

4 Resultados

4.1 Caracterização reológica

Materiais complexos, tais como fluidos de perfuração, óleos parafínicos gelificados, cimento, soluções poliméricas, suspensões, emulsões e espumas em geral, apresentam um comportamento reológico não newtoniano. Por isso é importante o conhecimento da reologia desses materiais para sua produção, formulação, aplicação e processamento (29).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312468/CA

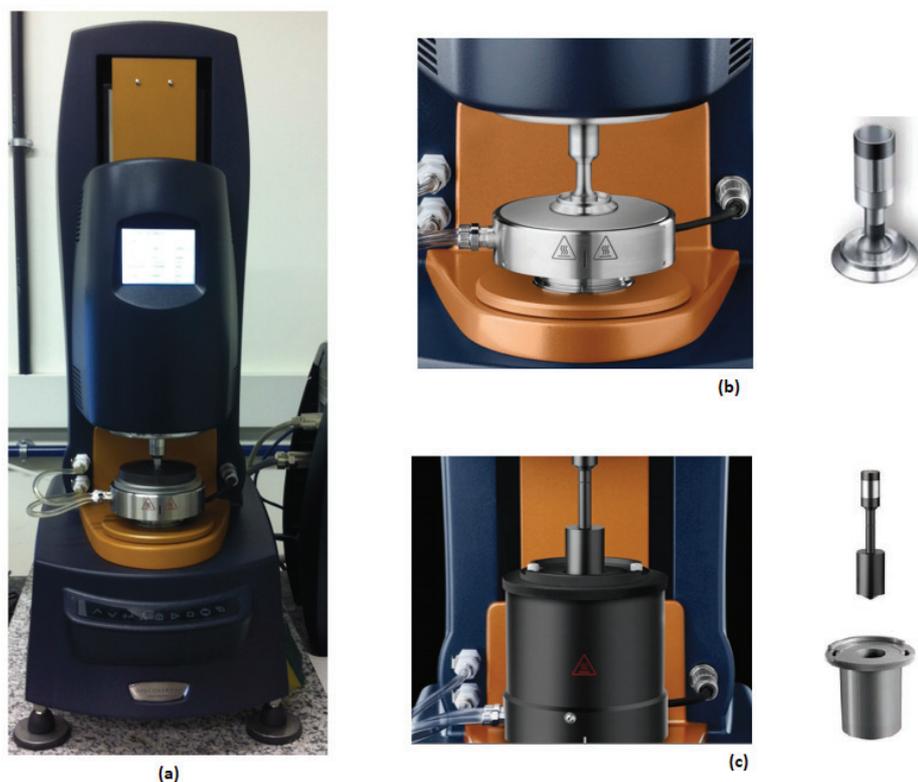


Figura 4.1: (a) Reômetro DHR (*Discovery Hybrid Rheometers*) da *TA Instruments* (b) *Peltier* de placas e geometria cônica de 60 mm e 1° (c) *Peltier* de cilindros concêntricos e geometria de cilindros concêntricos.

O reômetro usado para obter a caracterização reológica dos fluidos não newtonianos foi o *Discovery Hybrid Rheometers* da *TA Instruments*. As geometrias utilizadas foram a cônica de diâmetro 60 mm e ângulo de 1°, e a de

cilindros concêntricos (*couette*) (Figura 4.1). A última foi utilizada para taxas de cisalhamento mais altas, 100 a 1000 1/s. A geometria cônica foi escolhida após os testes realizados com a mesma terem sido comparados a geometria ranhurada, que é indicada para materiais que apresentam deslizamento. Como a amostra não apresentou deslizamento a melhor escolha foi a cônica, já que esta é a única geometria que mantém a taxa de cisalhamento constante em todos os pontos da amostra.

4.1.1

Óleo mineral

Na Figura 4.2 encontra-se uma *flow curve*, curva de escoamento, do óleo mineral, realizada no reômetro Physica MCR do fabricante Anton-Paar com a geometria *couette*, cilindros concêntricos, a uma temperatura de 25 °C. Como esperado, já que se trata de um fluido newtoniano, a viscosidade é independente da taxa de cisalhamento, ou seja, a mesma é constante. Observou-se que abaixo de $\dot{\gamma} = 10s^{-1}$ os torques atingem níveis inferiores ao mínimo torque confiável para esse reômetro, portanto os resultados abaixo desse torque foram desprezados. Assim como na maioria dos fluidos newtonianos, a viscosidade do óleo mineral varia muito com a temperatura (Figura 4.3) e pressão.

