

## DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DE UM ÓLEO PESADO BRASILEIRO

Guilherme Blaitterman Ribeiro Junior<sup>1</sup> (UNICAMP), Osvaldo Vidal Trevisan<sup>2</sup> (UNICAMP)

<sup>1</sup>Caixa Postal 6122 - CEP: 13.083-970 - Campinas - SP, blaitterman@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Caixa Postal 6122 - CEP: 13.083-970 - Campinas - SP, trevisan@dep.fem.unicamp.br

O trabalho trata de medidas experimentais da viscosidade de um óleo pesado brasileiro efetuadas em condições de reservatório, com o intuito de investigar o comportamento reológico de óleos vivos espumosos. O comportamento de óleos espumosos pesados vem sendo pesquisado a fim de se comprovar um modelo que justifique um menor valor de viscosidade obtido quando os mesmos apresentam quantidade significativa de gás preso, em comparação com o mesmo óleo desprovido de gás (óleo morto). De acordo com hipóteses, as bolhas de gás presentes na mistura atuam como esferas que transladam junto com o escoamento do óleo, atuando como rolamentos no transporte do fluido em questão, acarretando uma menor perda de carga ao longo do trajeto devido à queda ocorrida no valor da viscosidade do óleo. Tais informações são de fato preciosas visto que a validação do modelo auxiliará na recuperação de óleos pesados, que nos dias de hoje preenchem um grande papel no cenário econômico da exploração petrolífera. O viscosímetro no qual foram feitas as medidas opera segundo o princípio de Stokes. A operação do viscosímetro foi calibrada com um fluido de densidade e viscosidade conhecidas para diferentes temperaturas e à pressão ambiente. As constantes obtidas destes ensaios foram então utilizadas na correção dos valores aferidos para o óleo espumoso de interesse. Foram realizadas medidas com o óleo espumoso usando taxas de depleção variáveis, isto é, com decréscimo de pressão variável no tempo. Os resultados mostram o efeito da presença do gás preso no óleo, que se traduz na variação da viscosidade com o tempo. De acordo com os resultados obtidos, houve um aumento da viscosidade com o transcorrer do tempo, isto é, com a liberação do gás o óleo tornou-se mais viscoso.

*óleo pesado, óleo espumoso, propriedades PVT*

### 1. INTRODUÇÃO

A viscosidade de óleos pesados é uma propriedade crítica no prognóstico de exploração petrolífera. A redução da mesma em conjunto com uma possível expansão térmica são propriedades chave no aumento da produtividade de óleos pesados. Por isso, a determinação da mesma influencia diretamente nas simulações de reservatório.

Práticas modernas de engenharia de reservatório requerem informações precisas de propriedades termodinâmicas e de propriedades referentes ao transporte dos fluidos, que somados às propriedades das rochas do reservatório são capazes de determinar (estimar): os hidrocarbonetos iniciais (óleos e gases) no local, a futura performance do reservatório e esquemas otimizados de exploração e produção. A viabilidade técnica e econômica do processo de injeção de vapor tem sido estabelecida por laboratórios e campos de estudos de formação de rochas e óleos crus. Um extensivo conhecimento das propriedades do fluido é requerido para um desenvolvimento apropriado desta técnica.

Simuladores de reservatórios são rotineiramente usados para prever e aperfeiçoar recuperação de óleos em poços. Estes simuladores requerem a inserção de dados referentes à propriedade dos fluidos do reservatório como uma função da temperatura, pressão e composição. A precisão de tais dados pode afetar decisivamente nos resultados das simulações. Entre as propriedades estão presentes: densidade das fases, viscosidade das fases, faixas de solubilidade do gás-óleo.

### 2. REVISÃO DA LITERATURA

Quando um líquido flui com o número de Reynolds menor que 1 (um) em torno de uma esfera, ou quando uma esfera se move vagarosamente através do fluido, uma força resistente age sobre a mesma. O método de Stokes consiste em medir o tempo para a esfera cair através de um líquido em repouso.

