atrito, através do qual se obteve o valor da perda de carga (ΔP_{calc}) pela Equação 2.12.

A equação de fator de atrito utilizada no regime laminar foi a Equação 2.17. No regime turbulento foi escolhida dentre as Equações 2.7 a 2.11 a que obteve o melhor desempenho, de acordo com a Tabela 3.4, para o tubo circular no caso do escoamento interno ao *tool joint* e para o tubo anular no caso do escoamento externo ao *tool joint* e estabilizador.

A avaliação da perda de carga nos ejetores foi conduzida a partir da Equação 2.93. Entretanto foi considerado que $A \gg A_0$, e portanto a Equação 2.93 tomou a forma:

$$\Delta P_E = \frac{0,5 \cdot \rho \cdot Q^2}{C_D^2 \cdot A_0^2} \quad (3.2)$$

O coeficiente de descarga foi avaliado quanto à variação de seu valor em função do tipo de fluido e da razão dos diâmetros que formavam os ejetores.

3.8 Teste da Correlação de Perda de Carga para *Tool Joints*

As Equações 2.31 a 2.35 foram testadas para prever a perda de carga nas regiões de contração e expansão para o escoamento externo ao *tool joint*. No caso do escoamento interno ao *tool joint* foram testadas as Equações 2.87 a 2.92. Em ambos os casos as seções de trecho reto, da própria geometria e de 50 cm antes e após a peça, foram calculados a partir da Equação 2.12.

No caso do escoamento externo ao *tool joint* foram testadas também as correlações desenvolvidas por SIMÕES (2005), Equações 2.36 a 2.86. Cabe ressaltar que essas equações contemplam as perdas de carga ocorridas nas regiões de trecho reto.

3.9 Incertezas nas Determinações Experimentais

Com o objetivo de verificar o intervalo de confiança dos dados experimentais de fator atrito, queda de pressão, coeficientes de perda de carga e dados reológicos, foram feitas análises de incertezas das grandezas experimentais.

As incertezas das variáveis experimentais foram propagadas para as variáveis calculadas e o intervalo de confiança dos dados foi analisado a partir dos gráficos de determinação dos coeficientes de perda de carga (K), no caso do estabilizador e *tool joints*, e dos gráficos de avaliação das correlações de perda de carga em *tool joints* com escoamento interno e externo. No caso do coeficiente de descarga dos ejetores (C_D) o intervalo de incerteza foi determinado, entretanto não foi avaliado graficamente.

3.9.1 Tratamento das incertezas experimentais

As incertezas de cada uma das variáveis envolvidas no cálculo da queda de pressão, via dados experimentais, são apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Incerteza das variáveis experimentais.

Grandezas	$2\sigma_i$
ΔP_t (transdutor)	0,26 mmHg
ΔP_m (manômetro)	2 psi
m (balança)	5,0g
φ (°)	1
D, ρ	~0
L, g e Δt	~0

As incertezas dos transdutores e da balança foram fornecidas pelos fabricantes desses equipamentos. No caso do viscosímetro a incerteza na leitura do ângulo foi determinada pela escala do aparelho. Por serem pequenas, as incertezas referentes ao comprimento de tubo reto, massa específica, diâmetro, aceleração da gravidade e tempo não foram computadas.

Na análise realizada empregou-se fator de abrangência igual a 2 para o cálculo da incerteza, para associar aos resultados um nível de confiança de aproximadamente 95%, segundo BARTHEM (1995).

3.9.2 Propagação de erros (incertezas calculadas)

A propagação das incertezas experimentais foi feita sobre as variáveis: velocidade média (v), viscosidade aparente (μ_{ap}), número de Reynolds (Re_p), fator de atrito experimental (f_{exp}), fator de atrito calculado no regime laminar ($f_{calc(lam)}$), fator de atrito no regime turbulento ($f_{calc(turb)}$), queda de pressão experimental no regime laminar ($\Delta P_{exper(lam)}$) e queda de pressão experimental no regime turbulento ($\Delta P_{exper(turb)}$).

Cabe acrescentar que a propagação das incertezas foi feita nas variáveis que envolvem o cálculo da perda de carga em trecho reto. Dessa forma a propagação foi calculada com base nos dados experimentais obtidos no tubo circular ($D=1''$) e no anular ($D_2=1 \frac{1}{4}''$ e $D_1= \frac{1}{2}''$), exceto no caso dos coeficientes de descarga dos ejetores (C_D). Sendo assim, os valores propagados para as variáveis calculadas nos tubos circular e anular foram aplicados aos dados experimentais dos *tool joints* e estabilizador.

A partir da Equação 2.96 foi feita a propagação de erros nas variáveis citadas acima, e as fórmulas resultantes, desenvolvidas neste trabalho, para cada variável são apresentadas a seguir:

- Velocidade:

$$\sigma v = \frac{1}{3\rho A} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3} \right) \sigma m \quad (3.3)$$

- Viscosidade aparente:

$$\sigma \mu_{ap} = 2 \frac{300}{\omega} \sigma \varphi \quad (3.4)$$

- Reynolds:

$$\sigma \text{Re}_p = \sqrt{\left(\frac{\partial \text{Re}_p}{\partial v} \sigma v \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_p}{\partial k} \sigma k \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}_p}{\partial n} \sigma n \right)^2} \quad (3.5)$$

Sendo,

$$\frac{\partial \text{Re}_p}{\partial v} = \frac{(2-n)\text{Re}_p}{v} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \text{Re}_p}{\partial k} = -\frac{\text{Re}_p}{k} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \text{Re}_p}{\partial n} = -\text{Re}_p \left(\ln\left(\frac{8v}{D}\right) - \frac{1}{4} + \ln\left(\frac{3n+1}{4n}\right) \right) \quad (3.8)$$

- Fator de atrito experimental:

$$\sigma f_{\text{exp}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_{\text{exp}}}{\partial \Delta P} \sigma \Delta P_t \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\text{exp}}}{\partial v} \sigma v \right)^2} \quad (3.9)$$

Sendo,

$$\frac{\partial f_{\text{exp}}}{\partial \Delta P} = \frac{f_{\text{exp}}}{\Delta P} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial f_{\text{exp}}}{\partial v} = -\frac{\Delta P D}{\rho L v^3} \quad (3.11)$$

- Queda de pressão experimental:

$$\sigma \Delta P_{\text{exper}(lam,turb)} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta P_{\text{exper}(lam,turb)}}{\partial f_{\text{exper}(lam,turb)}} \sigma f_{\text{calc}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta P_{\text{exper}(lam,turb)}}{\partial v} \sigma v \right)^2} \quad (3.12)$$

Sendo,

$$\frac{\partial \Delta P_{\text{exper}(lam,turb)}}{\partial f_{\text{calc}(lam,turb)}} = \frac{\Delta P_{\text{exper}(lam,turb)}}{\Delta f_{\text{calc}(lam,turb)}} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \Delta P_{\text{exper}(lam,turb)}}{\partial v} = 2 \frac{\Delta P_{\text{exper}(lam,turb)}}{v} \quad (3.14)$$

- Fator de atrito calculado no regime laminar:

$$\sigma f_{\text{calc}(lam)} = \frac{-16}{\text{Re}_p^2} \sigma \text{Re}_p \quad (3.15)$$

- Fator de atrito calculado no regime turbulento (DMGomes):

$$\sigma f_{\text{calc}(turb)_{DM}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_{\text{calc}(turb)_{DM}}}{\partial n} \sigma n \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\text{calc}(turb)_{DM}}}{\partial \text{Re}_p} \sigma \text{Re}_p \right)^2} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial f_{\text{calc}(turb)_{DM}}}{\partial n} = 0,02772 n^{-0,538} \text{Re}_p^{-0,223} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial f_{\text{calc}(turb)_{DM}}}{\partial \text{Re}_p} = -0,01338 n^{0,462} \text{Re}_p^{-1,223} \quad (3.18)$$

- Fator de atrito calculado no regime turbulento (FSGomes):

$$\sigma f_{\text{calc}(turb)_{FS}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_{\text{calc}(turb)_{FS}}}{\partial n} \sigma n \right)^2 + \left(\frac{\partial f_{\text{calc}(turb)_{FS}}}{\partial \text{Re}_p} \sigma \text{Re}_p \right)^2} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial f_{\text{calc}(turb)_{FS}}}{\partial n} = 0,0678 n^{-0,384} \text{Re}_p^{-0,287} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial f_{calx(turb)_{FS}}}{\partial Re_p} = -0,0316n^{0,616} Re_p^{-1,287} \quad (3.21)$$

- Fator de atrito calculado no regime turbulento (OWGomes):

$$\sigma f_{calx(turb)_{OW}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_{calx(turb)_{OW}}}{\partial n} \sigma n\right)^2 + \left(\frac{\partial f_{calx(turb)_{OW}}}{\partial Re_p} \sigma Re_p\right)^2} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial f_{calx(turb)_{OW}}}{\partial n} = 0,0459n^{-0,334} Re_p^{-0,235} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial f_{calx(turb)_{OW}}}{\partial Re_p} = -0,0162n^{0,666} Re_p^{-1,235} \quad (3.24)$$

- Fator de atrito calculado no regime turbulento (Ellis):

$$\sigma f_{calx(turb)_{EL}} = \frac{\partial f_{calx(turb)_{EL}}}{\partial Re_p} \sigma Re_p \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial f_{calx(turb)_{EL}}}{\partial Re_p} = -0,4515 Re_p^{-1,79} \quad (3.26)$$

- Fator de atrito calculado no regime turbulento (Churchill):

$$\sigma f_{calx(turb)_{CH}} = \frac{\partial f_{calx(turb)_{CH}}}{\partial Re_p} \sigma Re_p \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial f_{calx(turb)_{CH}}}{\partial Re_p} = 2 \left\{ \left[- \left(12 \cdot \frac{8^{12}}{Re_p^{13}} \right) - \frac{\left[\left(\frac{353,80AA - 600480BB}{Re_p^2} \right) \cdot 1,5 \cdot (A+B)^{0,5} \right]}{(A+B)^3} \right] \right. \\ \left. \left(0,0833 \left[\left(\frac{8}{Re_p} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1,5}} \right]^{-0,9167} \right) \right\} \quad (3.28)$$

Onde, A e B são calculados respectivamente pelas Equações 2.24 e 2.25 e,

$$AA = \left[2,457 \ln \frac{1}{\left(\frac{7}{\text{Re}_p} \right)^{0,9}} \right]^{15} \quad (3.29)$$

$$BB = \left(\frac{37530}{\text{Re}_p} \right)^{15} \quad (3.30)$$

- Coeficiente de descarga dos ejetores:

$$\sigma C_D = \sqrt{\left(\frac{\partial C_D}{\partial \Delta P} \sigma \Delta P_m \right)^2 + \left(\frac{\partial C_D}{\partial v} \sigma v \right)^2} \quad (3.31)$$

Sendo,

$$\frac{\partial C_D}{\partial \Delta P_m} = -\frac{1}{2} v \Delta P_m^{-3/2} \sqrt{0,5 \rho} \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial C_D}{\partial v} = \sqrt{\frac{0,5 \rho}{\Delta P_m}} \quad (3.33)$$

3.9.3 Desvio padrão dos parâmetros reológicos (incertezas estimadas)

O desvio padrão dos parâmetros reológicos do modelo *power law* foi obtido através do pacote computacional ESTIMA, em linguagem FORTRAN, desenvolvido por PINTO e LOBÃO (1991). O desvio padrão de cada parâmetro foi gerado a partir dos valores médios desses parâmetros, referentes a todos os pontos experimentais. Nessa análise, assim como no tratamento das incertezas experimentais, foi utilizado o fator de abrangência igual a 2.

3.10 Simulação Computacional

Análises de perda de carga no escoamento interno e externo aos *tool joints* foram feitas a partir dos simuladores comerciais de CFD, GAMBIT® e FLUENT®. Essas análises permitiram a obtenção dos perfis de pressão e velocidade durante o escoamento.

A análise do perfil de pressão, obtido através de simulação computacional, em conjunto com os dados experimentais foi útil na avaliação das correlações de perda de carga testadas. A análise do perfil de velocidade foi importante para determinar se o tamanho do comprimento de entrada projetado para a unidade piloto foi suficiente para estabelecer o perfil de velocidade.

O cálculo da perda de carga em seções retas de regiões anulares via CFD foi executado com o objetivo de aprimorar o conhecimento em técnicas de simulação, tais como a geração

de malhas e aplicação de algoritmos. Nesses testes foram simulados dados em regime laminar, os quais foram comparados aos respectivos valores obtidos por solução analítica.

A seguir serão apresentadas as condições que foram estabelecidas para essas análises.

3.10.1 Modelagem do escoamento

As simulações foram executadas admitindo-se o escoamento como isotérmico, laminar*, incompressível, em regime permanente e com viscosidade aparente dependente apenas do tensor taxa de deformação. Diante dessas considerações, foram aplicadas as equações da continuidade (Equação 3.34) e do movimento (Equações 3.35 a 3.37), em coordenadas cilíndricas.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) \quad (3.34)$$

Equações do movimento:

Componente axial:

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (3.35)$$

Componente radial:

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r \quad (3.36)$$

Componente tangencial:

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \right) + \rho g_\theta \quad (3.37)$$

* Embora tenham sido obtidos dados experimentais em regime turbulento, foram simulados apenas os casos laminares.

Para os fluidos Não-newtonianos a tensão cisalhante é dada em termos da viscosidade efetiva e do tensor taxa de deformação, conforme a Equação 3.38.

$$\tau = \mu(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (3.38)$$

Em geral, a viscosidade efetiva é função das três invariantes do tensor taxa de deformação (FLUENT INC., 2005). Nas simulações executadas foi adotada a clássica aproximação de considerar o efeito apenas da segunda invariante, de acordo com as Equações 3.39 e 3.40.

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma} : \dot{\gamma}} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} = 2 \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \\ \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right]^2 + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right]^2 + \left[\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right]^2 \end{aligned} \quad (3.40)$$

3.10.2 Montagem das malhas

As malhas foram geradas a partir do pacote computacional GAMBIT[®], que é um dos pré-processadores do FLUENT, responsável pela criação da geometria, formação da malha e estabelecimento dos tipos de condições de contorno.

A malha do tubo anular foi formada com base nas dimensões observadas na Figura 3.9. Essas dimensões correspondem às dimensões reais das tubulações presentes na unidade piloto.

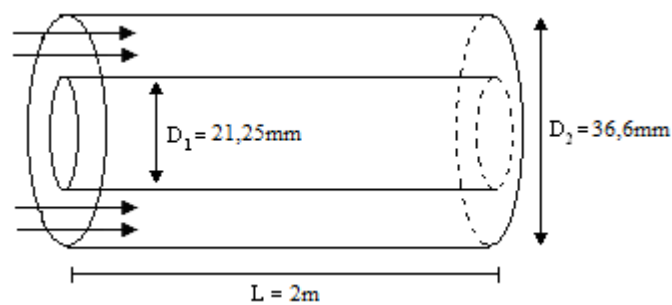


Figura 3.9 – Dimensões do tubo anular.

A partir das dimensões observadas no protótipo da Figura 3.6, foram formadas as geometrias para o escoamento externo ao *tool joint*, sendo um com ângulos de 18° e 35° para as regiões de entrada e saída respectivamente e o outro com ângulos iguais de 90° para a entrada e a saída. Para o escoamento interno ao *tool joint*, as dimensões utilizadas estão apresentadas no protótipo da Figura 3.5, sendo um com diâmetro interno (D_{1TJ}) igual a 15,24 mm e o outro igual 19,56 mm.

Para cada *tool joint* foi adicionada uma região de escoamento de 80 cm antes e após a peça, sendo essa uma região anular no caso dos *tool joints* com escoamento externo, e circular no caso dos *tool joints* com escoamento interno. Desses 80 cm adicionados, 50 cm referem-se

à posição da tomada de pressão na tubulação e os 30 cm sobressalentes tiveram o objetivo de permitir o desenvolvimento completo do perfil de velocidade antes que o fluxo atingisse a posição da tomada de pressão.

No caso da região anular e do escoamento externo ao *tool joint* foram geradas malhas estruturadas formadas por elementos hexaédricos. Para o escoamento interno ao *tool joint* a casca das tubulações foi formada por elementos retangulares e o interior por volumes tetraédricos, em virtude da presença de elementos triangulares nas faces de entrada e saída do tubo. Dessa forma a malha obtida para o escoamento interno ao *tool joint* foi uma malha híbrida, não-estruturada.

Optou-se pelo refinamento da malha nas regiões próximas à parede do tubo (utilizando-se o recurso de ‘*boundary layer*’), e nas regiões de contração e expansão da peça. O número de células obtidos em cada face e o número total de elementos em cada volume estão apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Resumo do número de células por face e elementos por volume para cada acessório.

Acessório	Entrada/ Saída	Contração	Trecho reto da peça	Expansão	Trecho de 80cm	Elementos totais
Tubo anular	2400	-	14400	-	-	432000
<i>Tool joint</i> interno $D_{ITJ}=15,24\text{mm}$	1336	2580	6880	1290	25800	1340533
<i>Tool joint</i> interno $D_{ITJ}=19,56\text{mm}$	1336	2580	6880	1290	25800	1340533
<i>Tool joint</i> externo $\Theta_c=18^\circ / \Theta_e=35^\circ$	1000	750	2500	250	15000	670000
<i>Tool joint</i> externo $\Theta_c=90^\circ / \Theta_e=90^\circ$	1600	-	4000	-	24000	1020000

Finalmente a malha de todo volume foi criada utilizando o esquema Cooper, tendo como base as faces de entrada e saída do fluido.

Para encerrar a etapa de pré-processamento foram definidas condições de contorno, ou seja, os tipos de faces que compõem a entrada, saída, paredes e interior da geometria. As faces de entrada e saída foram definidas, respectivamente, como ‘*velocity inlet*’ e como ‘*outflow*’, pela compatibilidade existente entre esses tipos de contorno.

A Figura 3.10 mostra a seção transversal das malhas obtidas para o tubo anular e *tool joints*. As Figuras 3.11 e 3.12 ilustram as vistas laterais das malhas obtidas para o escoamento interno ao *tool joint* ($D_{ITJ}= 15,24\text{mm}$) e o escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e= 35^\circ$), respectivamente.

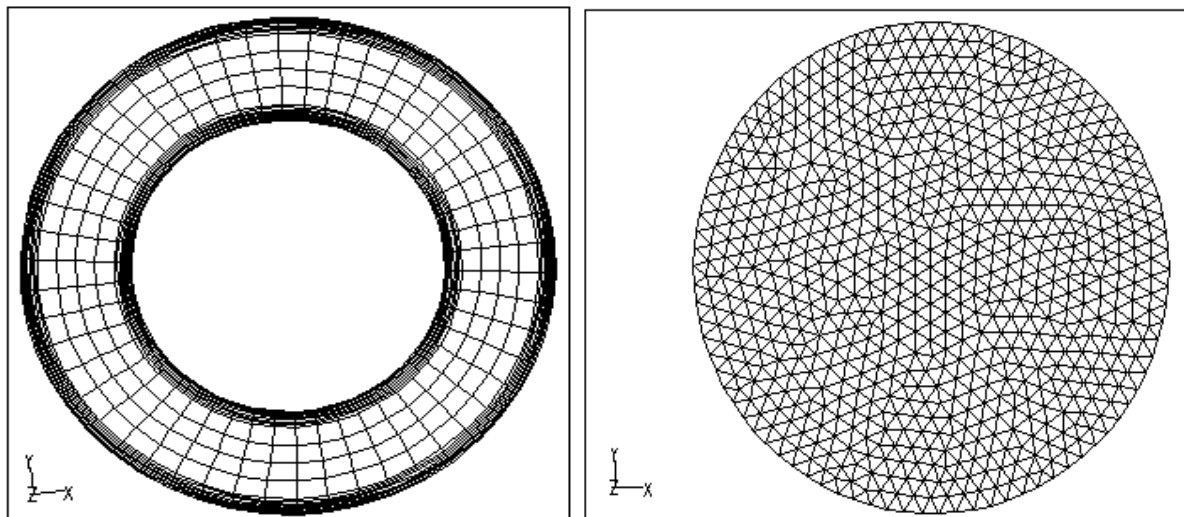


Figura 3.10 – Seção transversal das malhas do tubo anular e *tool joints*.

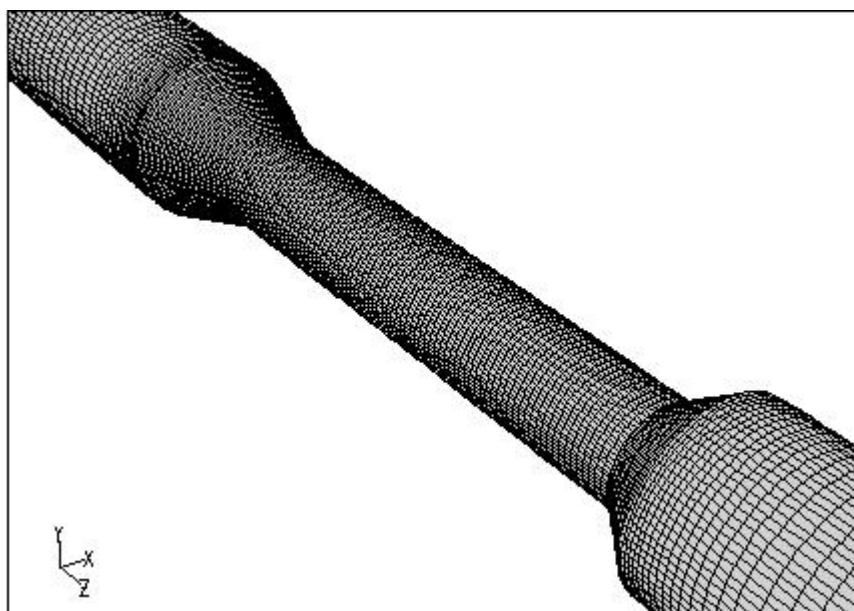


Figura 3.11 – Vista lateral da malha do *tool joint* com escoamento interno.

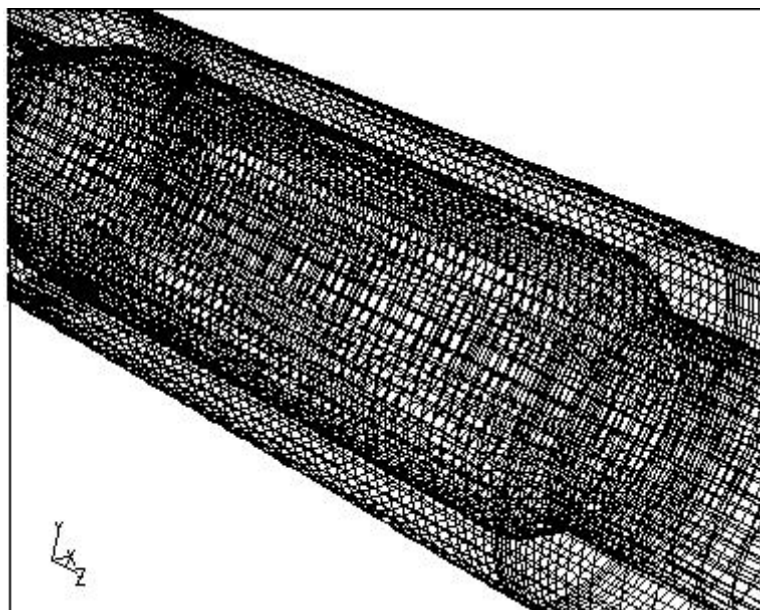


Figura 3.12 – Vista lateral da malha do *tool joint* com escoamento externo.

3.10.3 Parâmetros de simulação

A simulação numérica foi executada pelo *software* comercial FLUENT[®], versão 6.3.26. Após carregar o arquivo de pré-processamento, iniciou-se a simulação pela utilização do recurso '*smooth/swap*', que complementa a adaptação da malha e melhora a qualidade da solução numérica, e pela definição correta da escala utilizada na formação da geometria, ambas no *menu* '*grid*'.

Na configuração dos modelos, foram adotadas as condições: regime estacionário tridimensional, laminar, e com estratégia segregada. Os fluidos foram definidos a partir de suas propriedades físicas: massa específica e parâmetros reológicos. Nos parâmetros reológicos (*power law*), a temperatura de referência foi considerada igual a 298 K e os limites de viscosidade mínimo e máximo respectivamente iguais a 0 e 1000 Kg.m⁻¹.s⁻¹, para permitir flexibilidade ao simulador no cálculo do perfil de viscosidade aparente.

A seguir foram definidos os valores das condições de contorno, entre os quais a velocidade de entrada foi calculada a partir do valor experimental de vazão testada, e à saída foi atribuído valor igual a 1 para a razão de entrada e saída de massa.

Em relação às estratégias de resolução, foi adotada rotina '*SIMPLE*' para o acoplamento da velocidade e pressão, para interpolação da pressão foi utilizado o algoritmo '*PRESTO!*', pois é indicado para fluxos em que há recirculação e acentuados gradientes de pressão. Para a discretização da equação do movimento, no caso da malha do tubo anular e para o escoamento externo ao *tool joint*, foi utilizado o algoritmo '*QUICK*', pela sua eficiência em malhas hexaédricas e casos de recirculação. Para o caso de escoamento interno ao *tool joint* foi utilizado esquema de interpolação de segunda ordem, '*second-order-upwind*', por ser adequado às malhas formadas por elementos tetraédricos.

A fim de avaliar a o efeito da escolha dos algoritmos na solução final, foram testados, no caso do tubo anular, os algoritmos *default* do FLUENT[®], ou seja, '*SIMPLE*' para o acoplamento da velocidade e pressão, '*Standard*' para interpolação da pressão e '*first-order-upwind*' para a discretização da equação do movimento.

O critério de convergência adotado foi igual a 0,001 para todos os resíduos. A velocidade de entrada foi utilizada para iniciar a simulação. Cabe acrescentar que os valores dos parâmetros, inerentes aos modelos matemáticos, foram adotados segundo a indicação

proposta pela metodologia padrão empregada pelo FLUENT[®]. A escolha dos algoritmos também seguiu a indicação proposta pelo FLUENT[®], em função da geometria e da característica do fluido.

Para visualizar o perfil de velocidade axial, na direção axial, foi criada uma linha de escoamento, no centro do tubo para o caso do escoamento interno ao *tool joint* e no centro da região anular com abscissa igual a zero, no caso do tubo anular e do escoamento externo ao *tool joint*. A determinação desse perfil permitiu visualizar o desenvolvimento do perfil de velocidade, caracterizando o comprimento de entrada necessário para o estabelecimento de um perfil completamente desenvolvido.

3.10.4 Condições de simulação

Nas simulações do escoamento em *tool joints* foram analisados: o comprimento necessário para estabelecer o perfil de velocidade do fluido após o escoamento através dos *tool joints*, a existência de regiões de reversão de fluxo após as expansões, e o erro percentual entre a perda de carga obtida experimentalmente e a simulada, dado pela Equação 3.41.

$$Erro(\%) = \left| \frac{\Delta P_{\text{exper,calc}} - \Delta P_{\text{sim}}}{\Delta P_{\text{exper,calc}}} \right| \cdot 100 \quad (3.41)$$

Nas simulações executadas para o tubo anular foi avaliada o erro entre a queda de pressão calculada analiticamente (ΔP_{calc}) e a simulada obtida pelas diferentes combinações de algoritmos testados.

As Tabelas 3.7 e 3.8 mostram os valores usados como dados de entrada na simulação dos fluidos BRCARB, Catiônico, BRMUL e BRSCOL no escoamento em região anular e *tool joints*.

Tabela 3.7 – Dados de entrada na simulação do escoamento em tubo anular.

Fluido	k (Pa.s ⁿ)	n (adm.)	v (m/s)	ΔP_{calc} (Pa)	ΔP_{exper} (Pa)
BRCARB	1,35	0,43	2,008	22259	18631
	0,99	0,49	2,474	27173	24089
Catiônico	4,62	0,25	2,392	21451	19079
	5,21	0,23	1,797	20283	16682
	5,46	0,22	1,245	18282	13654
	4,62	0,24	2,694	21505	21213
BRMUL	2,87	0,33	2,432	23820	31263
	2,85	0,33	3,219	26849	39502
BRSCOL	4,43	0,23	1,841	17200	17469
	3,77	0,25	2,325	18230	21048

Tabela 3.8 – Dados de entrada na simulação do escoamento em *tool joints*.

