



X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica

"Influência da pesquisa em Engenharia Química no desenvolvimento tecnológico e industrial brasileiro"

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Universidade Severino Sombra

Vassouras – RJ – Brasil

AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA E DA VARIAÇÃO DA DENSIDADE EM PASTA DE CIMENTO DE ALTA COMPACIDADE.

PEREIRA^{*1}, C. E. G.; CABRAL¹, E. A.; SANTOS², D. S.; PARAISO³, E. C. H.; SCHEID⁴, C. M. e CALÇADA⁴, L. A.

¹Aluno do DEQ/UFRRJ ²Mestrando do DEQ/UFRRJ ³Pesquisador do LEF/DEQ/UFRRJ
⁴Professor do DEQ/UFRRJ

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Endereço – UFRRJ, BR 465, km 07, Seropédica, CEP. 23.890-000, RJ,
 email: scheid@ufrrj.br

RESUMO - A perfuração de poços exploratórios de petróleo ocorre em diversos cenários e em diferentes formações rochosas. Durante o processo de perfuração, a etapa de cimentação é essencial, pois proporciona estabilidade ao poço, cria uma zona de isolamento, garantindo sua integridade. Na cimentação de poços com formações rochosas frágeis, utiliza-se pasta de cimento com baixa densidade. Neste trabalho, analisamos uma pasta de alta compacidade e densidade reduzida por meio da adição de microesferas cerâmicas oca. Foram realizados experimentos para avaliar a quebra dessas microesferas através do acompanhamento da densidade da pasta, em diferentes taxas de cisalhamento. Além disso, avaliamos correlações que viabilizam a previsão da perda de carga durante o escoamento da pasta em uma unidade experimental. A importância de ambos os testes se deve à necessidade do controle da pressão durante o bombeio da pasta no poço. Para a previsão da perda de carga foram avaliadas correlações de fator de atrito e modelos reológicos. Os resultados dos testes mostraram uma variação significativa na densidade, proveniente da quebra das microesferas, havendo uma relação desta com a energia de mistura. No escoamento da pasta na unidade, chegou-se a um conjunto de correlações que adequadamente previram a perda de carga.

Palavras chave: cimentação, microesfera oca de cerâmica, energia de mistura.

INTRODUÇÃO

Com o intuito de atender a demanda por hidrocarbonetos, novos poços de petróleo em diferentes cenários vêm sendo estudados e explorados. Para que essa exploração se torne viável e alcance seu total potencial de produção, a etapa de cimentação, que é uma

operação crítica e fundamental para uma longa vida do poço, deve ser feita adequadamente. As principais metas da cimentação são: propiciar a integridade do poço através da zona de isolamento evitando, assim, a migração de fluidos no anular; manter a estabilidade mecânica do poço; suportar os tubos de revestimento, dando sustentação a

*Bolsista UFRRJ.

coluna e protegê-lo da corrosão por fluidos (Miranda, 2008).

A escolha da pasta a ser utilizada na cimentação depende das características do poço. Fatores limitantes na determinação da massa específica e de outras propriedades físico-químicas das pastas de cimento a serem utilizadas são as pressões de fratura e de poros do poço.

A pressão hidrostática na formação deve ser menor que a pressão de fratura, para evitar a entrada da pasta para o interior da formação; e em geral, maior que a pressão de poros para impedir a invasão de fluidos da formação para o poço. Em condições onde a zona de formação é fraca, esgotada ou inconsolidada, possuindo baixa pressão de fratura, ou em situações onde se é utilizado uma extensa coluna de cimento faz-se necessário o uso de uma pasta leve, de baixa massa específica (Miranda, 2008).

Neste trabalho foi utilizada uma formulação para pasta de cimento leve, contendo microesfera cerâmica oca. As principais motivações foram avaliar as mudanças de densidade e reologia da pasta oriundas da quebra dessas microesferas durante a mistura da pasta. O intuito dessa avaliação é fomentar as possíveis diferenças obtidas no preparo da pasta no laboratório e no campo atentando a possíveis mudanças na determinação da pressão de bombeio.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Modelos Reológicos

A escolha dos modelos avaliados se baseia na referência de Nelson (1990) que afirma que os modelos de Bingham (Equação 1) e potência (Equação 2) são os mais usuais na cimentação. Além desses, avaliamos o modelo de Herschel-Buckley (Equação 3), que possui características dos dois modelos anteriores.