Outro teste realizado foi o *stress sweep*, ou varredura da amplitude de tensão, como pode ser visto na Figura 4.4. Observa-se, como esperado, que para fluidos newtonianos $G' = 0$, módulo de armazenamento (elástico ou *storage modulus*), enquanto $G'' \neq 0$, módulo de dissipação (viscoso ou *loss modulus*). Quando tem-se apenas a resposta viscosa:

$$G' = 0$$

$$G'' = \eta \cdot \omega = 0,133 \cdot 6,283 = 0,83Pa \quad (4-1)$$

O módulo viscoso calculado pela Equação 4-1 ($G'' = 0,83Pa$) e o obtido no teste reológico de varredura da amplitude da tensão ($G'' = 0,79$) são bem próximos, com um erro de 5,50%.

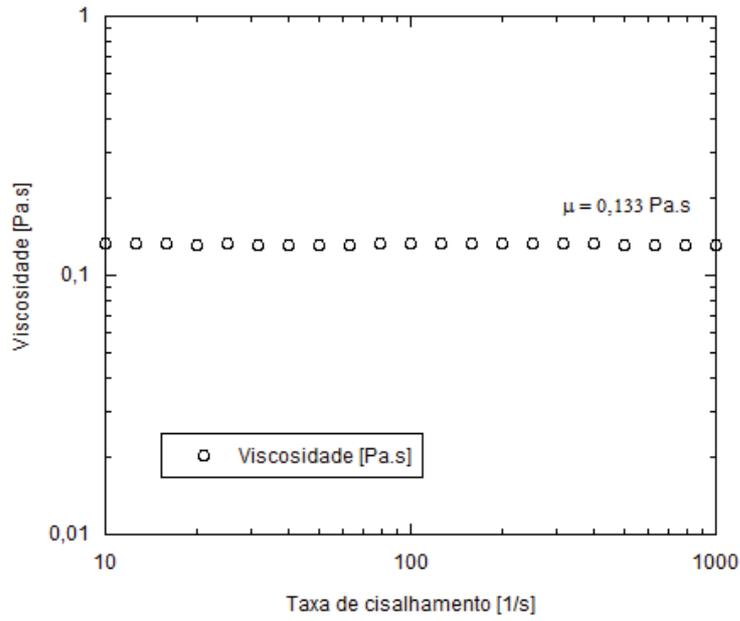


Figura 4.2: Curva de escoamento (*Flow curve*) do óleo mineral - $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

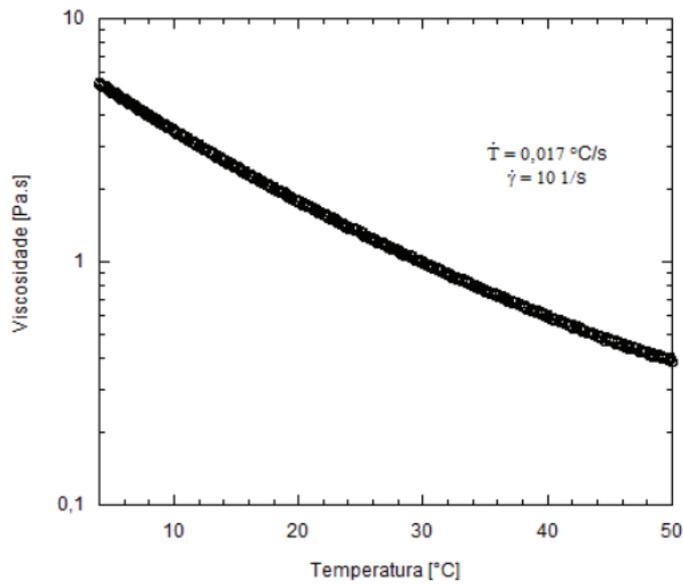


Figura 4.3: Rampa de temperatura (*Temperature ramp*) do óleo mineral.

