



## REOLOGIA DE ÓLEOS PESADOS

### **Lisa B. Blanco**

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de Petróleo  
DEP/FEM/UNICAMP Cx. P. 6122- Campinas -13081-970, SP, Brasil

### **Paulo R. Ribeiro**

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de Petróleo  
DEP/FEM/UNICAMP Cx. P. 6122- Campinas -13081-970, SP, Brasil

***Resumo.** O óleo pesado vem sendo uma alternativa cada vez mais atraente como gerador de combustível fóssil, devido à perspectiva de exaustão das reservas de óleo tradicional. Na produção de óleos pesados existem novos problemas e desafios, principalmente aqueles associados às altas viscosidades, que dificultam seu escoamento na tubulação de produção. Isso se traduz em grandes perdas de carga que estão diretamente vinculadas às propriedades reológicas desses óleos. De forma a entender o comportamento reológico do material, foi realizada a caracterização reológica de quatro óleos pesados de campos petrolíferos terrestres e marítimos do Brasil. Foi utilizado um reômetro controlado por deformação, abrangendo-se taxas de deformação de campo, visando-se a utilização de bombeio centrífugo submerso e de bombeio por cavidades progressivas como métodos de elevação artificial. Além dos ensaios convencionais foi analisado o efeito da temperatura (25°C a 65°C) e foram realizados ensaios dinâmicos. Foi verificado que dentro da faixa de taxas de deformação e de temperaturas analisada, as amostras apresentam comportamento Newtoniano ou levemente pseudoplástico, com dependência exponencial da viscosidade com a temperatura na faixa analisada. Do ponto de vista dinâmico, os óleos apresentam um componente viscoso dominante, tornando-se desnecessária uma abordagem viscoelástica do problema. A escolha dos sensores do reômetro tem um efeito decisivo na determinação da lei constitutiva.*

***Palavras-chave:** Reologia, Óleo, Pesado, Petróleo, Elevação, Artificial*

## 1. INTRODUÇÃO

No passado, o óleo pesado não tinha demanda como gerador de combustível fóssil, sendo que a partir da crise mundial de energia (1973) muitas refinarias foram modificadas para processar esses óleos de baixa qualidade (Visser, 1989). Essa mudança, junto com a perspectiva de exaustão das reservas de óleo tradicional, influenciou o mercado do óleo pesado e passou a ser economicamente atrativa a produção de campos desse tipo de óleo. O que é mais inconveniente no processo de desenvolvimento de um campo de óleo pesado é a sua recuperação, que está relacionada com as altas pressões de bombeamento necessárias para vencer a pressão hidrostática e as perdas de carga por atrito no escoamento ascendente.

Óleos pesados são definidos como aqueles que possuem densidades menores que 20° API (maiores que 930 kg/m<sup>3</sup>), ou mais estritamente, menores que 16 °API (maiores que 960 kg/m<sup>3</sup>), e com viscosidades maiores que 0,4 Pa.s a 37,8°C (Visser, 1989). Os betumes são óleos com viscosidades maiores que 10 Pa.s nas condições de reservatório, abrangendo-se aqueles produzidos na mineração.

O grau API, utilizado na indústria do petróleo, é uma medida de densidade relativa (à água) que é expressa pela Equação (1):

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\rho_r} - 131,5 \quad (1)$$

Onde  $\rho_r$  é a densidade relativa à água, adimensional.

As grandes perdas de carga na elevação de óleos pesados se devem, principalmente, às altas viscosidades (Blanco, 1999). Desta forma define-se o objetivo básico deste trabalho como pesquisar o comportamento reológico de alguns óleos pesados brasileiros, caracterizando-se, experimentalmente, amostras de óleo pesado de campos petrolíferos terrestres e marítimos fornecidas pela Petróleo Brasileiro (Petrobras).

**Modelos reológicos.** O modelo reológico de um fluido descreve seu comportamento no escoamento através de uma expressão matemática que relaciona a tensão cisalhante com a taxa de deformação. No modelo mais simples, o Newtoniano, a tensão cisalhante é diretamente proporcional à taxa de deformação, sendo a viscosidade a constante de proporcionalidade, segundo a Equação (2)

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

Onde  $\tau$  é a tensão cisalhante, Pa,  $\mu$  é a viscosidade, Pa.s e  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação, 1/s.

