

## 4

### Caracterização do Corpo de prova e dos Fluidos

Neste Capítulo, serão mostrados os procedimentos experimentais utilizados para determinar as propriedades do corpo de prova e dos fluidos que serão utilizados nos experimentos (água, óleos, emulsões, solução água-carbopol, surfactante), estas propriedades foram determinadas experimentalmente. A metodologia utilizada, é baseada em estudos e experiências anteriores.

Serão determinadas as seguintes propriedades: Do corpo de prova: (1) volume poroso, (2) permeabilidade absoluta, (3) diâmetro médio de poro. Dos óleos: (1) viscosidade e (2) densidade. Das emulsões: (1) Concentração, (2) diâmetro médio de gota, (3) viscosidade, (4) densidade.

#### 4.1

##### Determinação das propriedades do corpo de prova

O corpo de prova utilizado nos experimentos é mostrado na Fig. 4.1.



Figura 4.1: Fotografia do corpo de prova mostrando suas dimensões.

Para determinar cada propriedade do corpo de prova, o seguinte procedimento foi utilizado.

### 4.1.1

#### Volume Poroso efetivo

A porosidade do corpo de prova proporcionado pela Petrobrás é  $\phi = 27.3\%$ , Neste trabalho foi feita uma nova medição da porosidade.

Dentre os vários métodos mencionados na sub-seção § 2.1.3 para determinar o volume poroso efetivo, o método de Barnes modificado [5] foi utilizado. A escolha foi baseada na disponibilidade de equipamentos.

Primeiramente o corpo de prova é submetido a um secagem durante 24 horas a temperatura de  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  num forno elétrico. Logo depois é pesado em uma balança eletrônica. O peso do corpo saturado com ar, chamado de **peso seco**, é de 149.81 g.

Agora, o corpo de prova é embebido em água, isto para preparar o corpo de prova e determinar o volume poroso, explicado com maior detalhe a seguir.

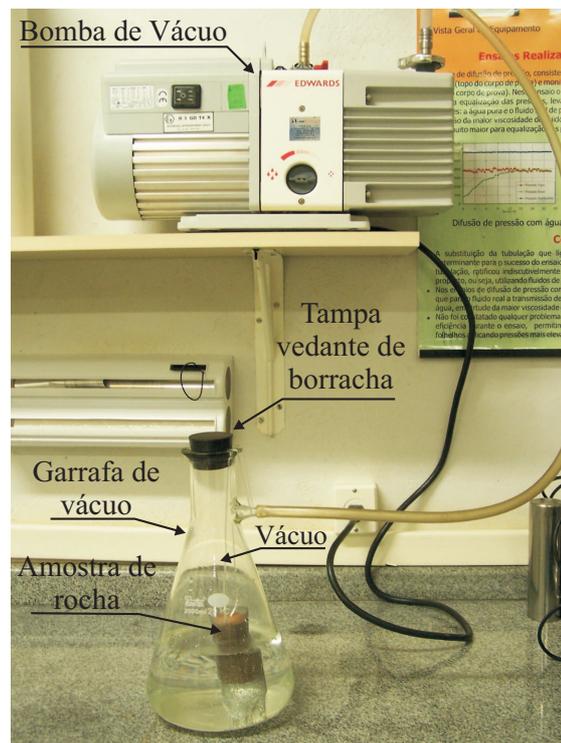


Figura 4.2: Fotografia do método utilizado para embeber o corpo de prova em água.

Para determinar o peso do corpo úmido, o corpo foi colocado numa garrafa com água destilada mas, a água não cobre completamente a rocha, como mostra a Fig. 4.2. A garrafa é vedada e submetida a uma pressão de vácuo (negativa) de  $3 \times 10^{-2}$  mbar, durante um tempo de 30 min. Logo dos 30 min, não se observam mais borbulhas de ar sair do corpo de prova e,

toma uma aparência de completamente úmida. Outro método de embeber o corpo de prova, é escoando água através de seu interior utilizando a câmara Hassler, mas, este processo é muito lento e não garante a saturação máxima do corpo de prova, como o método da garrafa aplicando vácuo.