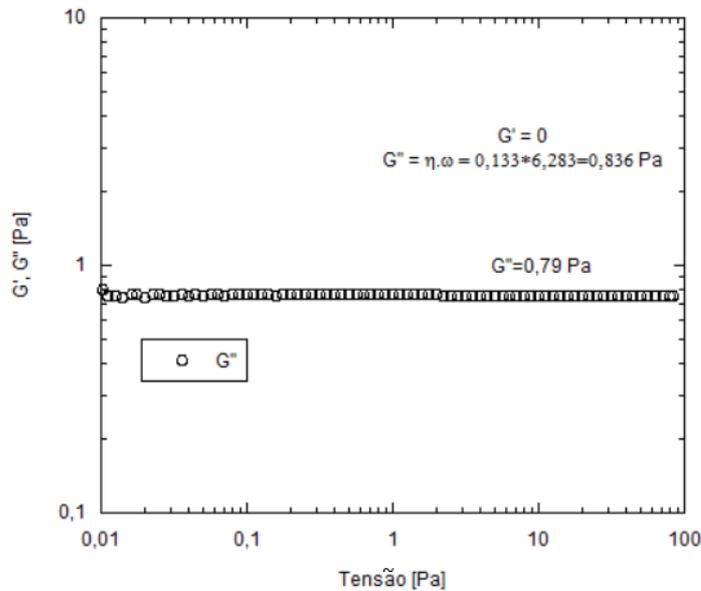


Figura 4.4: Varredura da amplitude de tensão (*Stress sweep*) do óleo mineral $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.1.2 Poliacrilamida e goma xantana

O teste de varredura da amplitude de tensão ou da deformação é um teste oscilatório utilizado para avaliar as propriedades viscoelásticas de um material. É tradicionalmente utilizado para analisar os limites da região viscoelástica linear (momento no qual G' e G'' deixam de ser paralelos com a varredura de tensão/deformação para uma frequência constante).

Para determinar a região viscoelástica linear, uma amplitude de tensão/deformação constante é aplicada de forma senoidal. Enquanto não há mudança na microestrutura, G' e G'' mantêm-se constante. Após um valor crítico, ocorre um colapso da microestrutura e os valores de G' e G'' são alterados. Obtida essa região de estabilidade, ou seja, região viscoelástica linear, todos os demais testes oscilatórios (varredura da frequência, varredura do tempo e varredura da temperatura) devem ser realizados nessa faixa (28).

As Figuras 4.5 e 4.6 são testes de varredura da tensão da poliacrilamida e da goma xantana, respectivamente. A partir desses gráficos é possível determinar a região viscoelástica linear.

O colapso da microestrutura em fluidos viscoplásticos também representa o alcance de uma tensão superior a tensão limite de escoamento. Sendo assim, esse teste apresenta um bom "chute" inicial para a tensão limite de escoamento (28).

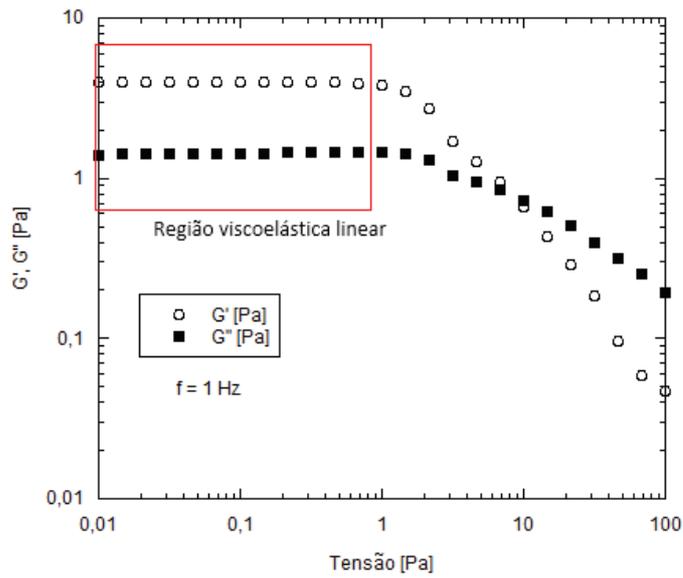


Figura 4.5: Varredura da amplitude de tensão (*Stress sweep*) da poliacrilamida 0,25%.