Exemplos típicos de fluidos Newtonianos são a água e alguns óleos pesados (Bourgoyne, 1986).

Para fluidos não-Newtonianos a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação é mais complexa. Existem diversos modelos para descrever o comportamento de distintos fluidos não-Newtonianos (Whittaker, 1985, Bird, 1987) desenvolvidos para caracterizar reologicamente certas classes de materiais. Existem modelos de dois parâmetros, como o modelo de Bingham e o modelo de Ostwald de Waale (Eq. (3)), e modelos de três parâmetros (Herschel-Bulkley).

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

Onde  $k$  é o índice de consistência, Pa.s<sup>n</sup> e  $n$  é o índice de comportamento.

Na Figura 1 são apresentadas as curvas de alguns modelos de dois parâmetros, que são usualmente utilizados na Engenharia de Petróleo.

A caracterização experimental proposta neste trabalho consistiu na realização de distintos ensaios de reometria, fazendo-se varreduras de Taxa de Deformação, Temperatura e Deformação. Os óleos brasileiros caracterizados são apresentados com nomes fictícios: Faisão, Mainá (duas amostras) e Curió. Foi utilizado um reômetro de cilindros coaxiais, controlado por deformação, com dois tipos de sensores, referenciados por A e B. A diferença básica entre eles é a largura do espaço anular, pois nestes sistemas, a amostra líquida preenche o espaço anular entre dois cilindros coaxiais e é exposta à deformação.

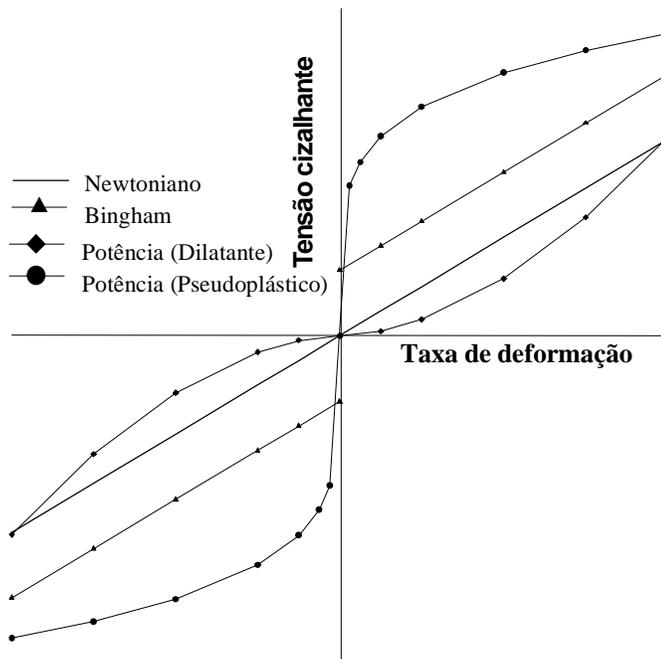


Figura 1- Representação esquemática dos modelos reológicos de dois parâmetros

## 2. ENSAIOS REOLÓGICOS BÁSICOS

No sistema de reômetro de cilindros coaxiais apresentado na Fig. 2, o cilindro externo gira a uma velocidade definida, provocando o cisalhamento do líquido no anular. A tensão de cisalhamento transmite um torque (dependente da viscosidade) ao cilindro interno que fica estacionário. Este sistema de cilindros assegura o fluxo laminar que permite seu tratamento matemático. A associação entre o torque e a rotação medidos pelo aparato, com a tensão cisalhante ( $\tau$ ) e a taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) atuantes na amostra é feita através do equacionamento do escoamento que ocorre no espaço anular (Haake, 1981).

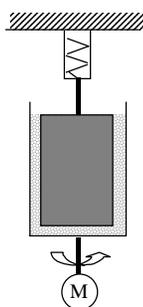


Figura 2- Esquema do sistema de cilindros coaxiais

Cada tipo de sensor está modelado para prover uma faixa específica de taxas de deformação e tensões cisalhantes, estabelecendo-se dessa forma, uma determinada faixa de viscosidades possíveis de se medir no aparato. A faixa de taxas de deformação de interesse no momento de se caracterizar os óleos é aquela que ocorre na aplicação de campo. Foi feita a análise das taxas de deformação máximas que ocorrem no escoamento totalmente desenvolvido de fluidos Newtonianos através de um anular com dimensões de 0,062 mm de diâmetro interno do cilindro externo (2 7/8") e 0,022 mm de diâmetro externo do cilindro interno (7/8"), que corresponde à bomba de cavidades progressivas (fluxo helicoidal) e

através de um tubo de 0,062 mm de diâmetro (2 7/8”) que corresponde à Bomba centrífuga Submersa. Resultou-se uma faixa de 0 a 100 s<sup>-1</sup>.