Stokes observou que uma esfera em queda em um fluido adquire inicialmente uma aceleração até que se equilibre o empuxo e a força de gravidade, ou seja, a partir deste equilíbrio a esfera cai com velocidade constante.

Stokes provou por análise matemática que a resistência para uma esfera se movimentando através de um fluido incompressível é:

$$R = 6\pi\eta V \quad (1)$$

onde  $R$  = resistência da esfera no fluido;  $r$  = raio da esfera e  $V$  = velocidade da esfera no fluido.

Sendo a força da gravidade igual à resistência temos:

$$\frac{4}{3}\pi^3(\rho_s - \rho_e)g = 6\pi V\mu \quad (2)$$

pela relação  $V = \frac{L}{t}$  e isolando  $\mu$  temos então:

$$\mu = \frac{2r^2 g(\rho_s - \rho_e)t}{9L} \quad (3)$$

onde  $t$  = tempo de queda da esfera,  $L$  = distancia percorrida pela esfera,  $\rho_s$  = densidade da esfera e  $\rho_e$  é a densidade do líquido cuja viscosidade pretende-se determinar. Esse método é preciso somente se a velocidade  $V$  é baixa.

### 3. METODOLOGIA

O óleo testado está disponível no laboratório de engenharia petrolífera da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP e se refere a um campo de óleo pesado do Espírito Santo. O laboratório possui um viscosímetro de alta pressão RUSKA que foi utilizado para a realização dos experimentos de viscosidade. O viscosímetro opera com o princípio de Stokes, aonde uma pequena esfera de aço com um diâmetro específico é utilizada para se obter os dados da viscosidade. Esses valores serão então obtidos pela correlação de dados já mensurados com os resultados advindos do fluido de viscosidade desconhecida.

O princípio básico consiste na determinação do tempo que a esfera leva para percorrer um trajeto em um tubo preenchido com o fluido a ser estudado. Efetivamente, a bola é forçada a descer no tubo devido à diferença de densidade entre o fluido e ela. Um aumento na densidade do fluido acarreta em um tempo maior de queda.

#### 3.1 Equações Governantes

Matematicamente pode ser expresso como:

$$\mu = Kt(\rho_B - \rho_F) \quad (4)$$

onde  $\mu$  = Viscosidade absoluta  $K$  = Constante  $t$  = Tempo de queda

$\rho_B$  = Densidade da esfera  $\rho_F$  = Densidade do fluido

#### 3.2 Aparato Experimental

De acordo com a equação acima é necessário, além do tempo de queda que o viscosímetro fornecerá eletronicamente, determinar a constante “K” e as densidades do fluido e da esfera para obtermos o valor da viscosidade do óleo de interesse. Para tanto, foram realizados ensaios de calibração com óleos de viscosidade e densidade conhecida para obtermos valores de “K” adequados ao estudo reológico do óleo. A densidade da esfera de teste foi obtida mensurando seu peso e volume.

Tendo finalizado os testes de calibração, foi dado início aos experimentos com óleo vivo. Os ensaios para esse óleo ocorreram em duas etapas: Na primeira foram realizadas medidas do tempo de trânsito da esfera em diversas pressões que variaram desde 2750psi até 800psi assegurando que todo o gás se conservasse na amostra. A segunda parte consistiu em ensaios realizados a uma pressão constante (650psi) a qual estava abaixo do ponto de bolha. Neste caso foi necessária a liberação para a atmosfera do gás que se desprendia do óleo a fim de se garantir que o sistema permanecesse monofásico. Todos os ensaios ocorreram a uma temperatura fixa característica de reservatório (124°F).

##### 3.2.1 Calibração

Foram adquiridos três óleos de silicone *DOW CORNING DC\*200* de viscosidades distintas, a saber: 500cSt, 1000cSt e 5000cSt (viscosidades fornecidas pelo fornecedor a temperatura de 77°F). O fabricante dos óleos forneceu a curva da variação da viscosidade com a temperatura, bem como o coeficiente de expansão volumétrico e o seu peso específico a 77°F, dados necessários para a determinação de sua densidade nas temperaturas de interesse.

