

AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÕES DE DIÂMETRO HIDRÁULICO EM DUTOS ANULARES

Eduardo da Cunha Hora Paraíso¹¹

Cláudia Miriam Scheid^l

Luís Américo Calçada^l

Deividson Silveira dos Santos²

Caroline Eulino Gonçalves Pereira³

Edilson Adrião Cabral^B

Resumo: Nos projetos hidráulicos de poços de petróleo, os fluidos de perfuração e completção circulam em regiões anulares. Dentre os fatores que influenciam o cálculo da perda de carga, nestas regiões, o diâmetro hidráulico é determinante. O objetivo deste trabalho foi avaliar as correlações de diâmetro hidráulico utilizando fluidos Newtonianos. Quatro correlações de diâmetro hidráulico foram analisadas e uma metodologia experimental é apresentada para o cálculo do diâmetro hidráulico experimental. Além da análise com fluidos Newtonianos, um estudo de caso é realizado com resultados do escoamento de pasta de cimento, um fluido não-Newtoniano utilizado na cimentação de poços de petróleo. Neste caso a correlação de diâmetro hidráulico desenvolvida é avaliada frente às demais. A correlação experimental apresentou bons resultados no estudo de caso com a pasta de cimento, com erros percentuais absolutos médios entre 9,6 e 16,6%, mostrando-se mais estável, sem extremos elevados como ocorre com as demais.

Palavras-chave: perda de carga, escoamento anular, diâmetro hidráulico.

Abstract: During the hydraulic projects of oil wells, the drilling and completion fluids flow in annular regions. Among the factors that influence the pressure loss, in these regions, the hydraulic diameter is decisive. The goal of this research was to evaluate hydraulic diameter correlations using Newtonian fluids. Four hydraulic diameter correlations were analyzed and an experimental methodology is presented to calculate the hydraulic diameter. Besides using Newtonian fluids to analyze the correlations, results of cement slurry flow were employed as a case study. Being the latter, a non-Newtonian fluid used in the process of oil well cementing. In this case, the hydraulic diameter correlation developed is evaluated against the others. The experimental correlation yielded good results in relation to the cement slurry, presenting average errors ranging from 9.6 to 16.6%, showing more stability unlike the other correlations.

Keywords: pressure loss, annular flow, hydraulic diameter.

¹¹Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

²Discente da Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

³Discente do curso de Engenharia Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Endereço: BR 465, Km 7 - 23.890-000 – Seropédica/RJ e-mail: eduardocunha@ufrj.br

1. INTRODUÇÃO

O estudo do escoamento de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos em dutos é de grande interesse da engenharia. Na indústria petrolífera, destacam-se os processos de perfuração e cimentação de poços. Nestes processos, ocorre a circulação de fluidos em regiões tubulares, interior da coluna, e anulares, entre a formação rochosa e o exterior do revestimento, Lake e Mitchel (2006).

Em regiões anulares, para utilização das equações tradicionais de escoamento de fluidos, Newtonianos e não-Newtonianos, é necessária a determinação de um parâmetro ou fator geométrico capaz de representar a região anular como um duto circular.

Diversos autores têm desenvolvido correlações, empíricas ou experimentais, para os chamados diâmetros hidráulicos ou equivalentes. O diâmetro hidráulico é usado em cálculos de projeto hidráulico da perfuração e completação de poços (Bourgoyne *et al.*, 1991).

O objetivo deste trabalho foi de avaliar quatro correlações de diâmetro hidráulico utilizando-se dados de queda de pressão e vazão no escoamento de água e glicerina (98%*m/v*), a 25°C, em regiões anulares.

Além disto, dados de queda de pressão do escoamento de água em regiões anulares são também utilizados no desenvolvimento de uma metodologia para determinação de um diâmetro hidráulico experimental. A partir da metodologia apresentada, uma correlação experimental é desenvolvida.