$$\tau = VP_B \gamma + LE_B \quad (1)$$

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

$$\tau = k_{HB} \gamma^{n_{HB}} + LE_{HB} \quad (3)$$

Determinação do Fator de Atrito

O fator de atrito experimental de Fanning (Equação 4) é obtido por meio da equação de perda de carga distribuída na equação modificada de Bernoulli, considerando um trecho reto e sem acidentes.

$$f = \frac{\Delta PD}{2\rho L \langle v \rangle^2} \quad (4)$$

Nos fluidos não newtonianos, a viscosidade varia com a taxa de deformação. Com isso, no regime laminar, cada modelo reológico possui uma equação desenvolvida para o fator de atrito, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Correlações utilizadas na avaliação do fator de atrito no regime laminar.

Modelos	Equações
Potência	$f = \frac{16}{Re_p} \quad (5)$
Bingham	$Re_p = \frac{Dv\rho}{k \left(\frac{8v}{D} \right)^{n-1} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n} \quad (6)$
	$f = \frac{16}{Re_B} \left[1 + \frac{He_B}{6Re_B} - \frac{He_B^4}{3f^3 Re_B^7} \right] \quad (7)$
Herschel-Buckley	$Re_B = \frac{Dv\rho}{VP_B} \quad (8)$
	$He_B = \frac{D^2 \rho LE_B}{VP_B^2} \quad (9)$
	$f = \frac{2He_{HB}}{Re_{HB}^2} + \frac{16}{Re_{HB}} [A]^{-n_{HB}} \quad (10)$
	$\frac{LE_{HB}}{\tau_w} = 2 \frac{He_{HB}}{f Re_{HB}^2} \quad (12)$
	$[A] = f(LE_{HB}, \tau_w, n_{HB}) \quad (13)$
	$Re_{HB} = \frac{8D^{n_{HB}} \langle v \rangle^{2-n_{HB}} \rho}{k_{HB} [2(3n_{HB}+1)/n_{HB}]^{n_{HB}}} \quad (11)$
	$He_{HB} = Re_{HB}^2 \frac{LE_{HB}}{\rho \langle v \rangle^2} \quad (14)$

As correlações para o cálculo do fator de atrito no regime turbulento, e seus respectivos autores, são apresentadas na Tabela 2. Estas correlações estão presentes em Paraiso (2011).

Tabela 2 – Correlações utilizadas na avaliação do fator de atrito no regime turbulento.

Autores	Equações
Tomita (1959)	$f = \lambda/4 \quad (15)$
	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(Re \frac{\sqrt{\lambda}}{2} \right) - 0,2 \quad (16)$
Churchill (1977)	$f = 2 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{1/2} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right]^{1/2} \quad (17)$
	$A = \left[2,457 \ln \left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0,27 \frac{E}{D} \right)^{-1/16} \right]^{1/16} \quad (18)$
	$B = (37530 Re)^{1/6} \quad (19)$
Ellis e George (1977)	$f = 0,00454 + 0,645 Re^{-0,70} \quad (20)$
Darby e Melson (1981)	$f_T = \frac{10^a}{Re^{0,193}} \quad (21) \quad a = -1,378 [1 + 0,146 \exp(-2,9 \times 10^{-5} He)] \quad (22)$
Darby et al. (1992)	$f_T = \frac{10^a}{Re^{0,193}} \quad (23) \quad a = -1,47 [1 + 0,146 \exp(-2,9 \times 10^{-5} He)] \quad (24)$
Gomes (1987)	$DMGomes \quad f = 0,060 n^{0,462} Re^{-0,223} \quad (25)$
	$OWGomes \quad f = 0,069 n^{0,666} Re^{-0,235} \quad (26)$
	$FSGomes \quad f = 0,110 n^{0,616} Re^{0,287} \quad (27)$

Energia de Mistura

Miranda (2008) apresenta a equação de energia de mistura (Equação 28).

$$E_M = k_V \times \sum [(2\pi \times rpm/60)^2 \times t] \quad (28)$$

Nesse caso, o volume de pasta utilizado foi de 0,6 L.

MATERIAIS E MÉTODOS

Formulação da Pasta de Cimento

Materiais sólidos: Os materiais sólidos consistem de cimento classe G fornecido pela empresa Holcim, microesfera oca de cerâmica fornecida pela empresa R&D International e sílica ativa fornecida pela empresa Dow Corning Silício do Brasil.

Materiais líquidos: Os materiais líquidos consistem de água doce e aditivos como: antiespumante (D175), dispersante (D080) e retardador de pega (D801), fornecidos pela empresa Schlumberger.