Os ensaios para a calibração, de acordo com o manual do viscosímetro RUSKA, deveriam ocorrer à pressão ambiente e em três temperaturas fixas: 100°F, 150°F e 250°F. O viscosímetro também dispõe de três graus de

inclinação: 23°, 45° e 70°. Em cada temperatura foram realizadas três medições de tempo de trânsito da esfera para cada inclinação. Cada medida de tempo fornecerá um valor de K de acordo com a equação (4).

### 3.2.2 Ensaio de viscosidade usando taxas de depleção variáveis

A princípio, foi medida a densidade do óleo morto, 0,97 g/cm<sup>3</sup>. Em seguida, prosseguiu-se com a recombinação do óleo. Em uma garrafa foram adicionados cerca de 193,65g de óleo morto, o que corresponde a um volume de 199,23cm<sup>3</sup>. Visto que a amostra possui um RS igual a 10 para uma pressão de bolha em torno de 720 psi, foram adicionados a garrafa 2080,22 cm<sup>3</sup> de metano, configurando um RS de 10,44. Depois de adicionado o gás ao óleo, a mistura foi pressurizada com uma bomba tipo seringa até a pressão de 2000psi para garantir a dissolução total do gás no fluido.

Enquanto ocorria a recombinação, foi acoplada ao viscosímetro uma bomba de vácuo a fim de se retirar o ar presente em seu interior. Com o viscosímetro a uma pressão estimada de  $1 \times 10^{-3}$  mBar, foi efetuada uma conexão entre este e a garrafa que continha óleo recombinado (vivo). Com o auxílio de bomba tipo seringa, o óleo foi transferido com êxito para a câmara de ensaios do viscosímetro, como mostra a Figura 1, a seguir:

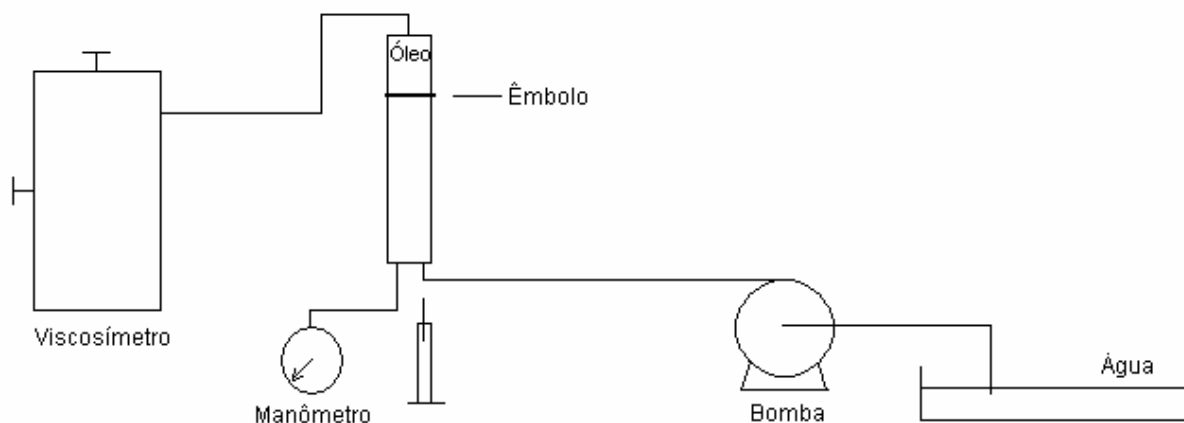


Figura 1. Esquema da montagem de teste.