## 2.1 Varredura de taxas de deformação

Foram feitos os ensaios (25°C) com os dois sensores, obtendo-se diferentes resultados. Essas diferenças são devidas, principalmente, aos diferentes intervalos de taxas de deformação a que ficam submetidos os fluidos no reômetro (Bird, 1987). As diferentes faixas de taxas de deformação se devem às diferentes viscosidades dos óleos. Quando mais viscoso é o óleo, menor é a faixa e os valores de taxa de deformação possíveis de medir no reômetro, devido às limitações de torque (tensão cisalhante). O óleo Faisão foi o mais viscoso, da ordem de 140 Pa.s a 25°C, já a viscosidade do óleo Mainá foi da ordem dos 30 Pa.s, e a do óleo Curió da ordem de 2 Pa.s. A 25°C, os sensores fornecem as seguintes faixas de taxa de deformação para os diferentes óleos:

Tabela 1- Comparação de faixas de taxa de deformação das medições nos reômetros A e B

	A	B
Faisão	0-20	0-2
Mainá II	0-170	0-10
Curió	0-200	0-150

Recorre-se então, para escolher o sensor mais adequado, à análise de taxas de deformação no campo para fluido Newtoniano.

O número de pontos que mede o reômetro com os quais plota as curvas é o mesmo em todos os casos: 40 pontos. Um exemplo de curvas é apresentado nas Figuras 3, 4, 5 e 6. Assim é

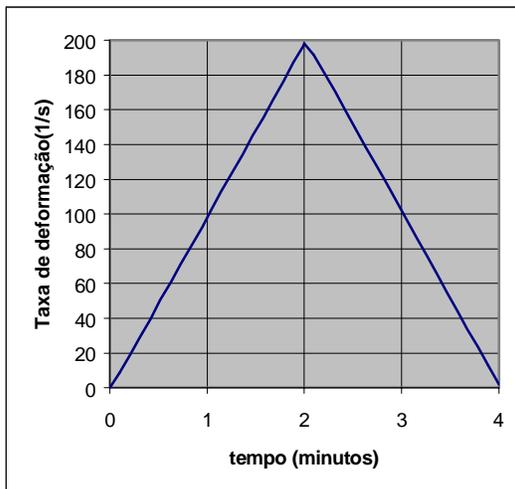


Figura 3 - Taxa de Deformação  $\dot{\gamma}$  imposta no tempo

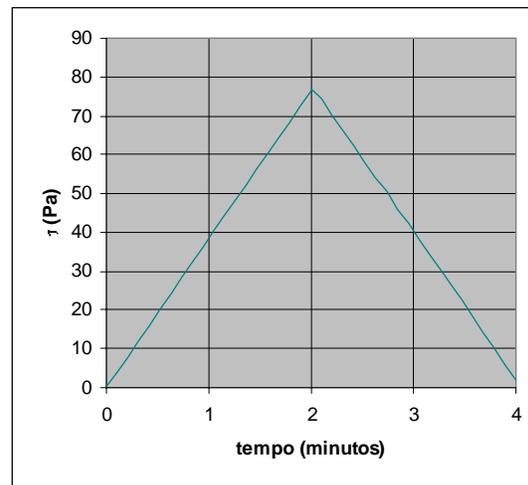


Figura 4 - Resposta Tensão  $\tau$  no tempo

que, por exemplo, o sensor B para o óleo Faisão descreve bem o comportamento a muito baixas taxas de deformação, mas não é de interesse, porque não dá bons resultados na

extrapolação para taxas de deformação maiores. Por outro lado, no ensaio do óleo Curió com o sensor A existe uma menor densidade de pontos no intervalo de interesse (porque abrange até taxas de  $200 \text{ s}^{-1}$ ), logo é preferível a medição com o sensor B