Fluido	Acessório	k (Pa.s ⁿ)	n (adm.)	v (m/s)	ΔP_{exper} (Pa)
BRCARB	TJ interno (D _{iTJ} = 15,24mm)	0,80	0,50	0,505	3028
		0,90	0,47	1,231	6983
	TJ interno (D _{iTJ} = 19,56mm)	1,12	0,46	1,349	6658
		1,21	0,44	0,411	2429
	TJ externo ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e= 35^\circ$)	1,11	0,46	2,169	12041
		1,11	0,46	0,443	4200
		1,11	0,46	1,138	7779
	TJ externo ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e= 90^\circ$)	1,10	0,46	1,920	11034
		0,95	0,49	1,113	6366
		1,20	0,45	0,411	4007
Catiônico	TJ interno (D _{iTJ} = 15,24mm)	5,83	0,23	1,634	9980
		5,83	0,23	0,785	6683
	TJ interno (D _{iTJ} = 19,56mm)	6,07	0,23	1,724	6267
		6,08	0,23	2,476	8101
		6,08	0,23	0,898	3029
	TJ externo ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e= 35^\circ$)	5,49	0,24	1,620	11552
		5,92	0,23	1,059	9613
	TJ externo ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e= 90^\circ$)	4,94	0,25	1,744	11764
		4,94	0,25	2,617	14675
	BRMUL	TJ interno (D _{iTJ} = 15,24mm)	2,53	0,35	0,582
TJ interno (D _{iTJ} = 19,56mm)		1,83	0,38	1,621	7297
TJ externo ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e= 90^\circ$)		2,47	0,37	2,435	17314
		2,60	0,35	3,207	23904
		2,57	0,35	3,115	22483
		2,54	0,36	2,766	18715
		2,47	0,37	1,580	12197
BRSCOL	TJ interno (D _{iTJ} = 15,24mm)	3,75	0,26	0,649	4577
		3,46	0,28	1,148	7586
		3,49	0,28	1,706	12384
	TJ interno (D _{iTJ} = 19,56mm)	4,14	0,26	1,370	2813
		3,24	0,29	1,710	5039
		3,58	0,27	1,837	5778
		4,10	0,26	2,593	8996
	TJ externo ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e= 35^\circ$)	4,45	0,25	1,648	9143
		4,49	0,24	1,167	7036
		3,81	0,27	1,260	7024
		3,68	0,28	0,882	5862
	TJ externo ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e= 90^\circ$)	3,92	0,27	0,497	4866
		3,87	0,27	0,834	5532
		4,22	0,27	1,037	6717
		4,33	0,26	1,478	9276
		4,35	0,26	2,147	13425

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados encontrados para a determinação dos parâmetros reológicos dos fluidos, da transição entre os regimes de escoamento, dos coeficientes de perda de carga (para *tool joints* e estabilizador) e coeficiente de descarga (para ejetores), da avaliação das correlações de perda de carga no escoamento interno e externo aos *tool joints* e simulação computacional via pacote CFD.

Quanto aos parâmetros reológicos, serão mostrados os intervalos de valores nos quais estavam compreendidos esses parâmetros e a variação desses parâmetros em função da temperatura do escoamento. O ajuste do modelo *power law* aos fluidos também foi analisado.

A análise da transição entre os regimes de escoamento foi baseada na comparação entre os resultados obtidos por determinação experimental e por correlações encontradas na literatura.

Os coeficientes de perda de carga e de descarga foram avaliados quanto ao ajuste aos dados experimentais e variação em função da geometria e do tipo de fluido.

As correlações para a determinação da perda de carga no escoamento interno e externo foram analisadas graficamente e através de tabelas, onde se verificou a necessidade de adequá-las aos dados experimentais através da reestimação de seus respectivos parâmetros.

As simulações mostram os perfis de velocidade e pressão obtidos no escoamento em tubos anulares e *tool joints*. Nesses perfis é possível observar os fenômenos determinantes para o escoamento, tais como o estabelecimento do perfil de velocidade e inversão de fluxo.

4.1 Propriedades Físicas dos Fluidos

Os parâmetros reológicos dos fluidos foram obtidos para cada ponto experimental de vazão, sendo assim foi formado um conjunto de dados reológicos para cada fluido. Esse conjunto de parâmetros está compreendido entre valores mínimos e máximos de cada parâmetro, como mostra a Tabela 4.1.

A Tabela 4.1 apresenta as faixas de n e k obtidas no ajuste pelo modelo *power law* para os fluidos BRCARB, Catiônico, BRMUL e BRSCOL. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram dados típicos das curvas reológicas obtidas.

Tabela 4.1 – Intervalo dos valores dos parâmetros reológicos obtidos para os fluidos de perfuração.

Grandeza	BRCARB		CATIÔNICO		BRMUL		BRSCOL	
	Valor mínimo	Valor Máximo	Valor mínimo	Valor Máximo	Valor mínimo	Valor Máximo	Valor mínimo	Valor Máximo
n	0,43	0,50	0,27	0,23	0,27	0,45	0,23	0,30
k (kg/m.s ²⁻ⁿ)	0,80	1,48	4,15	5,93	1,35	3,61	2,84	4,68
τ (kg/m.s ²)	1,78	29,13	7,14	32,70	3,31	40,88	4,59	30,15
γ (s ⁻¹)	5,1	1022	5,1	1022	5,1	1022	5,1	1022
Temperatura(°C)	22,5	38,5	27	43	24,5	50	24	46

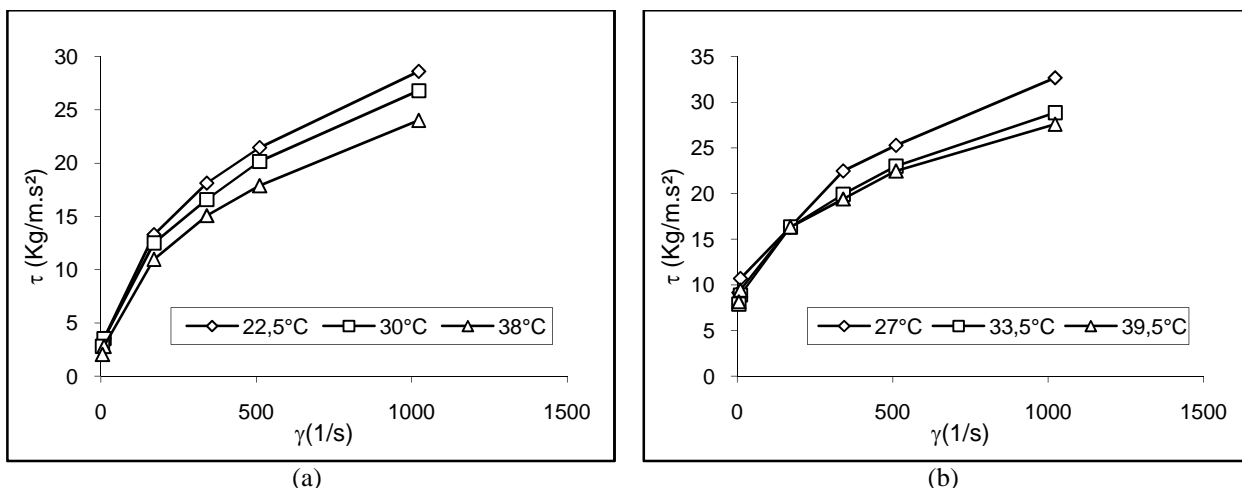


Figura 4.1 – Reograma típico dos fluidos de perfuração BRCARB (a) e Catiônico (b), obtidos para três temperaturas.

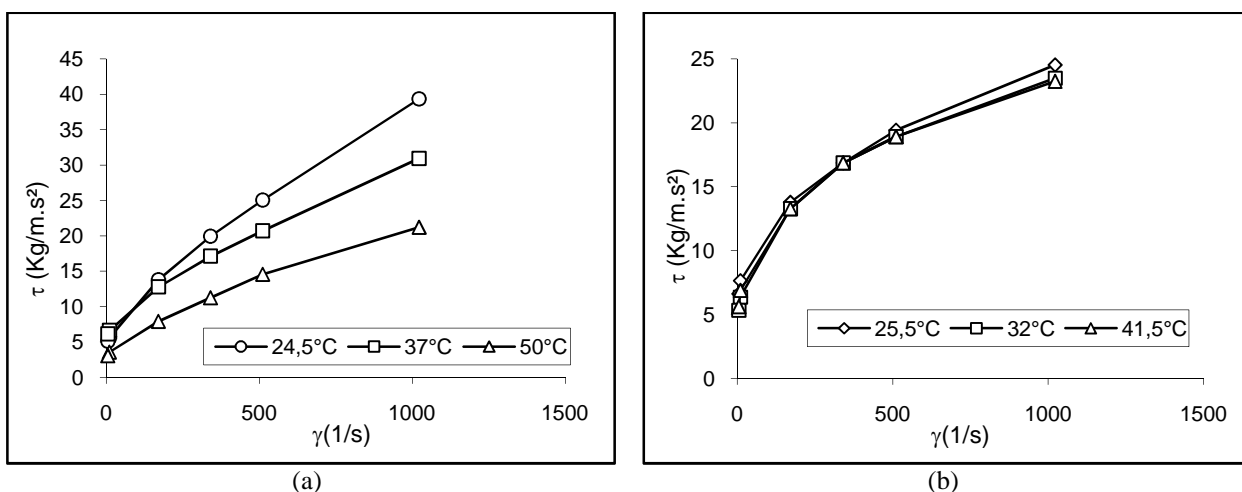


Figura 4.2 – Reograma típico dos fluidos de perfuração BRMUL (a) e BRSCOL (b), obtidos para três temperaturas.

Pode-se observar nas Figuras 4.1 e 4.2 que a viscosidade do fluido BRSCOL varia pouco com a temperatura, quando comparada à viscosidade dos outros fluidos estudados.

Os valores de R^2 , médios em relação a todos os pontos experimentais, do modelo *power law*, para os fluidos estudados estão na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Ajuste do modelo *power law* aos fluidos estudados.

Fluido	R^2
BRCARB	0,9990
Catiônico	0,9908
BRMUL	0,9686
BRSCOL	0,9950

A Tabela 4.2 mostra que o fluido BRMUL, que é um fluido de base oleosa, apresentou o menor coeficiente de correlação quando comparado aos outros fluidos de base aquosa.

4.1.1 Incertezas estimadas dos parâmetros reológicos k e n

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores das incertezas médias de cada parâmetro estimado para os fluidos estudados.

Tabela 4.3 – Incerteza média dos parâmetros estimados.

Fluido	Parâmetro	Incerteza (%)
BRCARB	k (Pa.s ⁻ⁿ)	7
	n (adm.)	2
Catiônico	k (Pa.s ⁻ⁿ)	13
	n (adm.)	8
BRMUL	k (Pa.s ⁻ⁿ)	34
	n (adm.)	12
BRSCOL	k (Pa.s ⁻ⁿ)	5
	n (adm.)	3

Avaliando o ajuste do modelo reológico pelo desvio padrão do ajuste dos parâmetros, pode-se verificar na Tabela 4.3 que a reologia do fluido BRMUL não é tão bem ajustada pelo modelo *power law* quanto à dos demais fluidos, devido ao alto valor de incerteza associado ao ajuste dos parâmetros. Essa constatação reafirma os resultados obtidos com a determinação do coeficiente de correlação (Tabela 4.2).

4.2 Resultados da Avaliação dos Regimes de Escoamento

4.2.1 Resultados para o fluido BRCARB

A Figura 4.3 mostra a determinação experimental das vazões críticas de escoamento do tubo circular e anular. Os valores das vazões críticas foram iguais a 0,0020 e 0,0022 m³/s para os tubos circular e anular, respectivamente.

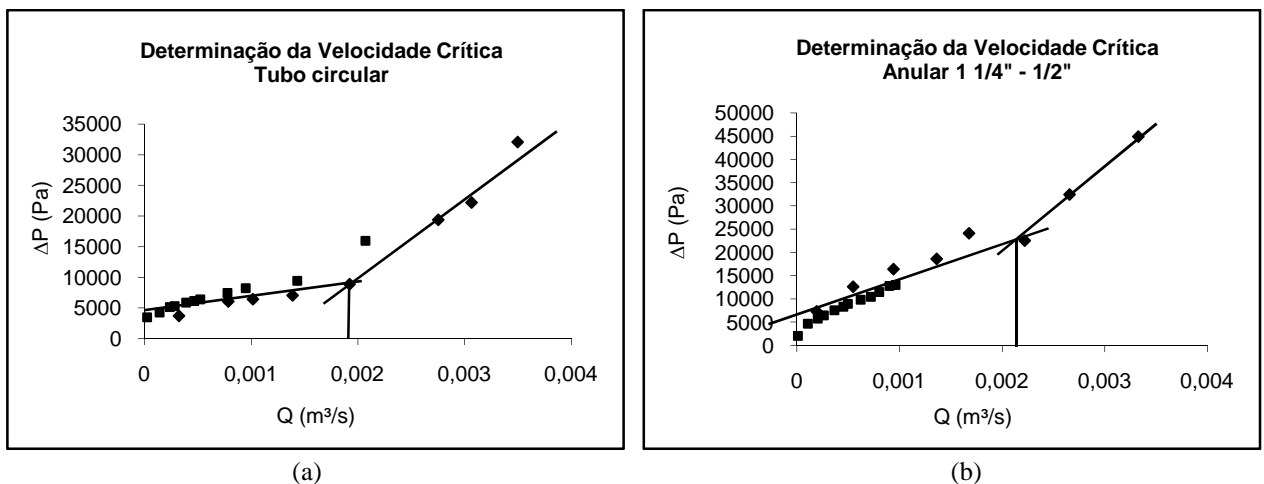


Figura 4.3 – Determinação das vazões críticas de escoamento do fluido BRCARB no tubo circular (a) e no tubo anular de 1 1/4" - 1/2" (b).

A partir dessas vazões foram calculados os valores de Reynolds críticos, utilizando valores médios dos parâmetros reológicos para cada tubo, que foram comparados aos valores gerados pelas Equações 2.14 e 2.15, como mostra a Tabela 4.4. Os erros apresentados

mostram o desvio dos valores gerados pelas correlações em relação ao valor utilizado (experimental), e é calculado pela Equação 4.1.

$$Erro(\%) = \frac{|Re_{c_{exp}} - Re_{c_{cor}}|}{Re_{c_{exp}}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Tabela 4.4 – Valores de Reynolds críticos para o fluido BRCARB.

Reynolds Crítico BRCARB	Circular	Anular 1 1/4"-1/2"				
		D _{H1}	D _{H2}	D _{H3}	D _{H4}	D _{H5}
Re _{cL} - experimental	3185	2042	2239	2045	2778	1868
Re _c - Jonhson (1959)	2393	2394	2394	2394	2394	2394
Re _c - Mishra e T. (1971)	2522	2526	2526	2526	2526	2526
Erro(%) - Jonhson (1959)	25	17	7	17	14	28
Erro(%) - Mishra e T. (1971)	21	24	13	24	9	35

Podemos observar na Tabela 4.4 que os valores experimentais utilizados foram concordantes com os valores gerados pelas correlações.

4.2.2 Resultados para o fluido Catiônico

A análise do fluido Catiônico, assim como as análises do BRMUL e do BRSCOL, seguiu os mesmos critérios adotados para o fluido BRCARB. A Figura 4.4 e a Tabela 4.5 mostram os resultados para o fluido Catiônico. Os valores das vazões críticas foram iguais a 0,0028 e 0,0022 m³/s para os tubos circular e anular, respectivamente.

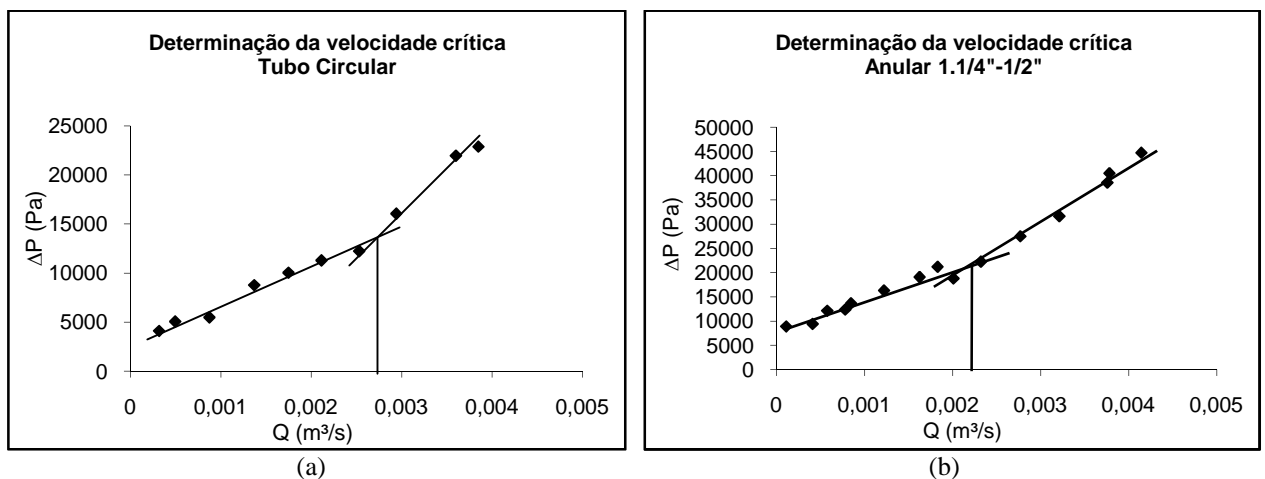


Figura 4.4 – Determinação das vazões críticas de escoamento do fluido Catiônico no tubo circular (a) e no tubo anular de 1 1/4" - 1/2" (b).

Tabela 4.5 – Valores de Reynolds críticos para o fluido Catiônico.

Reynolds Crítico Catiônico	Circular	Anular 1.1/4"-1/2"				
		D _{H1}	D _{H2}	D _{H3}	D _{H4}	D _{H5}
Re _{cL} - experimental	6587	3116	3269	3118	3660	2974
Re _c - Jonhson (1959)	2259	2242	2242	2242	2242	2242
Re _c - Mishra e T. (1971)	2931	2953	2953	2953	2953	2953
Erro(%) - Jonhson (1959)	66	28	31	28	39	25
Erro(%) - Mishra e T. (1971)	56	5	10	5	19	1

A Tabela 4.5 mostra que os resultados gerados pelas correlações, para o tubo circular, não foram concordantes com os resultados experimentais.

4.2.3 Resultados para o fluido BRMUL

A Figura 4.5 e a Tabela 4.6 mostram os resultados obtidos para o fluido BRMUL. Os valores das vazões críticas, laminares, foram iguais a 0,0019 e 0,0025 m³/s para os tubos circular e anular, respectivamente. No caso do tubo circular, foi encontrada a vazão crítica do final do período de transição, que foi igual a 0,0056 m³/s.

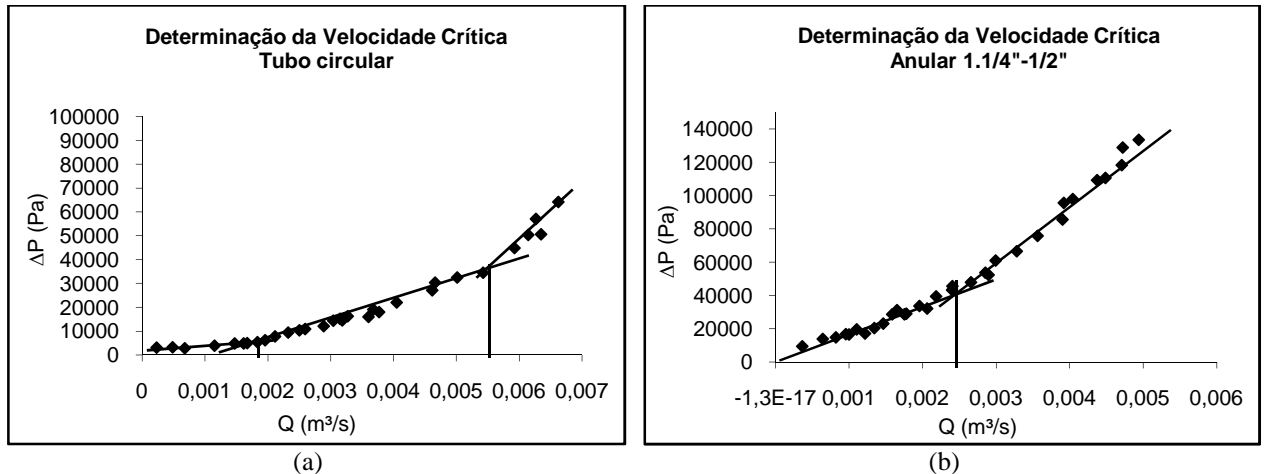


Figura 4.5 – Determinação das vazões críticas de escoamento do fluido BRMUL no tubo circular (a) e no tubo anular de 1 ¼” - ½” (b).

Tabela 4.6 – Valores de Reynolds críticos para o fluido BRMUL.

Reynolds Crítico BRMUL	Circular	Anular 1.1/4”-1/2”				
		D _{H1}	D _{H2}	D _{H3}	D _{H4}	D _{H5}
Re _{cL} - experimental	2593	2632	2814	2635	3293	2467
Re _{cT} - experimental	16142	-	-	-	-	-
Re _c - Jonhson (1959)	2365	2370	2370	2370	2370	2370
Re _c - Mishra e T. (1971)	2745	2731	2731	2731	2731	2731
Erro(%) - Jonhson (1959)	9	10	6	10	28	4
Erro(%) - Mishra e T. (1971)	6	4	3	4	17	11

A Tabela 4.6 mostra que os valores experimentais utilizados foram concordantes com os valores gerados pelas correlações.

4.2.4 Resultados para o fluido BRSCOL

A Figura 4.6 e a Tabela 4.7 mostram os resultados obtidos para o fluido BRSCOL. Os valores das vazões críticas, laminares, foram iguais a 0,0027 e 0,0022 m³/s para os tubos circular e anular, respectivamente.

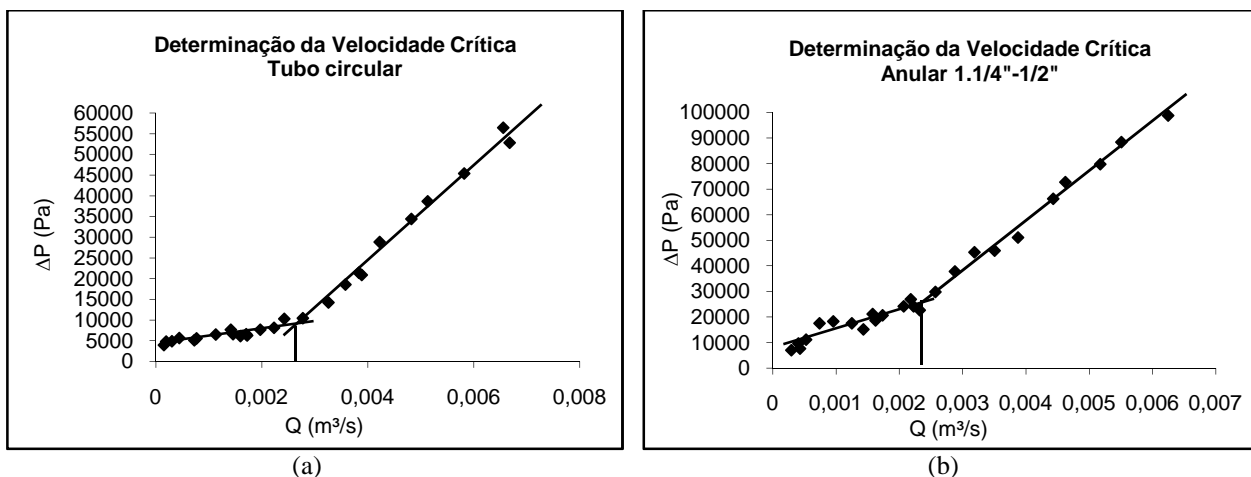


Figura 4.6 – Determinação das vazões críticas de escoamento do fluido BRSCOL no tubo circular (a) e no tubo anular de 1 ¼”- ½” (b).

Tabela 4.7 – Valores de Reynolds críticos para o fluido BRSCOL.

Reynolds Crítico BRSCOL	Circular	Anular 1.1/4"-1/2"				
		D _{H1}	D _{H2}	D _{H3}	D _{H4}	D _{H5}
Re _{cL} - experimental	7477	3057	3228	3060	3668	2901
Re _c - Jonhson (1959)	2287	2301	2301	2301	2301	2301
Re _c - Mishra e T. (1971)	2891	2870	2870	2870	2870	2870
Erro(%) - Jonhson (1959)	69	25	29	25	37	21
Erro(%) - Mishra e T. (1971)	61	6	11	6	22	1

A Tabela 4.7 mostra que os resultados gerados pelas correlações, para o tubo circular, não foram concordantes com os resultados experimentais.

4.3 Coeficientes de Perda de Carga (K) dos *tool joints* e Estabilizador

A equação de diâmetro hidráulico D_{H1} assim como as equações de fator de atrito indicadas na Tabela 3.4 para cada fluido foram utilizadas nesta análise, devido aos resultados obtidos no trabalho de SCHEID (2007), conforme foi mencionado nos itens 3.5 e 3.6.

Cabe ressaltar que para efetuar o desconto dos trechos retos foram utilizadas as equações indicadas para o tubo anular, no caso do escoamento externo ao *tool joint* e do estabilizador, e no caso do escoamento interno ao *tool joint* foram utilizadas as indicadas para o tubo circular.

O efeito das incertezas das variáveis experimentais e calculadas sobre a obtenção dos coeficientes de perda de carga (K) foi analisado a partir da propagação das incertezas na queda de pressão experimental (ΔP_{exper}).

A incerteza da queda de pressão calculada nos regimes laminar e turbulento é dependente das variáveis calculadas: fator de atrito, número de Reynolds e velocidade. As incertezas dessas variáveis estão apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Incerteza das variáveis calculadas.

Variável		Incerteza (%)			
		BRCARB	Catiônico	BRMUL	BRSCOL
v (m/s)		0,3	0,5	0,2	0,2
Re _p (adm.)		23	39	83	16
Tubo Circular	f _{calc(lam)} (adm.)	21	34	76	15
	f _{calc(turb)OW} (adm.)	7	-	-	6
	f _{calc(turb)FS} (adm.)	-	16	-	-
	f _{calc(turb)EL} (adm.)	-	-	13	-
	ΔP _{exper(lam)} (Pa)	21	36	76	15
	ΔP _{exper(turb)} (Pa)	10	16	13	6
Anular	f _{calc(lam)} (adm.)	24	37	90	16
	f _{calc(turb)OW} (adm.)	7	-	-	-
	f _{calc(turb)DM} (adm.)	-	-	-	5
	f _{calc(turb)FS} (adm.)	-	17	-	-
	f _{calc(turb)CH} (adm.)	-	-	0,2	-
	ΔP _{exper(lam)} (Pa)	23	38	89	16
	ΔP _{exper(turb)} (Pa)	7	17	0,4	5

É necessário esclarecer que as incertezas referentes ao fator de atrito e à queda de pressão foram diferenciadas quanto ao regime de escoamento, pois se tratam de equações diferentes.

A Tabela 4.9 mostra os resultados dos coeficientes de perda de carga K, obtidos em função da geometria e do tipo de fluido em escoamento. Os gráficos utilizados na obtenção desses coeficientes estão discutidos nos tópicos seguintes.

Tabela 4.9 – Coeficientes de perda carga (K).

Acessório	BRCARB	CATIÔNICO	BRMUL	BRSCOL
TJ 15,24mm	4,354	3,270	4,910	5,066
TJ 19,56mm	1,374	0,885	1,421	1,676
TJ 18°/35°	0,713	0,926	0,503	1,180
TJ 90°/90°	0,988	0,683	1,856	0,640
Estabilizador	2,364	1,568	1,466	2,625

Observa-se na Tabela 4.9, que o coeficiente K depende da geometria do escoamento e sofre pequenas variações em relação ao tipo de fluido. A mesma observação foi feita por MENDES (2007) e CORADIN (2006).

4.3.1 Escoamento interno ao *tool joint*

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os resultados obtidos para o escoamento interno do fluido BRSCOL aos *tool joints* com diâmetros internos iguais a 15,24mm e 19,56mm, respectivamente. Os demais fluidos apresentaram comportamentos semelhantes e seus respectivos gráficos encontram-se no Anexo A.

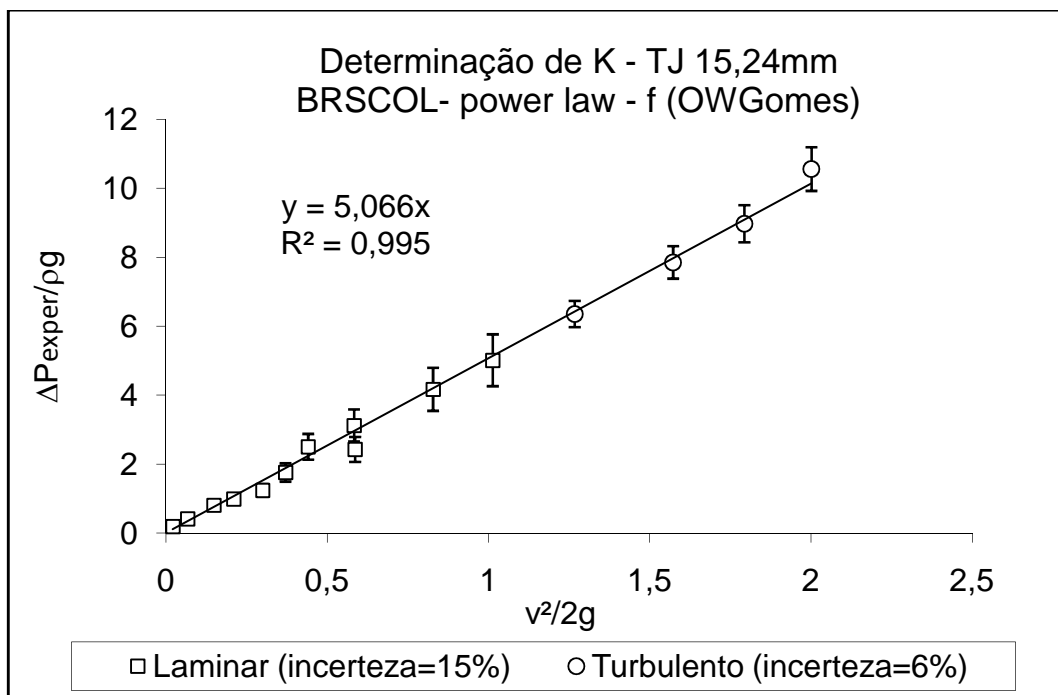


Figura 4.7 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento interno ($D_{iTJ} = 15,24\text{mm}$), para o fluido BRSCOL.