Esta correlação, bem como as demais analisadas, é utilizada em um estudo de caso na análise do escoamento de pasta de cimento, fluido não-Newtoniano, utilizado no processo de cimentação de poços de petróleo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. BALANÇO DE ENERGIA MECÂNICA NO ESCOAMENTO DE FLUIDOS

Fox *et al.* (2004) apresentam a equação de Bernoulli modificada que representa o balanço de energia mecânica no escoamento isotérmico e estacionário de um fluido incompressível entre dois pontos quaisquer, neste caso 1 e 2, onde não há

acidentes e sem o fornecimento de energia.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h \quad (1)$$

Onde hd pode ser calculado pela equação de Darcy-Weisbach;

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

O fator de atrito experimental de Fanning ($f_{exp} = 4 f_d$) é oriundo da substituição da Equação 2 em 1, feitas as considerações citadas.

$$f_{exp} = \frac{\Delta P_H}{2\rho L \langle v \rangle^2} \quad (3)$$

Sendo ΔP a queda de pressão (Pa), D_H o diâmetro hidráulico (m), ρ a densidade do fluido (Kg/m³), L a distância entre as tomadas de pressão (m) e $\langle v \rangle$ a velocidade média de escoamento (m/s).

Para fluidos Newtonianos, o fator de atrito laminar de Fanning é mostrado em Bird *et al.* (2002):

$$f = \frac{6}{R} \quad (4)$$

Onde;

$$R = \frac{D \langle v \rangle \rho}{\mu} \quad (5)$$

2.2. CORRELAÇÕES DE DIÂMETRO HIDRÁULICO DE REGIÕES ANULARES

Quatro equações de diâmetro hidráulico foram avaliadas neste trabalho. Ambas funções do diâmetro externo do tubo interno (D_1), e do diâmetro interno do tubo externo (D_2) do anular.

A primeira das correlações (DH_1), foi desenvolvida analiticamente, considerando a região anular, formada por dois cilindros concêntricos, como uma fissura formada por duas placas planas. Esta teoria é conhecida como Slot. Essas considerações são válidas quando a relação entre o diâmetro interno e externo é maior que 0,3 (Bourgoyne *et al.*, 1991). Em experimentos de perda de carga realizados com pastas de cimento e fluidos

de perfuração, Silva *et al.* (1989) relatam a eficiência desta correlação frente as demais avaliadas.

$$H_1 = 0,816(D_2 - D_1) \quad (6)$$

A segunda equação (DH_2) foi desenvolvida analiticamente a partir da teoria do raio hidráulico (Bourgoyne *et al.*, 1991). A relação entre a área da seção transversal e do perímetro molhado da região anular determina o diâmetro hidráulico, que é equivalente a quatro vezes o valor do raio hidráulico. Segundo Bourgoyne *et al.* (1991) esta correlação é a mais utilizada na indústria petrolífera.

$$H_2 = 4R_H = (D_2 - D_1) \quad (7)$$

A terceira equação (DH_3) foi desenvolvida por Lamb (1945). Esta equação foi desenvolvida a partir do critério de obtenção da geometria equivalente decorrente do princípio da medida de perda de carga no regime laminar de fluidos Newtonianos escoando em geometrias tubulares e anulares.

$$H_3 = \sqrt{D_2^2 + D_1^2 - \frac{D_2^2 - D_1^2}{h(D_2/D_1)}} \quad (8)$$

Crittendon (1959) obteve a Equação 9, a partir de um trabalho empírico, através de experimentos com fluidos de fraturamento. Para fins acadêmicos neste trabalho chamaremos de DH_4 .

$$H_4 = \frac{\sqrt[4]{D_2^4 - D_1^4 - \frac{(D_2^2 - D_1^2)^2}{h(D_2/D_1)}} + \sqrt{D_2^2 - D_1^2}}{2} \quad (9)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A unidade experimental utilizada para avaliação das correlações de diâmetro hidráulico (Figuras 1 e 2) consiste de um sistema que opera em circuito fechado composto de tubos de ferro galvanizado, uma bomba de deslocamento positivo do tipo helicoidal de 1/25HP com vazões de até 20m³/h e pressões de recalque da ordem de 12kgf/cm².

Transdutores de pressão diferencial fornecem a queda de pressão em cada arranjo estudado. Um medidor de vazão mássica tipo coriolis fornece as vazões, temperaturas e densidades do fluido

durante o escoamento. O tanque de mistura é dotado de agitação e aquecimento, podendo ainda ser refrigerado por um *chiller*, com potência de refrigeração de 15.000kcal/h.

Os trechos de análise são formados por dutos anulares concêntricos com diâmetros externos e internos com respectivamente: Anular I (2" e 1 1/2"), Anular II (1 1/2" e 1"), Anular III (1 1/4" e 3/4"), Anular IV (1 1/2" e 3/4"), Anular V (2" e 1 1/4"), Anular VI (3" e 1 1/4"). Os trechos anulares possuem 3m de comprimento e as tomadas de pressão são posicionadas a 1,5m da entrada e a 1m da saída de maneira a garantir a estabilização do fluxo. Estes anulares foram construídos mantendo-se uma similaridade geométrica com poços de petróleo usuais, através da razão de diâmetro (D_2/D_1).

