

Estudos Experimentais e Modelagem da Reologia e da Hidráulica na Perfuração com Espuma

André L. Martins – aleibsohn@cenpes.petrobras.com.br

Carlos H. M. de Sá - chsa@cenpes.petrobras.com.br

Affonso M. F. Lourenço – affonso-lourenco@utulsa.edu

Valter S. Junior – vsj@cenpes.petrobras.com.br

PETROBRAS/CENPES/DIPILOT

Ilha do Fundão – Av. 1 – Q. 07 – Cidade Universitária - Rio de Janeiro – RJ - Brasil - 21949-900

***Resumo.** O presente artigo descreve um esforço experimental extenso em analisar a estabilidade de espumas e suas propriedades reológicas para aplicações como fluido de perfuração leve. Os pontos principais do estudo foram: 1) a influência do tipo de espumante e concentração na reologia da espuma; 2) a influência da fração volumétrica de gás sobre as propriedades reológicas da espuma. Então, correlações simples foram propostas para quantificar o comportamento experimental. Além disso, testes de campo foram realizados para avaliar um dos agentes espumantes investigados em laboratório, utilizando-se 16 (dezesesseis) combinações de vazões gás-líquido.*

***Palavras-chave:** Reologia, Espuma, Perfuração, Poços de Petróleo*

1. INTRODUÇÃO

Dentre as diversas aplicações dos fluidos leves, compressíveis, uma das mais atrativas é a perfuração de reservatórios de óleo e gás em condições sub-balanceadas, tecnologia em que a pressão hidrodinâmica exercida pelos fluidos em circulação é menor que a pressão de poros, permitindo influxo. Esta técnica permite a perfuração das zonas produtoras com um mínimo de dano. Certamente, o bom conhecimento de hidráulica e do mecanismo de transporte de cascalhos em sistemas complexos como este é imprescindível para uma perfuração segura e econômica.

Este artigo apresenta uma tentativa inicial de realizar experimentos e modelar as propriedades reológicas dos sistemas de espuma. Equipamentos em escala de laboratório e piloto foram utilizados como ferramentas para a avaliação da estabilidade de espumas e reologia. Com base nos experimentos, funções abrangentes de ajuste de curvas foram propostas para explicar as propriedades de escoamento observadas.

Além disso, foram realizados testes com espuma num sistema fechado, reciclável, em escala real de magnitude, no poço 9-PE-2-TQ-BA, localizado no Centro de Treinamento da PETROBRAS. Os experimentos consistiram em gerar espuma na superfície, injetá-la no poço, quebrá-la na linha de retorno (separar as fases líquida e gasosa, para tanto utilizando ácido), formar nova espuma e posteriormente reinjetá-la. A grande vantagem do circuito fechado é evitar o descarte total, contínuo, da espuma quebrada, o que dificulta operações terrestres e inviabiliza o emprego de tal técnica em ambientes restritos, onde a fase líquida não pode ser descartada (futuras operações offshore).

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, com o intuito de introduzir o fenômeno básico para o presente estudo, são apresentados alguns trabalhos experimentais importantes sobre reologia de espumas. Existem divergências quanto à existência ou não de um limite de escoamento para sistemas espumados. Esta revisão não tem como objetivo exaurir os conhecimentos sobre este polêmico assunto.

David e Marsden (1969), Wenzel et al. (1967 e 1970), Beyer et al. (1972) e Patton et al. (1981) realizaram testes reológicos com diversas espumas e concluíram que elas se comportaram como líquidos pseudoplásticos. Entretanto, estes autores não apresentam conclusões quantitativas devido à presença de vários complicadores experimentais, grandes quedas de pressão que geram efeitos de compressão e o colapso das bolhas, entre outros fatores.

Mitchell (1969) descobriu que a reologia das espumas é bem descrita pelo modelo de Bingham. A tensão de limite de escoamento, no entanto, foi descoberta como sendo uma função da qualidade da espuma. Reidenbach et al. (1986) modelaram esta função e a correlacionaram com as propriedades dos surfactantes e gases utilizados. Foi encontrado que a tensão de cisalhamento aumenta quando a qualidade aumenta.