O corpo é rápida mas cuidadosamente retirado da garrafa, secado superficialmente com uma toalha de papel e pesado, obtendo assim o peso do corpo embebido em água, chamado de **peso molhado** igual a 169.84 g.

O aumento do peso do corpo de prova é devido à água que ficou entre os poros da rocha de arenito, ao deslocar o ar que nela estava contido. A massa de água embebida no corpo de prova, é a diferença entre o peso molhado e o peso seco, portanto,  $m_a = 20.03$  g.

Como a massa específica da água destilada é  $1 \text{ g/cm}^3$ , e da eq. 2-3,  $V_a = V_p = 20.03 \text{ cm}^3$ .

Para conhecer o volume total,  $V_t$ , realizamos várias medições, tanto do diâmetro,  $D$  como do comprimento,  $L$  do corpo de prova, tabela 4.1. Obtendo um diâmetro médio  $\bar{D} = 37.60$  mm, e comprimento médio  $\bar{L} = 70.55$  mm.

D	L
37.57	70.41
37.60	70.39
37.65	70.60
37.62	70.62
37.60	70.74
37.57	—

Tabela 4.1: Dimensões do corpo de prova.

$$V_t = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (4-1)$$

Pelo tanto o volume total  $V_t$  do meio poroso é  $78.336 \text{ cm}^3$ .

Colocando estes valores na eq. 2-1, foi possível conhecer a porosidade do corpo de prova.

$$\phi = \frac{20.03}{78.336} = 25.6 \%$$

Este valor é próximo do valor proporcionado pela Petrobras, 27,3%.

### 4.1.2 Permeabilidade

A permeabilidade foi determinada utilizando água destilada como o fluido que escoava através do corpo de prova. A lei de Darcy indica que há direta relação entre a vazão e a gradiente de pressão através de um meio poroso [5].

Água foi injetada através do arenito a diferentes vazões. Como mostra a tabela a seguir, para cada vazão injetada, mede-se um diferencial de pressão.

$Q$ <i>ml/min</i>	$Q$ <i>m<sup>3</sup>/seg</i>	$P$ Psi	$P$ <i>kg/m.s<sup>2</sup></i>
1	1.66667E-08	0.8	6896.552
3	0.00000005	2.8	19310.345
5	8.33333E-08	4	27586.207
7	1.16667E-07	5.2	35862.069
8	1.33333E-07	5.75	39655.172

Tabela 4.2: Tabela das Vazões utilizadas e seus diferenciais de Pressões resultantes ao atravessar o meio poroso

Segundo Koederitz [5], a permeabilidade é determinada pelo coeficiente angular da reta que passa pelos pontos apresentados na tabela 4.2.

Com os dados da tabela, se construiu uma curva Q-P (Vazão - Pressão), apresentada na fig. 4.3.

Como mostra a Fig. 4.3, a reta  $y = a.x + b$  que melhor ajusta os dados (por mínimos quadrados) possui um coeficiente angular igual a  $3.602 \times 10^{-12}$ . Por tanto, da eq. 2-15 obtemos:

$$k = \frac{a\mu L}{A} \quad (4-2)$$

onde:

$$a = 3.602 \times 10^{-12}$$

$$\mu = 1 \text{ cp} = 0.001 \text{ Kg/m.s.}$$

$$L = 0.07055 \text{ cm.}$$

$$A = 0.001110365 \text{ cm}^2$$

Então a permeabilidade do meio poroso é  $k = 2.289 \times 10^{-13} \text{ m}^2$  Em unidade técnica (miliDarcy), é dada por:

$$k = 231.9 \text{ mD}$$

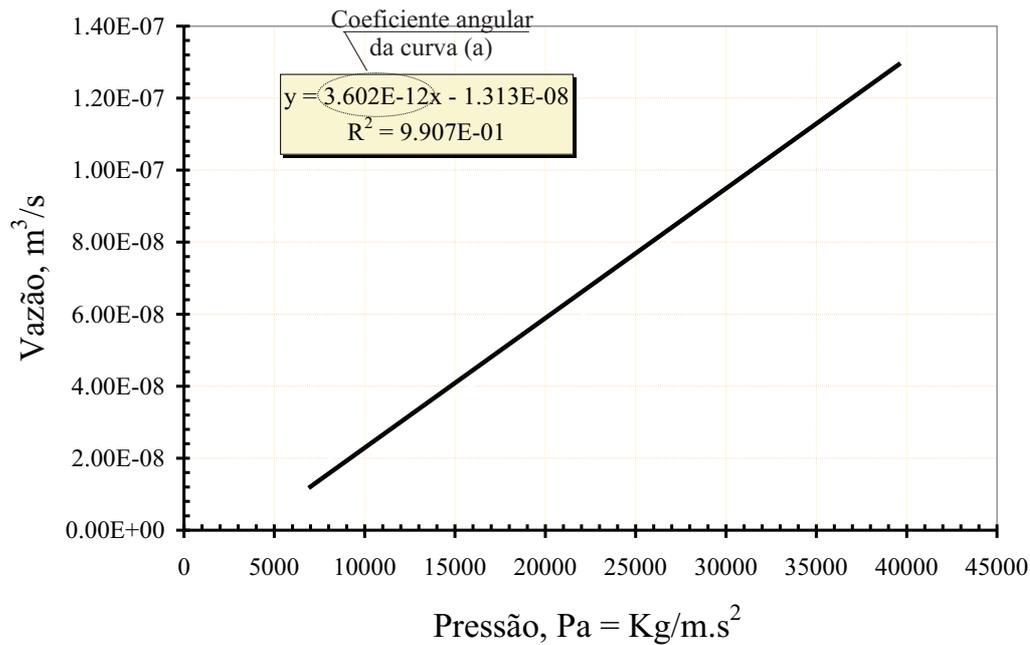


Figura 4.3: Curva de Vazão-Diferencial de Pressão.

Esta permeabilidade esta de acordo com as referencias para este tipo de material com porosidade em torno de 26 %.

#### 4.1.3 Saturação de óleo

Para determinar a saturação do óleo contido no corpo de prova  $S_o$ , primeiramente precisamos pesar a amostra de rocha depois do processo de embebição em água destilada (peso molhado). Também precisamos obter o peso do corpo de prova depois do processo de saturação com óleo. A saturação de óleo no corpo de prova, é obtida mediante a seguinte equação do balanço de massas:

$$m_{o+a} = \rho_o \cdot S_o \cdot V_p + \rho_a (1 - S_o) V_p \quad (4-3)$$

onde,  $m_{o+a}$  é a massa do fluido contido no corpo de prova, óleo mais água. Pode ser obtido, da diferença de massas entre o peso do corpo de prova seco (sub-seção 4.1.1) e o peso do corpo de prova depois do processo de saturação em óleo,  $m_{o+a} = \text{peso total} - \text{peso seco}$ .

$V_p$  é o volume poroso efetivo do corpo de prova,  $\rho_a$  é a massa específica da água,  $\rho_o$  é a massa específica do óleo.

Modificando a eq. 4-3 obtemos:

$$S_o = \frac{\frac{m_{o+a}}{V_p} - \rho_a}{\rho_o - \rho_a} \quad (4-4)$$

A saturação de óleo no corpo de prova, é determinada também depois do deslocamento do óleo por injeção de água no corpo de prova e, também depois do deslocamento do óleo por injeção de emulsões.

#### 4.1.4 Diâmetro de poro

É importante conhecer o diâmetro de poro, já que com esse dado decidiremos o tamanho de gota das emulsões que serão preparadas. Uma emulsão com gotas muito menores do que o tamanho dos poros não conseguirá bloquear os mesmos que já foram invadidos pela água.

Portanto, utilizando-se um microscópio ótico e uma câmera digital adaptada no microscópio, foram obtidas várias fotos da superfície externa do corpo de prova. As fotos conseguidas são guardadas e visualizadas no computador, e com a ajuda do software AxioVision é possível fazer uma estimativa grossa dos Tamanhos de poros exteriores, aparentes. Para obter um diâmetro médio, precisamos tomar as medidas de vários poros em cada foto, como mostra a Fig. 4.4. O procedimento é muito aproximado, mas fornece uma ideia das dimensões dos poros.