Experimento de Bancada

Primeiramente foi feita a pesagem dos materiais sólidos e, em seguida, a homogeneização dos mesmos. No copo do misturador (Figura 1a) foi feita a adição e pesagem dos materiais líquidos. No início da agitação, toda a mistura sólida foi adicionada aos poucos em um período de 60 segundos. Após esse tempo de adição dos sólidos, iniciou-se a contagem do tempo de mistura analisado. Foram feitas análises nos tempos de 420, 540, 900 e 1200 segundos, nas rotações de 4000, 5000 e 6000 RPM. Em cada conjunto tempo-rotação foi feito um ensaio reológico no viscosímetro FANN 35A (Figura 1b). Além disso, a densidade foi medida através da balança de lama (Figura 1c) e a temperatura também foi anotada.

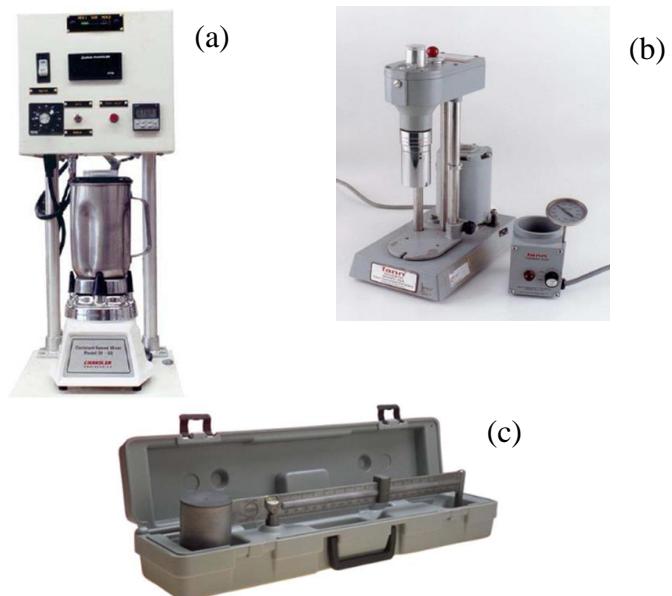


Figura 1 – (a) Misturador Waring Blender, Chandler; (b) Viscosímetro Fann-VG Meter, Modelo 35A; (c) Balança de Lama, Fann.

Experimento na Unidade Piloto

Assim como no experimento de bancada, os materiais sólidos são misturados previamente, nesse caso, em um misturador Y. O material líquido e a mistura sólida são homogeneizados no tanque e a circulação da pasta por toda a unidade experimental (Figura 2) é iniciada. Após estabilização da densidade, a coleta de dados de vazão e diferença de pressão é feita em diferentes rotações da bomba. Os experimentos são feitos nas temperaturas de 15, 25 e 60°C. Amostras da pasta, em rotações pré-determinadas, são retiradas para serem feitos ensaios reológicos com as mesmas em viscosímetro FANN 35A. A unidade experimental consiste de um loop de escoamento de fluidos composto por tubos de ferro galvanizado e alguns equipamentos. Dentre eles: um tanque de 250 litros de capacidade, um medidor de vazão do tipo Coriolis, transdutores de pressão diferencial, uma bomba helicoidal de 25HP e um resfriador para o controle da temperatura. O trecho experimental é composto por um duto circular de 1" polegada de diâmetro e três metros de comprimento. Nesse trecho é feita a tomada de diferença de pressão por meio dos transdutores com um metro e meio de distância entre eles.

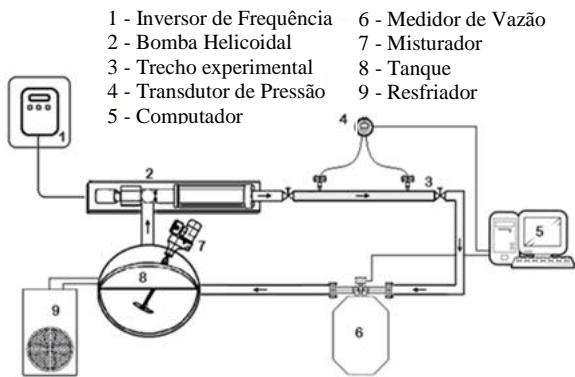


Figura 2 – Unidade experimental para o escoamento de pastas de cimento.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Densidade X Energia de Mistura

O gráfico de densidade X energia de mistura (Figura 3) apresenta os dados obtidos no experimento de bancada. Olhando os extremos, é possível observar que uma energia de mistura e rotação baixa gera um resultado de densidade menor que uma energia de mistura e rotação alta. Além disso, é possível ver no gráfico, que fixando uma energia de mistura, quanto maior a rotação maior a densidade. Esse aumento na densidade em maiores rotações ocorre devido à quebra das microesferas ocas, que quando submetidas a uma alta agitação e a um alto tempo de mistura elas tendem a quebrar. Através de testes de micrografia por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), foi possível observar a quebras dessas microesferas dependendo da rotação e tempo de mistura da pasta (Miranda, 2008), como pode ser visto na Figura 4.