Foi descoberto que a viscosidade plástica das espumas também é função da qualidade. Diversos autores correlacionaram a viscosidade plástica das espumas com a viscosidade plástica da fase líquida e com a qualidade. Estas fórmulas devem ser utilizadas com cautela, já que a qualidade sozinha não é suficiente para determinar a viscosidade plástica. Hirasaki e Lawson (1983) mostraram que a viscosidade plástica também é função da textura da espuma, ou do tamanho da bolha. Harris (1985) também achou que a textura é um parâmetro importante, mesmo sendo a qualidade o parâmetro mais significativo.

Polímeros e surfactantes são adicionados ao líquido base utilizado para formar a espuma. Posto que muito do comportamento viscoso das espumas está relacionado com o cisalhamento dos filmes líquidos que cobrem as paredes, a adição de polímeros iria mudar o perfil reológico do fluido base: de Bingham para potência com limite de escoamento (Herschel-Bulkley). O comportamento reológico das espumas seria, com isso, melhor descrito pelo modelo yield Power-Law.

Os estudos do escoamento de espumas em tubos feitos por Reidenbach et al. (1986), e Cawiezel e Niles (1987), mostraram que os valores do índice de consistência e do índice de comportamento do modelo de potência com limite de escoamento são praticamente os mesmos quando comparados aos da fase líquida. Para alguns casos, o modelo yield Power-Law pode se tornar mais apropriado que o modelo de Bingham.

Khan et al. (1988) realizaram experimentos em um reômetro em geometria placa-placa com espumas de diferentes frações volumétricas de gás. A viscosidade foi traçada como função da taxa de cisalhamento. Eles descobriram que a espuma se comporta como um material pseudoplástico com a sua viscosidade sendo fortemente função da taxa de cisalhamento até para baixas taxas de cisalhamento.

Harris (1995), trabalhando com espumas de N₂ e CO₂ com base de gel de carboximetilhidroxipropil-guar (CMHPG), as descreveu como tendo comportamento pseudoplástico com limite de escoamento. No entanto, as equações a serem utilizadas no campo foram ajustadas pelo modelo de potência (Power-Law).

3. IMPACTO DO AGENTE ESPUMANTE E SUA CONCENTRAÇÃO NA REOLOGIA

Primeiramente, dois espumantes fornecidos por fabricantes distintos em duas concentrações cada, foram testados em um reômetro cone e placa para avaliar a melhor escolha. Nota-se que o espumante B gera uma espuma mais viscosa do que o espumante A (Figura 1) e não existe uma diferença aparente entre os perfis das reologias quando 0.5 e 1% v/v de espumante B são utilizados.

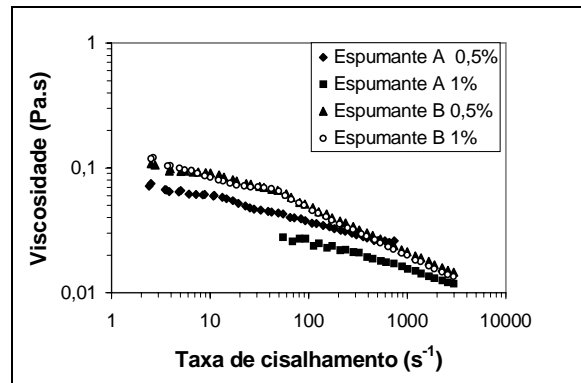


Figura 1 – Comparação entre os perfis reológicos dos espumantes A e B.

4. EXPERIMENTOS NO VISCOSÍMETRO TUBULAR DO CENPES

O sistema é composto por dois tanques de fluido, sendo um de alta e o outro de baixa pressão, interconectados por um sistema de tubos e válvulas e duas bombas. Os tubos e vasos são revestidos com um material isolante térmico. As pressões de operação podem chegar a 1 MPa (10 atm) e as temperaturas, a 90 °C. A seção de teste é composta por 5 tubos com diâmetros variando de 0.25 a 1 in. As medidas de vazão e diferença de pressão são coletadas por um sistema de aquisição de dados.