Figura 1. Esquema representativo da unidade.

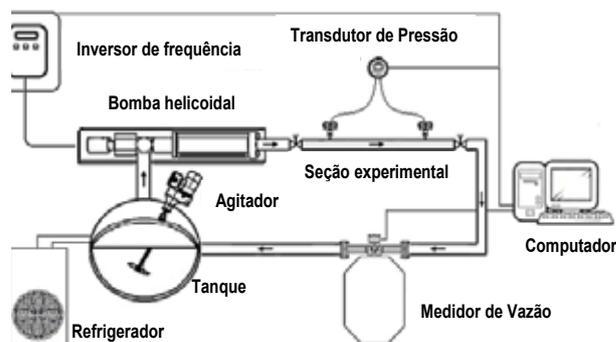
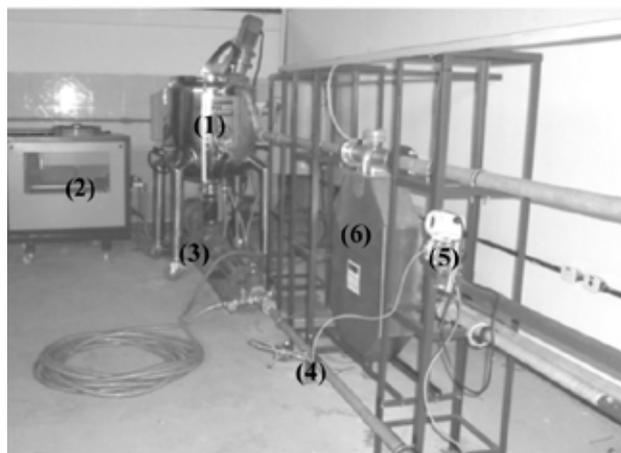


Figura 2. Foto da unidade experimental (1-Tanque; 2- Refrigerador; 3- Bomba helicoidal; 4- Trecho experimental; 5- Transdutor de pressão; 6- Medidor de vazão).



Para avaliação das correlações de diâmetro hidráulico foram utilizados dados de queda de pressão e vazão, no regime laminar, de água nos anulares I a V, e uma solução de glicerina (98%

m/v) nos anulares IV e VI. Em ambos os fluidos a temperatura do teste foi de 25(+/-2)°C,

Os dados de perda de carga e vazão de água, no regime laminar a 25°C, nos anulares I a V são utilizados para desenvolvimento da metodologia de cálculo do diâmetro hidráulico experimental.

Um estudo de caso é realizado com resultados de queda de pressão e vazão do escoamento de pasta de cimento, a fim de avaliar a correlação experimental desenvolvida frente às demais.

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

Características dos fluidos e dos dutos estudados estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos fluidos e dutos.

	Água	Glicerina 98%(m/v)
Composição	Água doce	Água doce Glicerina
Massa específica	1000 Kg/m ³	974 - 1150 Kg/m ³
Viscosidade	0,925 cP	39,2 - 38,3cP
Temperatura	25(+/- 2)°C	25(+/- 2)°C
Dutos anulares	I (2" - 1 1/2"); II (1 1/2" - 1"); III (1 1/4" - 3/4"); IV (1 1/2" - 3/4"); V (2" - 1 1/4").	IV (1 1/2" - 3/4"); V (3" - 1 1/4").

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES DE DIÂMETRO HIDRÁULICO

Nesta avaliação, a perda de carga teórica é obtida com a substituição do fator de atrito experimental (Equação 3), na equação do fator de atrito laminar (Equação 4). Na equação resultante é então inserida a correlação de diâmetro hidráulico, que se deseja avaliar, e desta forma é possível o cálculo da perda de carga teórica do trecho, no regime laminar.

Para exemplificar a avaliação realizada, são apresentadas as Figuras 3a e 3b, que são gráficos comparativos da perda de carga experimental, obtida no escoamento de água, a 25°C, e de Glicerina

na (98% m/v), ambos no duto Anular IV (1 1/2" e 3/4"). Nestas figuras, os valores da queda de pressão foram comparados através do erro percentual absoluto, Equação 10.

$$Erro(\%) = \frac{|\Delta P_{exp} - \Delta P_{calc}|}{\Delta P_{exp}} 100 \quad (10)$$

Os erros percentuais médios dos demais experimentos, bem como os apresentados nas Figuras 3a e 3b, são sintetizados na Tabela 2. Nesta tabela os erros percentuais menores que 20% são destacados.