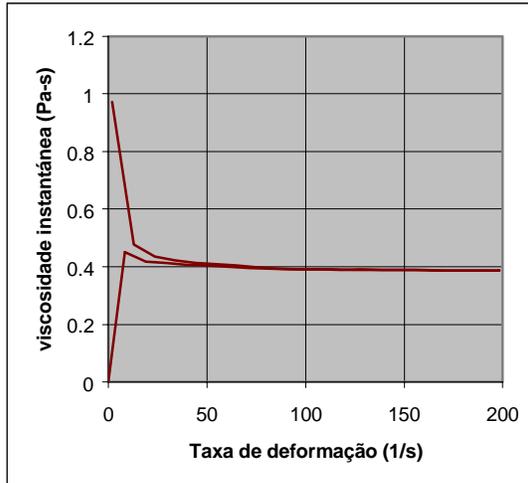


Figura 5 – Viscosidade instantânea,  $\eta = \tau/\dot{\gamma}$  segundo a Taxa de deformação  $\dot{\gamma}$

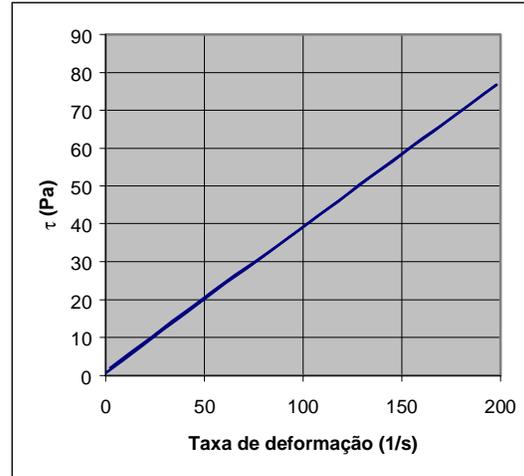


Figura 6 - Curva reologica: tensão cisalhante  $\tau$  segundo a taxa de deformação  $\dot{\gamma}$

## 2.2 Resultados

Baseando-se nos aspectos mencionados na seção 2.1, foram consideradas as medições com o sensor A para os óleos Faisão e Mainá II e com o sensor B para o óleo Curió e Mainá. A  $25^\circ\text{C}$  e 1 atmosfera de pressão, os modelos reológicos dos óleos analisados são representados pelas equações (4), (5), (6).e (7)

Faisão

$$\tau = 139,1 \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

Mainá (sensor B)

$$\tau = 28,3 \cdot \dot{\gamma} \quad (5)$$

Mainá II

$$\tau = 27,08 \cdot \dot{\gamma}^{0,9051} \quad (5)$$

Curió

$$\tau = 1,813 \cdot \dot{\gamma} \quad (6)$$

Pode-se observar que três óleos exibiram comportamento Newtoniano e um deles pseudoplástico.

## 2.3 Efeito da Temperatura

Foram feitos os ensaios reológicos a diferentes temperaturas, constituindo-se uma varredura de temperatura. Verificou-se que os óleos Newtonianos a  $25^\circ\text{C}$  também são

Newtonianos na faixa de 25 a 65°C. Para os óleos viscosos é de se esperar uma dependência exponencial da viscosidade com a temperatura. Foram feitas as varreduras de temperatura, para obter a regressão que confirmasse a dependência exponencial e o valor de viscosidade no primeiro ponto, a 25°C, que é o suspeito de afastar-se da correlação por utilizar uma muito pequena faixa de taxas de deformação.

Os dados das viscosidades nas diferentes temperaturas permitem concluir que as viscosidades dos óleos Faisão, Mainá e Curió têm dependência exponencial com a temperatura e que os valores de viscosidades a 25°C estão próximos aos valores previstos segundo a extrapolação da dependência exponencial.