4.1 Procedimento do Teste

- Preparar uma solução 0.5% v/v de espumante nos tanques de alimentação;
- Começar a injeção de gás e líquido para uma desejada qualidade da espuma;
- Esperar pela estabilização das vazões;
- Anotar a perda de pressão e a vazão da espuma para um dado diâmetro do tubo;
- Aumentar a vazão da espuma, mantendo a qualidade constante;
- Repetir o procedimento anterior para um outro diâmetro de tubo.

4.2 Matriz de Testes

- Total de 50 testes válidos (Tabela 1) incluindo as repetições para cinco diâmetros de tubo diferentes;
- Intervalo de vazão do líquido: 13 a 50 l/min;
- Intervalo de vazão do gás: 30 a 270 l/min;
- Intervalo de qualidade da espuma: 60% a 90%.

Tabela 1. Matriz de testes.

	QL(l/min)	QG (l/min)		QL(l/min)	QG (l/min)		QL(l/min)	QG (l/min)
60%	20	30	80%	20	80	90%	13	132
	30	45		23	92		15	135
	40	60		25	100		20	180
	50	75		27	108		22	198
70%	20	47	30	120	25	225		
	30	70	33	132	30	270		
	35	81	35	140				
	40	93	40	160				
	50	115						

4.3 Resultados do Teste de Escoamento

Os dados experimentais (Figuras 2 e 3) mostraram que o comportamento reológico das espumas formuladas foram bem ajustados de acordo com o modelo Power-Law e o procedimento sugerido por Craft et al. (1962).

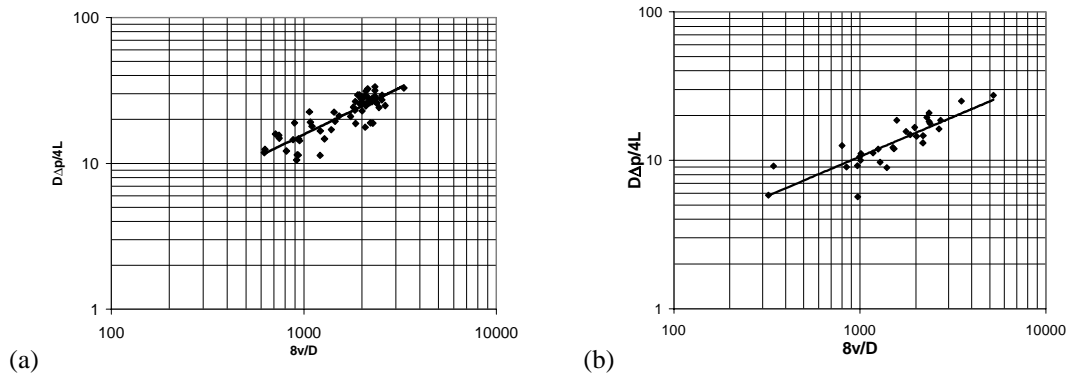


Figura 2 – Reograma para espumas de qualidade: 60% (a) e 70% (b).

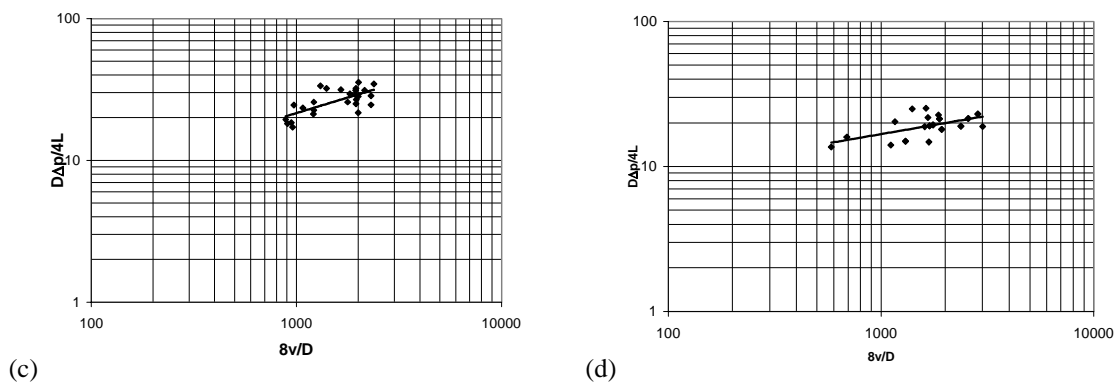


Figura 3 – Reograma para espuma de qualidade: 80% (c) e 90% (d).