Analisando a Figuras 3 e a Tabela 2 é possível perceber que nos experimentos realizados com água há uma alternância na eficácia das correlações DH₁ e DH₃, com a correlação DH₂.

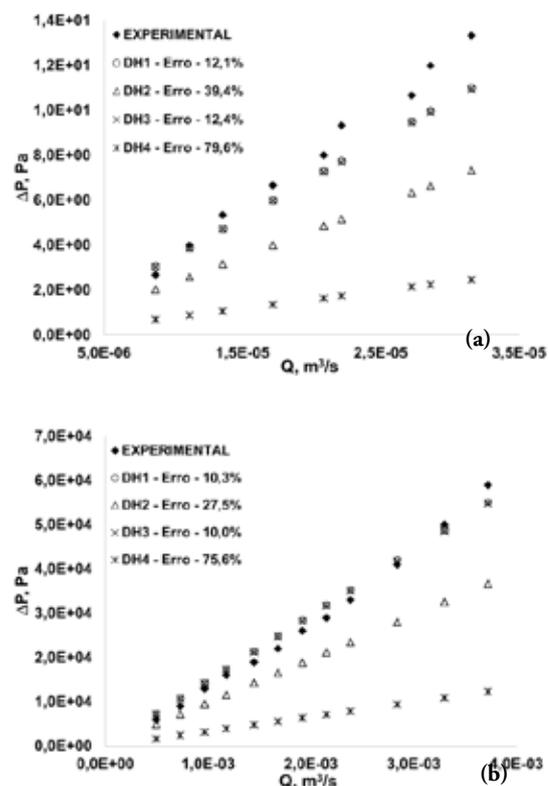


Figura 3. Avaliação das equações de diâmetro hidráulico no duto Anular IV (1 1/2" e 3/4"), no escoamento: (a) água; (b) Glicerina 98% m/v.

Comparando os resultados dos testes com água e glicerina no anular IV, nota-se que a mudança do fluido não gerou alteração na ordem de eficiência das correlações, levando a crer que esta alternância deva estar relacionada com a área de

escoamento e com a razão de diâmetro de cada anular.

Tabela 2. Erros percentuais absolutos médios das correlações de diâmetro hidráulico.

Anular	Erro percentual absoluto médio Água, 25°C				Erro percentual absoluto médio Glicerina (98% <i>m/v</i>), 25°C			
	DH ₁	DH ₂	DH ₃	DH ₄	DH ₁	DH ₂	DH ₃	DH ₄
Anular I (2" - 1 1/2")	36,7	12,6	36,5	90,3	-	-	-	-
Anular II (1 1/2" - 1")	9,8	26,9	9,6	86,1	-	-	-	-
Anular III (1 1/4" - 3/4")	59,1	10,7	58,7	73,9	-	-	-	-
Anular IV (1 1/2" - 3/4")	12,1	39,4	12,4	79,6	10,3	27,5	10,0	75,6
Anular V (2" - 1 1/4")	17,4	21,8	17,1	83,7	-	-	-	-
Anular VI (3" - 1 1/2")	-	-	-	-	5,6	35,0	6,0	71,1

Em todos os testes realizados, a correlação DH₄ apresentou resultado insatisfatório frente às demais.

4.2. METODOLOGIA PARA CÁLCULO DO DIÂMETRO HIDRÁULICO EXPERIMENTAL (DH_{EXP})

Com o intuito de melhorar a previsão da perda de carga nas regiões anulares e visando reduzir o erro percentual médio das correlações de diâmetro hidráulico, foi utilizada uma metodologia para o cálculo de um diâmetro hidráulico experimental (DH_{exp}).

O fator de atrito experimental (Equação 3) foi aproximado ao fator de atrito de Fanning para escoamento La-minar (Equação 4).

$$f_{exp} \cong f_{u\ min\ a} \quad (11)$$

Simplificando:

$$Q = \frac{H_{exp}^2}{\left(\frac{3 \cdot \mu \cdot L}{A}\right)} \Delta P \quad (12)$$

A partir da Equação 12, com dados experimentais da queda de pressão e vazão em dutos anulares, no regime laminar de fluidos Newtonianos, é possível calcular o diâmetro hidráulico experimental (DH_{exp}) para cada geometria anular avaliada.