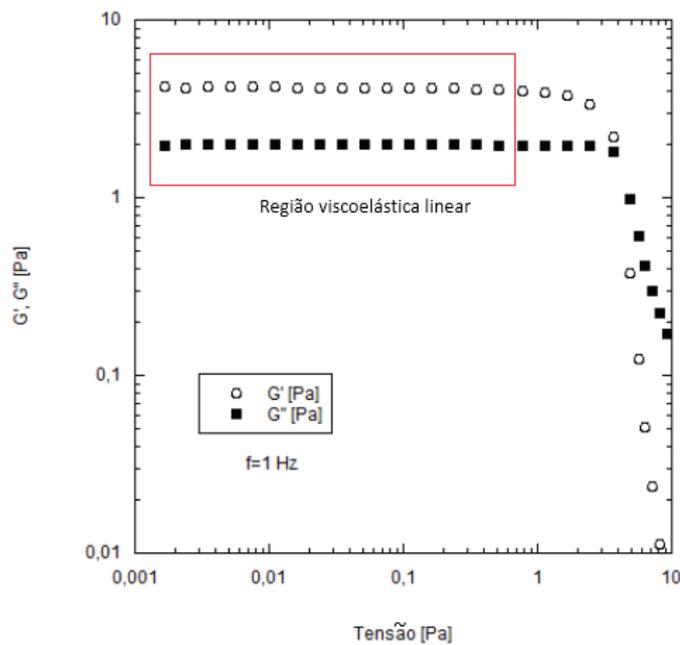


Figura 4.6: Varredura da amplitude de tensão (*Stress sweep*) da goma xantana 0,4%.

O teste de varredura de tempo é um teste oscilatório que consiste em submeter a amostra a uma tensão de cisalhamento ou deformação na forma senoidal, com frequência e amplitude constantes. Deve-se verificar que o teste seja realizado dentro da região viscoelástica linear.

Esse teste é realizado para observar a existência de mudanças na microestrutura ao longo do tempo. As modificações podem ser ocasionadas por degradação de cadeias poliméricas, evaporação de solvente, tempo de cura, tixotropia, sedimentação ou qualquer outra reação que acarrete na alteração da rigidez ou consistência do material (28).

A análise das curvas de módulo de armazenamento (G') e módulo de dissipação (G'') em função do tempo, possibilita analisar a modificação da estrutura do material.

As Figuras 4.7 e 4.8 são testes de varredura de tempo da poliacrilamida e da goma xantana, respectivamente. Em cada fluido foi submetida uma tensão de 0,1 Pa e uma frequência de 1 Hz durante 1 hora. Observa-se que para ambos os casos as mudanças estruturais não foram muito significativas, porém sendo mais criterioso pode-se dizer que após 1000 s os módulos de armazenamento e de dissipação modificam.

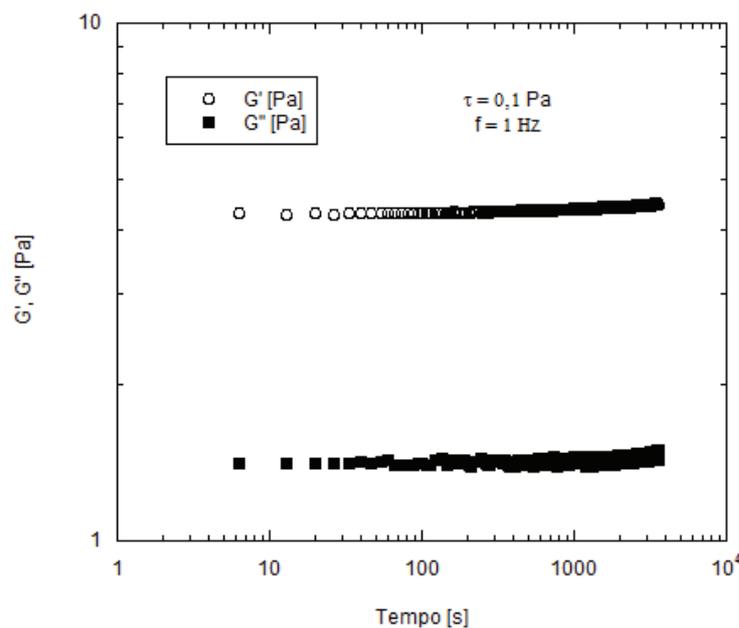


Figura 4.7: Varredura de tempo (*Time sweep*) da poliacrilamida 0,25%.