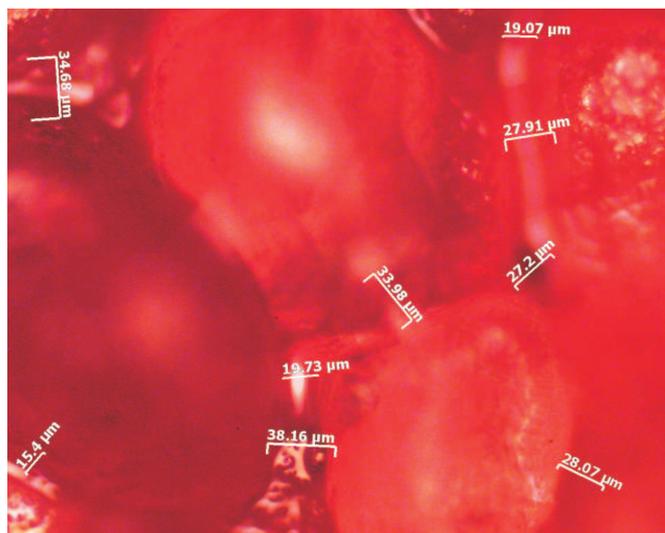


Figura 4.4: Fotografia mostrando as medidas dos diâmetros dos poros no corpo de prova obtidas nesta foto.

Como mostra a Fig. 4.4, foram obtidos vários tamanhos aparentes de poros, na Fig. 4.5 são mostrados os valores e a repetição dos tamanhos de poros aparentes encontrados.

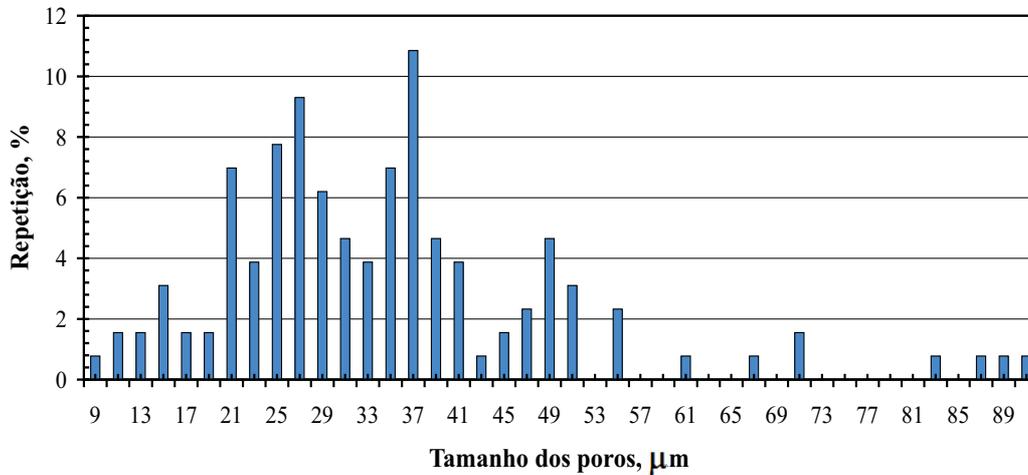


Figura 4.5: Diagrama mostrando os valores e a repetição dos tamanhos de poros aparentes do corpo de prova.

O tamanho médio aparente de poro do corpo de prova utilizado neste projeto, é:  $\bar{D} = 30 \mu\text{m}$ .

#### 4.1.5

##### Velocidade média do fluido através corpo de prova

Para descobrir a velocidade média com a que o fluido atravessa o corpo de prova, utilizamos a seguinte equação.

$$v_m = \frac{q}{A_{PTot}} \quad (4-5)$$

Onde, a  $A_{PT}$  é a área porosa transversal do corpo de prova e é igual à Área trasversal  $A = 38 \text{ mm}^2$  pela porosidade da rocha  $\phi = 27\%$ .

$$v_m = 8.16 \times 10^{-7} \text{ m/s} = 7.056 \text{ cm/dia.}$$

Esta velocidade é razoável, posto que a velocidade de fluxo media num reservatório, é de 1 pé/dia = 26 cm/dia [3]. Como não temos um conhecimento detalhado do corpo de prova, se tentava evitar algum risco de fraturar o corpo de prova pelo aumento da pressão ao injetar o óleo e as emulsões.