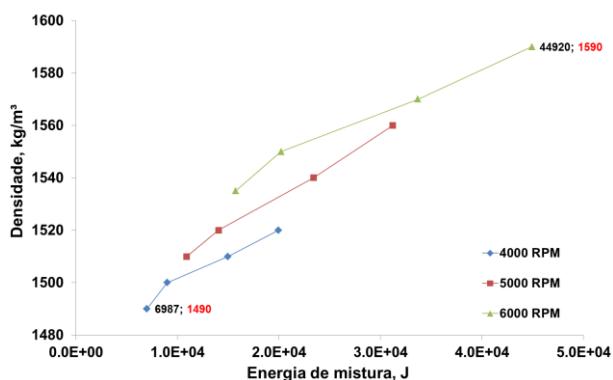


Figura 3 – Influência da energia de mistura e intensidade de cisalhamento na densidade.

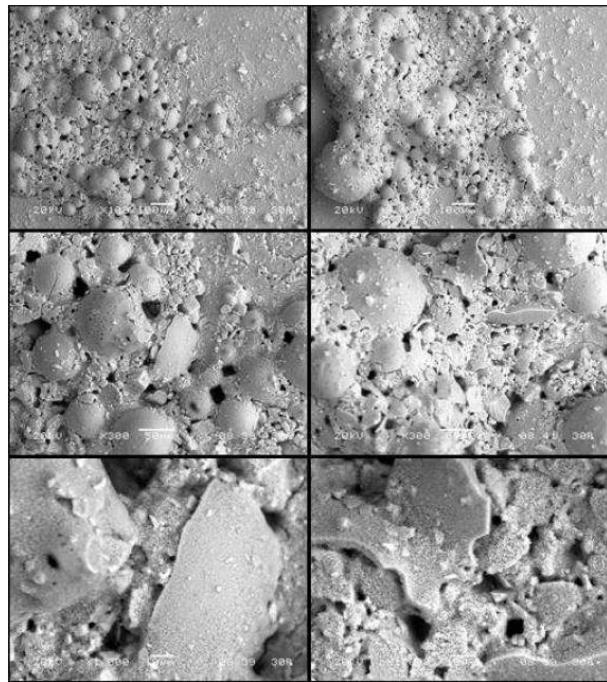


Figura 4 – Micrografias por MEV de pasta misturada a 4000 rpm por 15 s + 3000 rpm por 9 min 22s + 12000 rpm por 1 min – $\rho=1,45 \text{ g/cm}^3$ (12,1 lb/gal) – Ensaio D (Miranda 2008).

Reologia (Experimento de Bancada)

O gráfico de tensão X taxa de deformação (Figura 5) apresenta os dados reológicos obtidos por meio do viscosímetro Fann 35 A. Foram feitos gráficos para as rotações de 4000, 5000 e 6000 RPM. Cada linha representa o tempo de rotação em que a pasta foi preparada. Cada ponto representa os dados de tensão obtidos para cada taxa de deformação onde as taxas de deformação foram, respectivamente, 5,11; 10,21; 51,07; 102,14; 170,23; 340,46 e 510,69 s^{-1} .

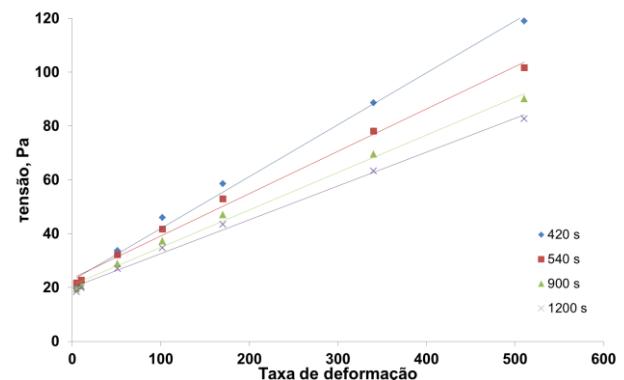


Figura 5 – Influência da energia de mistura e intensidade de cisalhamento na reologia na pasta preparada a 5000 RPM.