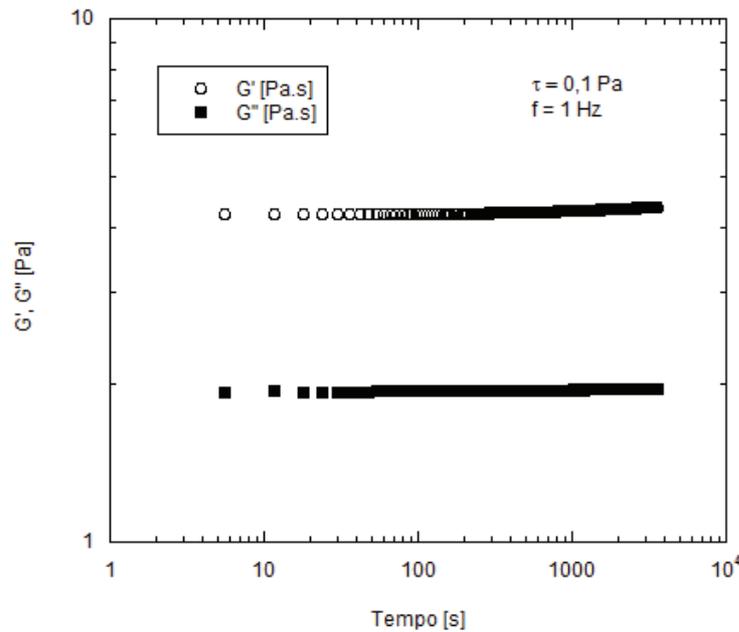


Figura 4.8: Varredura de tempo (*Time sweep*) da goma xantana 0,40%.

O teste de varredura de frequência é um teste oscilatório no qual se aplica uma tensão de cisalhamento ou uma deformação que varia senoidalmente com o tempo e se mantém a amplitude de deformação constante, variando a frequência. É importante ressaltar que a amplitude de tensão (ou da deformação) deve ser escolhida de tal forma que o fluido permaneça dentro da faixa de viscoelasticidade linear em todo o intervalo de frequência aplicada.

Várias propriedades reológicas podem ser obtidas nesse teste, entretanto o resultado mais importante para a avaliação de materiais é a comparação entre as curvas do módulo de armazenamento (G') e do módulo dissipativo (G'') versus a frequência (ω). A partir desse resultado é possível analisar as respostas elásticas e viscosas do fluido em estudo.

As Figuras 4.9 e 4.10 são testes de varredura de frequência da poliacrilamida e da goma xantana, respectivamente. A tensão constante imposta foi de 0,1 Pa, em ambos os fluidos, já que as regiões viscoelásticas lineares são próximas. A limitação das frequências ocorre devido ao torque mínimo e ao torque máximo do reômetro, sendo assim a frequência mínima é 0,01 Hz e a máxima 10 Hz. Para essa faixa de frequência observa-se que ambos os fluidos, poliacrilamida e goma xantana, apresentam um comportamento no qual a natureza elástica prevalece sobre a natureza viscosa ($G' > G''$). Quanto maior for G' e menor G'' , mais estruturado se encontra o material.

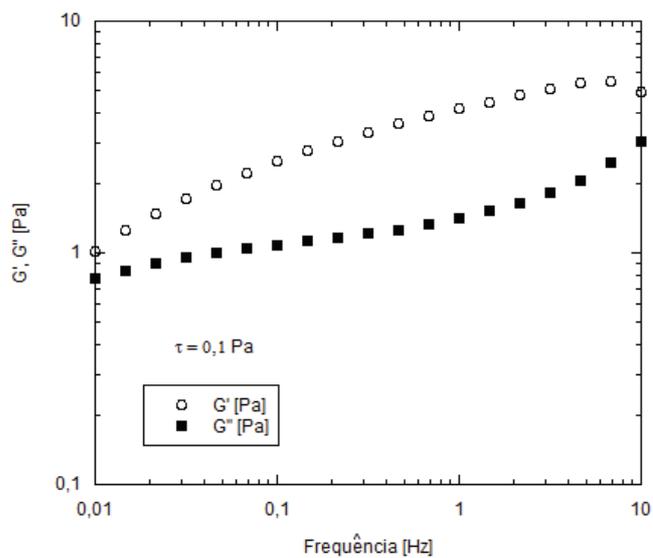


Figura 4.9: Varredura de frequência (*Frequency sweep*) da poliacrilamida 0,25%.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1312468/CA