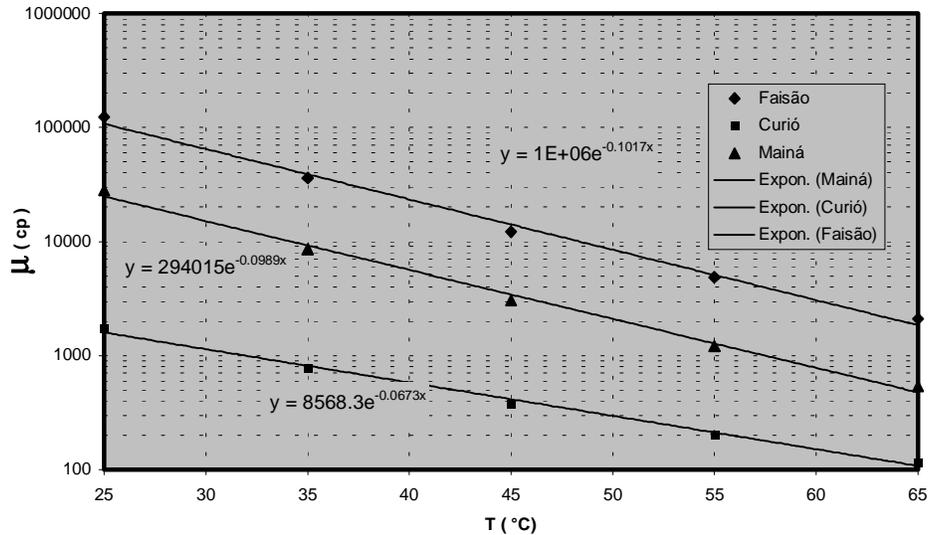


Figura 7 - Viscosidades em função da temperatura

Faisão:

$$\mu = 1000 \cdot e^{-0,1017 \cdot T} \text{ Pa.s} \quad (8)$$

Mainá:

$$\mu = 294,015 \cdot e^{-0,0989 \cdot T} \text{ Pa.s} \quad (9)$$

Curió:

$$\mu = 8,5683 \cdot e^{-0,0673 \cdot T} \text{ Pa.s} \quad (10)$$

### 3 ENSAIOS DINÂMICOS

Foram feitos ensaios dinâmicos para constatar que a relevância dos componentes elástico e viscoso na resposta à deformação. Foram reportados comportamentos viscoelásticos importantes em óleos pesados (Ribeiro, 1994). Nos materiais elásticos a tensão é proporcional à deformação:

$$\tau = C_1 \cdot \gamma \quad (11)$$

E nos materiais puramente viscosos Newtonianos a tensão é proporcional à taxa de deformação:

$$\tau = C_2 \cdot \dot{\gamma} \quad (12)$$

A maioria dos materiais apresenta os dois efeitos, sendo chamados de materiais viscoelásticos. Os ensaios foram realizados no mesmo reômetro utilizado para as varreduras de taxa de deformação, mas nesse caso o cilindro externo oscila com frequência e amplitude variáveis no tempo (Schramm, 1981), fornecendo uma deformação harmônica no tempo com certa frequência e amplitude. No cilindro interno mede-se a saída harmônica na forma de tensão cisalhante, tendo a mesma frequência, mas com amplitude diferente e defasada em relação à entrada. Essa defasagem depende da componente viscosa na resposta.

O tratamento matemático dos dados permite determinar o Módulo de Armazenamento  $G'$  – medida da energia da deformação armazenada elasticamente – e o Módulo de Perda  $G''$  – medida da energia da deformação irreversivelmente perdida como resultado do fluxo viscoso (Whorlow, 1980).

A excitação é dada por uma deformação imposta:

$$\gamma = \gamma_0 \cos \omega t \quad (13)$$

Onde  $\gamma$  é a deformação,  $\gamma_0$  é a deformação máxima (amplitude),  $\omega$  é a frequência e  $t$  o tempo.

E a resposta na tensão cisalhante é dada por:

$$\tau = \tau_0 \cos(\omega t + \delta) \quad (14)$$

Onde  $\tau_0$  é a tensão cisalhante média e  $\delta$  é o ângulo de fase.

A tensão cisalhante pode ser decomposta da seguinte forma:

$$\tau = \gamma_0 (G' \cos \omega t + G'' \sin \omega t) \quad (15)$$

Com

$$G' = \frac{\tau_0 \cos \delta}{\gamma_0} \quad (16)$$

$$G'' = \frac{\tau_0 \sin \delta}{\gamma_0} \quad (17)$$

Também define-se a viscosidade complexa  $\eta^*$ :

$$|\eta^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0 \omega} \quad \text{com} \quad \omega = 2\pi f \quad (18)$$

E o fator de perda:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{G''}{G'} \quad (19)$$

O ângulo de fase  $\delta$  vale 0 quando o material é puramente elástico e vale  $90^\circ$  quando o material é puramente viscoso.

Como primeiro passo foram feitos ensaios de varredura de deformação, a frequência constante para determinação da região viscoelástica linear, onde o desenvolvimento matemático apresentado é válido.