O aumento da energia de mistura ocasionado pelo aumento no tempo de exposição ao cisalhamento causou uma diminuição da viscosidade plástica.

Reologia (Experimento na Unidade)

Na Tabela 3 são apresentadas as médias dos parâmetros reológicos, bem como o coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) obtido em cada modelo.

Tabela 3 – Parâmetros reológicos médios obtidos a 15, 25 e 60°C.

T.°C	Potência			Bingham			Herschel-Buckley			R^2
	n (-)	K (Pa.s ⁿ)	R^2	LE (Pa)	VP (Pa.s)	R^2	n (-)	K (Pa.s ⁿ)	LE (Pa)	R^2
15	0,549	1,73	0,972	5,84	0,116	0,997	0,879	0,25	4,15	0,9998
25	0,536	1,26	0,967	4,05	0,078	0,998	0,895	0,16	3,06	0,9999
60	0,477	1,04	0,957	3,04	0,044	0,997	0,871	0,10	2,35	0,9998

Como pode ser visto na tabela acima, o modelo de Herschel-Buckley é o que apresenta o melhor coeficiente de correlação ao quadrado. Posteriormente vem o de Bingham, apresentando bons resultados e depois, Potência.

Avaliação das Correlações de Fator de Atrito

Gráficos de fator de atrito versus Reynolds foram utilizados para avaliar as correlações de fator de atrito nos dois regimes (Figura 6). A figura a seguir mostra os dados usando o modelo de Herschel-Buckley a 25°C.

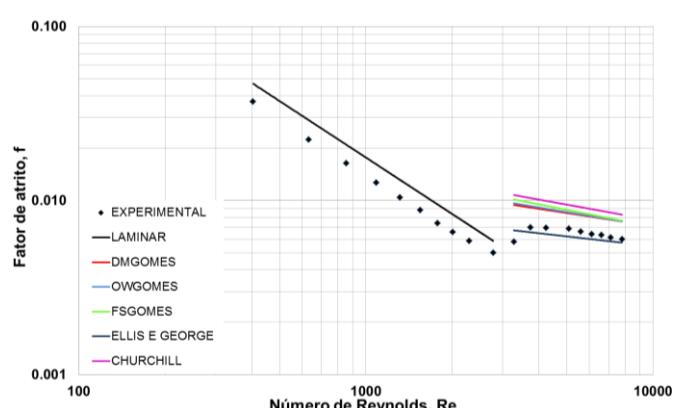


Figura 6 – Gráfico de fator de atrito versus Reynolds – Herschel-Buckley, 25°C.

Os mesmos gráficos foram feitos para os três modelos reológicos nas três temperaturas. Os erros percentuais absolutos médios gerados entre os valores obtidos experimentalmente e os calculados são apresentados na Tabela 4.

Nesta tabela, os erros percentuais menores que 25% são destacados.

Tabela 4 – Erro percentual absoluto médio das correlações de fator de atrito no regime laminar e turbulento.

	Correlações de fator de atrito	15 °C	25 °C	60 °C	Média
Potência	Laminar	15,8	16,3	16,3	16,1
	DM Gomes	11,4	12,8	7,3	10,5
	OW Gomes	16,5	19,0	16,7	17,4
	FS Gomes	15,4	18,4	16,8	16,9
	Ellis e George	13,8	14,0	7,7	11,8
	Churchill	29,1	22,3	32,3	27,9
Bingham	Laminar	33,8	28,5	40,0	34,1
	Darby e Melson	16,0	18,5	9,2	14,6
	Tomita	41,5	31,7	41,2	38,1
	Darby <i>et al.</i>	33,0	36,0	28,3	32,4
	Ellis e George	6,0	5,8	11,2	7,7
Herschel-Buckley	Churchill	61,4	51,5	61,1	58,0
	Laminar	27,4	25,9	38,2	30,5
	DW Gomes	35,5	30,1	41,0	35,5
	OW Gomes	36,9	31,6	41,3	36,6
	FS Gomes	42,7	35,3	42,4	40,1
	Ellis e George	7,9	8,0	9,7	8,5
Churchill	Churchill	55,3	45,1	54,5	51,6

No regime laminar, o modelo cuja correlação de fator de atrito obteve menores erros percentuais foi o da potência. No regime turbulento, a correlação de Ellis e George (1977) resultou em baixos erros nos três modelos reológicos. Mas destacam-se também as correlações DM Gomes, OW Gomes e FS Gomes, no modelo da potência e Darby e Melson (1981) no modelo de Bingham.