Como as taxas de cisalhamento testadas foram relativamente altas, não fazia sentido propor um modelo com limite de escoamento. Deve-se ressaltar que as taxas são representativas das verificadas no campo.

4.4 Relação entre a qualidade da espuma e os parâmetros do modelo Power-Law

De acordo com os dados experimentais, pode ser observada uma relação entre a qualidade da espuma e os parâmetros do modelo Power-Law (Figura 4).

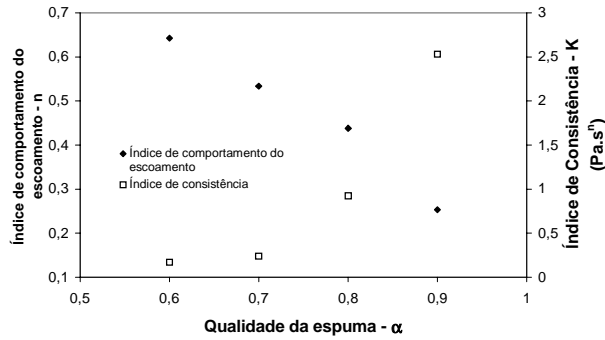


Figura 4 – Relação entre a reologia da espuma e os parâmetros do modelo Power-Law.

Dentre os diversos tipos de funções testadas, a melhor correlação da qualidade da espuma com os índices do modelo Power-Law foi como o parâmetro $((1- \alpha) / \alpha)$. Este parâmetro é uma fração de injeção de líquido sobre injeção de gás, como descrito a seguir

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = \frac{1 - \frac{Q_G}{Q_G + Q_L}}{\frac{Q_G}{Q_G + Q_L}} = \frac{Q_G + Q_L - Q_G}{Q_G} = \frac{Q_L}{Q_G} \quad (1)$$

Traçando o índice de comportamento do escoamento pela razão de injeção de líquido sobre injeção de gás (Figura 5) e executando uma regressão analítica, a seguinte correlação pode ser obtida

$$n = n' = 0.8242 \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^{0.5164} \quad (2)$$

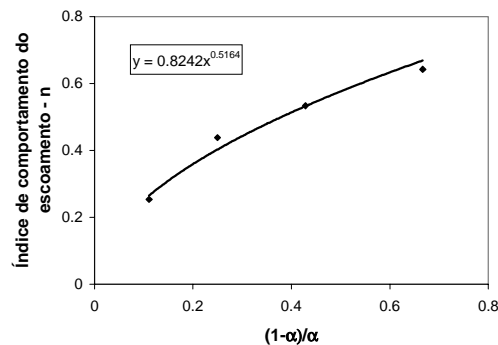


Figura 5 – Correlação entre a razão de injeção de líquido sobre a injeção de gás da espuma e o índice de comportamento do escoamento.

O coeficiente de potência positivo indica que se a quantidade de gás na espuma aumenta, o comportamento da mesma ficará próximo do comportamento Newtoniano (n aproxima-se de 1).

Traçando o índice de consistência pela razão de injeção de líquido sobre injeção de gás (Figura 6) e efetuando uma regressão analítica, a seguinte correlação pode ser obtida:

$$K' = 0.0813 \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^{-1.5909} \quad (3)$$

$$K = K' \left(\frac{4n'}{3n' + 1} \right)^{n'} \quad (4)$$

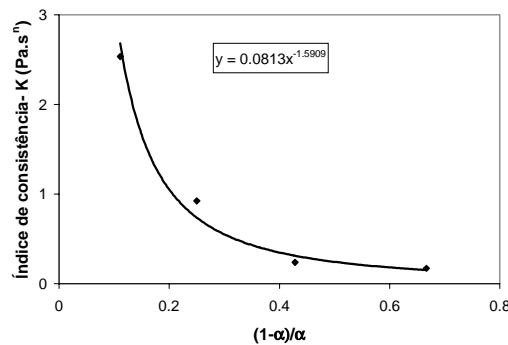


Figura 6 – Correlação entre a reologia da espuma e o índice de consistência.