Com a abertura da válvula que une a garrafa ao viscosímetro, ocorreu uma expansão do fluido para o interior do viscosímetro, acompanhada de uma queda de pressão que foi corrigida em seguida com a bomba. Obtida a pressão de 2750 psi, retirou-se a bomba e começou a ser realizado o ensaio com o óleo a uma temperatura típica de reservatório (124°F). A variação de pressão foi obtida drenando-se a água que estava localizada na parte inferior da garrafa. Esse volume de água retirado a cada mudança de pressão foi aferido com um Becker a fim de se obter a variação na densidade do óleo de acordo com a nova pressão.

### 3.2.2 Ensaio de viscosidade à pressão constante com liberação de gás

Para este ensaio, foi necessária uma segunda recombinação. Neste caso foi utilizado um procedimento análogo ao da primeira etapa. Em uma garrafa foram adicionados cerca de 976,7g de óleo morto, o que corresponde a um volume de 1006,9cm<sup>3</sup>. Em seguida, a garrafa foi comunicada a uma segunda garrafa que possuía 13069,0cm<sup>3</sup> de metano, configurando após a recombinação um RS de 13.52. Depois de adicionado o gás ao óleo, a mistura foi pressurizada com uma bomba tipo seringa até a pressão de 2000psi, para garantir a total dissolução do gás no fluido. Novamente a amostra só foi transferida após a realização de vácuo no viscosímetro. Após a amostra estar presente no viscosímetro, a pressão foi reduzida para 650psi e deu-se início à realização dos ensaios após o óleo ter atingido a temperatura de 124°F. Neste caso, devido a pressão estar abaixo do ponto de bolha, antes de se iniciar qualquer experimento, foi necessária a liberação de gás livre para a atmosfera quando havia a presença de gás livre no viscosímetro. Caso contrário, os resultados estariam prejudicados. Quando ocorria queda de pressão devido à liberação de gás, houve uma correção da mesma por meio de uma bomba tipo seringa.

## 4. RESULTADOS

O primeiro passo foi obter a densidade da esfera através de seu peso e da medida de seu diâmetro, o valor encontrado foi de 7.6406 g/cm<sup>3</sup>.

As medidas dos tempos de trânsito utilizando os três fluidos de silicone forneceram diversos valores de K em função da inclinação, que podem ser observados por meio das Figuras 2a, 2b e 2c.

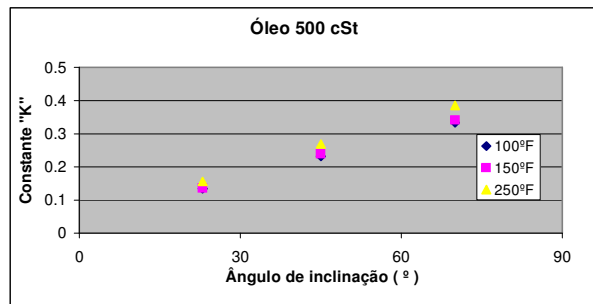


Figura 2a. Constantes obtidas com o óleo de 500 cSt.

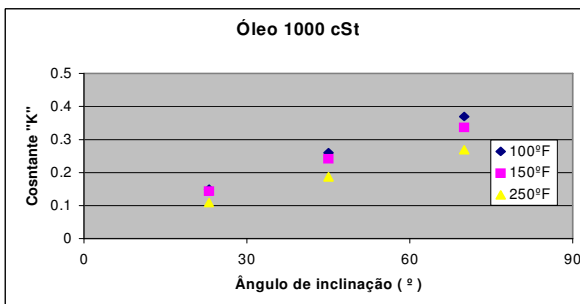


Figura 2b. Constantes obtidas com o óleo de 1000 cSt.

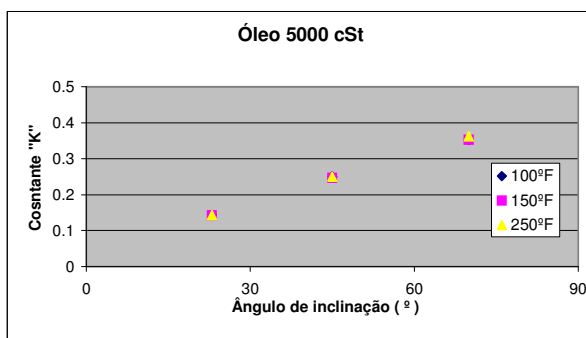


Figura 2c. Constantes obtidas com o óleo de 5000 cSt.