CONCLUSÃO

A partir dos experimentos de bancada observou-se que, com o aumento da rotação e do tempo de mistura no preparo da pasta, a densidade aumenta e essa ocorre devido à quebra das microesferas ocas. Além disso, a reologia também é afetada com o aumento da energia de mistura ocasionada pelo maior tempo de exposição ao cisalhamento, levando a uma diminuição da viscosidade plástica.

No experimento no loop de escoamento, o modelo que gerou a melhor correlação dos dados reológicos foi o de Herschel-Buckley, seguido do de Bingham e potência. Quanto às correlações de fator de atrito, no regime laminar, a correlação que obteve o menor erro foi a do modelo da potência. No regime

turbulento, a que se destaca é a correlação de Ellis e George (1977).

NOMENCLATURA

a	Parâmetro da equação 23
[A]	Parâmetro da equação 10
A	Parâmetro da equação 17
B	Parâmetro da equação 17
D	Diâmetro, m
E	Energia de mistura, kJ
f	Fator de atrito de Fanning
f_L	Fator de atrito laminar
f_T	Fator de atrito turbulento
He	Nº de Hedstrom
He_B	Nº de Hedstrom - modelo de Bingham
He_{HB}	Nº de Hedstrom - modelo de H.B.
k	Índice de consistência - potência, Pa.s ⁿ
k_{HB}	Índice de consistência – H.B., Pa.s ⁿ
K	Constante determinada experimentalmente = $6,1 \times 10^{-8}$
L	Comprimento da seção reta, m
LE_B	Limite de escoamento - Bingham, Pa
LE_{HB}	Limite de escoamento – H.B., Pa
M	Massa da pasta de cimento, kg
n	Índice de comportamento – modelo da potência
n_{HB}	Índice de comportamento – H.B.
Q	Vazão, m ³ /s
R^2	Coeficiente de correlação
Re	Número de Reynolds
Re_B	Número de Reynolds generalizado - Bingham
Re_{HB}	Número de Reynolds generalizado - Herschel-Buckley
Re_p	Número de Reynolds generalizado – potência
t	Tempo de mistura, s
v ou $\langle v \rangle$	Velocidade média, m/s
V	Volume da pasta, L
VP_B	Viscosidade plástica (Bingham), Pa.s

Letras gregas

γ	Taxa de deformação, s ⁻¹
ΔP	Diferença de pressão, Pa
ε	Rugosidade do duto, m
λ	Parâmetro da equação 15, s ⁻¹
ρ	Densidade do fluido, kg.m ⁻³
τ	Tensão de cisalhamento, Pa
τ_w	Tensão de cisalhamento, Pa

REFERÊNCIAS

- CHURCHILL, S. W. (1977), "Friction factor equation spans all fluid flow regimes". J. Chem. Eng.
- DARBY, R., MELSON, J. (1981), "How to predict the friction factor for the flow of Bingham plastics." J. Chem. Eng., v. 88, n. 26, p. 59–6
- DARBY, R., MUN, R., BOGER, D. V. (1992), "Predict Friction Loss in Slurry Pipes", J. Chem. Eng., v.9, p.116
- ELLIS, R. C., GEORGE, D. S. (1977), "Practical interpretation on rheology, annular displacing forces. How to avoid by passing mud during primary cementing." World Oil, p. 64-9
- GOMES, F. J. A. D. (1987), "Hydraulic, power law models, calculation method using rational polynomial models." Technical meeting on software developing in drilling operations, CAPER/87, Salvador, Brazil. (em Português)
- MIRANDA, C. R. (2008), Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo – processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química. Tese de doutorado, Instituto Militar de Engenharia do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
- NELSON, E. B. (1990), Well Cementing, Houston: Schlumberger Educational Services
- PARAISO, E. C. H. (2011), Estudo do escoamento de pastas de cimento em dutos circulares e anulares concêntricos. PPGEQ/UFRRJ, Seropédica- RJ (dissertação de mestrado)
- TOMITA, Y. A. (1959), "A study on non-Newtonian flow in pipe lines." Bulletin JSME, v.2, n.5, p. 10-16

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CENPES/PETROBRAS pelo suporte técnico e financeiro e a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.