O coeficiente de potência negativo indica que as espumas ricas em gás são mais consistentes do que as mais pobres (K aumenta).

5. PREVISÃO DE PRESSÃO DE BOMBEIO NA PERFURAÇÃO COM ESPUMA

Utilizando-se o espumante B, testes de campo foram realizados no poço vertical 9-PE-2-TQ-BA, coluna de perfuração (3½” x 2.764”) descida a 1275 m de profundidade no interior de revestimento de 7” (6.276” ID). Água foi agitada num tanque com o agente espumante B e posteriormente misturada com nitrogênio criogênico no tubo bengala (stand pipe). Em seguida, a espuma resultante foi continuamente injetada via coluna de perfuração. Os testes foram realizados com broca (6 1/8”, sem jatos) em repouso, sem girar a coluna. Descrição dos procedimentos operacionais para geração e quebra da espuma, configuração do circuito hidráulico, concentração dos produtos químicos e aparato utilizados foi realizada por Nakagawa et al. (1998).

Para tal cenário, foram investigadas 16 (dezesseis) combinações de vazões, mantidas constantes até que fosse atingido o regime permanente. Um sistema de aquisição de dados permitiu registrar pressão e temperatura na superfície (linhas de injeção de fluido e retorno) e em quatro profundidades distintas ao longo da região anular do poço: 240 m, 494 m, 998 m, e 1273 m.

Rotina computacional foi escrita para determinar o perfil de pressões na região anular do poço, utilizando a pressão no retorno como condição de contorno para resolução do problema, requerendo procedimento iterativo de solução. Foi resolvida a equação do balanço de energia

mecânica no sistema, presumindo-se perfil constante de temperatura, valores medidos durante os testes.

Para determinação da viscosidade da espuma em função da qualidade a cada trecho do domínio discretizado, 03 (três) modelos reológicos foram implementados: 1) Power-Law (resultante dos experimentos realizados no CENPES, aqui descrito); 2) Bingham Plastic (Blauer et al., 1974); 3) Herschel-Bulkley (Harris et ali., 1987).

Observe-se que o domínio de validade da correlação desenvolvida, modelo Power-Law, restringe-se a espumas com qualidade entre 60% e 90%. Assim, para qualidades abaixo de 52%, adotou-se fórmula geralmente utilizada para descrever viscosidade de espuma nesta faixa de fração de vazios (Einstein, 1906):

$$\eta = \mu_L \times (1.0 + 2.5\alpha) \quad (5)$$

A formulação aqui desenvolvida foi extrapolada para qualidades compreendidas entre 52% e 60%, e acima de 90%. Necessário frisar que, enquanto a espuma é um agregado de bolhas de gás numa matriz contínua de líquido, transição para escoamento em forma de névoa ocorre quando a qualidade atinge cerca de 96%. A partir daí, o padrão de fluxo predominante passa a ser o de névoa (mist flow), gás saturado com gotículas dispersas de líquido, sendo que a fase gasosa passa a controlar o gradiente de pressão. A viscosidade da mistura bifásica cai bruscamente, magnitude próxima à da viscosidade do gás, reduzindo-se a eficiência de transporte de sólidos perfurados.

A Tabela 2, abaixo, resume os resultados de erros médios (m) e desvios padrão para as pressões médias e simuladas obtidos para duas profundidades, 998 m e 1273 m:

Tabela 2 – ECD: Estatística de erros.

Modelo Reológico	Profundidade (m)	m (kPa)	s (kPa)
<i>Power-Law</i>	998	352	1057
	1273	299	1198
<i>Bingham Plastic</i>	998	235	1761
	1273	150	2096
<i>Herschel-Bulkley</i>	998	3522	1526
	1273	2396	1647

Vide análise da dispersão dos erros absolutos em torno do valor médio, s , os melhores resultados foram obtidos através do modelo Power-Law. Assim também indica a média aritmética dos erros absolutos, parâmetro m .