#### 4.1.6 Taxa de cisalhamento num poro

Para determinar a taxa de cisalhamento à que estão submetidos os fluidos através do meio poroso, precisamos conhecer o que acontece quando um fluido passa entre dois grãos da rocha. A Fig. 4.6 apresenta um esquema desta situação.

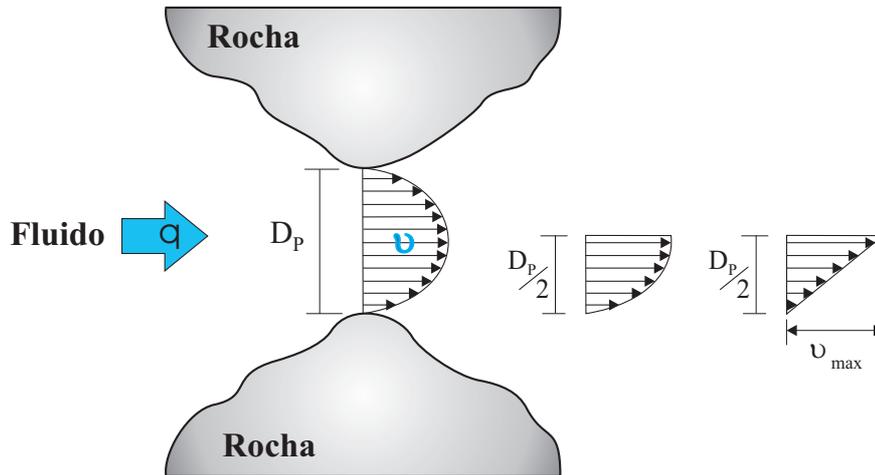


Figura 4.6: Diagrama mostrando a diferença de velocidades que aparecem quando um fluido escoar entre dois grãos de rocha.

O fluido que está mais próximo da parede da rocha, escoar com menor velocidade do que o fluido que está mais afastado das paredes.

Conhecendo o diâmetro de poro e a velocidade média com a que o fluido atravessa o poro, podemos determinar a taxa de cisalhamento.

$$\dot{\gamma} = \frac{v_m}{D_P/2} \quad (4-6)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{8.16 \times 10^{-7} \text{ m/s}}{15 \mu\text{m}} = 0.0544 \frac{1}{\text{s}}$$

Então a taxa de cisalhamento nos poros é de  $\dot{\gamma} = 0.0544 \frac{1}{\text{s}}$ . Este valor vai-nos servir também no momento de determinar a viscosidade de algum fluido não newtonianos, como o caso das nossas emulsões na sub-seção § 4.3.2.

## 4.2

### Líquidos utilizados

Em todo o processo experimental, foram utilizados vários fluidos, listados na Tabela 4.3.

#	Líquido
L1	água destilada
L2	óleo Talpa 30
L3	óleo Tivela 460
L4	emulsão 30% óleo - 70% água com $\bar{D}_1$
L5	emulsão 30% óleo - 70% água com $\bar{D}_2$
L6	solução água-carbopol
L7	Surfactante Triton X-100

Tabela 4.3: Líquidos utilizados.

Onde:

$\bar{D}_1$  é o Diâmetro médio de gota =  $5 \mu m$  e,

$\bar{D}_2$  é o Diâmetro médio de gota =  $20 \mu m$ .

Cada um dos fluidos utilizados teve uma função específica nos experimentos. A água foi utilizada para embeber o corpo de prova, para realizar a recuperação por injeção de água e para preparar a solução água-carbopol. O óleo Talpa 30 foi utilizado para saturar o corpo de prova. O óleo Tivela 460 foi utilizado para preparar as emulsões, juntamente com a solução água-carbopol e o surfactante.

## 4.3

### Caracterização dos líquidos

Nesta seção, serão determinadas as propriedades que precisamos conhecer dos fluidos utilizados nos experimentos. Mas, primeiramente será apresentado num quadro o resumo dos resultados obtidos. As viscosidades das emulsões foram determinadas na taxa de cisalhamento que se encontra na sub-seção 4.1.6,  $\dot{\gamma} = 0.0544 \frac{1}{s}$ .