Uma vez identificado o intervalo de deformações onde o módulo de resposta elástica é constante, procede-se à varredura de frequência, a essa deformação ( $\gamma_0$ ), monitorando-se os módulos armazenamento e perda, assim como a viscosidade complexa e o ângulo de fase.

Nas Figuras 8, 9 são apresentadas as varreduras de frequência para o óleo Faisão, onde segue-se o comportamento dos módulos de armazenamento e de perda, como a viscosidade complexa e o ângulo de fase. Também são apresentadas as varreduras dos óleos Mainá (Fig. 10 e 11) e Curió (Fig. 12 e 13).

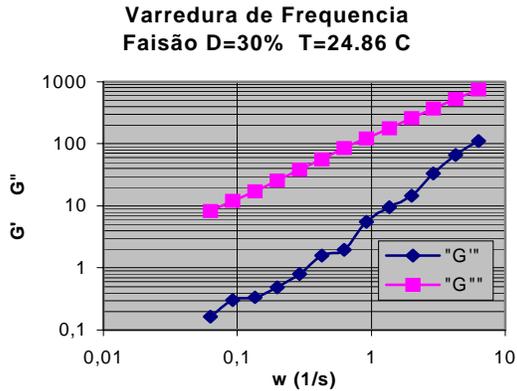


Figura 8 - Módulos na Varredura de Frequência do óleo Faisão

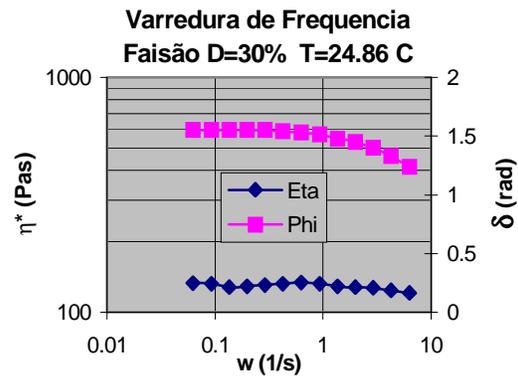


Figura 9 - Ângulo na Varredura de Frequência do óleo Faisão

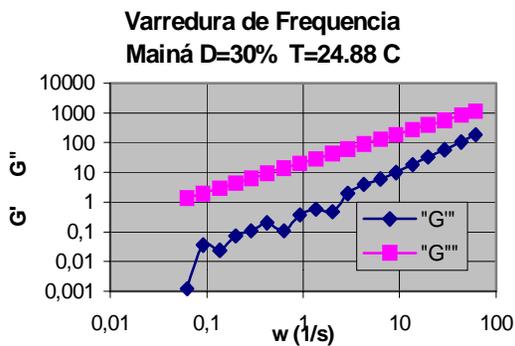


Figura 10 - Módulos na Varredura de Frequência do óleo Mainá

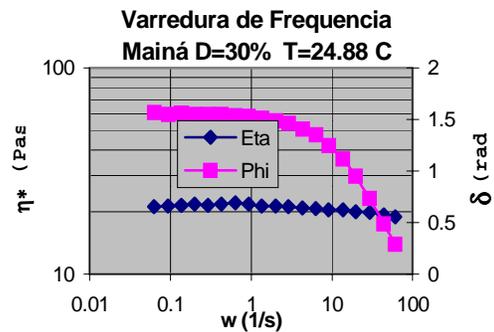


Figura 11 - Ângulos na Varredura de Frequência do óleo Mainá

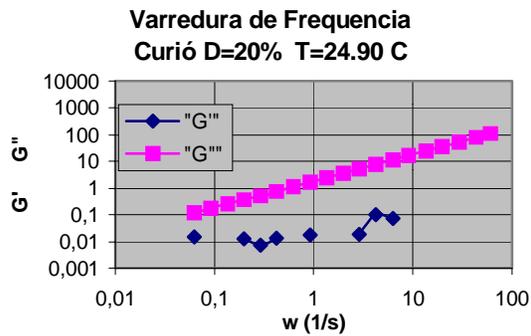


Figura 12 - Módulos na Varredura de frequência do óleo Curió

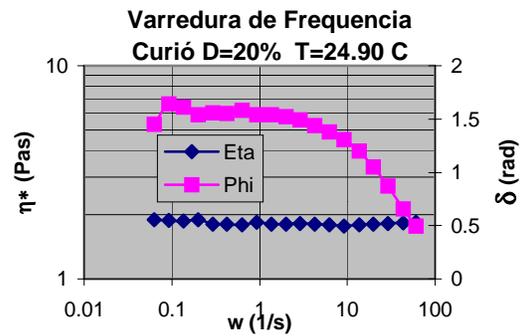


Figura 13 - Ângulos na Varredura de frequência do óleo Curió

A partir dos resultados obtidos nas varreduras, verifica-se que a componente elástica é da ordem do 1% da componente viscosa, já que o valor do ângulo de fase é próximo a 90°, assegurando-se assim o comportamento viscoso dos óleos analisados. Verificou-se o comportamento fortemente viscoso dos óleos Faisão, Mainá e Curió.

#### 4. CONCLUSÕES

1. Três das quatro amostras de óleo pesado caracterizadas têm comportamento reológico Newtoniano e a restante comportamento levemente pseudoplástico.
2. Na faixa de temperatura de 25 a 65°C, os óleos Newtonianos conservam essa qualidade no seu comportamento reológico. Verificou-se uma dependência exponencial da viscosidade com a temperatura.
3. A escolha do sensor é um aspecto fundamental na caracterização reológica do material, pois tem um efeito decisivo na determinação da lei constitutiva. É importante verificar a faixa de taxas de deformação do problema particular, de forma a se escolher o sistema sensor mais adequado.
4. Os óleos pesados analisados apresentam, na sua conduta reológica, comportamentos puramente viscosos, sendo desprezível a componente elástica. Isto torna desnecessária uma abordagem viscoelástica no problema de fluxo desses óleos.

#### *Agradecimentos*

À Petrobrás, pelos óleos fornecidos para os testes realizados neste trabalho; ao Laboratório de Fluidos de Perfuração do Departamento de Engenharia de Petróleo da Unicamp.