Na Tabela 3, referente ao modelo Power-Law, são apresentados os valores calculados de pressão para cada par de vazões, confrontando-os com os valores medidos em campo (1273 m). As vazões de gás são representadas em metros cúbicos padrão por segundo, referidos a 14,696 psi a (101.325 kPa) e 60 °F (15.6 °C).

Tabela 3 – Pressão a 1273 m: valores medidos versus valores previstos pelo modelo Power-Law.

Q_L (m ³ /s)	Q_G (m ³ /s)	P (kPa) a 1273 m	
		Medido	Calculado
$1,26 \times 10^{-3}$	0,189	3444	3744
	0,283	3145	4043
	0,378	2396	4343
	0,472	1048	4642
$1,89 \times 10^{-3}$	0,189	3893	3893
	0,283	3594	3893
	0,378	3444	4043
	0,472	3144	4343
$2,52 \times 10^{-3}$	0,189	4492	4343
	0,283	4343	4043
	0,378	4492	4043
	0,472	4343	4343
$3,15 \times 10^{-3}$	0,189	5091	4792
	0,283	4942	4343
	0,378	4942	4193
	0,472	5091	4193

Como se depreende da tabela acima, para uma dada vazão de líquido, a discrepância entre os valores medidos e calculados cresce à proporção que aumenta a razão gás-líquido de injeção.

Nos testes com vazão de líquido igual a 20 gpm e vazões de gás acima de 600 scfm, muito provavelmente houve instabilidade da espuma à medida que aproximou-se da linha de retorno, na superfície. A qualidade excedeu 96%, limite de transição para escoamento em névoa, cujos mecanismos de hidráulica não são previstos pelos modelos em estudo. Dessa forma, a hidrodinâmica do escoamento passou a ser regida pela fase gasosa.

Se, na análise estatística dos erros, descartamos os testes 20x800 e 20x1000, obteremos os seguintes resultados (Tabela 4):

Tabela 4 – Estatística de erros (descartados testes 20x800 e 20x1000).

Modelo Reológico	Profundidade (m)	m (kPa)	s (kPa)
<i>Power-Law</i>	998	0.0	587
	1273	0.0	599

As predições teóricas aproximam-se sobremaneira dos valores registrados em campo.

6. CONCLUSÕES

- Este artigo é o resultado de 02 (dois) anos de trabalho experimental considerando a estabilidade e a reologia das espumas. O conhecimento acumulado em diversas tentativas de gerar e quebrar espumas de forma repetitiva e confiável, e também na adaptação de equipamentos de laboratório para testar fluidos compressíveis, foi uma etapa lenta e necessária ao processo.
- Testes preliminares realizados no reômetro cone e placa não indicaram grandes diferenças nos testes realizados na concentração de 0.5% e 1% em volume do agente espumante. O equipamento provou ser confiável em testar espumas que eram imediatamente geradas. Se o gerador de espumas é colocado próximo ao equipamento, ele pode se tornar uma ferramenta de laboratório para avaliação da reologia da espuma.
- Os testes realizados no viscosímetro tubular forneceram dados reométricos confiáveis para diferentes qualidades e vazões de espuma. A metodologia obtida através destes dados consiste numa ferramenta eficaz para o projeto de transporte hidráulico e de cascalhos. A aplicação de tal metodologia para outros sistemas de espumas deve ser verificada.
- No teste de campo, a viabilidade de operação com espuma num circuito fechado, mesmo sem aparato automático de controle de pH, foi confirmada.
- Para o cenário de teste – poço de anular restrito, utilizando-se altas razões gás-líquido de injeção –, as predições do modelo Power-Law proposto mostraram boa concordância com os resultados medidos.
- Para definição do domínio de validade, os modelos reológicos implementados como rotina computacional devem ser testados para outras configurações de poços e combinações de vazões.