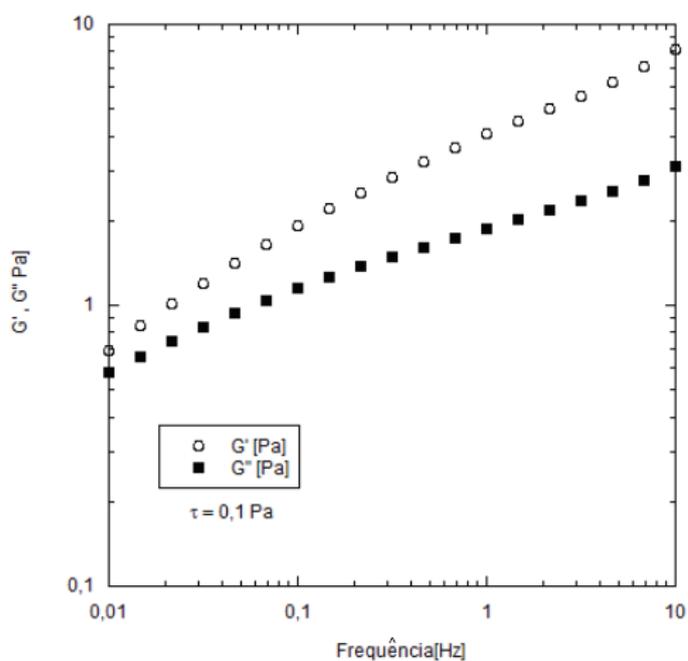


Figura 4.10: Varredura de frequência (*Frequency sweep*) da goma xantana 0,4%.

A resposta mais comum de G' e G'' para exemplos reais de líquidos não newtonianos é mostrada na Figura 4.11. Os valores exatos dos módulos e sua posição no domínio da frequência serão necessariamente diferentes. No entanto, o comportamento qualitativo indicado geralmente é visto se os dados estiverem disponíveis em uma ampla faixa de frequência. As regiões especificadas na Figura 4.11 são diferenciadas e nomeadas como:

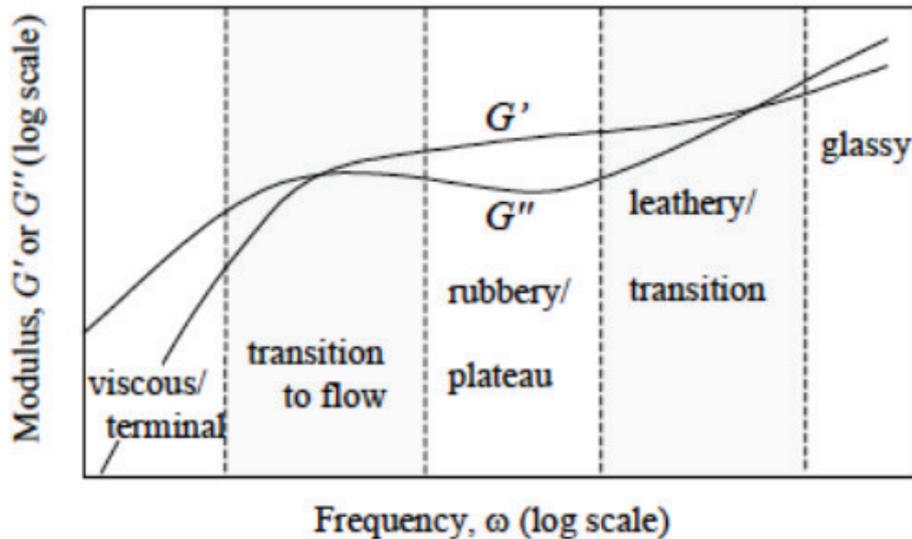


Figura 4.11: O comportamento de fluido não newtoniano viscoelástico generalizado variando a frequência.