#	Líquido	Densidade (g/ml)	Viscosidade (mPa-s)
L1	água destilada - 20 °C	0.9988	1.0030
L2	óleo Talpa 30 - 25 °C	0.9101	410
L3	óleo Tivela 460 - 25 °C	0.998	1000
L4	emulsão 30% óleo - 70% água $\bar{D}_1$	0.9992	300
L5	emulsão 30% óleo - 70% água $\bar{D}_2$	0.9992	120
L6	solução água-carbopol	0.9998	—
L7	surfactante Triton X-100	1.065	—

Tabela 4.4: Caracterização dos líquidos utilizados.

### 4.3.1

#### Óleo, água e solução água-carbopol

Para determinar as densidades dos fluidos, foi utilizado um picnômetro de capacidade volumétrica conhecida, o que é pesado com e sem o fluido a testar.

Para determinar a viscosidade dos óleos, foi utilizado um reômetro T.A. Rheometric Scientific, modelo Ares L.S. Ares, com geometria de cilindros concêntricos (Couette) [7].

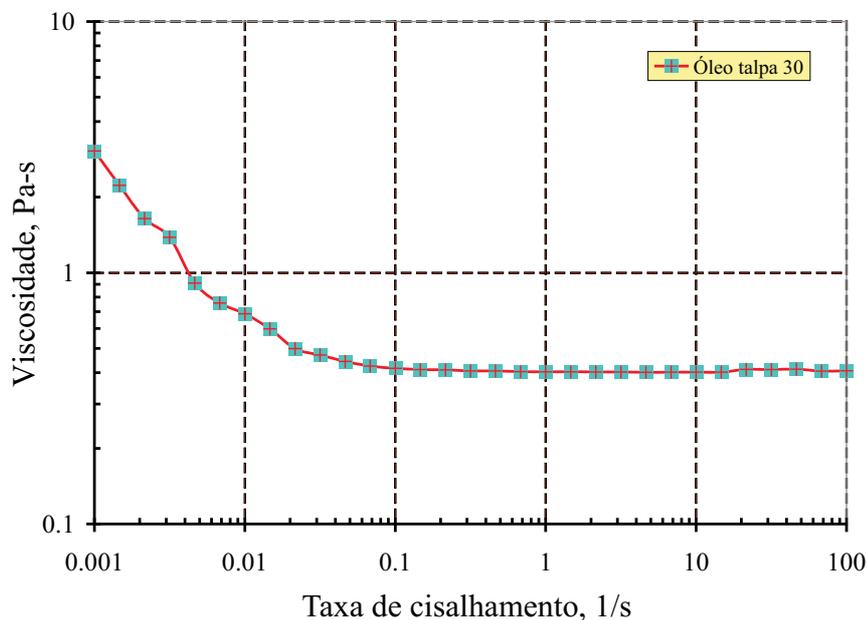


Figura 4.7: Viscosidade do óleo Talpa 30, utilizado para saturar o corpo de prova.

Como se observa nos testes do óleo e água a viscosidade não varia com o aumento da taxa de cisalhamento, por ser estes fluidos Newtonianos.