Foi determinado a priori que seria utilizada somente uma inclinação (de 45°) do viscosímetro para os testes que envolveriam o óleo pesado, reduzindo assim o tempo total do experimento, visando assegurar que a amostra dentro da garrafa permanecesse inalterada, livre de contaminações externas. De acordo com os resultados de calibração o valor médio K correspondente à inclinação de 45° foi de 0.244783. Utilizando esse valor na equação (4) obtivemos os seguintes valores de viscosidade de acordo com os tempos de queda mensurados:

Tabela 1. Valores de viscosidade do óleo vivo obtidos utilizando taxas de depleção variáveis.

| Pressão (psi) | Dens. O (g/cm <sup>3</sup> ) | T1 (s) | T2 (s) | T3 (s) | Média (s) | Viscosidade (cP) |
|---------------|------------------------------|--------|--------|--------|-----------|------------------|
| 2750          | 1.0591                       | 928.3  | 948.8  | 954.2  | 943.7667  | 1520.4421        |
| 2400          | 1.0488                       | 807.1  | 830.9  | 837.8  | 825.2667  | 1331.6204        |
| 2050          | 1.0398                       | 764.8  | 774.5  | 776.8  | 772.0333  | 1247.4280        |
| 1800          | 1.0376                       | 723.8  | 724.8  | 731.8  | 726.8000  | 1174.7379        |
| 1500          | 1.0288                       | 678.5  | 686.3  | 690.9  | 685.2333  | 1109.0325        |
| 1300          | 1.0212                       | 658.2  | 660    | 663.8  | 660.6667  | 1070.5003        |
| 1100          | 1.0121                       | 609.4  | 621.4  | 618.3  | 616.3667  | 1000.0885        |
| 850           | 0.9944                       | 590.3  | 590.8  | 593.9  | 591.6667  | 962.5709         |

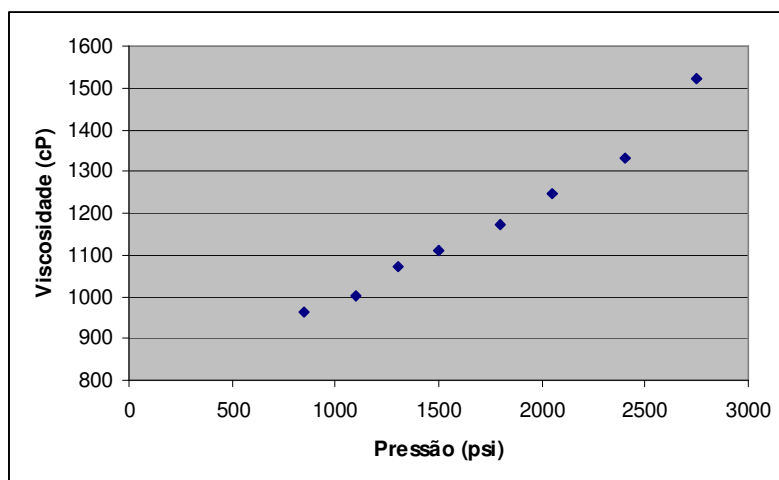


Figura 3. Valores da viscosidade do óleo vivo em função da pressão.