Dados experimentais de queda de pressão e vazão, do escoamento de água a 25°C no regime laminar, foram selecionados e relacionados graficamente. Para exemplificar a análise realizada é apresentada a Figura 4, onde são utilizados os dados de queda de pressão do anular I.

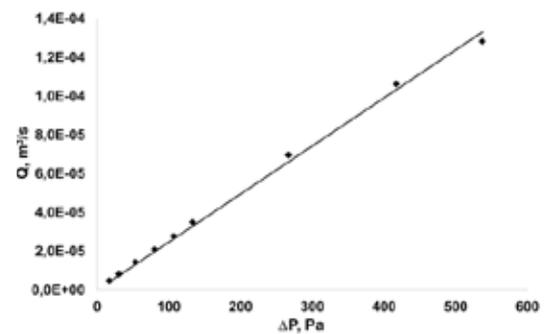


Figura 4. Relação entre vazão e queda de pressão no Anular I (2" - 1 1/2"), escoamento laminar.

Os resultados apresentados na Figura 4 demonstram uma boa linearidade dos pontos experimentais. A mesma análise gráfica foi realizada nos demais anulares. Os coeficientes angulares obtidos foram comparados com a Equação 12, a fim de calcular o DH_{exp} em cada anular pesquisado. Estes resultados são apresentados na Tabela 3, onde são comparados com as demais correlações.

Os valores em destaque na Tabela 3 correspondem aos DH_{exp} obtidos em cada anular. De posse destes, foi possível construir a Figura 5 de onde se calcula, através da linha de tendência, a equação que melhor ajusta os pontos experimentais de DH_{exp}, que será então a correlação do diâmetro hidráulico experimental desenvolvida neste trabalho.

Tabela 3. Resultado do DH_{exp} para cada anular e transdutor de pressão.

Anular	DH _{exp} , m	DH ₁ , m	DH ₂ , m	DH ₃ , m	DH ₄ , m
Anular I (2" - 1 1/2")	0,0054	0,0046	0,0056	0,0046	0,0172
Anular II (1 1/2" - 1")	0,0070	0,0068	0,0084	0,0068	0,0192
Anular III (1 1/4" - 3/4")	0,0092	0,0078	0,0096	0,0078	0,0193
Anular IV (1 1/2" - 3/4")	0,0115	0,0124	0,0152	0,0124	0,0262
Anular V (2" - 1 1/4")	0,0100	0,0096	0,0118	0,0096	0,0258

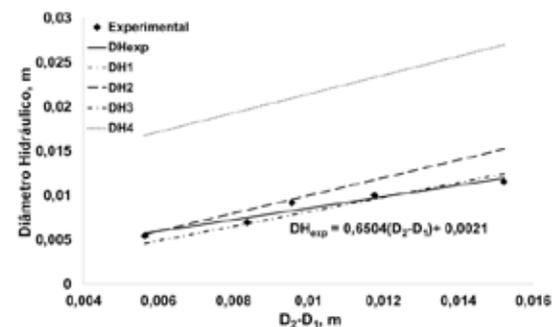


Figura 5. Ajuste e comparação da correlação de diâmetro hidráulico.

Através da análise da Figura 5, foi possível verificar que a correlação obtida (Equação 13) é capaz de representar bem as regiões anulares estudadas.

$$H_{exp} = 0,6504(D_2 - D_1) + 0,0021 \quad (13)$$

A metodologia utilizada para desenvolvimento do diâmetro hidráulico experimental mostrou-se satisfatória pela proximidade com as correlações DH_1 e DH_3 , que apresentaram os melhores resultados nos experimentos com a glicerina e ainda pela proximidade com a correlação DH_2 que é uma das mais usuais na área de escoamento de fluidos. A correlação DH_4 apresentou resultados insatisfatórios.

O distanciamento que as correlações apresentam para elevados valores de diferença de diâmetro ($D_2 - D_1$), pode representar uma diferença substancial na previsão da perda de carga em poços de petróleo, já que nestes as diferenças de diâmetro são elevadas. As correlações DH_3 e DH_1 são equivalentes e os resultados estão sobrepostos na Figura 5.