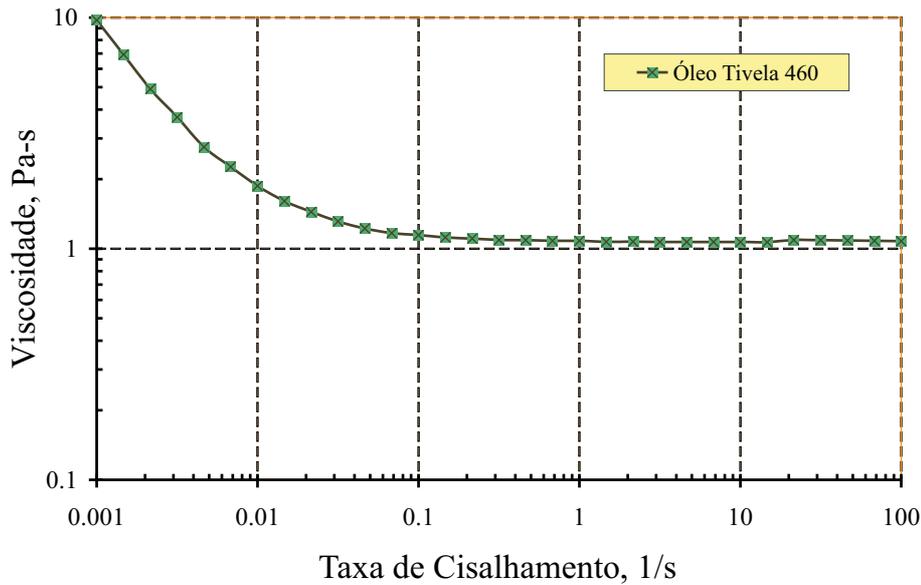


Figura 4.8: Viscosidade do óleo Tivela 460, utilizado na preparação das emulsões.

Para preparar a solução água-carbopol, foi utilizado 0.1% de Carbopol e 99.9% água destilada.

### 4.3.2 Emulsões

Para preparar as emulsões, foi utilizado 30% de óleo Tivela 460, 70% da solução água-carbopol e 0.013% de Triton X 100. O Triton X 100 é o surfactante utilizado para possibilitar a formação de gotas finas e minimizar a coalescência das gotas.

O diâmetro médio de gotas das emulsões, foi determinado tirando varias fotos das emulsões e medindo os seus tamanhos de gotas, da mesma maneira que se determinou o diâmetro de poro, na sub-seção § 4.1.4. Foram preparadas duas emulsões, com diâmetro médio de gotas de  $\bar{D}_1 = 5 \mu\text{m}$  e  $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$ .

Para determinar a viscosidade das emulsões, foi utilizado também o reômetro T.A. Rheometric Scientific, modelo Ares L.S., mas a geometria utilizada para estes casos foi de cilindros concêntricos Grooved Couette.

As emulsões são fluidos não newtonianos, pelo que, a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, como se observa nos gráficos apresentados.

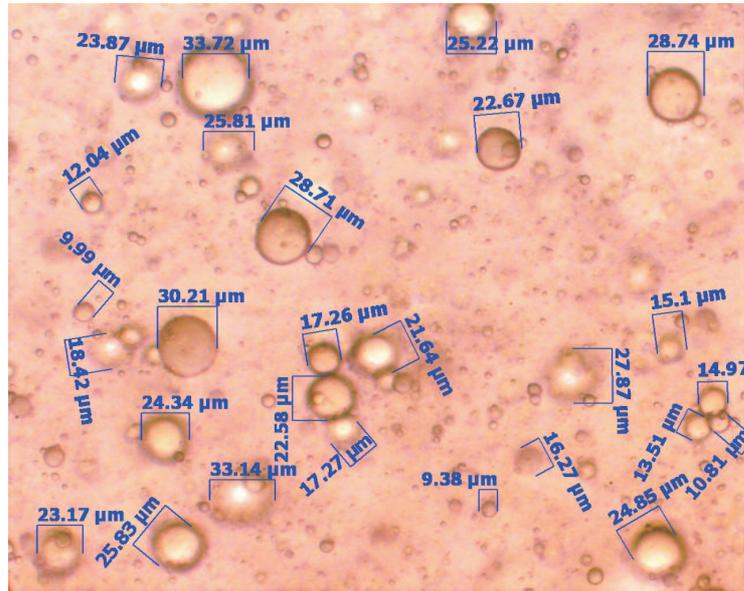


Figura 4.9: Fotografia mostrando as medidas de diâmetro das gotas da emulsão  $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$ .