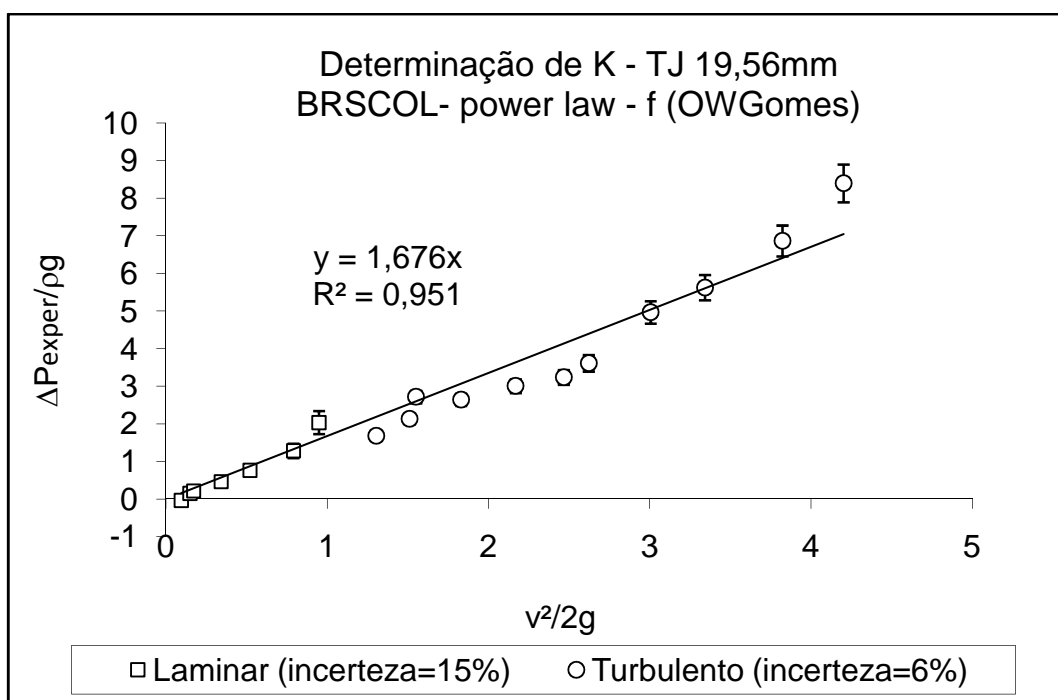


Figura 4.8 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento interno ($D_{iTJ} = 19,56\text{ mm}$), para o fluido BRSCOL.

Analisando as Figuras 4.7 e 4.8 é possível observar que os dados experimentais, nos regimes laminar e turbulento, são regulares quanto ao ajuste da reta que determina o valor de K, e portanto possibilitam a obtenção de resultados satisfatórios.

Os valores associados às incertezas experimentais não permitem que os pontos experimentais sejam deslocados o suficiente, sobre a barra vertical, para causar variações

significativas no ajuste da reta, e portanto na determinação de K. Dessa forma pode-se atribuir confiança aos valores dos coeficientes K obtidos.

A variação do diâmetro interno do *tool joint* (15,24mm e 19,56mm) provocou alteração no valor do coeficiente K, entretanto o ajuste dos dados experimentais foi semelhante.

4.3.2 Escoamento externo ao *tool joint*

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os resultados obtidos para o escoamento externo do fluido BRSCOL aos *tool joints* com ângulos de contração/expansão iguais a $\Theta_c=18^\circ/\Theta_e=35^\circ$ e $\Theta_c=90^\circ/\Theta_e=90^\circ$, respectivamente. Os comportamentos dos demais fluidos foram semelhantes e seus respectivos gráficos encontram-se no Anexo A.

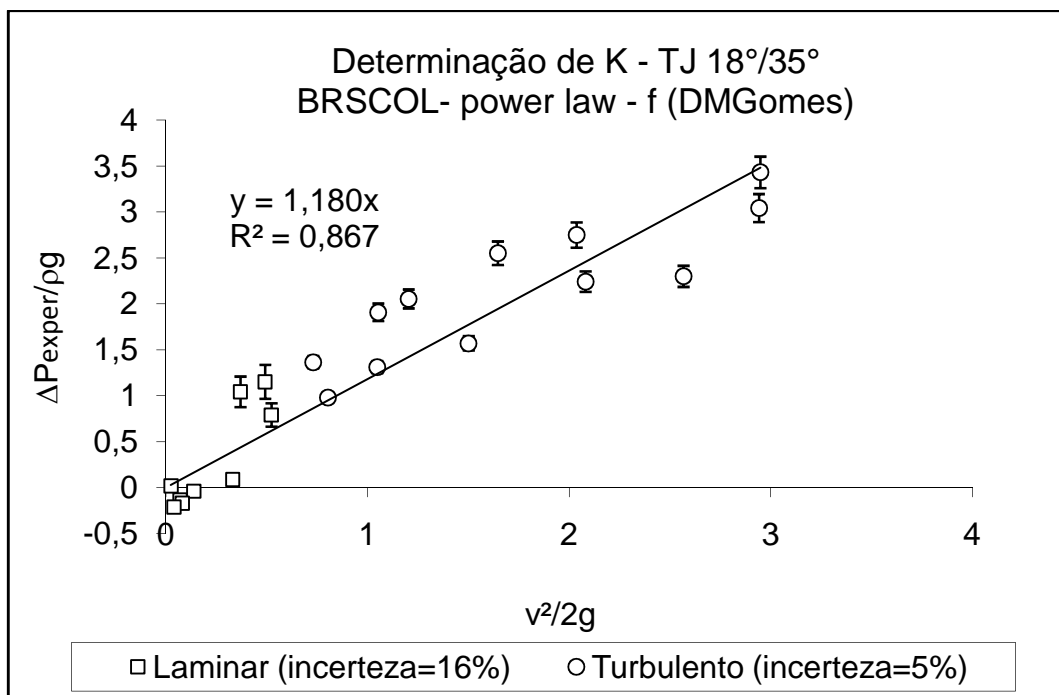


Figura 4.9 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento externo ($\Theta_c=18^\circ/\Theta_e=35^\circ$), para o fluido BRSCOL.

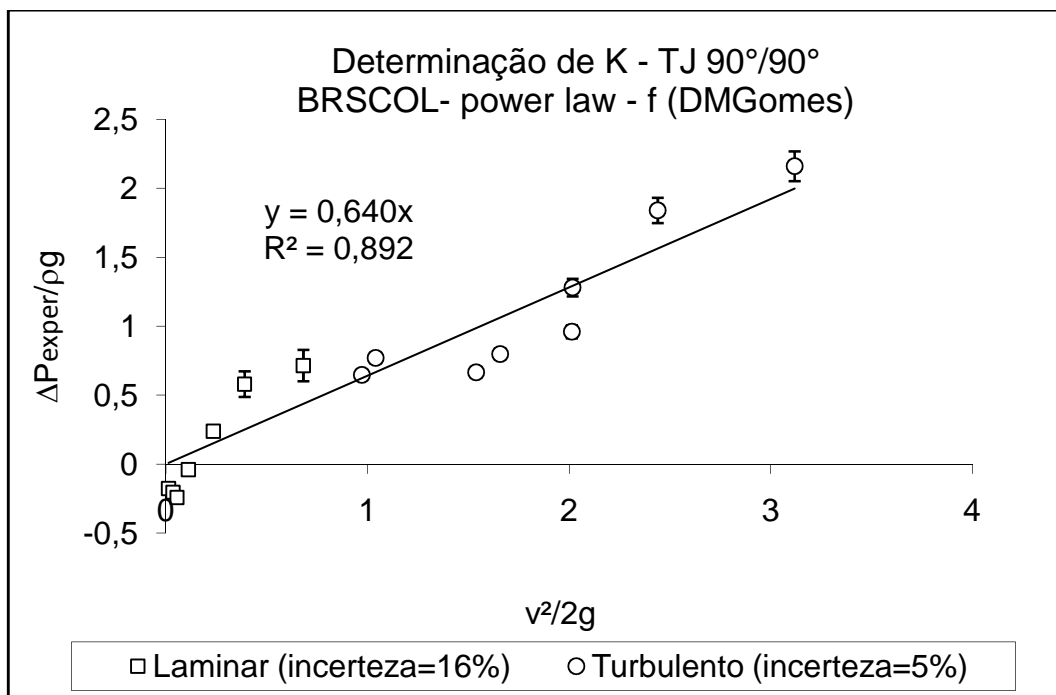


Figura 4.10 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento externo ($\Theta_c=90^\circ/\Theta_e=90^\circ$), para o fluido BRSCOL.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram que os pontos experimentais, nos regimes laminar e turbulento, encontram-se dispersos em relação à reta de ajuste que determina o valor de K. No caso do regime laminar ainda existem pontos com queda de pressão negativa, o que é incoerente fisicamente.

As incertezas nas determinações experimentais não foram responsáveis pelo comportamento negativo da queda de pressão, visto que os dados experimentais não poderiam ser deslocados, dentro do intervalo de incerteza, o suficiente para se tornarem positivos.

Os pontos de queda de pressão negativa poderiam estar associados ao sistema de cálculo adotado para determinar o coeficiente K. Nesse sistema estipulou-se que a queda de pressão nas regiões anterior e posterior a contração eram equivalentes em magnitude, e portanto o cálculo da queda de pressão dessas regiões foi tratado a partir da análise de fator de atrito em região anular. Entretanto, essa metodologia difere do cálculo apresentado por correlações presentes na literatura, que tratam as duas regiões de forma distinta.

A incoerência física apresentada na determinação dos coeficientes K foi uma das motivações da análise de correlações presentes na literatura e da utilização dos pacotes de CFD, que ajudam na compreensão desse fenômeno.

4.3.3 Escoamento em estabilizadores

A Figura 4.11 mostra um exemplo típico do comportamento da pressão na obtenção do coeficiente de perda de carga (K) para os estabilizadores. Os resultados dos demais fluidos estão no Anexo A.

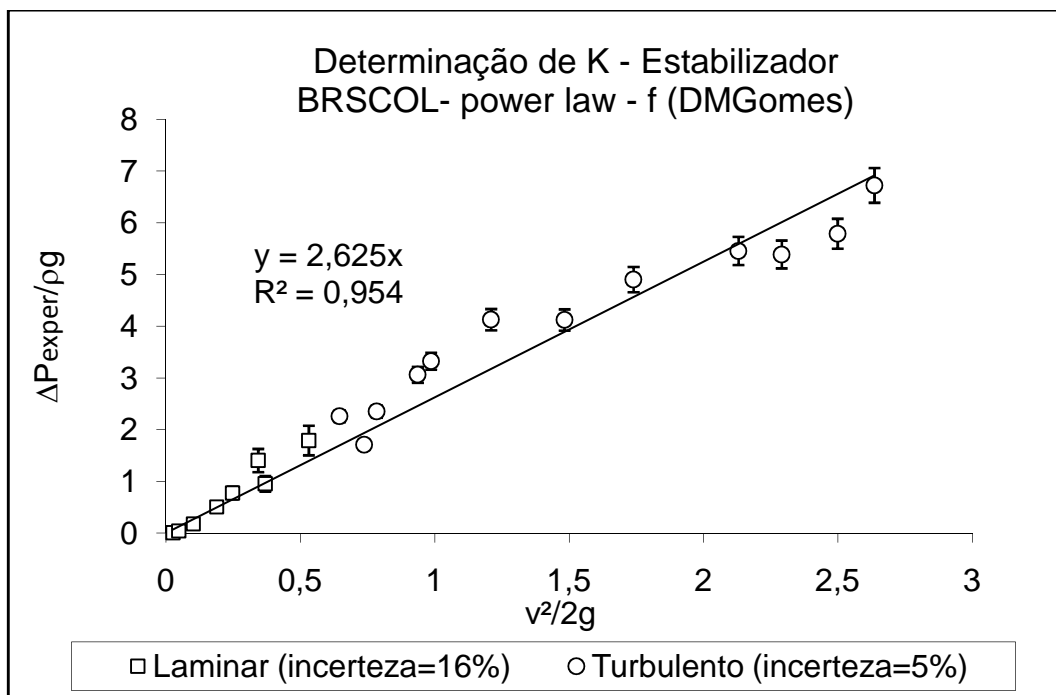


Figura 4.11 – Determinação do coeficiente de perda (K) do estabilizador, para o fluido BRSCOL.

O comportamento dos dados experimentais no escoamento em estabilizadores foi semelhante ao do escoamento externo aos *tool joints* quanto à dispersão dos dados em torno da reta que ajusta o valor de K. A semelhança ocorre devido ao escoamento em região anular em torno dessas peças, entretanto observa-se que não há presença de pontos com queda de pressão negativa no regime laminar.

4.4 Resultados dos Testes da Correlação de Perda de Carga para Escoamento Interno ao *Tool Joint*

Após analisar os resultados fornecidos pelas correlações para perda de carga no escoamento interno aos *tool joints*, verificou-se a necessidade de adequá-las aos dados experimentais obtidos. Para esse fim, o parâmetro existente nas Equações 2.87 e 2.90 ($C=0,8710$) foi reestimado.

A reestimação desse parâmetro foi feita a partir do pacote computacional de estimação de parâmetros ESTIMA, que é baseado no método matemático da máxima verossimilhança. Nesse procedimento foram utilizados os dados de experimentos realizados com água e com os fluidos BRCARB e Catiônico.

O valor do parâmetro reestimado foi $C=0,225$, com desvio padrão $\sigma_C = 0,008$. Dessa forma, as Equações 2.87 e 2.90 tomaram a forma:

$$\Delta P_C = 0,225 \cdot K_1 \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{D_I^{17/4}} \quad (4.2)$$

$$\Delta P_E = 0,225 \cdot K_2 \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{D_I^{17/4}} \quad (4.3)$$

A influência das incertezas nas variáveis experimentais e calculadas sobre o ajuste da correlação para perda de carga em *tool joints* com escoamento interno foi analisada.

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam os resultados obtidos para o escoamento do fluido BRMUL nos *tool joints* com diâmetros internos iguais a 15,24mm e 19,56mm, respectivamente. Essas figuras mostram os resultados das correlações originais assim como das alterações feitas nas mesmas. Os demais fluidos comportaram-se de maneira semelhante, portanto os resultados desses fluidos estão apresentados no Anexo B.

Nos resultados apresentados pelas Figuras 4.12 a 4.13, o valor das incertezas da queda de pressão experimental (ΔP_{exper}), representadas pela barra horizontal, correspondentes ao regime laminar e turbulento encontram-se na Tabela 4.8.

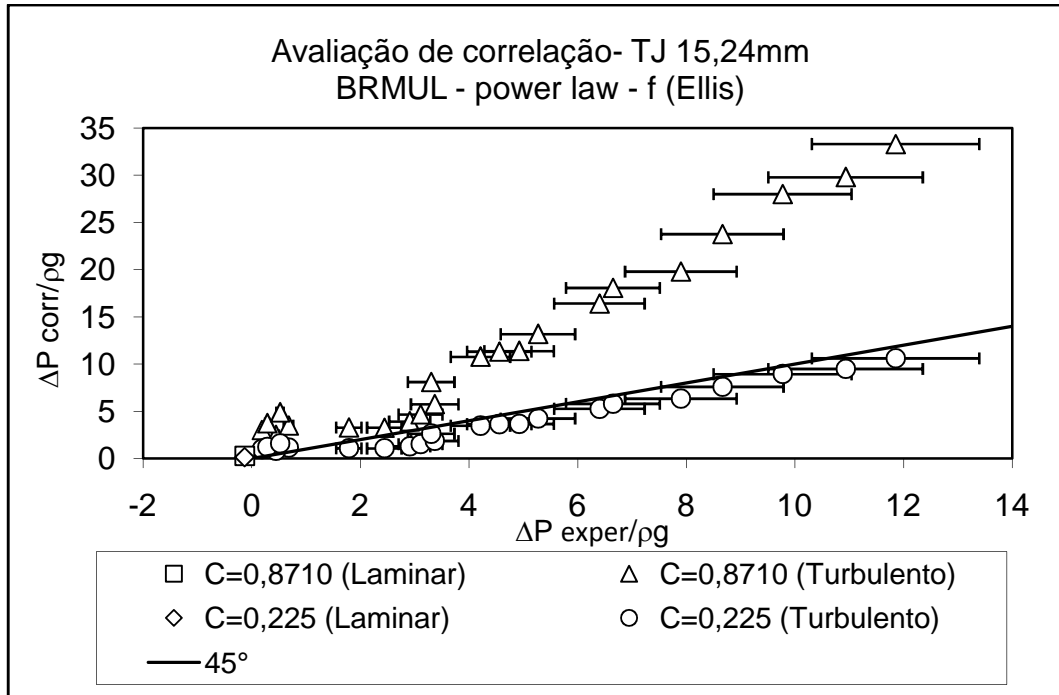


Figura 4.12 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{i\text{TJ}}=15,24$ mm), do fluido BRMUL.

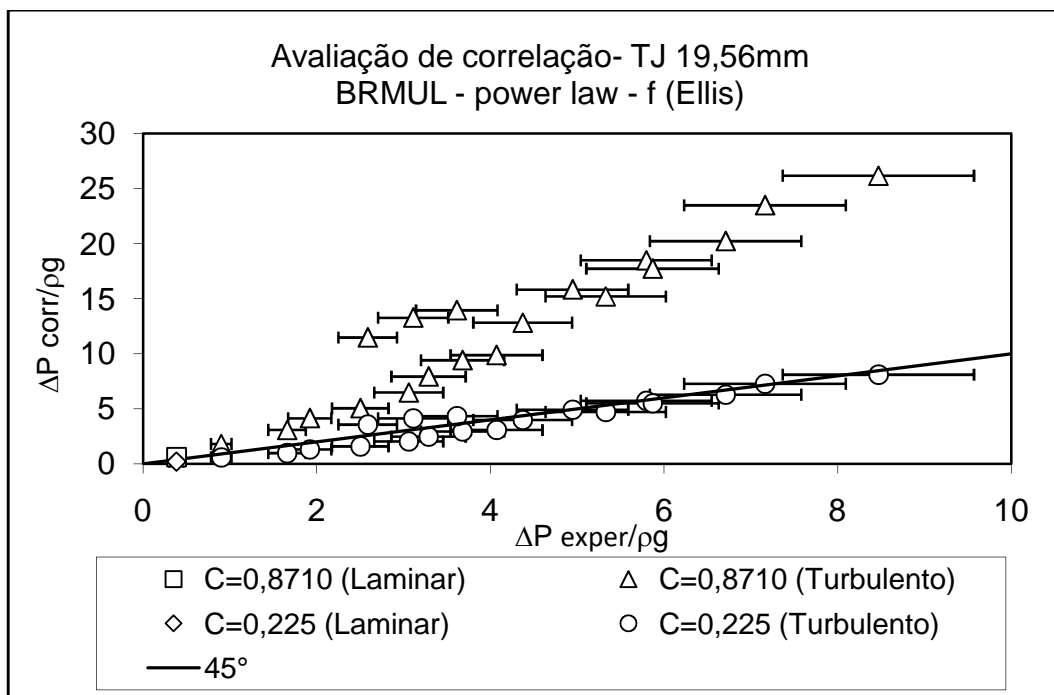


Figura 4.13 – Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{iTJ}=19,56$ mm), do fluido BRMUL.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram que a reestimação do parâmetro C diminuiu os desvios dos resultados obtidos pela correlação em relação aos dados calculados. O intervalo de incertezas experimentais mostra que os dados calculados, com o parâmetro reestimado, possuem mobilidade suficiente para atingir a reta de 45°, que determinaria o perfeito ajuste da correlação aos dados experimentais. Portanto pode-se concluir que as Equações 4.2 e 4.3 são eficientes na previsão da perda de carga nas regiões de contração e expansão do escoamento interno aos *tool joints*.

4.5 Resultados dos Testes das Correlações de Perda de Carga para Escoamento Externo ao *Tool Joint*

4.5.1 Resultados dos testes da correlação proposta por JEONG e SHAH (2004)

Assim como no tratamento dos resultados obtidos para o escoamento interno ao *tool joint*, foi necessário adequar as Equações 2.31 a 2.35 aos dados experimentais através da reestimação do parâmetro ($D=1$) da Equação 2.35. A estimação desse parâmetro foi feita a partir do pacote computacional ESTIMA, e os dados utilizados foram de experimentos realizados com os fluidos BRCARB e Catiônico.

O valor do parâmetro reestimado foi $D=0,38$, com desvio padrão $\sigma_D = 0,01$. Dessa forma, a Equação 2.35 tomou a forma:

$$K_e = 0,38(1 - \beta^2)^2 \quad (4.4)$$

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os resultados obtidos para o escoamento do fluido Catiônico nos *tool joints* com ângulos de contração/expansão iguais a $\Theta_c=18^\circ / \Theta_e= 35^\circ$ e $\Theta_c=90^\circ / \Theta_e= 90^\circ$, respectivamente. As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam os resultados obtidos

para o escoamento do fluido BRMUL. Essas figuras mostram os resultados das correlações originais assim como das alterações feitas a partir da reestimação de parâmetros.

A influência das incertezas nas variáveis experimentais e calculadas sobre o ajuste da correlação para perda de carga em *tool joints* com escoamento externo foi analisada, e os valores correspondentes de queda de pressão experimental (ΔP_{exper}), representadas pela barra horizontal, para os regimes laminar e turbulento encontram-se na Tabela 4.8.

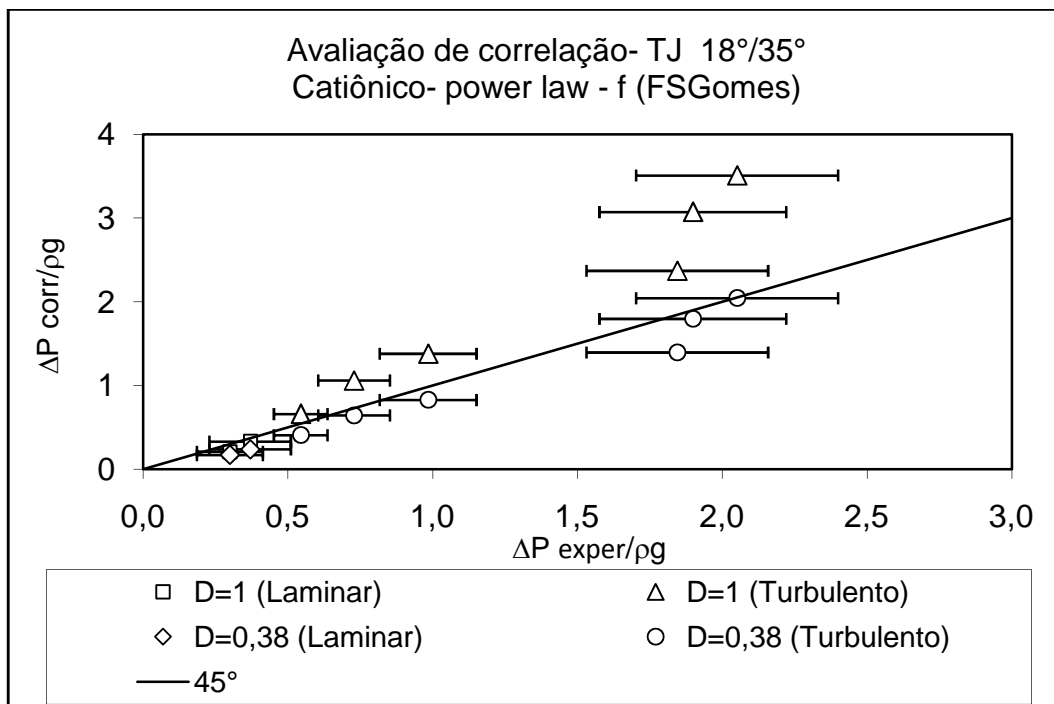


Figura 4.14 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=18^\circ/\Theta_e=35^\circ$), do fluido Catiônico.

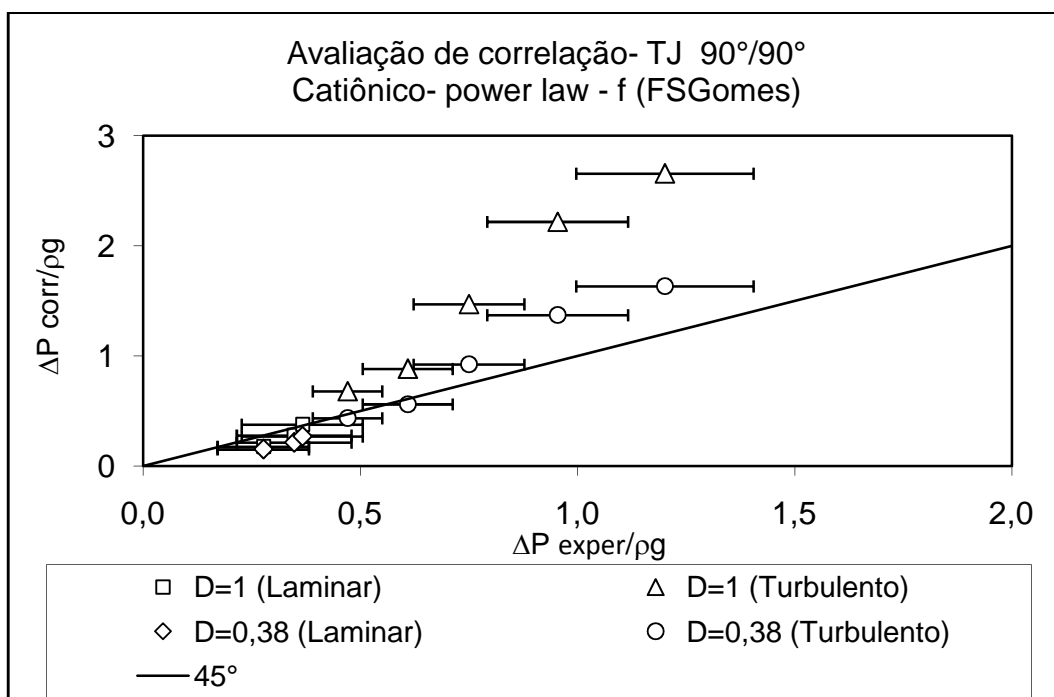


Figura 4.15 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=90^\circ/\Theta_e=90^\circ$), do fluido Catiônico.

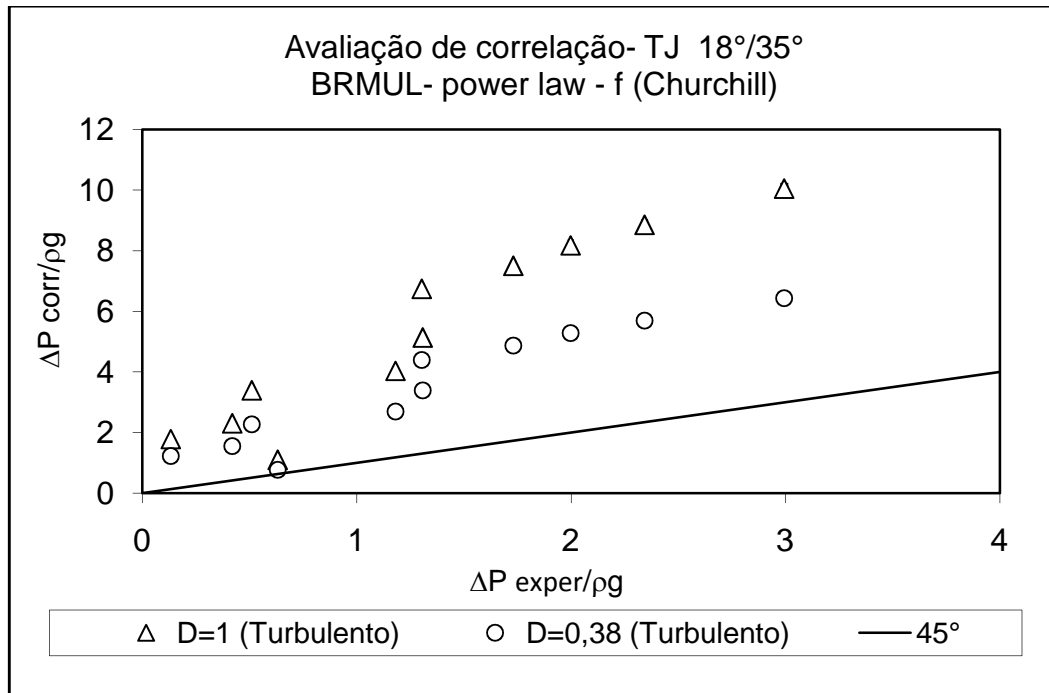


Figura 4.16 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e=35^\circ$), do fluido BRMUL.