Com o intuito de estudar a eficácia da correlação experimental foi necessária sua utilização na previsão da perda de carga de fluidos diferentes de água e glicerina. Para isto, é apresentado a seguir, um estudo de caso com escoamento de pasta de cimento.

4.3. ESTUDO DE CASO DA AVALIAÇÃO DO DIÂMETRO HIDRÁULICO COM PASTA DE CIMENTO

A relevância deste estudo de caso está na necessidade de previsão da perda de carga nos processos de cimentação de poços de petróleo. Neste processo, além de escoar em regiões circulares, a pasta de cimento é injetada em regiões anulares, formada pela formação rochosa perfurada e a parede externa do duto de revestimento.

Com o intuito de avaliar correlações de diâmetro hidráulico para o processo de cimentação de poços de petróleo, foram utilizados dados de queda de pressão e vazão de pasta de cimento em regiões anulares.

A pasta de cimento analisada foi formulada pelo CENPES/PETROBRAS e possui características de fluido não-Newtoniano independente do tempo. A pasta de cimento foi produzida no tanque de mistura da unidade experimental sendo

composta por cimento classe G, água doce e aditivos (retardador de pega e anti-espumante).

Para este tipo de fluido, a viscosidade varia com a taxa de deformação. Cada modelo reológico possui uma equação desenvolvida para o fator de atrito no regime laminar.

A Equação 14 apresenta o fator de atrito laminar, desenvolvido para o modelo reológico de Herschell-Buckley. Esta equação foi utilizada na análise da pasta de cimento estudada por apresentar bons resultados com este tipo de fluido (Silva *et al.*, 1989; Paraíso, 2011)

$$f = \frac{2H_H}{R_H^2} + \frac{\phi}{R_H} [A]^{-n_H} \quad (14)$$

Onde;

$$[A] = \left[\left(1 - \frac{E_H}{\tau_w} \right)^3 + \frac{2(3n_H + 1)}{(2n_H + 1)} \left(\frac{E_H}{\tau_w} \right) \left(1 - \frac{E_H}{\tau_w} \right)^2 + \frac{(3n_H + 1)}{(n_H + 1)} \left(\frac{E_H}{\tau_w} \right)^2 \left(1 - \frac{E_H}{\tau_w} \right) \right] \quad (15)$$

$$R_H = \frac{8D_H^{n_H} \langle v \rangle^{2-n_H} \rho}{k_H [2(3n_H + 1)/n_H]^{n_H}} \quad (16)$$

$$H_H = R_H^2 \frac{E_H}{\rho \langle v \rangle^2} \quad (17)$$

$$\frac{E_H}{\tau_w} = 2 \frac{H_H}{f R_H^2} \quad (18)$$

Neste caso, a perda de carga teórica é obtida com a substituição do fator de atrito experimental (Equação 3), na equação do fator de atrito laminar desenvolvido para o modelo reológico de Herschell-Buckley (Equação 14). Na equação desenvolvida é inserida a correlação de diâmetro hidráulico, que se deseja avaliar, e então é possível o cálculo da perda de carga teórica do trecho, no regime laminar.

Para ilustrar os resultados obtidos é apresentada a Figura 6, onde são comparadas as perdas de carga experimental e calculadas, obtidas no escoamento da pasta de cimento no Anular III (1 1/4" e 3/4"), a 25°C. Nesta figura, os valores de queda de pressão experimentais e teóricas são comparadas através do erro percentual, Equação 9. Os erros percentuais absolutos médios das correlações de diâmetro hidráulico nos Anulares I, II e III, a 25°C, foram condensados na Tabela 4.

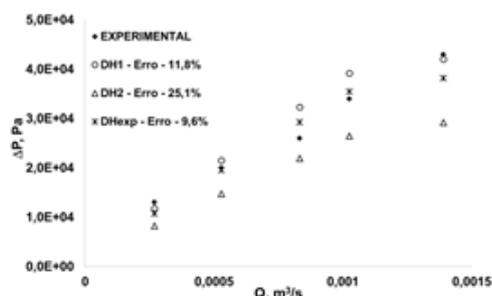


Figura 6. Avaliação das equações de diâmetro hidráulico para pasta de cimento no anular III (1 1/4" e 3/4") a 25°C.

Tabela 4. Erros percentuais médios das correlações de diâmetro hidráulico.