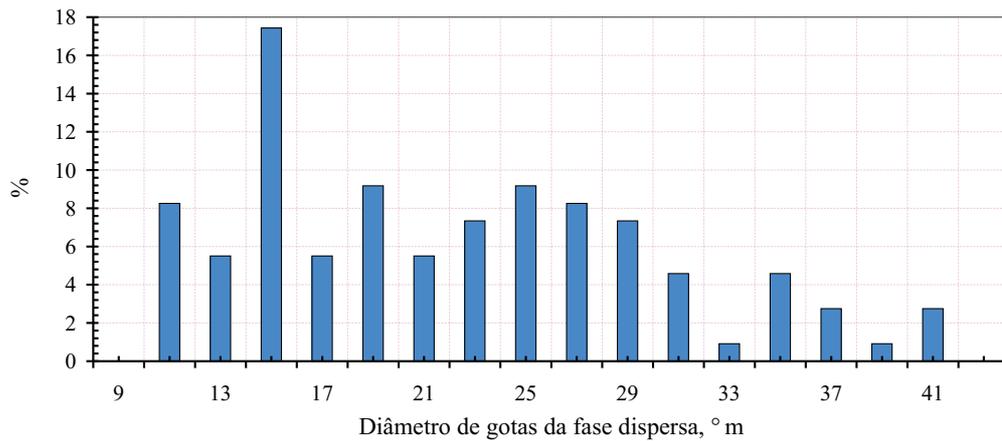


Figura 4.10: Diagrama mostrando a média do diâmetro das gotas da emulsão  $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$ .

Para uma taxa de cisalhamento de  $\dot{\gamma} = 0.0544 \frac{1}{s}$ , obtemos que a viscosidade  $\mu = 0.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  na emulsão de  $\bar{D}_1 = 5 \mu\text{m}$ , e  $\mu = 0.12 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  na emulsão de  $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$ .

Como esperado, a emulsão com menor tamanho de gota apresenta uma viscosidade mais alta.

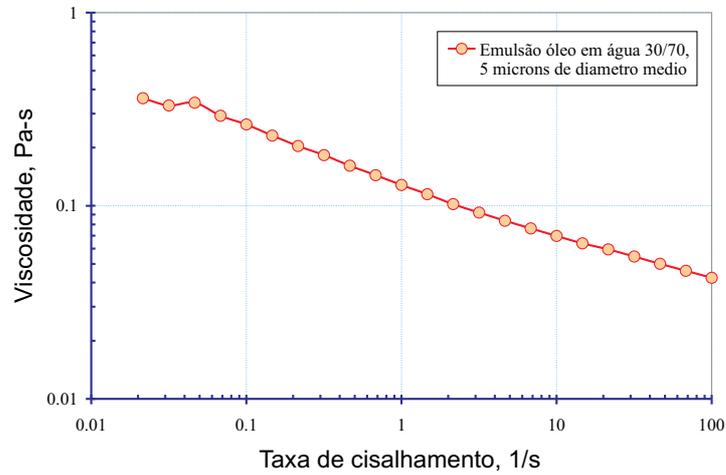


Figura 4.11: Viscosidade da emulsão com  $\bar{D}_1 = 5 \mu\text{m}$ .

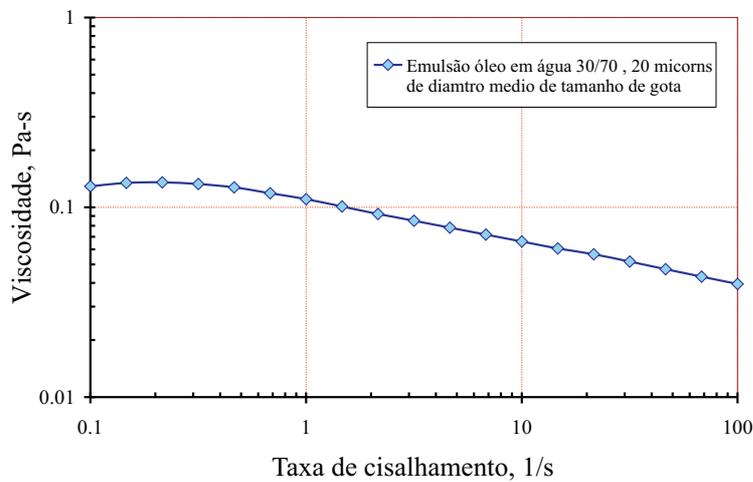


Figura 4.12: Viscosidade da emulsão com  $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$ .