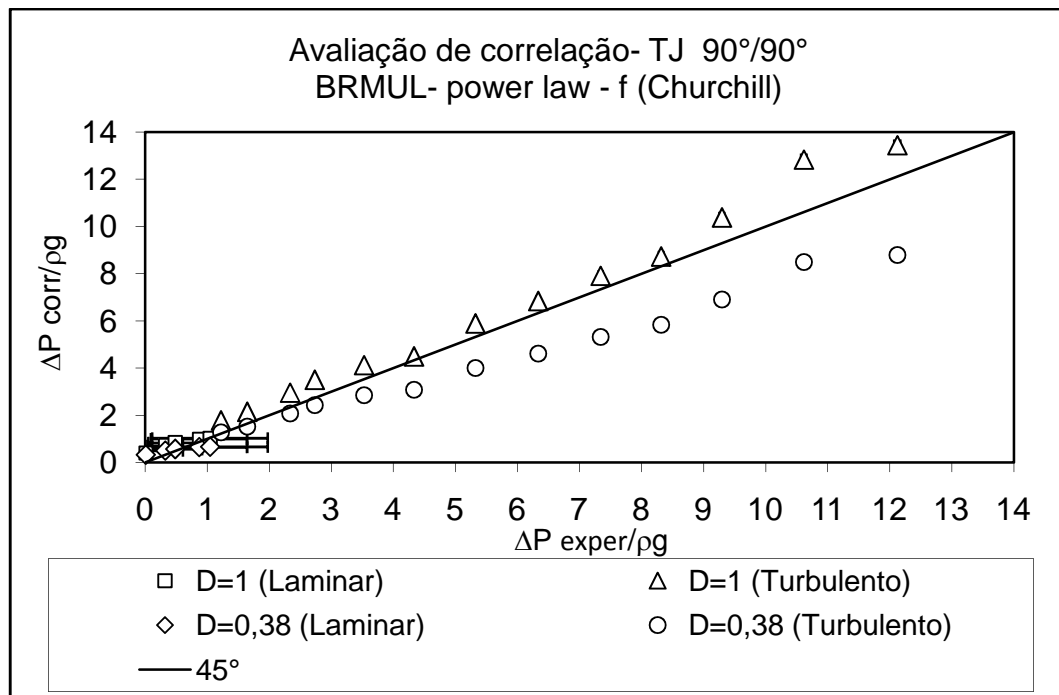


Figura 4.17 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e=90^\circ$), do fluido BRMUL.

Observando-se as Figuras 4.14 a 4.17, pode-se verificar que a reestimação do parâmetro D diminuiu o desvio entre os dados calculados e os dados obtidos pela correlação. As Figuras 4.16 e 4.17 mostram que, para o fluido BRMUL, o parâmetro reestimado fornece dados superestimados e subestimados dependendo da geometria do escoamento. O mesmo resultado foi obtido no caso do fluido BRSCOL.

As figuras referentes aos fluidos BRCARB e BRSCOL encontram-se no Anexo B.

4.5.2 Resultados dos testes da correlação proposta por SIMÕES (2005)

As Equações 2.36 a 2.86 foram testadas para a previsão da perda de carga no escoamento externo do fluido BRCARB aos *tool joints* com ângulos: $\Theta_e=90^\circ / \Theta_e= 90^\circ$ e $\Theta_e=18^\circ / \Theta_e= 35^\circ$.

As Equações 2.45, 2.57, 2.63, 2.68, 2.76, 2.81 e 2.86 foram utilizadas nos casos em que o valor do número de Reynolds foi superior aos indicados no intervalo de validade das Equações 2.44, 2.56, 2.62, 2.67, 2.75, 2.80 e 2.85, respectivamente. Entretanto os valores experimentais de Reynolds não foram compatíveis com o intervalo indicado, por SIMÕES (2005), para cada equação.

Os resultados dos cálculos encontram-se no Anexo C. Nas tabelas referentes ao cálculo da perda de carga nas regiões de contração e expansão, os valores encontrados para o fator de atrito foram excessivamente altos, e portanto a perda de carga calculada apresentou valores incoerentes fisicamente.

Os testes utilizando os demais fluidos não foram feitos devido ao resultado incoerente apresentado no teste com o fluido BRCARB.

4.6 Resultado da Determinação dos Coeficientes de Descarga (C_D) dos Ejetores

Análises do escoamento dos fluidos BRCARB, Catiônico, BRMUL e BRSCOL foram feitas para as razões de diâmetros: 2" para 3/4", 2" para 1/2", 2" para 1/4" e 2" para 1/8". Essas análises tiveram o objetivo de determinar o coeficiente de descarga dos ejtores para os diferentes fluidos e de avaliar a influência da razão de diâmetros sobre o coeficiente C_D .

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os resultados obtidos para o fluido Catiônico. Os demais fluidos tiveram comportamentos semelhantes e seus resultados encontram-se no Anexo D. O efeito das incertezas das variáveis experimentais sobre os valores dos coeficientes obtidos foi avaliado.

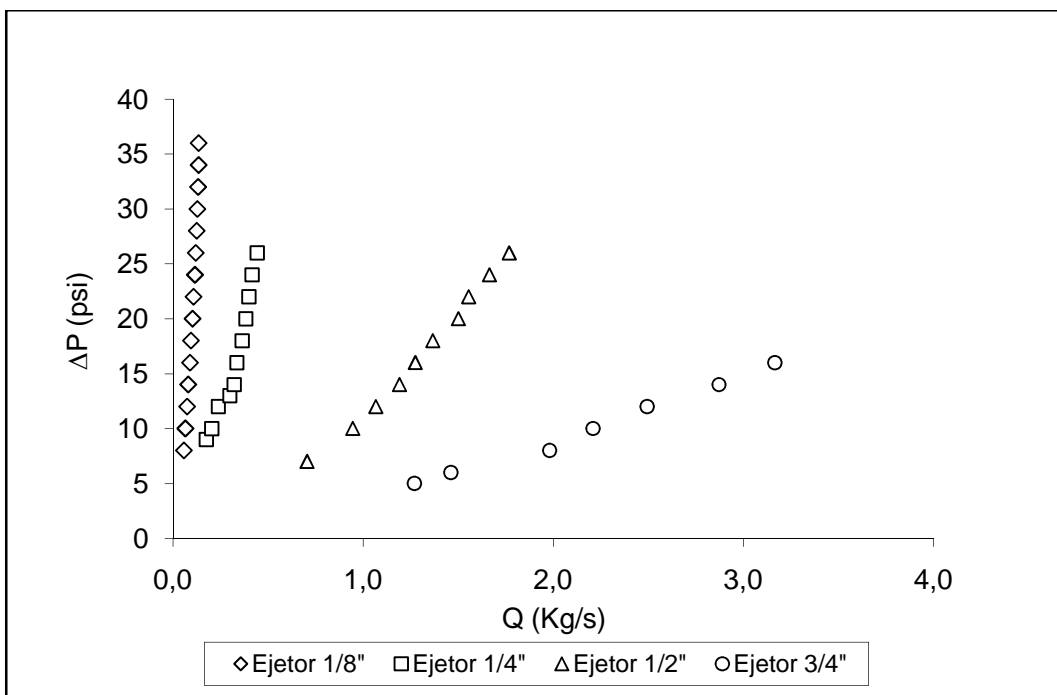


Figura 4.18 – Vazão versus perda de carga para os ejetores, no escoamento do fluido Catiônico.

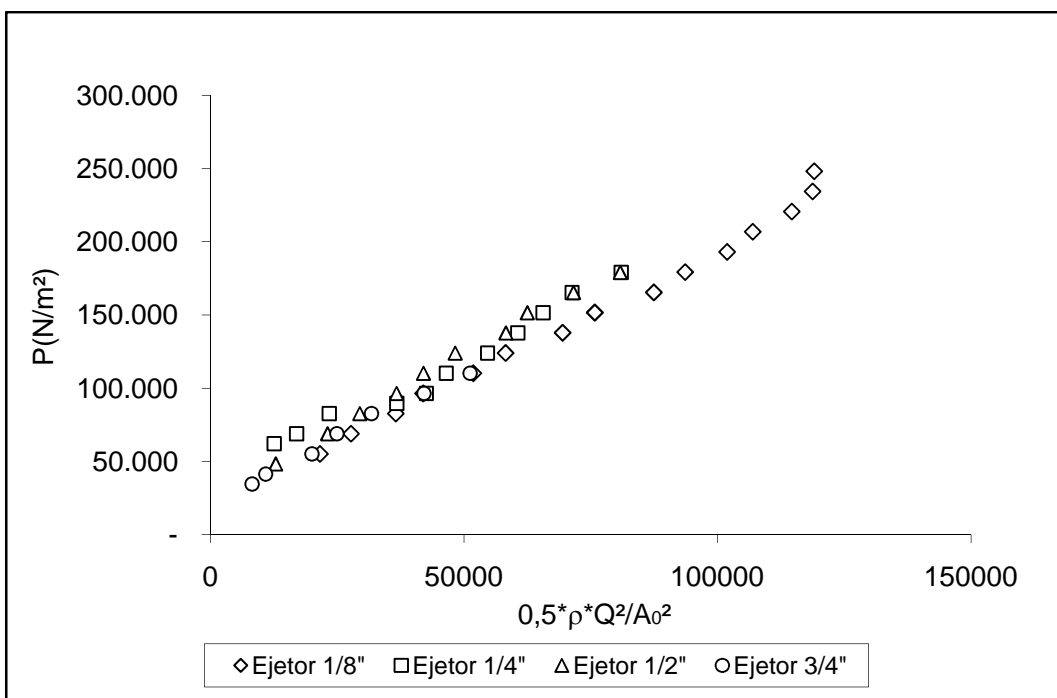


Figura 4.19 – Avaliação do coeficiente de descarga dos ejetores, no escoamento do fluido Catiônico.

A Figura 4.19 mostra que com a Equação 3.2 os coeficientes de descarga, para os diferentes diâmetros de ejetores, seguem uma tendência e é possível se obter um coeficiente de descarga médio.

O número de Froude calculado para todos os experimentos foi superior a 100, atribuindo portanto o valor teórico de C_D entre 0,65 e 0,70, conforme indicado na Figura 2.12.

A Tabela 4.10 mostra as incertezas médias, em relação a todos os pontos experimentais, para os coeficientes C_D de cada ejetor e fluido.

Tabela 4.10 – Incertezas médias dos coeficientes de descarga (C_D).

Variável	Incerteza (%)			
	BRCARB	Catiônico	BRMUL	BRSCOL
C_D ejetor 1/8" (adm.)	6	8	14	10
C_D ejetor 1/4" (adm.)	7	7	16	12
C_D ejetor 1/2" (adm.)	11	6	13	26
C_D ejetor 3/4" (adm.)	22	10	24	52

Na Tabela 4.11 são apresentados os coeficientes de descarga para cada diâmetro de ejetor e os coeficientes de descarga médios para cada fluido.

Tabela 4.11 – Coeficientes de descarga em função do diâmetro do ejetor e do fluido de perfuração.

Ejetor	BRCARB	Catiônico	BRMUL	BRSCOL
Ejetor 1/8"	0,72	0,71	0,65	0,72
Ejetor 1/4"	0,75	0,65	0,7	0,74
Ejetor 1/2"	0,74	0,64	0,8	0,7
Ejetor 3/4"	0,9	0,64	0,7	0,9
Média	0,78	0,66	0,71	0,76

Na Tabela 4.11 pode-se observar que os valores de coeficiente de descarga encontram-se na faixa de 0,64 a 0,9. Considerando-se as respectivas incertezas apresentadas na Tabela 10, estes valores podem variar atingindo a faixa de 0,65 a 0,7, que corresponde aos valores apresentados na literatura para o escoamento turbulento. Observa-se também que não há influência da razão entre o diâmetro do ejetor e o diâmetro do tubo.

4.7 Resultados das Simulações

As simulações numéricas em tubo anular permitiram estudar a geração de malhas e avaliar diferentes combinações de algoritmos quanto ao erro obtido entre a perda de carga simulada e calculada analiticamente.

Nos resultados obtidos através das simulações, para o caso dos *tool joints*, foram analisados: o perfil de velocidade axial do fluido, a existência de regiões de recirculação após as expansões e os valores da perda de carga simulada.

4.7.1 Simulação da queda de pressão em região anular

A Tabela 4.12 e a Figura 4.20 mostram os resultados obtidos através da simulação comparados aos resultados calculados analiticamente para cada caso. A combinação 1 (C_1) refere-se aos algoritmos *default* do FLUENT® ('SIMPLE', 'Standard' e 'First-order-upwind') e a combinação 2 (C_2) refere-se aos algoritmos: 'SIMPLE', 'PRESTO!' e 'QUICK'.

Tabela 4.12 – Resultados da simulação do escoamento em tubo anular.

Fluido	ΔP_{calc} (Pa)	Algoritmos	ΔP_{sim} (Pa)	Erro (%)
BRCARB	22259	C ₁	22002	1,15
		C ₂	21283	4,38
	27173	C ₁	27292	-0,43
		C ₂	26279	3,29
Catiônico	21451	C ₁	24465	-14,32
		C ₂	20637	3,79
	20283	C ₁	22889	-12,85
		C ₂	18859	7,02
	18282	C ₁	19126	-4,62
		C ₂	16615	9,12
	21505	C ₁	25458	-18,38
		C ₂	20725	3,62
BRMUL	23820	C ₁	24663	-3,54
		C ₂	22731	4,57
	26849	C ₁	29239	-8,90
		C ₂	26103	2,78
BRSCOL	17200	C ₁	22780	-32,44
		C ₂	10069	41,46
	18230	C ₁	29001	-59,08
		C ₂	14343	21,32

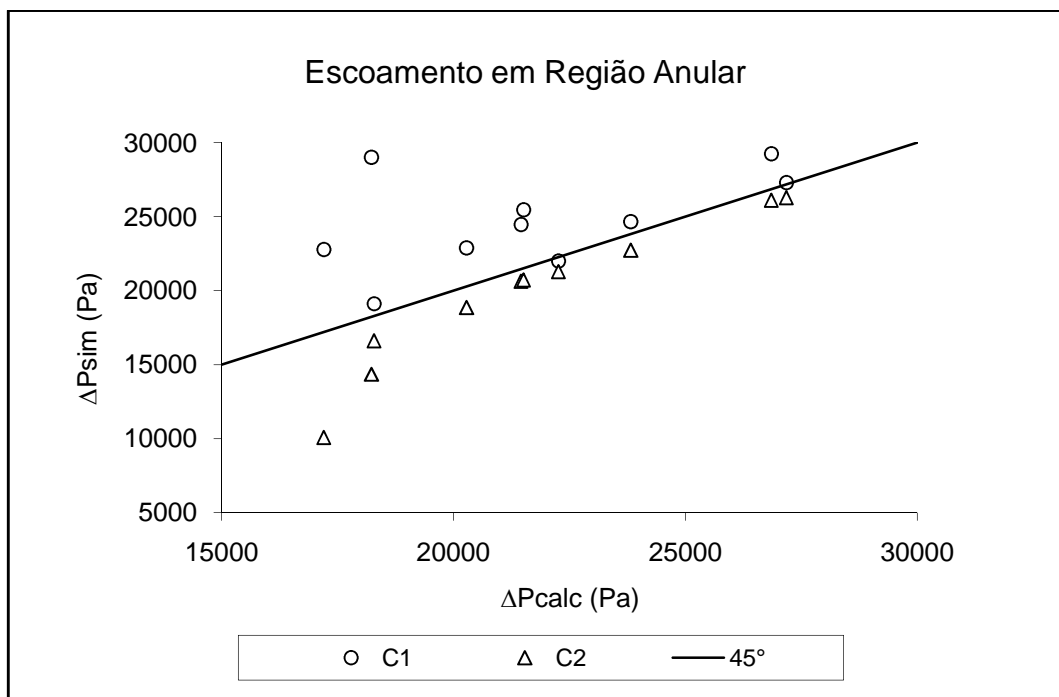


Figura 4.20 – Comparação dos resultados simulados com as combinações 1 e 2 de algoritmos.

A Figura 4.20 e a Tabela 4.12 mostram que os resultados obtidos pela combinação 2 de algoritmos apresentaram os menores erros percentuais em relação aos dados calculados. Esse resultado motivou a utilização dessa combinação para o caso do escoamento externo ao *tool joint*, onde também ocorre escoamento em região anular.

4.7.2 Análise do perfil de velocidade axial

A análise do perfil de velocidade axial permitiu verificar se o escoamento estava completamente desenvolvido no instante da passagem do fluido pelo ponto de tomada de pressão. Esse perfil foi avaliado a partir de uma linha de escoamento criada no centro do tubo, no caso do escoamento interno ao *tool joint* e no centro da região anular com abscissa igual a zero, para o caso de escoamento externo ao *tool joint*.

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram os perfis obtidos para o escoamento externo do fluido Catiônico e interno do fluido BRSCOL, respectivamente. Os demais fluidos apresentaram comportamentos semelhantes.

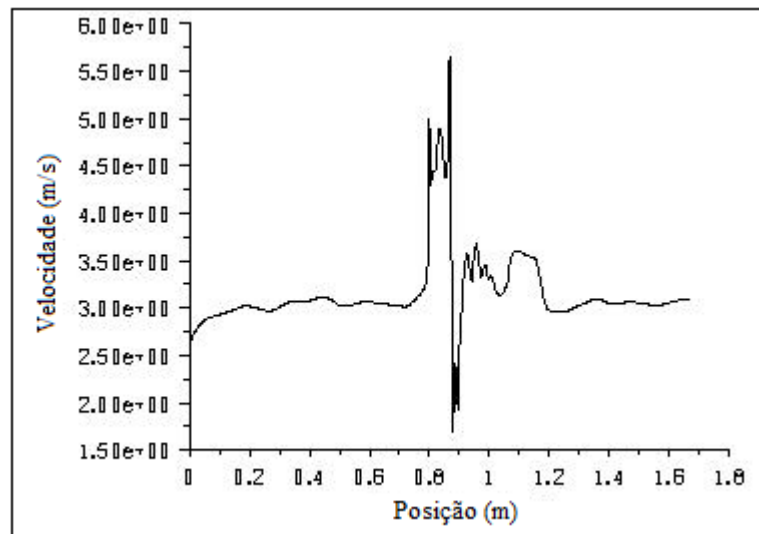


Figura 4.21 – Perfil de velocidade ao longo da tubulação, no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=90^\circ/\Theta_e=90^\circ$), do fluido Catiônico.

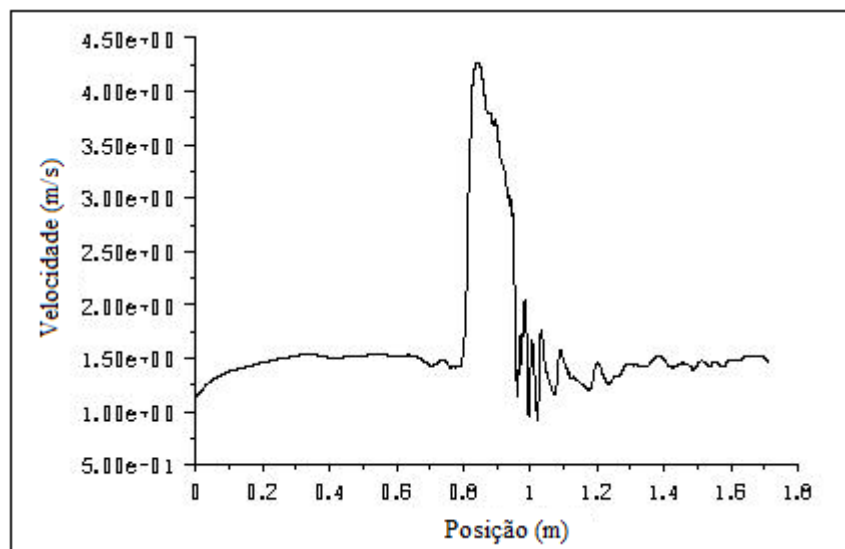


Figura 4.22 – Perfil de velocidade ao longo da tubulação, no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{ITJ}=15,24$ mm), do fluido BRSCOL.

Nas Figuras 4.21 e 4.22, a partir da posição que tem início o *tool joint* (0,8m), o fluido sofre uma aceleração que provoca a instabilidade da velocidade após o trecho de expansão (a

partir de aproximadamente 0,9m). Esse comportamento ocorre devido à recirculação do fluido nessa região, ou seja, existe fluxo em sentido oposto ao do escoamento.

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram que a velocidade do fluido sofre pequenas oscilações (com exceção do trecho após a expansão) nas regiões de trecho reto que antecedem e sucedem o *tool joint*. Contudo, devido à baixa magnitude das oscilações, considerou-se essa região como estável. Portanto, os intervalos de 80cm, antes e depois da peça, foram suficientes para estabelecer completamente o perfil de velocidade do fluido nas regiões de medição de pressão. Logo, a unidade piloto estava corretamente dimensionada e os dados experimentais eram válidos.

4.7.3 Análise de regiões de recirculação

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram a ocorrência de recirculação nos escoamentos interno e externo ao *tool joint*. Essas figuras mostram uma ampliação da região que sucede a seção de expansão do *tool joint*, e os vetores indicam o sentido do fluxo, sendo que os que possuem maior magnitude representam o sentido majoritário do escoamento.

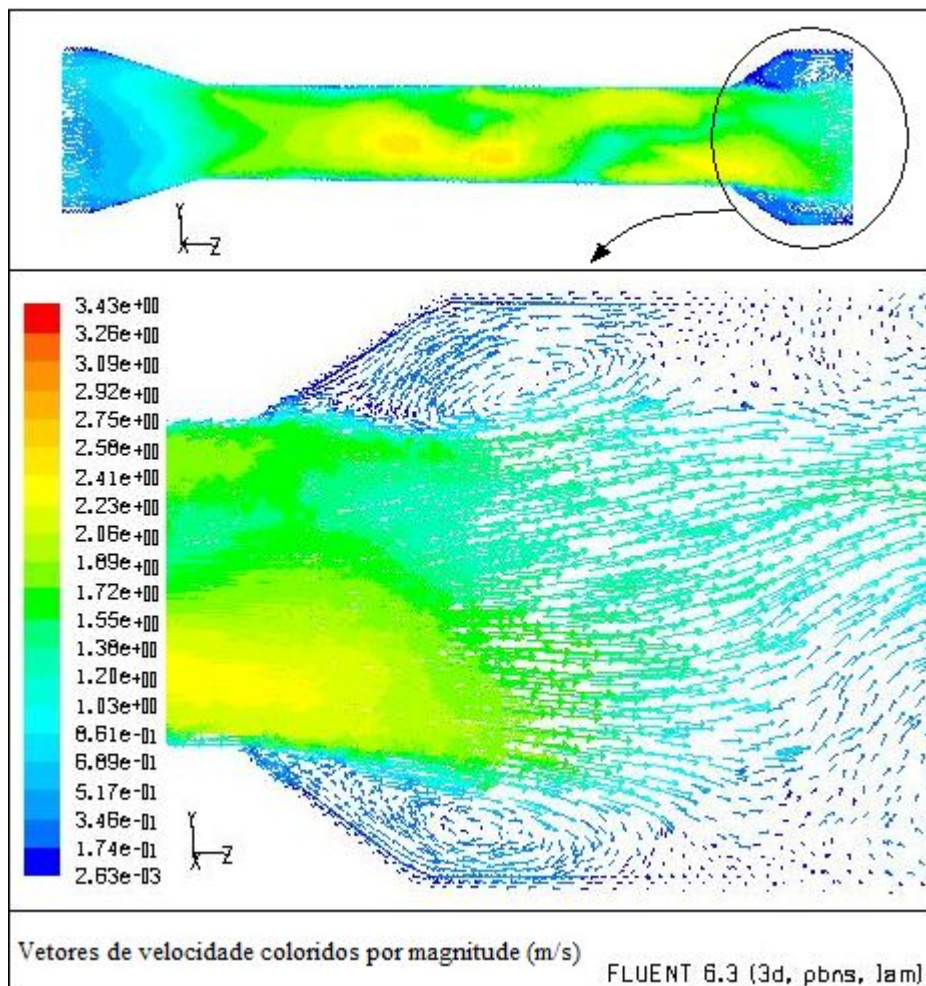


Figura 4.23 – Região de recirculação no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{ITJ}=15,24$ mm), do fluido BRCARB.

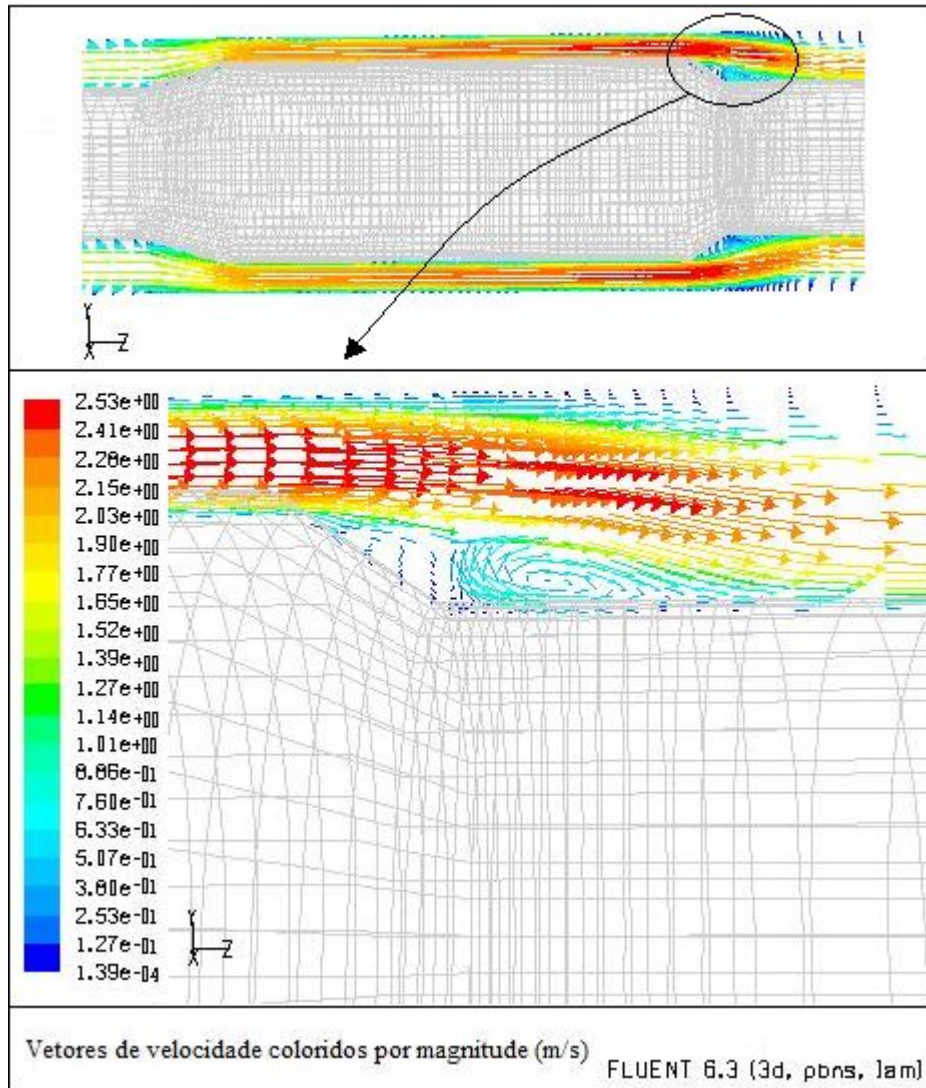


Figura 4.24 – Região de recirculação no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=18^\circ$ / $\Theta_e= 35^\circ$), do fluido BRCARB.

A formação dessas regiões ocorre devido à mudança abrupta da geometria do escoamento. Nos casos estudados, as geometrias contêm uma região de contração abrupta seguida de uma região de expansão abrupta, o que provoca o aceleração e o desaceleração repentino do fluido, respectivamente. Essa variação de velocidade não permite às linhas de corrente do fluido acompanharem as paredes da tubulação, e portanto formam-se as zonas de recirculação.

A existência dessas regiões influi diretamente no desenvolvimento do perfil de velocidade conforme foi visto anteriormente, e o comprimento necessário para estabelecer o perfil de velocidade depende do tamanho dessas zonas.

Segundo MENDES *et al* (2007), o tamanho dessas zonas de recirculação depende do número de Reynolds, da reologia do fluido e da geometria de escoamento. Nos casos estudados o tamanho dessas zonas não foi suficiente para impedir o estabelecimento do perfil de velocidade nas zonas de medição de pressão.

A recirculação também provocou uma queda de pressão atípica, configurando uma região de baixa pressão após a seção de expansão, como mostra a Figura 4.25.