Para o ensaio à pressão constante, foi utilizado o mesmo valor de K anterior na equação (4). Nesse caso foi necessário considerar que a densidade do óleo permaneceu constante, embora ocorresse a liberação de gás, fixando em  $0.972\text{g/cm}^3$ . Foram obtidos os seguintes valores de viscosidade em função dos tempos de queda:

Tabela 2. Viscosidade do óleo a uma pressão fixa abaixo do ponto de bolha com liberação de gás.

| Tempo (h) | Pressão (psi) | T1 (s) | T2 (s) | T3 (s) | Média (s) | Viscosidade (cP) |
|-----------|---------------|--------|--------|--------|-----------|------------------|
| 0         | 650           | 379.6  | 402.9  | 412.8  | 398.4333  | 650.3942         |
| 1         | 650           | 368.7  | 421.9  | 376.1  | 388.9000  | 634.8322         |
| 5         | 650           | 444.0  | 444.6  | 392.7  | 427.1000  | 697.1891         |
| 15        | 650           | 429.4  | 440.1  | 446.1  | 438.5333  | 715.8526         |
| 100       | 650           | 840.7  | 865.3  | 873.1  | 859.7000  | 1403.3563        |
| Morto     | 650           | 868.4  | 883.5  | 873.7  | 875.2000  | 1428.6582        |

## 5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos através dos ensaios descritos anteriormente podemos concluir que o gás e a pressão preenchem papéis fundamentais no valor da viscosidade. A descompressão do óleo além de aumentar a densidade do mesmo, favoreceu a queda nos resultados obtidos de viscosidade de acordo com a figura 3.

Os ensaios com liberação de gás, que ocorreram somente na segunda etapa dos experimentos, mostraram que a presença de gás, em grande parte composta por metano, acarreta em um menor valor de viscosidade do óleo. Conforme o passar do tempo, o gás presente na amostra começou a se desprender lentamente devido à pressão estabelecida estar abaixo da pressão de bolha. Os resultados obtidos deixam claro uma tendência de aumento da viscosidade com uma diminuição de gás dissolvido.

## 6. AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial a CNPq que investiu nesta pesquisa através do fornecimento de subsídios direcionados a realização destes experimentos e ao laboratório de engenharia de petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP que disponibilizou os equipamentos necessários para os ensaios de viscosidade.

## 7. REFERÊNCIAS

- ELY, J. F. ; HENLEY, H. J. M. Prediction Of Transport Properties. 1 Viscosity Of Fluids And Mixtures. **Introduction Engineering Fundamentals**. 1981. v.20, p. 323-332.
- ISMAIL, K. A. R. **Técnicas de medidas e instrumentação**. 2ª edição. Campinas: Editora do autor, 2003. p.380.
- MEHROTRA, A. K. ; MONNERY, W. D. ; SVRCEK, W. Y. A review of practical calculation methods for the viscosity of liquid hydrocarbons and their mixtures. **Fluid Phase Equilibria**. 1996. v.117, p. 344-355.

PEDERSEN, K. S. ; FREDENSLUND, A. ; CHIRSTENSEN , P. L. ; THOMASSEN, P. Viscosity of crude oils. **Chemical Engineering Science**. 1984. v. 39, p. 1011-1016.

## DETERMINATION OF VISCOSITY OF BRAZILIAN HEAVY OILS

This work deals with experimental measurements of viscosity of Brazilian heavy oils in reservoir conditions, with the purpose of investigating its flow properties. These properties are important to verify the consistency of foamy oil models. Foamy behavior of some heavy oils predicts lower values of viscosity when the oil presents significant amount of entrapped gas, in comparison to oil without gas (dead oil). According to the hypotheses, the gas bubbles in the mixture act as spheres that move with the oil, acting like rolling balls in the transport of the fluid, causing a lesser viscous head loss. Such information is important for the validation of the model in the assessment of ultimate the recovery of the oil. The viscometer used for the measurements works according to Stokes' principle. The viscometer was previously calibrated with a fluid of known density and viscosity for different temperatures at the ambient pressure. Afterwards, the constants obtained from these calibrations runs were used for the correction of the measurements made with foamy oil. The measures were taken using a fixed depletion rate, i.e., with a fixed pressure-decreasing rate in the time. The results show the effect of the presence of the imprisoned gas in the oil, translated into the variation of viscosity with time. According to the obtained results, the live oil viscosity increased with time, i.e., with the release of the originally entrapped gas, the oil became more viscous.

*heavy oil, foamy oil, PVT properties*

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.