#### REFERÊNCIAS

- Bird, R.B., W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, 1987, Transport Phenomena, John Wiley & Sons
- Blanco L. B., 1999, Estudo da Elevação de Óleos pesados através de BCP utilizando-se o Método de Elementos finitos, tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Brasil
- Bourgoyne, A.T., 1986, Applied Drilling Engineering, SPE Textbook Series, Richardson, Texas
- Haake Manual, 1981, Instruction Manual Rotovisco RV20, Sensor System CV20. Haake-

- Circulators Viscometer Material Testing, Germany
- Ribeiro G. S., 1994, Topics in the Transport and Rheology of Heavy Crude Oils, Ph.D. Thesis, University of Minnesota
- Schramm, G., 1981, Introduction to Practical Viscometry. Haake-Circulators Viscometer Material Testing, Germany
- Visser, R. C., 1989, Offshore Production of Heavy Oil. SPE 16606, Journal of Petroleum Technology, Jan. 1989, p. 67-70
- Whitaker, A., 1985, Theory and Application of Drilling Fluid Hydraulics, Exlog Series of Petroleum Geology and Engineering Handbooks
- Whorlow, R. I., 1980, Rheological Techniques, Ed. Ellis Horwood Ltd., Great Britain

## HEAVY OIL RHEOLOGY

**Abstract.** *The heavy oil is being an alternative more and more attractive as generator of fossil combustible, due to the perspective of exhausting of the traditional oil reserves. New problems and challenges exist in the production of heavy oils, mainly those associated to the high viscosities, that hinder the flow in the production tubing. It causes great pressure losses that are directly related to the rheological properties of those oils. To understanding the behavior of the material, the rheological characterization of four heavy oils from onshore and offshore Brazilian fields was obtained. Was used a deformation controlled rheometer, representing field shear rates comparable with the use of Electrical Submersible Pump and Progressive Cavities Pump as methods of artificial lift. In addition the conventional tests, the effect of the temperature (25°C a 65°C) was analyzed and dynamic tests were accomplished. It was verified that in the range of shear rates and temperatures analyzed, the samples presented Newtonian behavior or slightly pseudoplastic, with exponential dependence of the viscosity with the temperature in the test range. As far as dynamic point of view, the oils present a dominant viscous component, becoming unnecessary an viscoelástico approach of the problem. The choice of the rheometer sensor has a decisive effect in the determination of the constituent law.*

**Key-Words:** *Rheology, Oil, Heavy, Petroleum, Artificial, Lift*