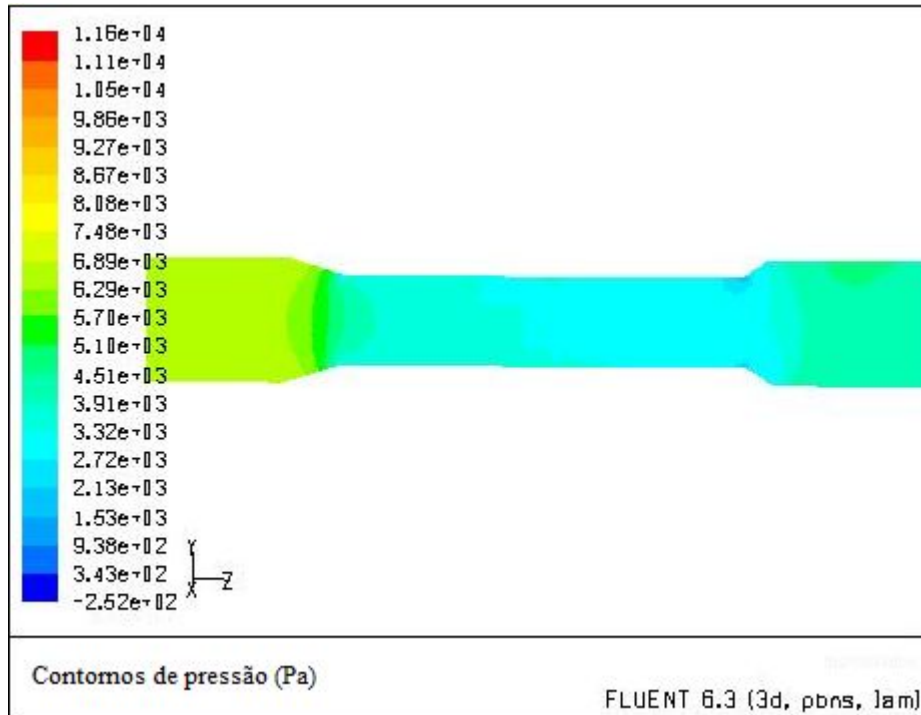


Figura 4.25 – Contorno de pressão no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{ITJ}=19,56$ mm), do fluido BRCARB.

Essas regiões de baixa pressão mostram que a perda de carga do fluido ao escoar em uma tubulação que contém *tool joints* é maior no trecho reto anterior ao *tool joint* do que no trecho posterior, e portanto essas regiões devem ser tratadas de forma distinta.

Na determinação dos coeficientes de perda de carga (K) feita em tópicos anteriores, ao calcular a perda de carga na seção reta anterior ao *tool joint* a partir da equação de fator de atrito e adotar o mesmo procedimento para região posterior ao *tool joint*, atribuiu-se uma queda elevada de pressão à região posterior à expansão, que não era aceitável devido a existência das zonas de baixa pressão. Esse excesso de diferencial de pressão provocou a ocorrência, em alguns casos, de pontos com valor negativo de pressão em baixas vazões, que eram incoerentes fisicamente, vide Figuras 4.9, 4.10, 8.4, 8.7, 8.8 e 8.10.

4.7.4 Resultados de perda de carga simulada

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram os perfis típicos de pressão ao longo da tubulação, no escoamento interno e externo aos *tool joints*, respectivamente.

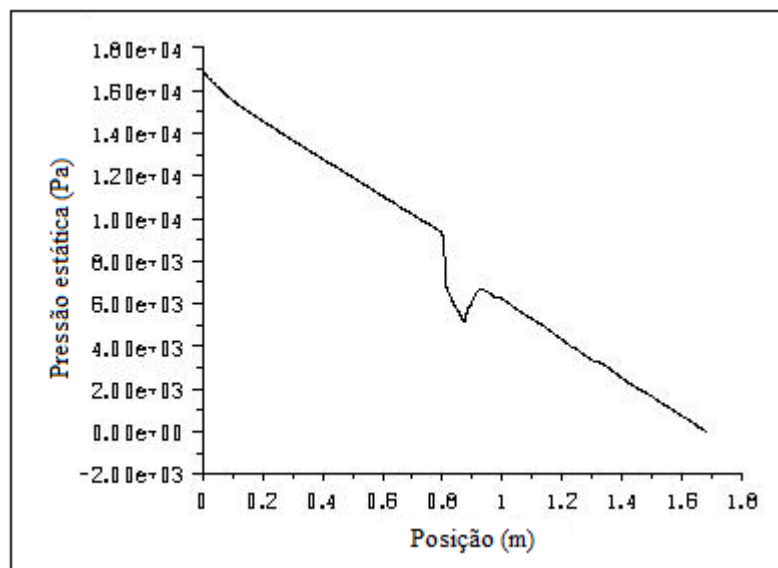


Figura 4.26 –Perfil de pressão no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e= 35^\circ$), do fluido Catiônico.

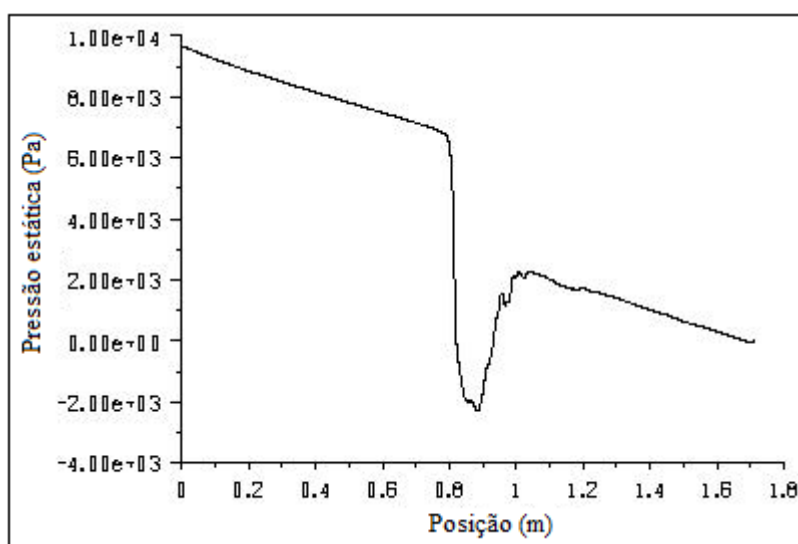


Figura 4.27 –Perfil de pressão no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido BRSCOL.

Nas Figuras 4.26 e 4.27 observa-se uma queda de pressão acentuada na posição em que se encontra o *tool joint* (entre 0,8 e 0,9m). SIMÕES (2005) obteve perfis semelhantes no escoamento de goma-xantana externo ao *tool joint*.

A Tabela 4.13 mostra os resultados de queda de pressão simulada e os respectivos erros percentuais para os casos apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 4.13 – Resultados da simulação da queda de pressão em *tool joints*, em regime laminar.

Fluido	Acessório	ΔP_{exper} (Pa)	ΔP_{sim} (Pa)	Erro (%)	
BRCARB	TJ interno ($D_{i\text{TJ}}= 15,24\text{mm}$)	3028	4690	-54,89	
		6983	11590	-65,97	
	TJ interno ($D_{i\text{TJ}}= 19,56\text{mm}$)	6658	9586	-43,98	
		2429	3701	-52,40	
	TJ externo ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e= 35^\circ$)	12041	16565	-37,57	
		4200	6140	-46,19	
		7779	10098	-29,81	
	TJ externo ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e= 90^\circ$)	11034	19106	-73,16	
		6366	14242	-123,72	
		4007	8149	-103,37	
	Catiónico	TJ interno ($D_{i\text{TJ}}= 15,24\text{mm}$)	9980	11709	-17,32
			6683	6983	-4,49
TJ interno ($D_{i\text{TJ}}= 19,56\text{mm}$)		6267	7432	-18,59	
		8101	11451	-41,35	
		3029	4787	-58,05	
TJ externo ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e= 35^\circ$)		11552	10869	5,91	
		9613	9262	3,65	
TJ externo ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e= 90^\circ$)		11764	15041	-27,86	
	14675	17668	-20,39		
BRMUL	TJ interno ($D_{i\text{TJ}}= 15,24\text{mm}$)	1312	925	29,46	
	TJ interno ($D_{i\text{TJ}}= 19,56\text{mm}$)	7297	9250	-26,76	
	TJ externo ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e= 90^\circ$)	17314	24782	-43,13	
		23904	25673	-7,40	
		22483	24549	-9,19	
		18715	24559	-31,23	
		12197	18534	-51,95	
	BRSCOL	TJ interno ($D_{i\text{TJ}}= 15,24\text{mm}$)	4577	4309	5,85
7586			8628	-13,74	
12384			13300	-7,40	
TJ interno ($D_{i\text{TJ}}= 19,56\text{mm}$)		2813	5861	-108,36	
		5039	7803	-54,86	
		5778	7401	-28,10	
		8996	10611	-17,96	
TJ externo ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e= 35^\circ$)		9143	9993	-9,30	
		7036	8354	-18,73	
		7024	9214	-31,18	
		5862	8046	-37,25	
TJ externo ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e= 90^\circ$)		4866	6834	-40,44	
		5532	8479	-53,25	
		6717	12004	-78,71	
		9276	11692	-26,04	
		13425	18695	-39,25	

De acordo com a Tabela 4.13, os desvios dos valores de pressão simulados em relação aos experimentais apresentaram erros de até 123,72%. Na tentativa de explicar os desvios apresentados, as simulações de cada caso foram feitas novamente variando-se os valores dos parâmetros reológicos em função da incerteza apresentada, para cada fluido, de acordo com a Tabela 4.3.

As incertezas dos parâmetros reológicos foram aplicadas na simulação porque, embora existissem incertezas referentes a outras variáveis experimentais, observou-se que a incerteza dos parâmetros reológicos foram as mais influentes na determinação da incerteza da perda de carga.

As Figuras 4.28 a 4.31 apresentam os resultados obtidos para os fluidos BRCARB, Catiônico, BRMUL e BRSCOL, com as respectivas variações dos valores dos parâmetros k e n . Nessas figuras, a barra de erro superior corresponde à simulação executada utilizando a variação positiva de ambos os parâmetros e a barra inferior a variação negativa de ambos.

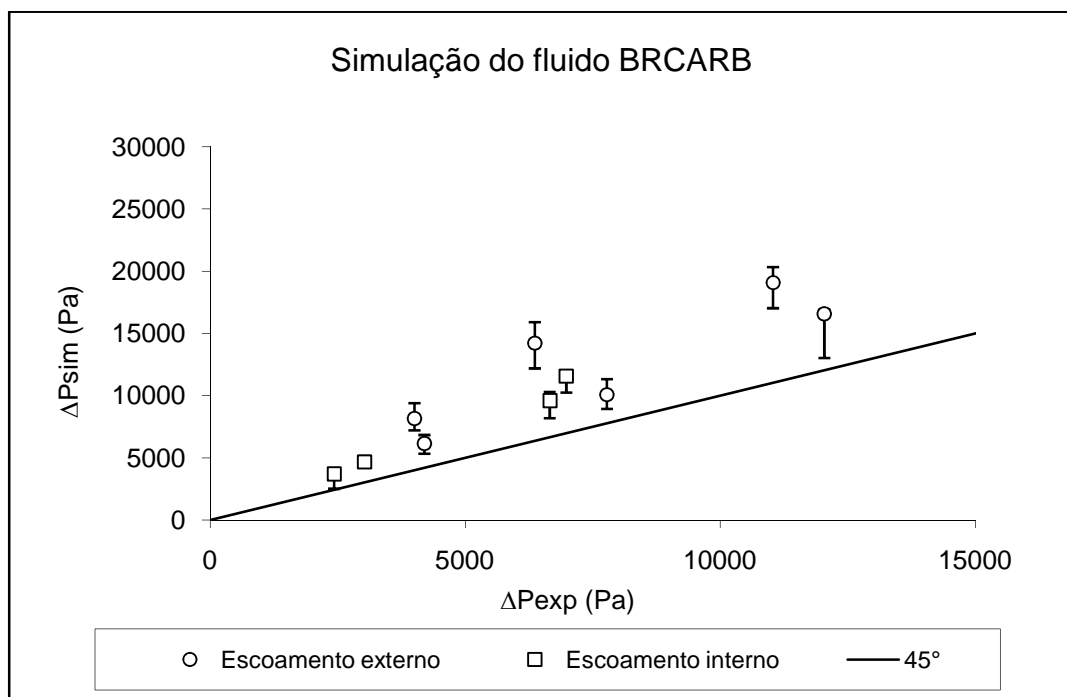


Figura 4.28 – Influência das incertezas dos parâmetros reológicos sobre a perda de carga simulada no escoamento do fluido BRCARB em *tool joints*.

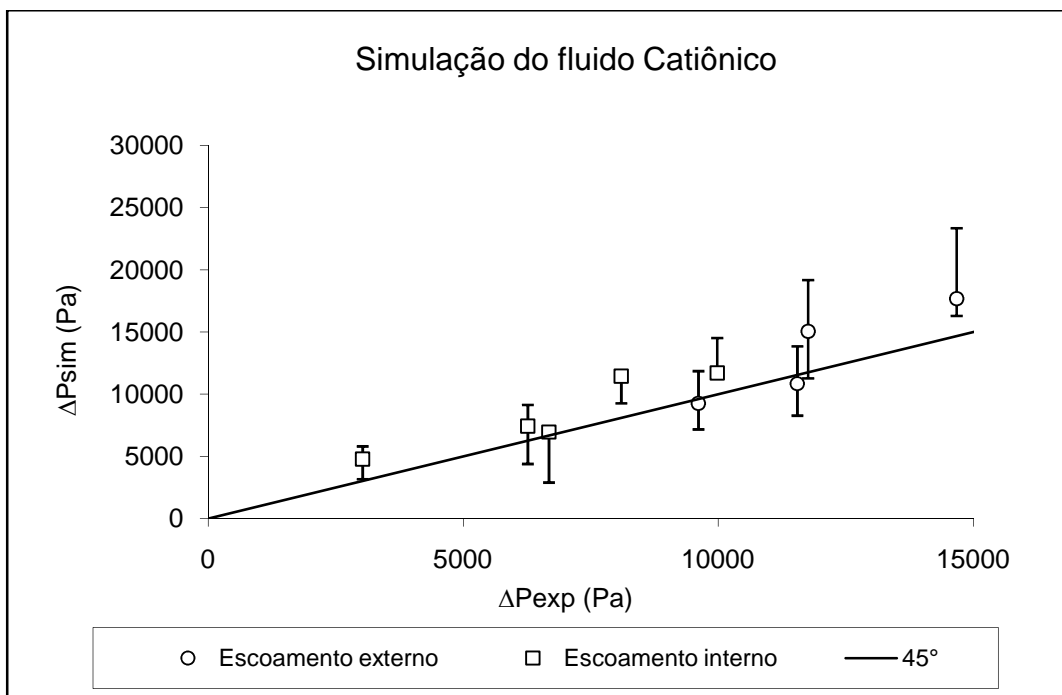


Figura 4.29 – Influência das incertezas dos parâmetros reológicos sobre a perda de carga simulada no escoamento do fluido Catiônico em *tool joints*.

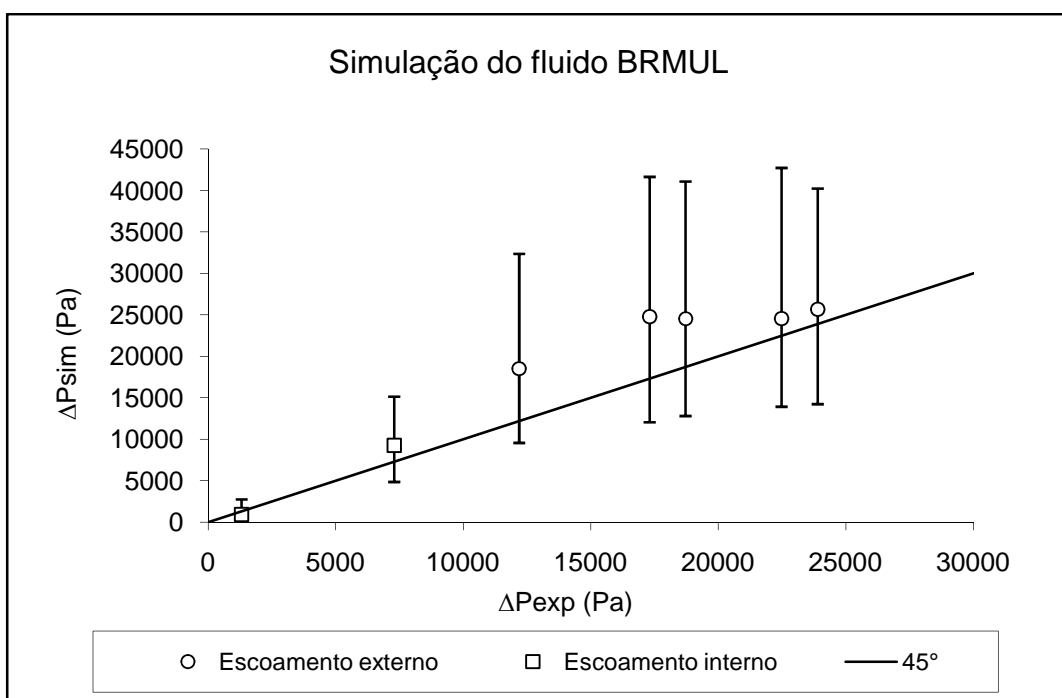


Figura 4.30 – Influência das incertezas dos parâmetros reológicos sobre a perda de carga simulada no escoamento do fluido BRMUL em *tool joints*.

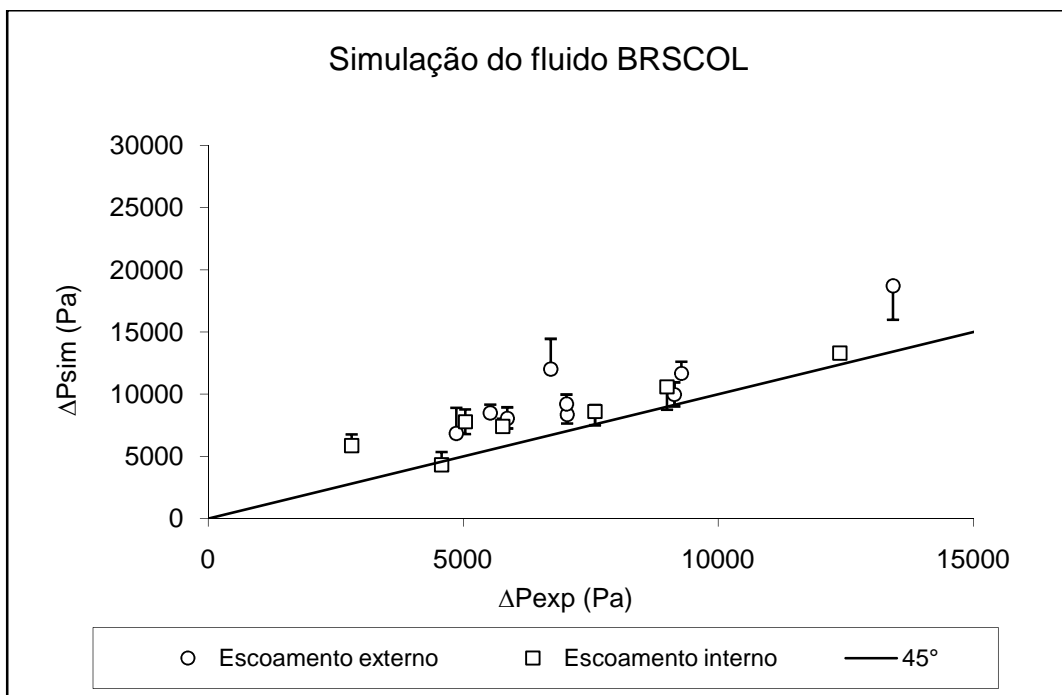


Figura 4.31 – Influência das incertezas dos parâmetros reológicos sobre a perda de carga simulada no escoamento do fluido BRSCOL em *tool joints*.

As Figuras 4.28 a 4.31 mostram que a perda de carga obtida na simulação numérica, para alguns dos casos, pode ser equivalente à experimental quando se consideram as incertezas nos parâmetros experimentais k e n . Entretanto não podem ser desconsiderados os eventuais erros gerados devido à geração de malha inapropriada, e solução numérica inconsistente.

5 CONCLUSÕES

As perdas de carga dos fluidos de perfuração BRCARB, Catiônico, BRMUL e BRSCOL no escoamento através de *tool joints*, ejetores e estabilizador foram avaliadas através da determinação de coeficientes de perda de carga (K). No caso dos *tool joints*, foram feitos testes de correlações e simulação computacional via pacote de CFD.

O modelo *power law* foi adequado para representar o comportamento reológico dos fluidos de perfuração avaliados. A determinação experimental e teórica da transição entre os regimes laminar e turbulento foram concordantes, permitindo estabelecer os limites entre os regimes de escoamento.

Os resultados mostraram que valor do coeficiente de perda (K) varia de acordo com a geometria e é pouco sensível ao tipo de fluido em escoamento. O coeficiente de perda de carga dos ejetores foi determinado e está de acordo com a literatura. Foi observado que não houve grande variação nos valores de C_D com relação aos fluidos e à razão entre o diâmetro do tubo e do ejetor estudados.

A correlação testada para a previsão da perda de carga no escoamento interno ao *tool joint* foi eficiente após a reestimação do parâmetro C. No caso da correlação proposta por JEONG e SHAH (2004) para o escoamento externo ao *tool joint*, a reestimação do parâmetro D permitiu a obtenção de resultados concordantes com os dados experimentais. Os resultados obtidos através da correlação proposta por SIMÕES (2005) foram incoerentes fisicamente.

As simulações com os pacotes de CFD mostraram que a unidade piloto estava corretamente dimensionada, quanto à posição das tomadas de pressão, e que conseqüentemente os dados experimentais eram válidos, a partir da análise do comprimento de entrada necessário para estabelecer o perfil de velocidade. As simulações mostraram também que a perda de carga na região reta anterior ao *tool joint* é maior que na região posterior devido à existência de regiões de recirculação e, portanto, o cálculo da perda de carga nessas regiões deve ser feito de forma distinta.

Os erros percentuais entre os dados de perda de carga experimental e simulada para os *tool joints* foram elevados. Esses erros, em alguns casos, poderiam estar associados às incertezas experimentais referentes aos parâmetros reológicos k e n, embora não sejam descartados os eventuais erros ocorridos devido à geração de malha inapropriada e solução numérica inconsistente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para os trabalhos futuros são relativas principalmente ao desenvolvimento de correlações para a previsão da perda de carga no escoamento externo aos *tool joints* e ao estudo da previsão da perda de carga através dos pacotes de CFD.

Para o escoamento externo ao *tool joint*, sugere-se desenvolver uma correlação a partir de dados experimentais e dados obtidos através de simulação com pacote CFD. Essa correlação deverá prever cálculos distintos para a região reta anterior e posterior ao *tool joint*, sendo que deverá ser atribuída a maior variação de pressão à região anterior ao *tool joint*.

Quanto à simulação, deve-se inicialmente testar as malhas que descrevem a geometria dos *tool joints*, e analisar quais os algoritmos adequados para descrever o escoamento de fluidos de perfuração. Seria importante conhecer o valor da pressão estática na tomada de pressão da saída, pois esse valor iria servir como condição de contorno do problema, evitando a utilização da condição ‘*outflow*’, que é aplicada no caso em que não é conhecida nenhuma propriedade na face de saída do escoamento.

Devido à grande influência das incertezas experimentais dos parâmetros reológicos na simulação, sugere-se a utilização de equipamentos mais precisos para medir a reologia, tais como um reômetro, por exemplo. Além disso, deveria ser feito o teste de modelos reológicos mais precisos (a três parâmetros, por exemplo) para representar os fluidos estudados, visto que o BRMUL obteve um coeficiente de correlação baixo quando comparado aos outros fluidos.

Além da simulação em regime laminar, propõe-se o estudo da simulação em regime turbulento e a geração das malhas referentes aos ejetores e ao estabilizador.

Embora a determinação dos regimes de escoamento tenha gerado valores plausíveis para o número de Reynolds, é necessário pesquisar e até mesmo propor formas mais consistentes de determinar as regiões de transição.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**; John Willey & Sons Inc.; Second edition, New York, USA, 2003.
- BARTHEM, R. B. **Tratamento e Análise de Dados em Física Experimental**, Cadernos Didáticos UFRJ, 1995.
- BOURGOYNE, A. T., MILHEIM, K. K., CHENEVERT, M. E., YOUNG, F. S. **Applied Drilling Engineering**, Second Edition, SPE, Richardson, Texas, EUA, 1991.
- CHURCHILL, S. W. Friction factor equation spans All fluid flow regimes. **J. Chem. Eng.**, 7 de novembro, 1977.
- CORADIN, H. T.; BRONDANI, W. M.; MATTIUSI, E. M.; FRANCO, A. T.; MORALES, R. E. M. Simulação numérica do escoamento laminar através de uma contração brusca axissimétrica. In: **Anais do 1º ENAHPE**, Domingos Martins, ES, Brasil, 2006.
- CRANE COMPANY Flow of fluids through valves, fittings and pipe. **Crane Co.**, Technical Paper No. 410, 16th printing, 300 Park Avenue, New York, 1976.
- CRITTENDON, B. C. The mechanics of design and interpretation of hydraulic fracture treatments. **Journal of Petroleum Technology**, Outubro, pp. 21-9, 1959.
- DODGE, D. W.; METZNER, A. B. Turbulent flow of non-newtonian systems. **J. Amer. Ints. Chem. Eng.**, 5(2): 189, 1959.
- ELLIS, R. C.; GEORGE, D. S. Pratical interpretation on rheology, annular displacing torces. How to avoid by passing mud during primary cementing. **World Oil**, 64-9, 1977.
- FLUENT INC., Fluent 6.1 User's Guide, Centerra Resource Park, **Fluent**, Lebanon, NH 03766, 2005.
- FOX, R. W., McDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J. **Introduction to Fluid Mechanics**, 6th Edition, John Wiley & Sons Inc, 2004.
- GOMES, F. J. A. D. Hidráulica, fluidos de potência: racionalização do uso do fator de fricção, I. In: **Encontro Técnico sobre Informática na Perfuração**, CAPER/87, Módulo 7, Salvador, Brasil, 1987.
- JEONG, Y.; SHAH, S. Analysis of tool joint effects for accurate friction pressure loss calculations. **Paper SPE 87182**, IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, Março 2-4, 2004.
- LAMB, H. S. Hydrodynamics. **Dover Publications**, New York, pp. 586-187, 1945.
- LEAL, A. B. **Estudo do escoamento de fluidos não-Newtonianos em dutos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2005.

LEAL, A. B., SCHEID, C. M., CALÇADA, L. A., FERREIRA, M. V. D., MARTINS, A. L., LEAL, R. A. F. Avaliação de aditivos redutores de arraste comerciais no escoamento de fluidos de completação. In: **Anais do 1º ENAHPE**, Domingos Martins, ES, Brasil, 2006.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e Escoamento de Fluidos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

McCAIN, R. C. Pressure loss in tool joint **Internal Memo**,. USA Mobil, Dallas, Texas, 1994.

MENDES, P. R. S.; NACCACHE, M. F.; VARGES, P. R.; MARCHESINI, F. H. Flow of viscoplastic liquids through axisymmetric expansions – contractions. **J. Non – Newtonian Fluid Mech.**, 142, 207-217, 2007.

METZNER, A. B. Heat transfer in non-Newtonian fluids. **Advances in Heat Transfer**, v.2, Academic Press, p.357, 1965.

METZNER, A. B.; REED, J. C. Flow of non-newtonian fluids-correlation of laminar, transition and turbulent flow regions. **AIChE Journal**, 1: 434-40, Dezembro, 1955.

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.

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: McGraw-Hill, 1999.

PILEHVARI, A.; SERTH, R. Generalized hydraulic calculation method using rational polynomial model. **J. Energy Res. Tech.**, 127, p.15, 2005.

PINTO, J. C.; LOBÃO, M. W. ESTIMA: Um pacote computacional para estimação de parâmetros e projeto de experimentos”, **Relatório Técnico Interno**, PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1991.

REED, T. D.; PILEHVARI, A. A. A New model for laminar, transitional, and turbulent flow of drilling muds. **Paper SPE 25456**, Production Operations Symposium, Cidade de Oklahoma, OK, Março 21-23, 1993.

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

SANTOS, O. L. A. Segurança de poço em lâminas de água ultraprofundas. In: **Anais do I ENAHPE**, Domingos Martins, ES, Brasil, 2006.

SCHEID, C. M.; GONÇALVES, R. S. A.; ROCHA, D. C.; CALÇADA, L. A. Projeto perda de carga. **Relatório Técnico Interno**, CENPES/PETROBRAS, 2007.

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

SIMÕES, S. Q. **The effect of tool joints on ECD while drilling with power law fluids**. Tese de Mestrado, Universidade de Tulsa, 2005.

THOMAS, J. E. **Fundamentos da engenharia de petróleo**, Segunda Edição, Interciência, Rio de Janeiro, Petrobrás, 2004.