Anular	Erro percentual absoluto médio		
	DH ₁	DH ₂	DH _{exp}
Anular I (2" - 1 1/2")	59,1	15,5	16,6
Anular II (1 1/2" - 1")	11,9	27,1	9,8
Anular III (1 1/4" - 3/4")	11,8	25,1	9,6

A análise da Figura 6 e da Tabela 4 mostra que as correlações DH₁ e DH₂ apresentam bons resultados em casos separados, no entanto, é possível perceber que a mudança na geometria causa uma alternância na eficácia destas correlações.

A correlação DH_{exp}, no entanto, mostra-se mais estável, sem valores de erros percentuais extremos, como ocorre com as demais com a substituição da geometria.

5. CONCLUSÃO

Na avaliação do diâmetro hidráulico, com solução de glicerina a 98% m/v, as correlações DH₁ e DH₃ apresentam resultados matematicamente equivalentes. Estas apresentam ainda os menores erros percentuais médios, con-forme mostrado na Tabela 2.

Nos experimentos realizados com água há uma alternância na eficácia das correlações DH₁ e DH₃, com a correlação DH₂. Esta alternância possivelmente esta relacionada com a área de escoamento e com a razão de diâmetro de cada anular.

Nos testes realizados com água e glicerina a correlação DH₄ apresentou resultados insatisfatórios frente às demais, possivelmente por ter sido originalmente utilizada com fluidos de fraturamento.

O estudo de caso apresentado com dados do escoamento de pasta de cimento mostrou que a correlação de diâmetro hidráulico desenvolvida, apresenta resultados satisfatórios e estáveis frente à

mudança de geometria, já que esta apresentou, na maioria dos casos os menores erros percentuais, como pode ser visto na Tabela 4.

Para que a correlação experimental desenvolvida venha ter uma maior validade e aceitação acadêmica, se faz necessário novos testes com diferentes fluidos e outros dutos anulares de diferentes diâmetros hidráulicos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio técnico e financeiro.

7. NOMENCLATURA

A	área de escoamento (m ²)
D	diâmetro (m)
D ₁	diâmetro externo do tubo interno do anular (m)
D ₂	diâmetro interno do tubo externo do anular (m)
DH	diâmetro hidráulico (m)
f	fator de atrito de fanning (adimensional)
f _d	fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional)
f _{exp}	fator de atrito experimental de fanning (adimensional)
f _{laminar}	fator de atrito laminar de fanning (adimensional)
g	aceleração da gravidade (m/s ²)
hd	perda de carga distribuida (m)
He _{HB}	número de Hedstron – modelo de Herschel-Buckley (adimensional)

k_{HB}	índice de consistência para o modelo de Herschel-Buckley (Pa.s ⁿ)
L	comprimento da seção reta (m)
LE_{HB}	limite de escoamento para fluidos (Pa)
n_{HB}	índice de comportamento do modelo de Herschel-Buckley
P	pressão (Pa)
Q	vazão de escoamento (m ³ / s)
R_H	raio hidráulico (m)
Re_{HB}	número de Reynolds - modelo de Herschel-Buckley (adimensional)
$\langle v \rangle$	velocidade média (m / s)
v	velocidade (m / s)
z	altura (m)

Letras e símbolos gregos

DP	queda de pressão (Pa)
DP_{exp}	queda de pressão experimental (Pa)
DP_{calc}	queda pressão calculada para correlação (Pa)
ρ	densidade (kg.m ⁻³)
μ	viscosidade dinâmica (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
t_w	parâmetro da equação 14 e 17 (Pa)

8. REFERÊNCIAS

Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. *Transport Phenomena*. Second edition, John Wiley & Sons Inc., 2002.

Bourgoyne Jr, A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E., Young Jr, F.S. *Applied drilling engineering*. Second printing, Society of petroleum engineers, Richardson, Texas, 1991.

Crittendon, B. C. The mechanics of design and interpretation of hydraulic fracture treatments. *Journal of Petroleum Technology*, October, pp. 21-9, 1959.

Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. *Introduction to Fluid Mechanics*, Six Edition, John Wiley & Sons Inc., 2004.

Lake L. W., Mitchel R.F. *Petroleum Engineering Handbook*, v. 2, chapter 3, Society of Petroleum Engineers, 2006.

Lamb, H. S. *Hydrodynamics*, New York, Dover Publications, pp. 586-187, 1945.

Paraiso, E. C. H. *Estudo do escoamento de pastas de cimento em dutos circulares e anulares concêntricos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2011.

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