REFERÊNCIAS

1. Beyer, A.H., Millhone, R.S., Foote, R.W.: “Flow Behavior of Foam as a Well Circulating Fluid”, artigo SPE 3986, apresentado no Encontro Anual da SPE, em outubro de 1972, San Antonio, Texas.
2. Blauer, R.E.; Mitchell, B.J.; e Kohlhaas, C.A.: “Determination of Laminar, Turbulent, and Transitional Foam Flow Losses in Pipes”, artigo SPE 4885, 1974.
3. Cawiezel, K.E. e Niles, T.D.: “Rheological Properties of Foam Fracturing Fluids under Downhole Conditions”. Artigo SPE 16191, apresentado no “Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium of the Soc. of Petroleum Eng.”, Dallas, Texas, 1987.
4. Craft, B. C., Holden, W.R. e Graves, E. D.: “Well Design: Drilling and Production, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1962.
5. David, A. e Marsden Jr., S.S. Soc. Pet. Eng. J.: 2544, 1969.
6. Einstein, A.: “Eine Neve Bestimmung Der Molekuldimensionen”, Annalen Der Physik, 1906, Vol. 19, SFR 4, pág. 289.
7. Harris, P.C.: “A Comparison of Mixed-Gas Foams with N₂ and CO₂ Foam Fracturing Fluids on a Flow-Loop Viscometer”. SPE Production & Facilities. pág. 197-203, agosto de 1995.
8. Harris, P.C.: “Effects of Texture on Rheology of Foam Fracturing Fluids”. SPE 14257, apresentado no “60th. Ann. Fall Tech. Conf. and Exhib.”, Las Vegas, Nevada, 1985.
9. Harris, P.C. e Reidenbach, V.G.: “High-Temperature Rheological Study of Foam Fracturing Fluids”, Journal of Petroleum Technology, pág. 613-619, maio de 1987.

10. Hirasaki, G.J. e Lawson, J.B.: “Mechanism of Foam Flow in Porous Media – Apparent Viscosity in Smooth Capillaries”. SPE 12129, apresentado no “58th. Ann. Fall Tech. Conf. and Exhib.”, San Francisco, California, 1983.
11. Khan, S.A.; Schnepfer, C.A., Armstrong, R.C.: “Foam Rheology: III. Measurement of Shear Flow Properties”. *Jornal de Reologia*, 32:1, pág. 69-92, 1988.
12. Mitchell, B.J.: Viscosity of Foam, Ph.D. Dissertation, The University of Oklahoma, Norman, 1969.
13. Nakagawa, E.Y.; Andrade Jr., P.H.; Vidal, J.L.A.; Silva Jr., V. e Silva, P.R.C.: Technical Report on Full Scale Light-Weight Fluids Experiments in Taquipe-BA, PETROBRAS/CENPES, PROCAP 2000, Projeto 02.04.69 – Perfuração com Fluidos Leves e/ou na Condição Sub-balanceada, 1999.
14. Reindenbach, V.G.; Harris, P.C.; Lee, Y.N. e Lord, P.L. *Soc. Pet. Eng. J.*: 38, 1986.
15. Wenzel, H.G.; Brungraber, R.J. e Stelson, T.E. *ASCE: EM6*, 153, 1967.

NOMENCLATURA

- a ≡ coeficiente de ajuste da correlação entre o índice de comportamento do escoamento e a qualidade da espuma;
- b ≡ coeficiente de ajuste da correlação entre o índice de consistência e a qualidade da espuma;
- D ≡ diâmetro do tubo do viscosímetro;
- h ≡ profundidade do poço
- K ≡ índice de consistência do modelo *Power-Law*;
- k ≡ constante de integração;
- K' ≡ valor de interseção do gráfico logaritmo da tensão de cisalhamento na parede contra a taxa de cisalhamento Newtoniana onde a taxa de cisalhamento Newtoniana é igual a um;
- L ≡ comprimento do tubo do viscosímetro;
- n ≡ índice de comportamento do escoamento no modelo *Power-Law*;
- P ≡ pressão do fluido;
- Q ≡ vazão volumétrica;
- r ≡ raio do tubo do viscosímetro;
- v ≡ velocidade do fluido no viscosímetro capilar;
- m ≡ média aritmética dos eixos;
- s ≡ desvio padrão dos eixos;

Símbolos Gregos

- α ≡ qualidade da espuma;
- Δ ≡ diferencial;
- η ≡ viscosidade;

Subscritos

- G ≡ gás;
- L ≡ líquido