8 ANEXOS

A - Gráficos para determinação de coeficientes de perda de carga (K)

B - Resultados dos testes de correlações de perda de carga em *tool joints*

C - Tabelas Referentes ao Teste da Correlação Proposta por SIMÕES (2005) para *Tool Joint* ($\Theta_c = 90^\circ / \Theta_e = 90^\circ$)

D - Tabelas Referentes ao Teste da Correlação Proposta por SIMÕES (2005) para *Tool Joint* ($\Theta_c = 18^\circ / \Theta_e = 35^\circ$)

E - Resultados da Determinação dos Coeficientes de Descarga

8.1 Anexo A – Gráficos para Determinação de Coeficientes de Perda de Carga (K)

8.1.1 Escoamento interno ao *tool joint*

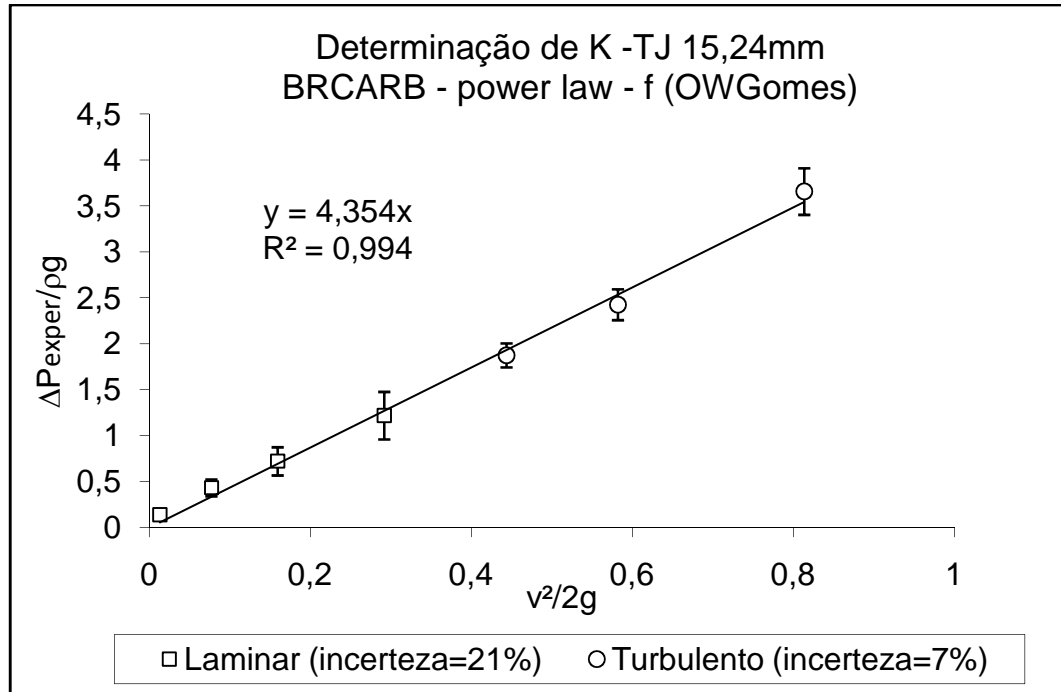


Figura 8.1 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento interno ($D_{\text{TJ}} = 15,24\text{mm}$), para o fluido BRCARB.

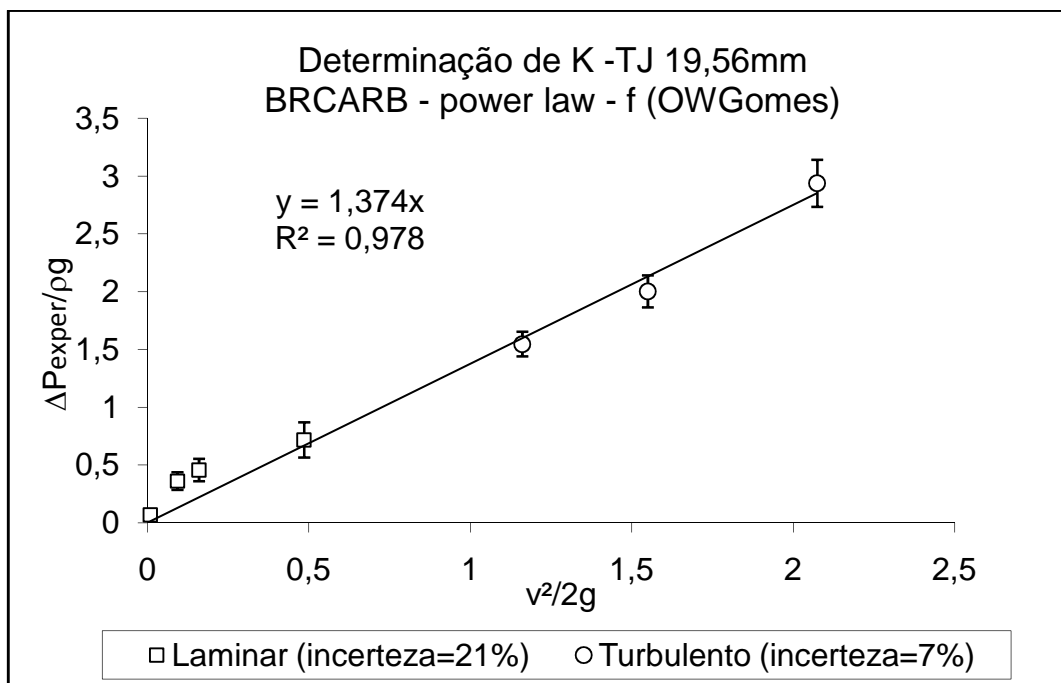


Figura 8.2 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento interno ($D_{\text{TJ}} = 19,56\text{ mm}$), para o fluido BRCARB.

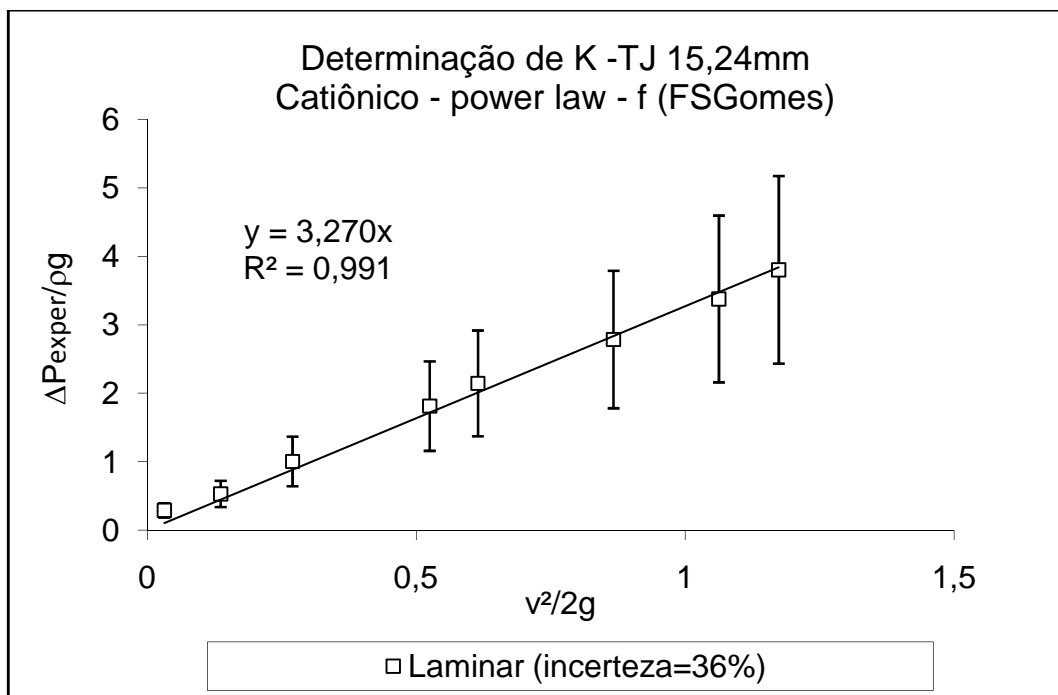


Figura 8.3 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento interno ($D_{iTJ} = 15,24\text{mm}$), para o fluido Catiônico.

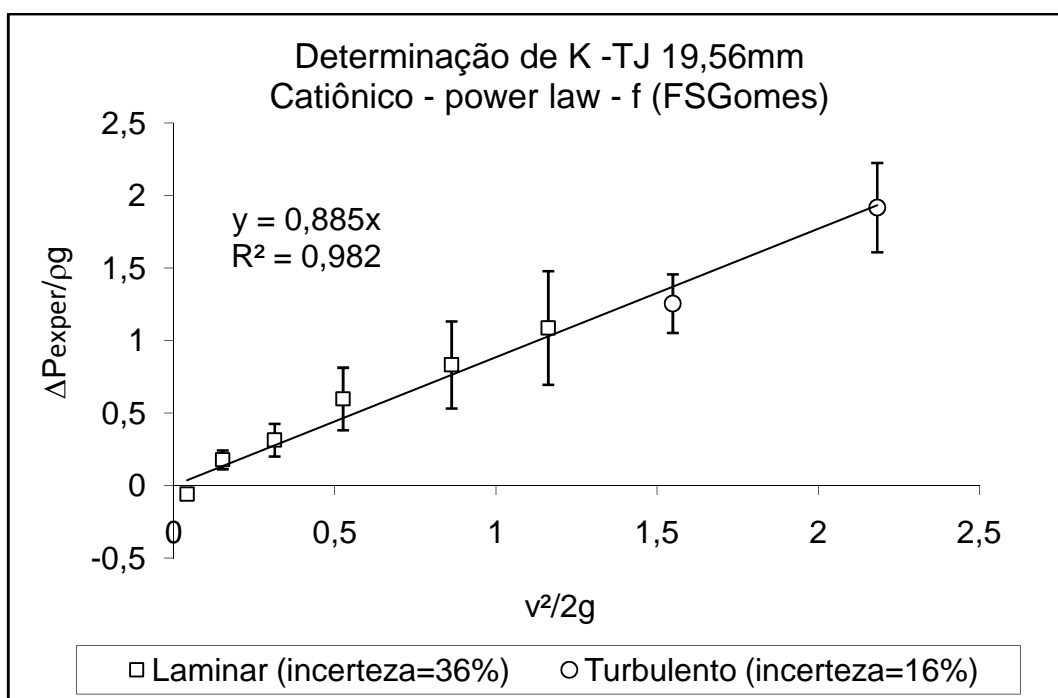


Figura 8.4 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento interno ($D_{iTJ} = 19,56\text{ mm}$), para o fluido Catiônico.

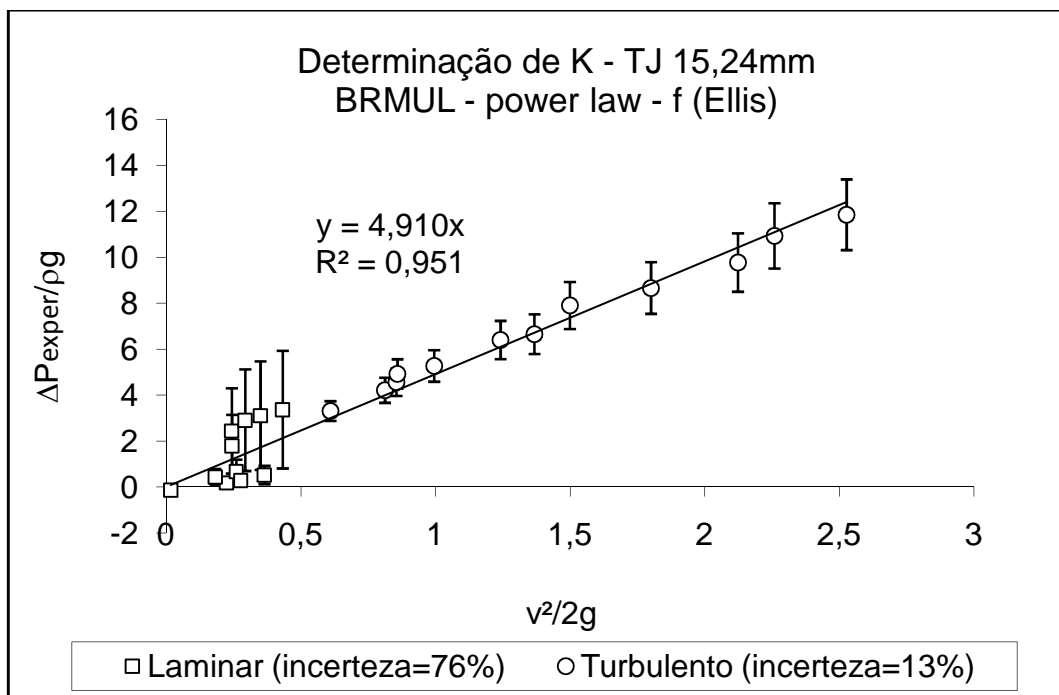


Figura 8.5 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento interno ($D_{i\text{TJ}} = 15,24\text{mm}$), para o fluido BRMUL.

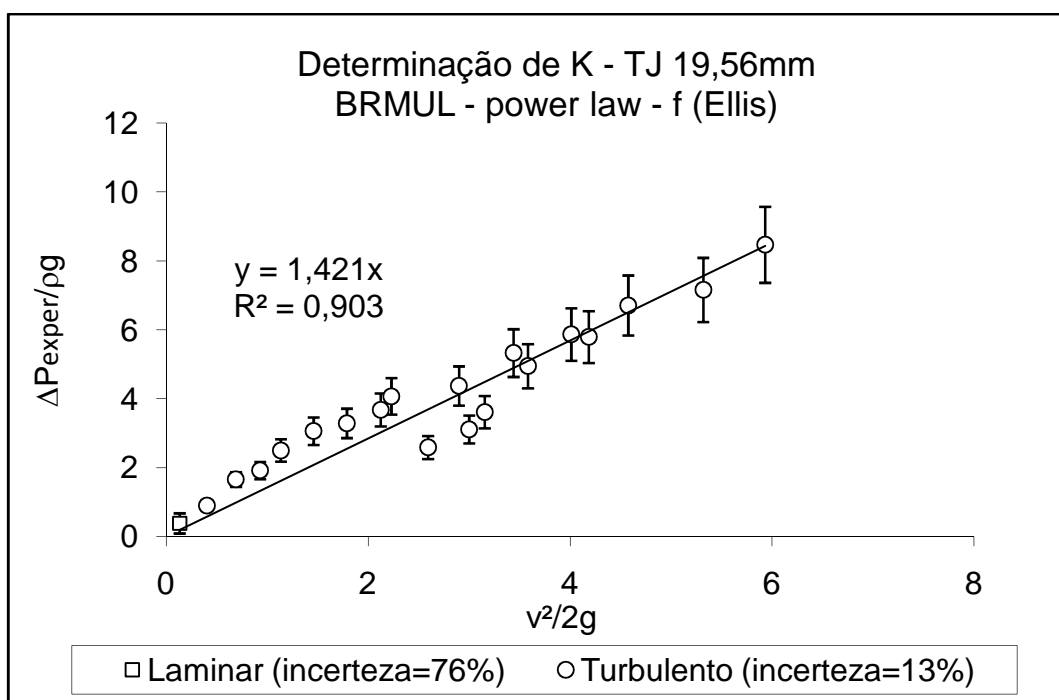


Figura 8.6 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento interno ($D_{i\text{TJ}} = 19,56\text{ mm}$), para o fluido BRMUL.

8.1.2 Escoamento externo ao *tool joint*

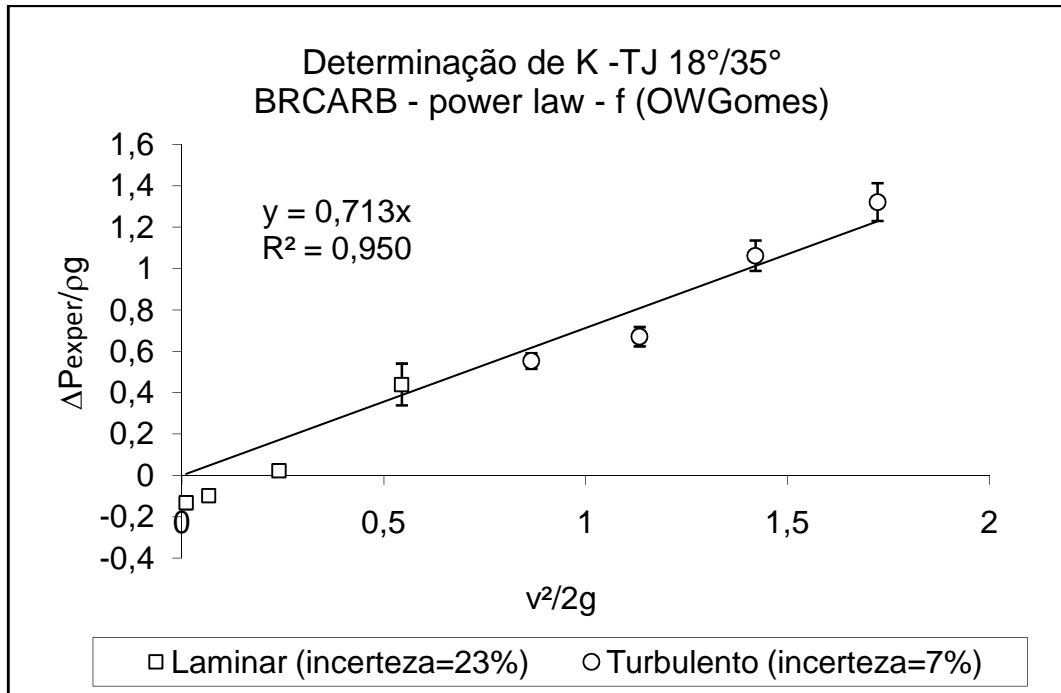


Figura 8.7 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento externo ($\Theta_e=18^\circ / \Theta_e=35^\circ$), para o fluido BRCARB.

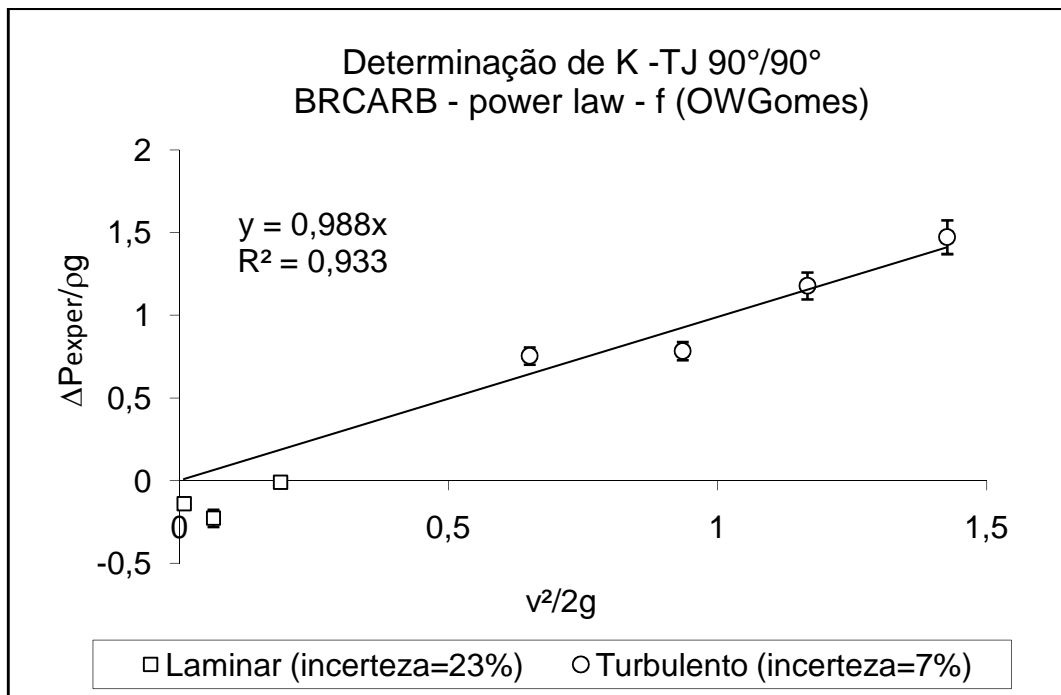


Figura 8.8 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento externo ($\Theta_e=90^\circ / \Theta_e=90^\circ$), para o fluido BRCARB.

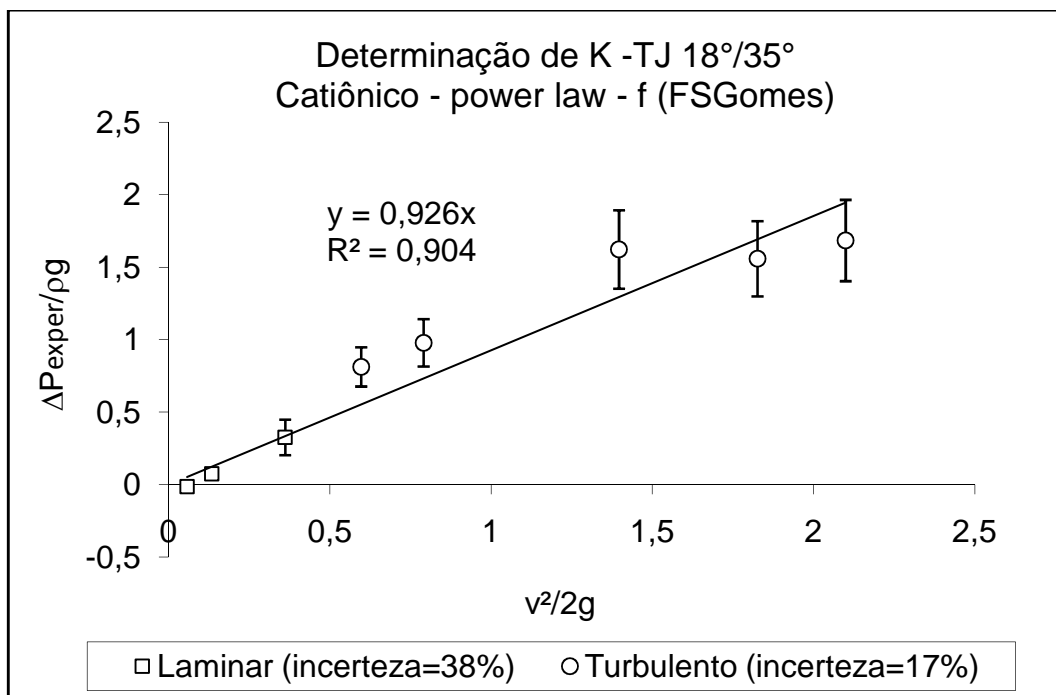


Figura 8.9 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento externo ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e=35^\circ$), para o fluido Catiônico.

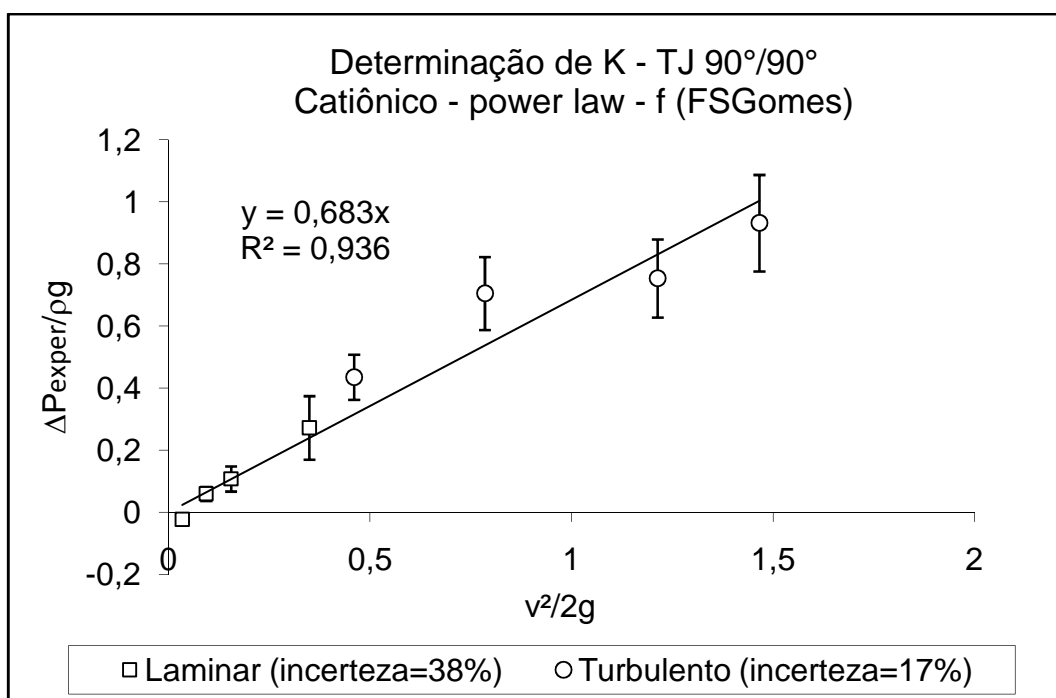


Figura 8.10 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento externo ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e=90^\circ$), para o fluido Catiônico.

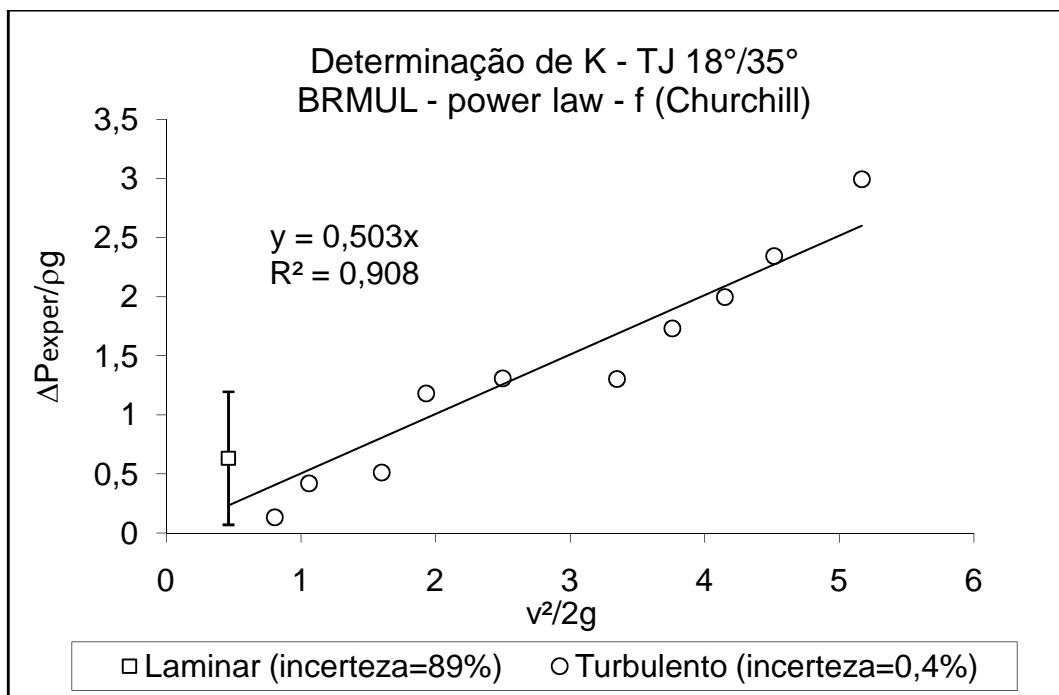


Figura 8.11 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento externo ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e=35^\circ$), para o fluido BRMUL.

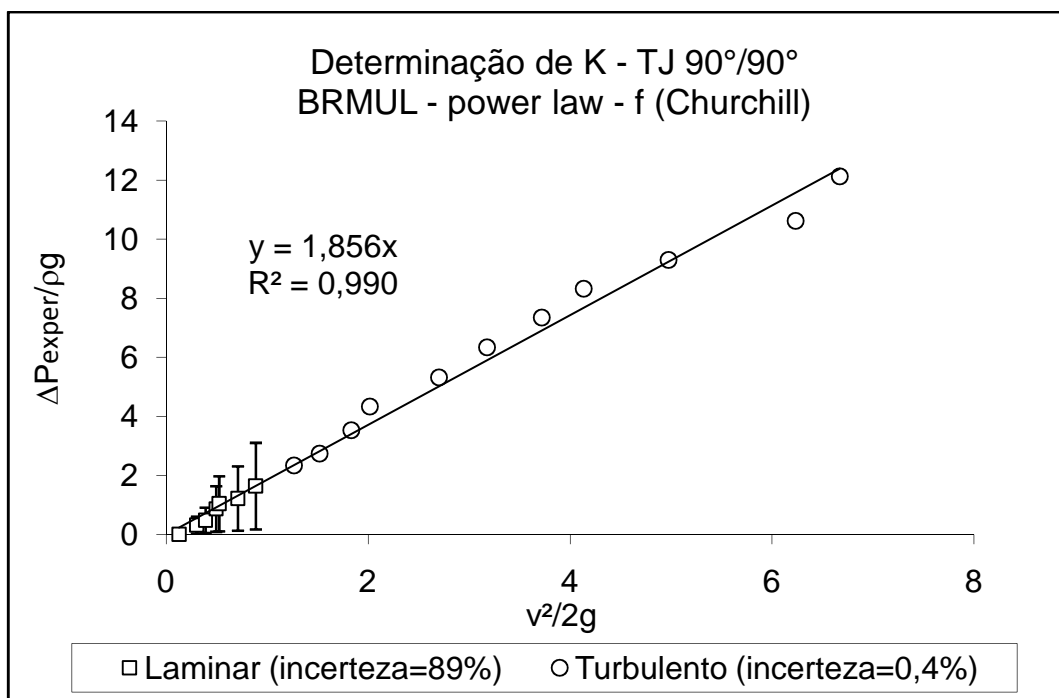


Figura 8.12 – Determinação do coeficiente de perda (K) do *tool joint* com escoamento externo ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e=90^\circ$), para o fluido BRMUL.

8.1.3 Escoamento em estabilizadores

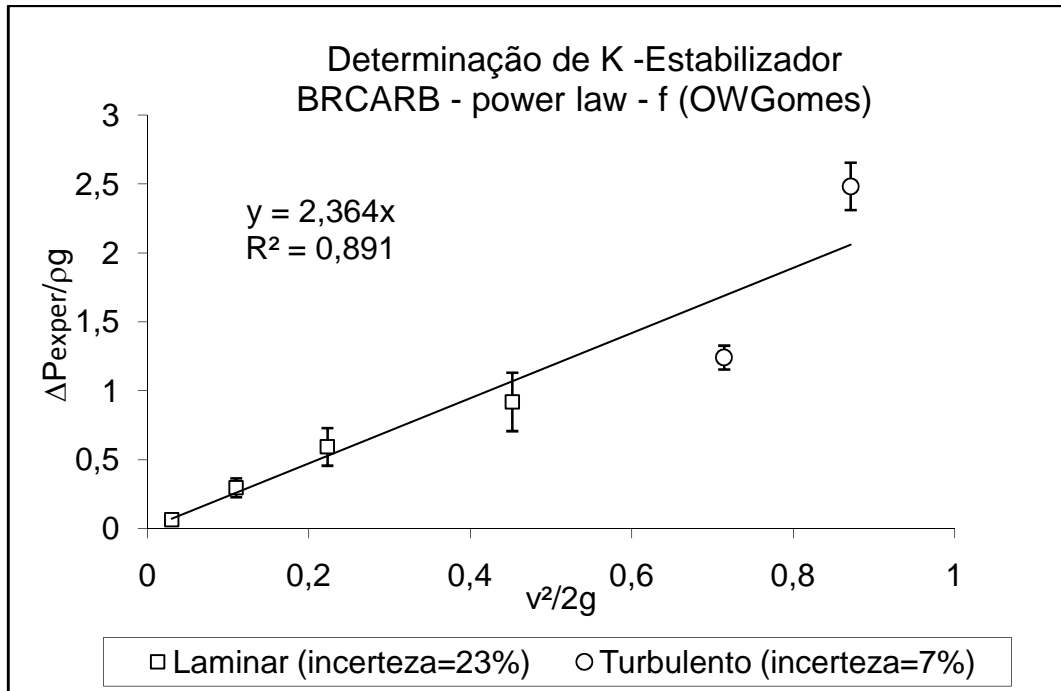


Figura 8.13 – Determinação do coeficiente de perda (K) do estabilizador, para o fluido BRCARB.

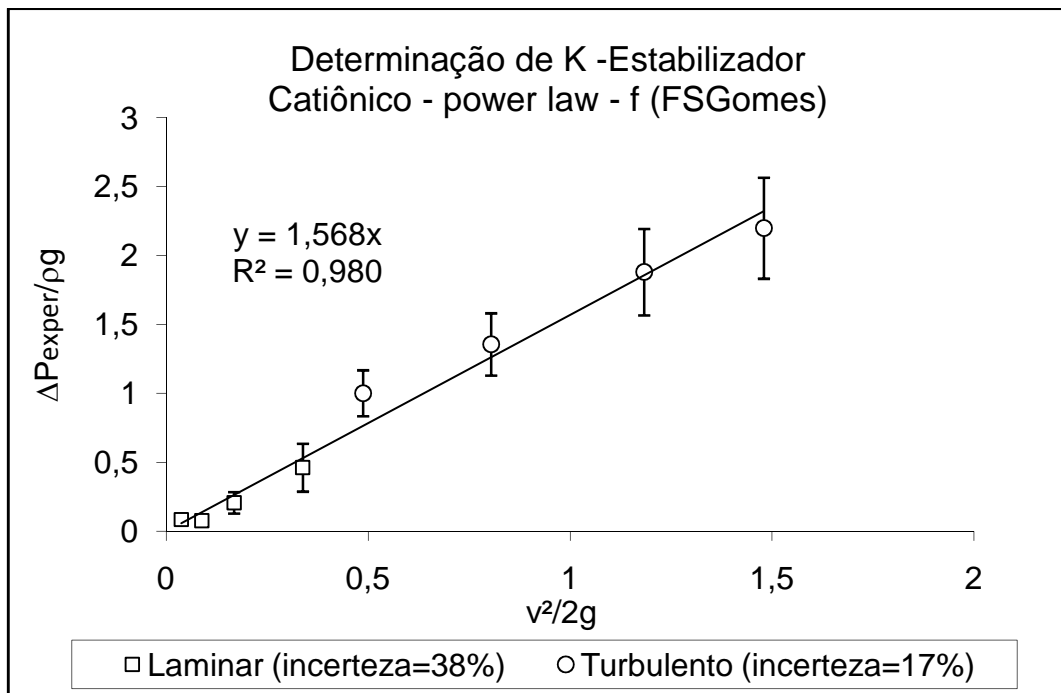


Figura 8.14 – Determinação do coeficiente de perda (K) do estabilizador, para o fluido Catiônico.

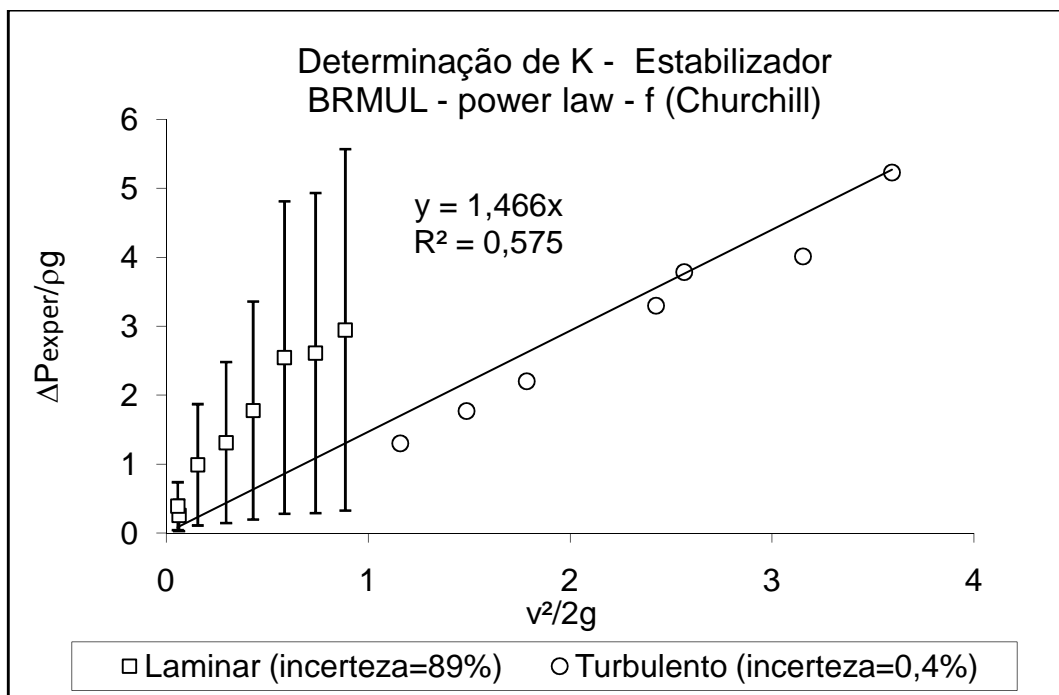


Figura 8.15 – Determinação do coeficiente de perda (K) do estabilizador, para o fluido BRMUL.

8.2 Anexo B – Resultados dos Testes de Correlações de Perda de Carga em *Tool Joints*

8.2.1 Escoamento interno ao *tool joint*

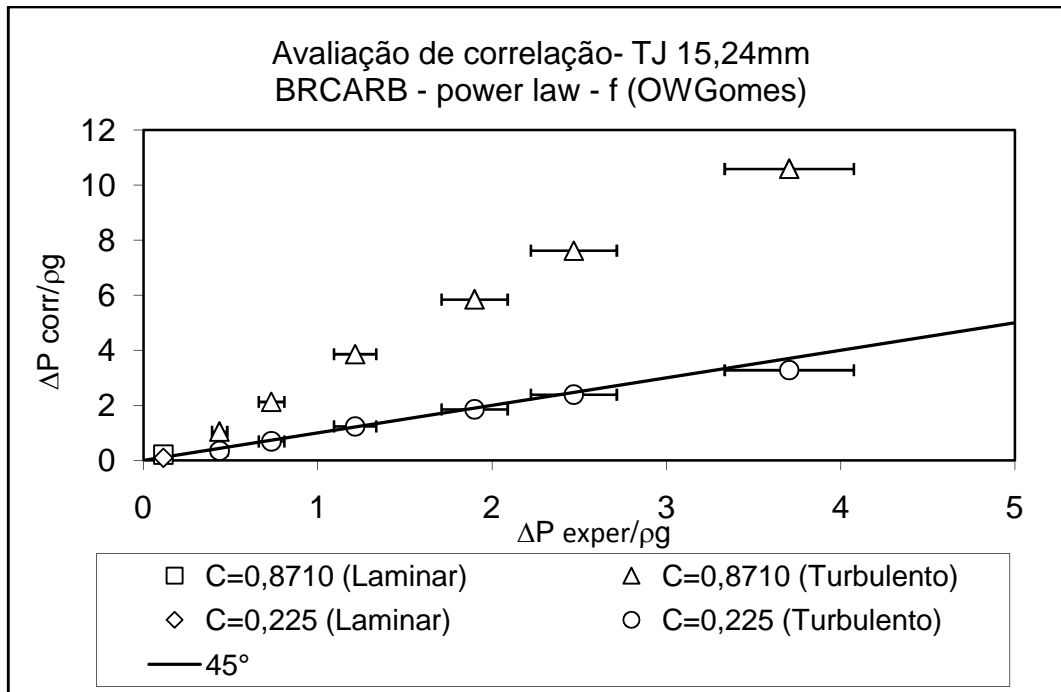


Figura 8.16 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido BRCARB.

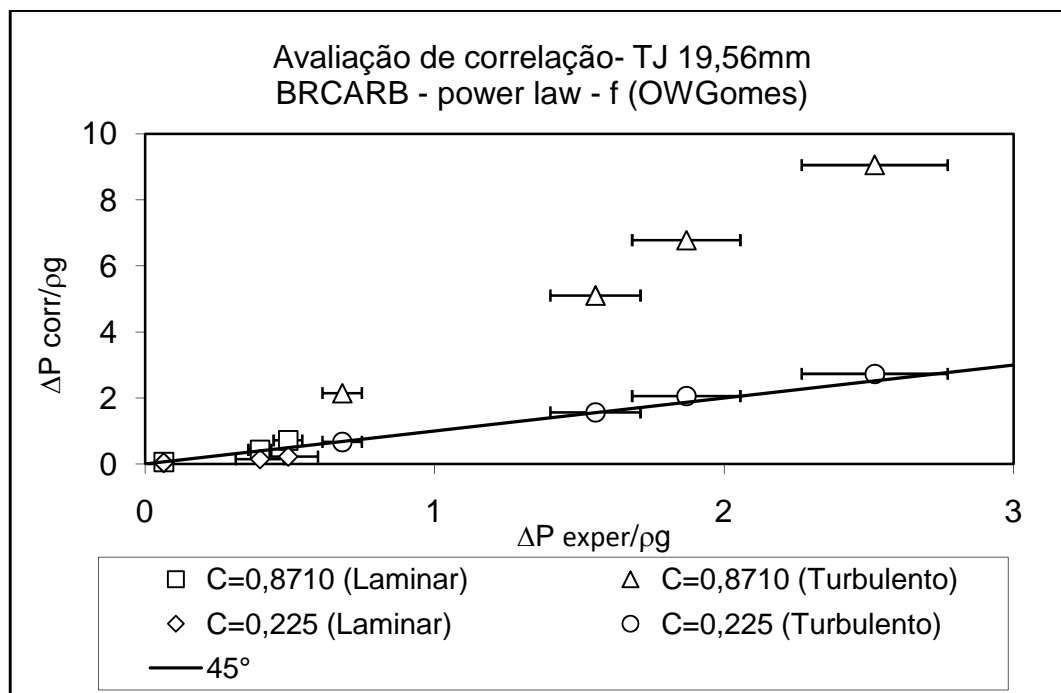


Figura 8.17 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{iTJ}=19,56$ mm), do fluido BRCARB.

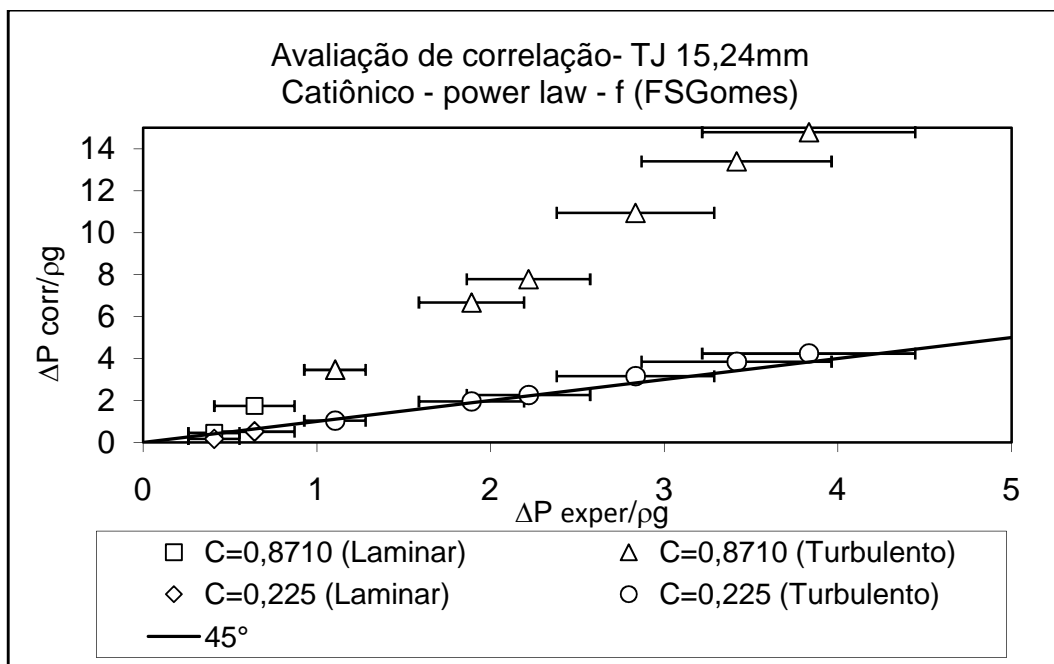


Figura 8.18 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido Catiônico.

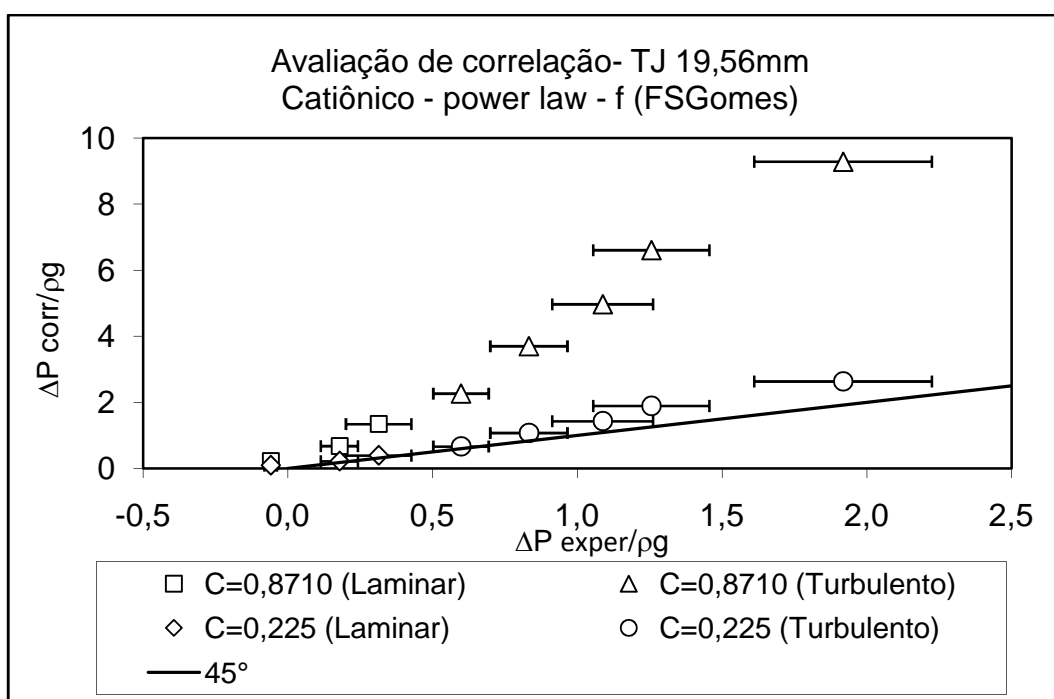


Figura 8.19 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{iTJ}=19,56$ mm), do fluido Catiônico.

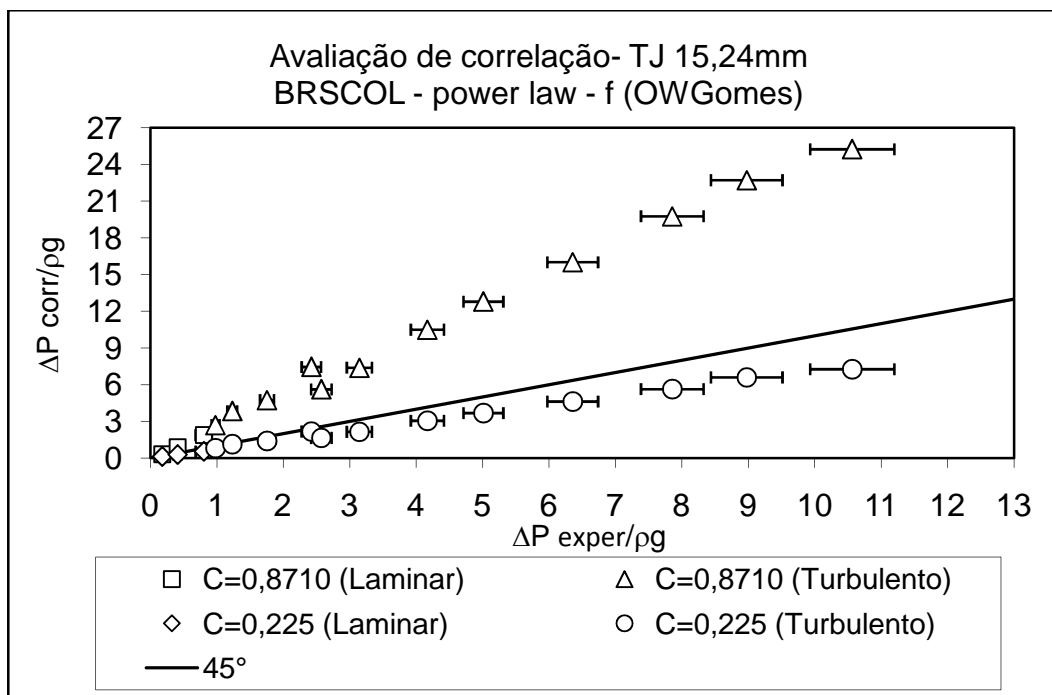


Figura 8.20 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{iTJ}=15,24$ mm), do fluido BRSCOL.

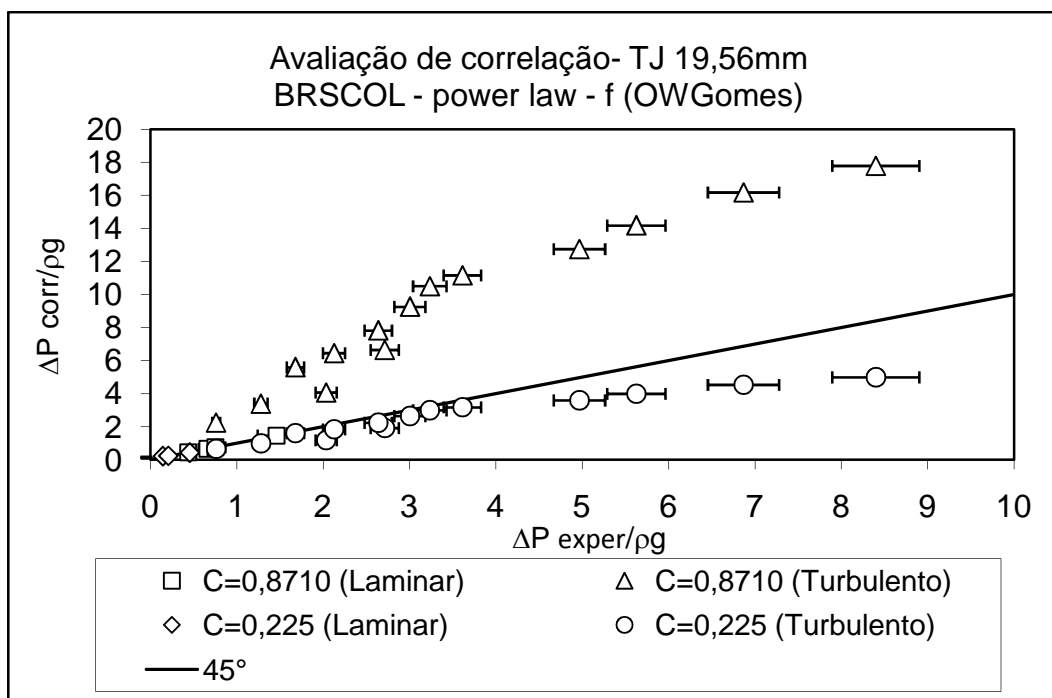


Figura 8.21 –Avaliação da correlação de perda de carga no escoamento interno ao *tool joint* ($D_{iTJ}=19,56$ mm), do fluido BRSCOL.

8.2.1 Escoamento externo ao *tool joint*

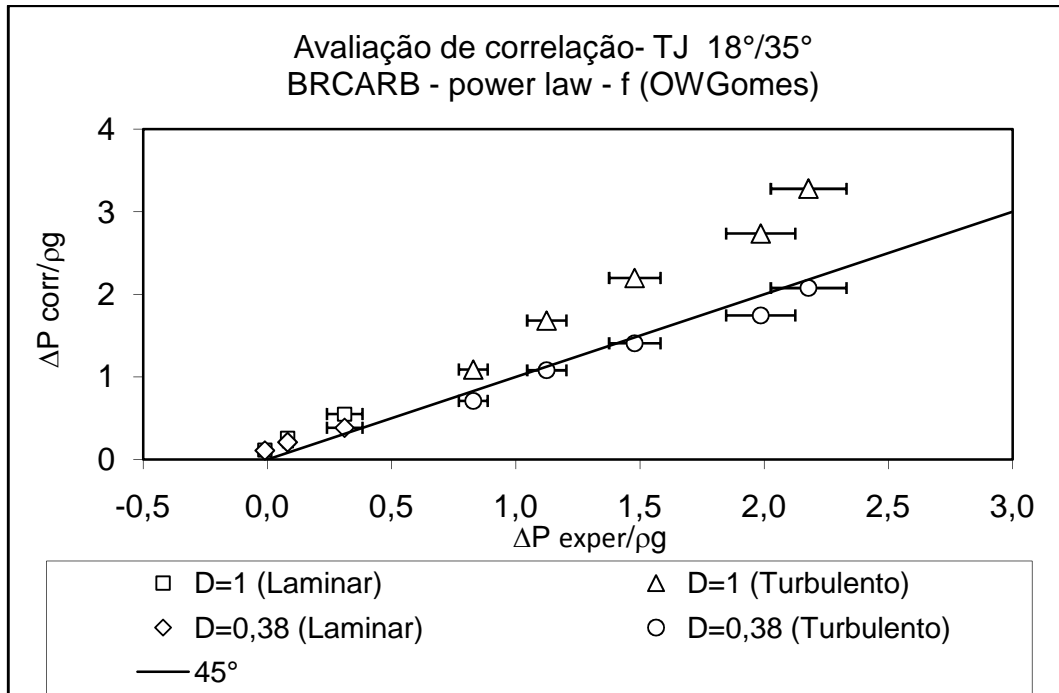


Figura 8.22 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e=35^\circ$), do fluido BRCARB.

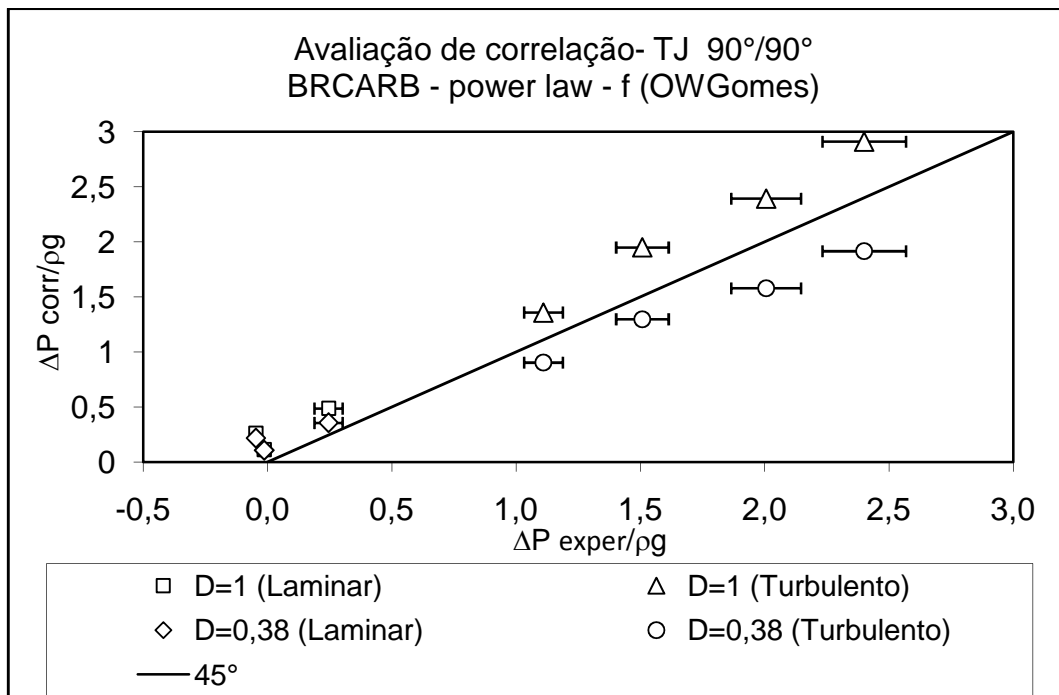


Figura 8.23 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e=90^\circ$), do fluido BRCARB.

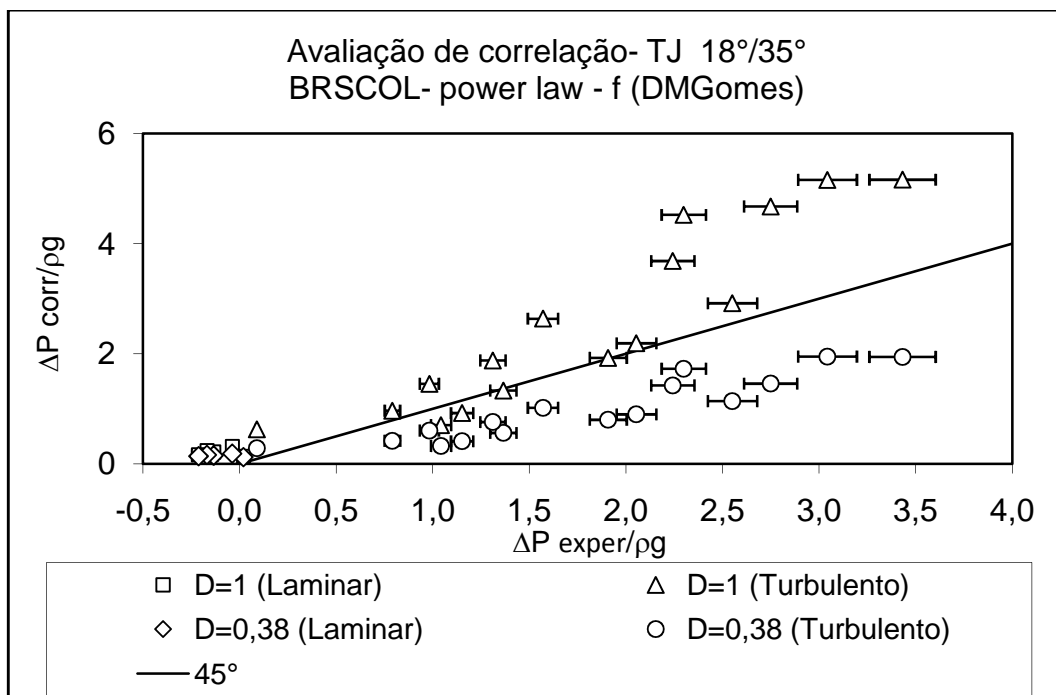


Figura 8.24 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=18^\circ / \Theta_e=35^\circ$), do fluido BRSCOL.

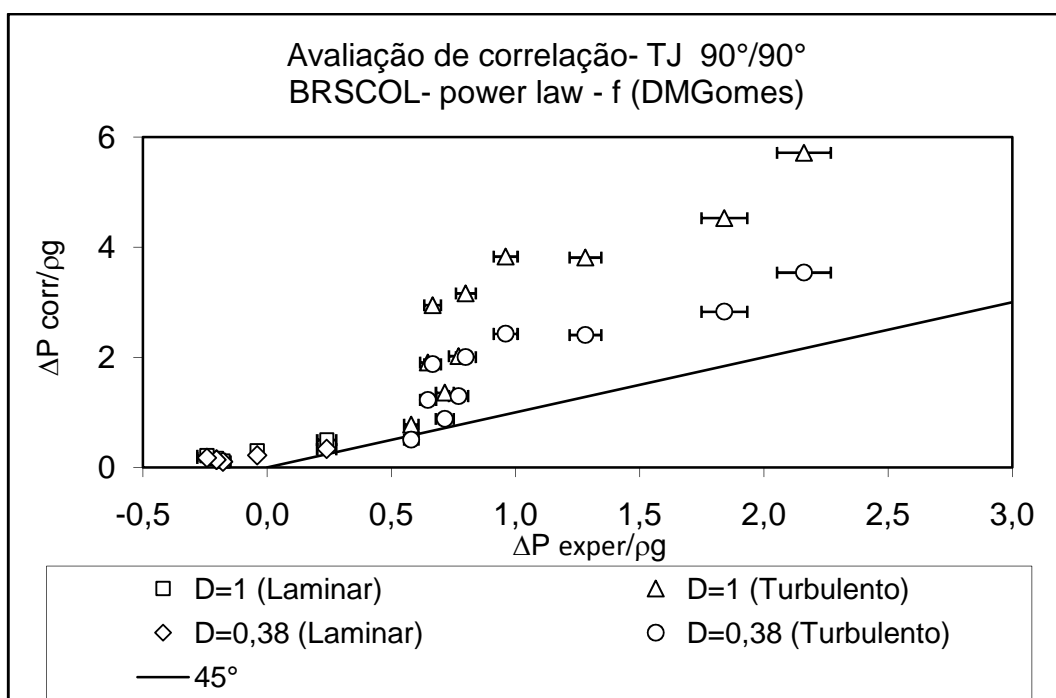


Figura 8.25 – Avaliação da correlação no escoamento externo ao *tool joint* ($\Theta_c=90^\circ / \Theta_e=90^\circ$), do fluido BRSCOL

8.3 Anexo C – Tabelas Referentes ao Teste da Correlação Proposta por SIMÕES (2005) para o *Tool Joint* ($\Theta_c = 90^\circ / \Theta_e = 90^\circ$)

Dados						
D _{cas} (m)	D _{tubo} (m)	D _{TJ} (m)	L _{tj} (m)	ρ (Kg/m ³)	g(m/s ²)	θ_c (°)
0,0363	0,0213	0,028	0,06452	1065,5	9,8	90

Experimento	M(Kg)	Δt (s)	T(°C)	Q(Kg/s)	Q(m ³ /s)	ΔP_{exp} (mmHg)	ΔP_{exp} (Pa)	k	n
1	1,720	5,81	28,50	0,2970	0,0511	30,06	4007,5992	1,2020	0,4504
	1,765	5,96							
	1,630	5,45							
2	1,785	2,21	28,50	0,8046	0,1385	47,75	6366,03	0,9579	0,4887
	1,79	2,21							
	1,800	2,26							
3	2,200	1,61	30,00	1,3882	0,2389	82,77	11034,896	1,1043	0,4649
	2,48	1,8							
	2,955	2,09							
4	3,340	1,28	30,00	2,5823	0,4445	168,1	22411,092	1,0228	0,4659
	3,715	1,46							
	3,610	1,39							
5	3,545	1,15	35,00	3,0955	0,5328	216,3	28837,116	0,8714	0,4944
	3,515	1,14							
	3,310	1,06							
6	3,835	1,10	35,50	3,4579	0,5952	274,8	36636,336	0,9268	0,4842
	3,695	1,07							
	2,740	0,80							
7	4,360	1,14	36,00	3,8233	0,6581	333,7	44488,884	0,8722	0,4930
	3,66	0,96							
	3,450	0,90							

Região anterior à contração

Experimento	Y	Z	G	Deff1	v1(m/s)	v1/2g	Reynolds	f anterior à contração	ΔP anterior à contração(Pa)
1	0,4137	0,9801	2,0921	0,0072	0,4108	0,0210	75,7588	0,4225	2532,5593
2	0,4090	0,9814	2,0074	0,0075	1,1129	0,0568	345,9038	0,0988	4345,3598
3	0,4119	0,9806	2,0584	0,0073	1,9199	0,0980	810,7345	0,0437	5724,3473
4	0,4118	0,9806	2,0562	0,0073	3,5715	0,1822	2252,2402	0,0200	9040,7618
5	0,4083	0,9816	1,9959	0,0075	4,2813	0,2184	2784,3863	0,0191	12404,6277
6	0,4095	0,9813	2,0167	0,0074	4,7825	0,2440	3357,0063	0,0183	14861,0379
7	0,4085	0,9816	1,9987	0,0075	5,2879	0,2698	3866,8375	0,0177	17616,8567

Contração

Experimento	v2(m/s)	Z	G	Deff2	v	Deff	N	Reynolds	f contração	ΔP contração(Pa)
1	0,6651	0,9960	2,1065	0,0039	0,5380	0,0056	10,7358	67,5333	6,46E+13	1,99E+16
2	1,8016	0,9963	2,0200	0,0041	1,4573	0,0058	48,3546	305,3794	6,11E+13	1,38E+17
3	3,1082	0,9961	2,0721	0,0040	2,5141	0,0056	114,2908	720,0675	5,45E+13	3,67E+17
4	5,7820	0,9961	2,0698	0,0040	4,6768	0,0057	317,3892	1999,8600	4,51E+14	1,05E+19
5	6,9311	0,9964	2,0083	0,0041	5,6062	0,0058	388,4636	2454,6451	4,55E+14	1,52E+19
6	7,7425	0,9963	2,0295	0,0041	6,2625	0,0058	470,0218	2967,0851	4,27E+14	1,79E+19
7	8,5607	0,9964	2,0111	0,0041	6,9243	0,0058	539,7441	3410,1123	4,21E+14	2,15E+19

Expansão

Experimento	Z2	Z3	G2	G3	Deff2	Deff3	v3	v	Deff	N	Reynolds	f expansão	ΔP expansão(Pa)
1	0,9960	0,9801	2,1065	2,0921	0,0039	0,0072	0,4108	0,5380	0,0056	10,7358	102,5565	1,22E+06	3,76E+08
2	0,9963	0,9814	2,0200	2,0074	0,0041	0,0075	1,1129	1,4573	0,0058	48,3546	458,9872	1,20E+06	2,72E+09
3	0,9961	0,9806	2,0721	2,0584	0,0040	0,0073	1,9199	2,5141	0,0056	114,2908	1089,2331	1,25E+06	8,43E+09
4	0,9961	0,9806	2,0698	2,0562	0,0040	0,0073	3,5715	4,6768	0,0057	317,3892	3024,3365	1,01E+18	2,36E+22
5	0,9964	0,9816	2,0083	1,9959	0,0041	0,0075	4,2813	5,6062	0,0058	388,4636	3683,6820	8,79E+17	2,94E+22
6	0,9963	0,9813	2,0295	2,0167	0,0041	0,0074	4,7825	6,2625	0,0058	470,0218	4464,9618	8,69E+17	3,63E+22
7	0,9964	0,9816	2,0111	1,9987	0,0041	0,0075	5,2879	6,9243	0,0058	539,7441	5119,4820	8,17E+17	4,18E+22

Região reta da peça

Experimento	Reynolds	f região reta	ΔP região reta(Pa)
1	122,0527	0,0149	54,4892
2	534,8387	0,0041	110,0755
3	1285,9860	0,0019	152,3158
4	3568,6694	0,0075	2072,9425
5	4278,9870	0,0070	2800,9276
6	5215,7459	0,0066	3268,2027
7	5951,4081	0,0063	3820,6269

Região posterior à expansão

Reynolds	f posterior à expansão	ΔP posterior à expansão(Pa)	ΔP total(Pa)
75,7588	0,2385	1429,6253	1,99E+16
345,9038	0,1442	6343,7921	1,38E+17
810,7345	0,1088	14239,9574	3,67E+17
2252,2402	0,0005	222,6341	2,36E+22
2784,3863	0,0004	259,4980	2,94E+22
3357,0063	0,0003	269,2396	3,63E+22
3866,8375	0,0003	286,2850	4,18E+22

8.4 Anexo D – Tabelas Referentes ao Teste da Correlação Proposta por SIMÕES (2005) para o *Tool Joint* ($\Theta_c = 18^\circ / \Theta_e = 35^\circ$)

Dados	D _{cas} (m)	0,0363
	D _{tubo} (m)	0,0213
	D _{TI} (m)	0,028
	L _{ij} (m)	0,06452
	l ₁ (m)	0,0104
	l ₂ (m)	0,0048
	ρ (Kg/m ³)	1065,5
	g(m/s ²)	9,8
	θ_c (°)	18
θ_e (°)	35	

Experimento	M(Kg)	Δt (s)	T(°C)	Q(Kg/s)	Q(m ³ /s)	ΔP_{exp} (mmHg)	ΔP_{exp} (Pa)	k	n
1	0,880	2,80	27,50	0,3202	0,0003	31,51	4200,91	1,1110	0,4624
	0,72	2,21							
	0,805	2,50							
2	1,290	1,58	28,00	0,8228	0,0008	58,35	7779,22	1,1110	0,4652
	1,49	1,8							
	1,400	1,70							
3	2,250	1,43	29,00	1,5686	0,0015	90,32	12041,46	1,1107	0,4642
	2,670	1,72							
	2,735	1,73							
4	2,790	1,21	30,00	2,3614	0,0022	141,48	18862,11	1,1107	0,4642
	2,93	1,23							
	2,970	1,24							
5	3,080	1,01	31,00	2,9777	0,0028	181,40	24184,25	1,1207	0,4601
	3,425	1,15							
	3,500	1,20							
6	3,395	1,01	31,00	3,4079	0,0032	230,40	30716,93	0,9719	0,4802
	3,52	1,02							
	4,740	1,39							
7	3,890	1,02	33,00	3,8152	0,0036	300,50	40062,66	0,9224	0,4885
	4,105	1,06							
	4,290	1,14							
8	3,900	0,95	32,00	4,2017	0,0039	356,10	47475,25	0,9689	0,4824
	4,285	1							
	4,000	0,95							

Região anterior à contração

Experimento	Y	Z	G	Deff1	v1(m/s)	v1/2g	Reynolds	f anterior à contração	ΔP anterior à contração(Pa)
1	0,4122	0,9805	2,0641	0,0073	0,4429	0,0226	86,0260	0,3741	2606,5479
2	0,4118	0,9806	2,0577	0,0073	1,1380	0,0581	360,3652	0,0950	4369,4381
3	0,4120	0,9806	2,0600	0,0073	2,1695	0,1107	977,3936	0,0366	6112,1013
4	0,4120	0,9806	2,0600	0,0073	3,2660	0,1666	1831,8889	0,0209	7908,1013
5	0,4125	0,9804	2,0693	0,0072	4,1183	0,2101	2677,6066	0,0192	11576,3386
6	0,4100	0,9811	2,0250	0,0074	4,7133	0,2405	3233,8174	0,0184	14552,2692
7	0,4090	0,9814	2,0078	0,0075	5,2767	0,2692	3780,7367	0,0178	17628,4113
8	0,4098	0,9812	2,0204	0,0074	5,8113	0,2965	4378,7723	0,0173	20707,8889

Contração

Experimento	v2(m/s)	Z	G	Deff2	v	Deff	N	Reynolds	f contração	ΔP contração(Pa)
1	0,7170	0,9961	2,0779	0,0040	0,5800	0,0056	10,4652	76,4537	9,95E-01	3,57E+02
2	1,8424	0,9961	2,0714	0,0040	1,4902	0,0056	17,0447	320,0402	2,39E+00	5,65E+03
3	3,5123	0,9961	2,0737	0,0040	2,8409	0,0056	24,2582	868,2421	4,39E+00	3,78E+04
4	5,2874	0,9961	2,0737	0,0040	4,2767	0,0056	30,2024	1627,3106	1,04E+07	2,03E+11
5	6,6672	0,9961	2,0832	0,0040	5,3928	0,0056	35,0608	2381,0460	3,75E+07	1,16E+12
6	7,6305	0,9963	2,0380	0,0041	6,1719	0,0057	36,7349	2861,0933	6,73E+07	2,73E+12
7	8,5425	0,9963	2,0204	0,0041	6,9096	0,0058	38,2511	3337,9721	1,10E+08	5,59E+12
8	9,4080	0,9963	2,0333	0,0041	7,6096	0,0058	40,3124	3871,9311	1,80E+08	1,11E+13

Expansão

Experimento	Z2	Z3	G2	G3	Deff2	Deff3	v3	v	Deff	N	Reynolds	f expansão	ΔP expansão(Pa)
1	0,9961	0,9805	2,0779	2,0641	0,0040	0,0073	0,4429	0,5800	0,0056	10,4610	115,7281	1,89E+00	6,78E+02
2	0,9961	0,9806	2,0714	2,0577	0,0040	0,0073	1,1380	1,4902	0,0056	17,0379	484,0799	4,24E+00	1,00E+04
3	0,9961	0,9806	2,0737	2,0600	0,0040	0,0073	2,1695	2,8409	0,0056	24,2485	1313,6220	7,78E+06	6,69E+10
4	0,9961	0,9806	2,0737	2,0600	0,0040	0,0073	3,2660	4,2767	0,0056	30,1903	2462,0680	7,13E+07	1,39E+12
5	0,9961	0,9804	2,0832	2,0693	0,0040	0,0072	4,1183	5,3928	0,0056	35,0467	3606,4295	2,81E+08	8,69E+12
6	0,9963	0,9811	2,0380	2,0250	0,0041	0,0074	4,7133	6,1719	0,0057	36,7201	4310,1079	5,14E+08	2,09E+13
7	0,9963	0,9814	2,0204	2,0078	0,0041	0,0075	5,2767	6,9096	0,0058	38,2357	5017,2640	8,62E+08	4,38E+13
8	0,9963	0,9812	2,0333	2,0204	0,0041	0,0074	5,8113	7,6096	0,0058	40,2962	5829,4305	1,46E+09	9,03E+13

Região reta da peça

Experimento	Reynolds	f região reta	ΔP região reta(Pa)
1	136,8209	0,0135	57,3230
2	571,4269	0,0039	108,6483
3	1551,5054	0,0016	165,0960
4	2907,9230	0,0080	1858,0703
5	4269,1469	0,0070	2593,7532
6	5045,9580	0,0067	3210,1619
7	5847,0534	0,0063	3827,3128
8	6816,4048	0,0060	4406,7781

Região posterior à expansão

Reynolds	f posterior à expansão	ΔP posterior à expansão(Pa)	ΔP total(Pa)
86,0260	0,2287	1,59E+03	5,29E+03
360,3652	0,1423	6,54E+03	2,67E+04
977,3936	0,1022	1,71E+04	6,69E+10
1831,8889	0,0006	2,28E+02	1,59E+12
2677,6066	0,0004	2,50E+02	9,86E+12
3233,8174	0,0003	2,71E+02	2,36E+13
3780,7367	0,0003	2,91E+02	4,94E+13
4378,7723	0,0003	3,06E+02	1,01E+14

8.5 Anexo E – Resultados da Determinação dos Coeficientes de Descarga

8.5.1 Resultados para o fluido BRCARB

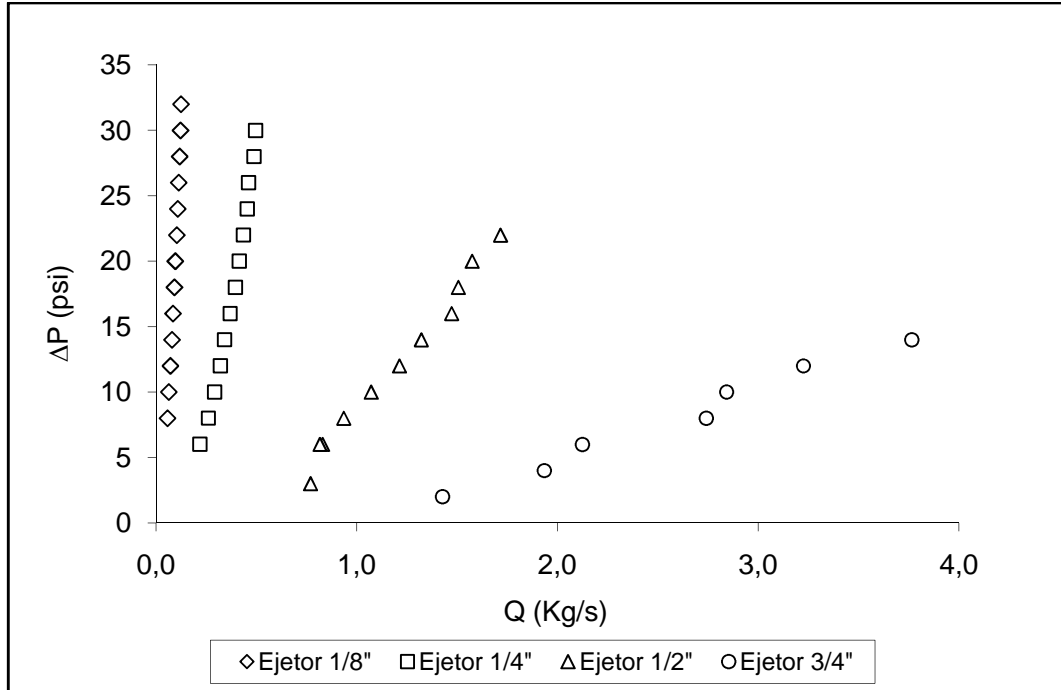


Figura 8.26 – Vazão versus perda de carga para os ejetores, no escoamento do fluido BRCARB.

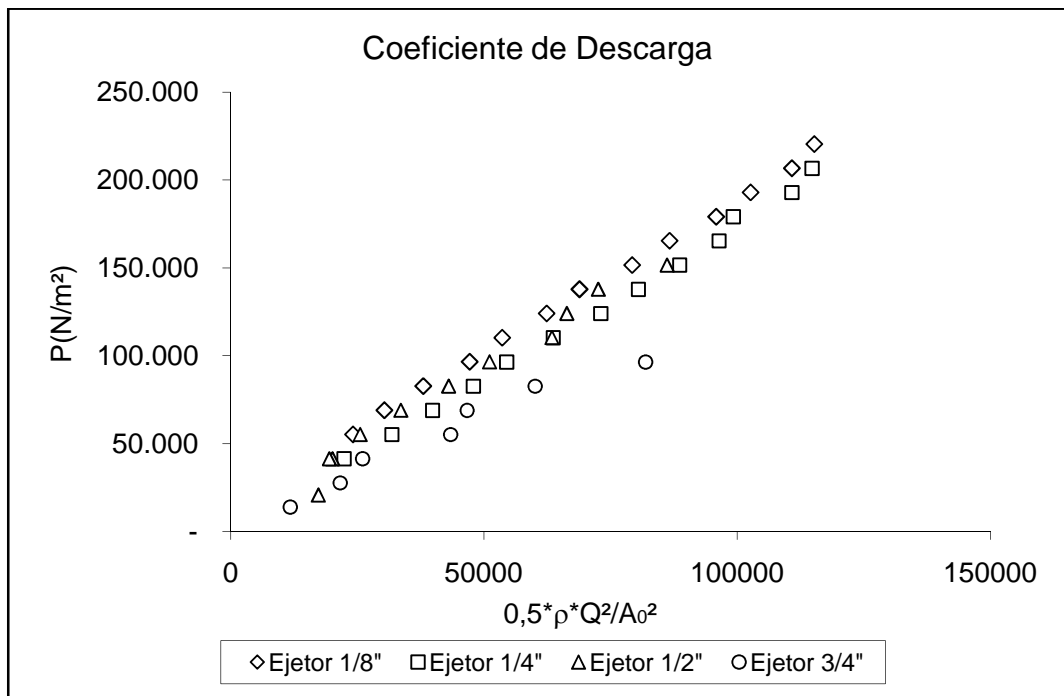


Figura 8.27 – Avaliação do coeficiente de descarga dos ejetores, no escoamento do fluido BRCARB.

8.5.2 Resultados para o fluido BRMUL

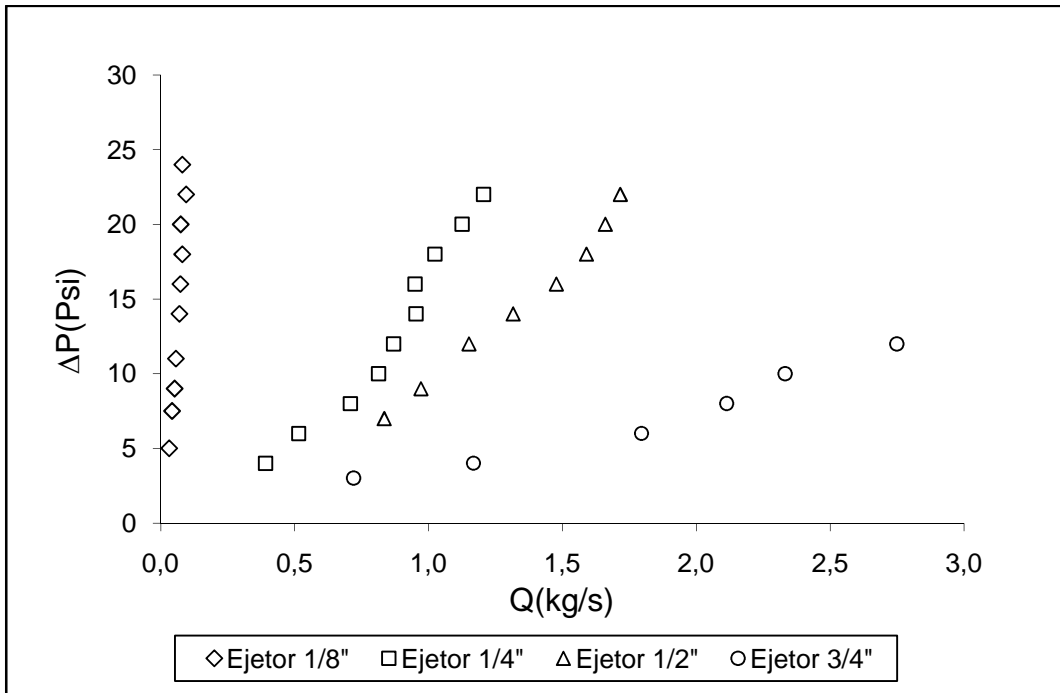


Figura 8.28 – Vazão versus perda de carga para os ejetores, no escoamento do fluido BRMUL.

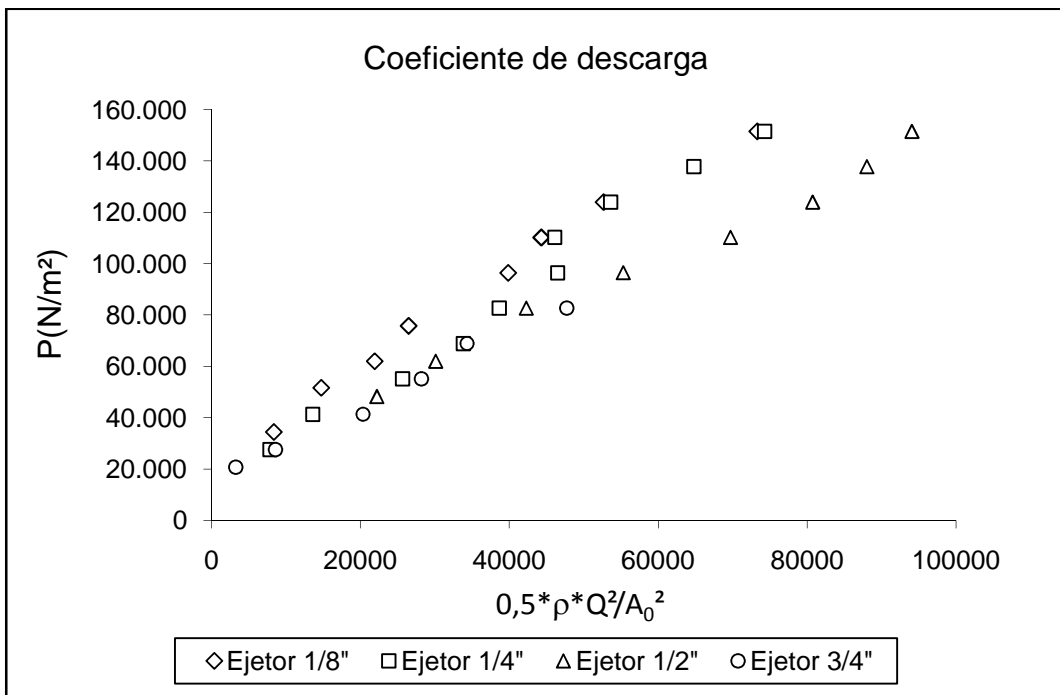


Figura 8.29 – Avaliação do coeficiente de descarga dos ejetores, no escoamento do fluido BRMUL.

8.5.3 Resultados para o fluido BRSCOL

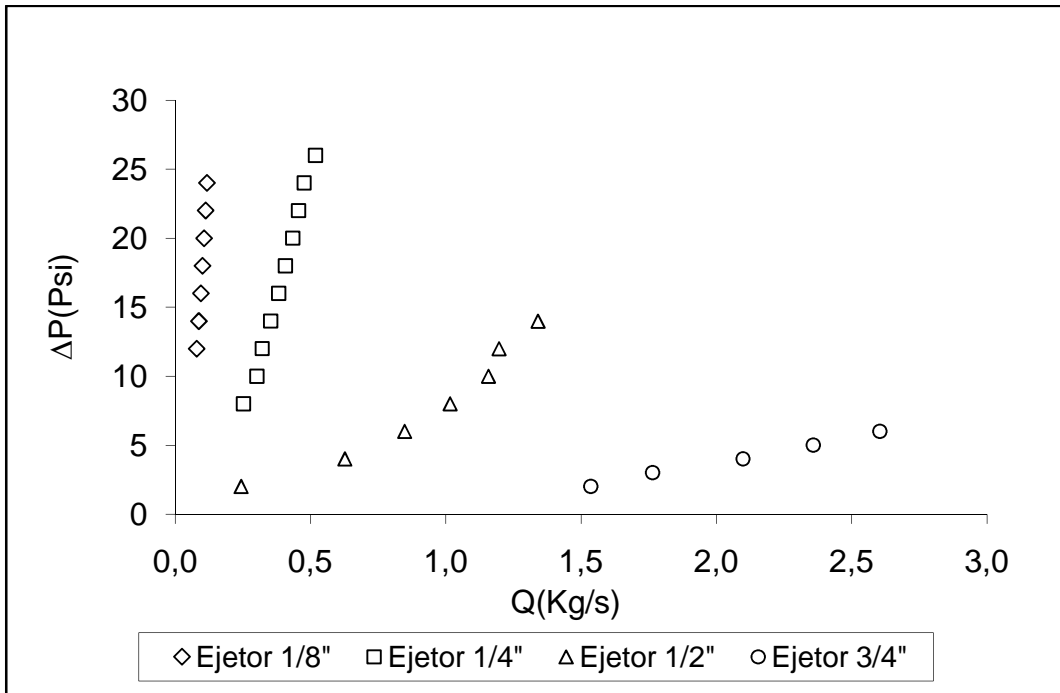


Figura 8.30 – Vazão versus perda de carga para os ejetores, no escoamento do fluido BRSCOL.

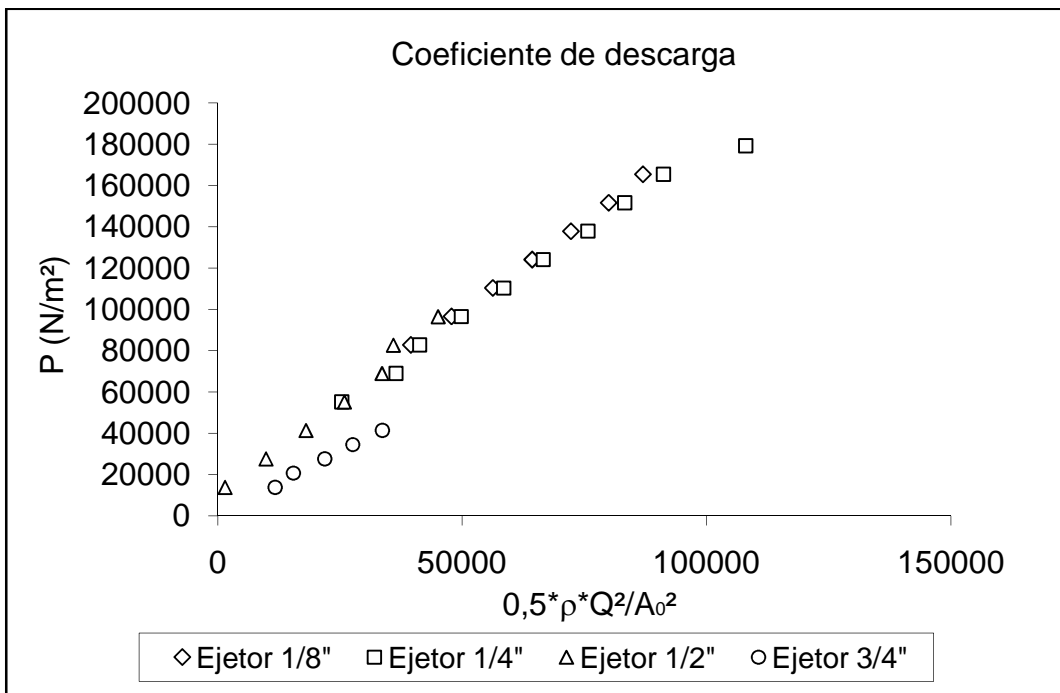


Figura 8.31 – Avaliação do coeficiente de descarga dos ejetores, no escoamento do fluido BRSCOL.