Nos testes a taxa de cisalhamento constante, como o nome já sugere, aplica-se uma taxa de cisalhamento constante e observa-se a variação da tensão de cisalhamento ou viscosidade com o tempo. Quando não houver mais variação temporal da tensão, determina-se o tempo correspondente ao regime permanente (t_e). Esse tempo normalmente é da mesma ordem do inverso da taxa de cisalhamento imposta ($t_e \approx 1/\dot{\gamma}$) (28).

Esse teste é importante pois a partir dele é possível determinar o tempo mínimo para garantir que todos os pontos da curva de escoamento estejam em equilíbrio (regime permanente).

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam os gráficos de taxa de cisalhamento constante da poliacrilamida e da goma xantana, respectivamente, da menor taxa de cisalhamento, já que esse é o pior caso. Analisando os dois gráficos percebe-se que o tempo correspondente ao regime permanente, t_e , é aproximadamente 400 s. Ou seja, o tempo necessário para medir o valor "correto", constante, da tensão é de 400 s. Esse será o tempo necessário para medir cada ponto da curva de escoamento que será explicada a seguir.

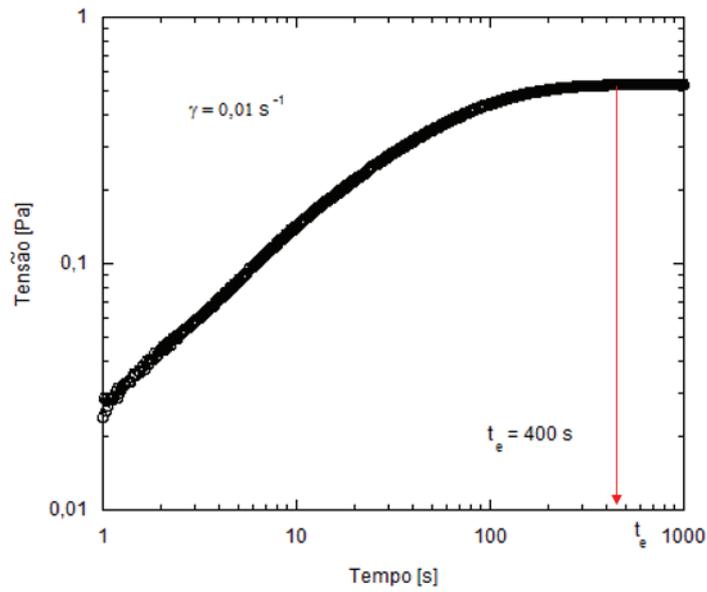


Figura 4.12: Taxa de cisalhamento constante - $\dot{\gamma} = 0,011/s$ da poliacrilamida 0,25%.

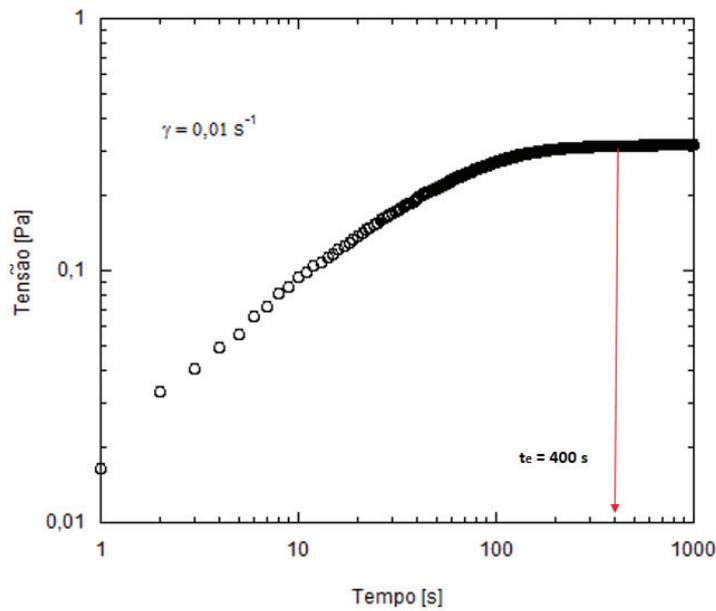


Figura 4.13: Taxa de cisalhamento constante - $\dot{\gamma} = 0,011/s$ da goma xantana 0,40%.

A curva de escoamento é o gráfico de tensão por taxa de cisalhamento (ou viscosidade por taxa de cisalhamento) em que todos os pontos devem estar em equilíbrio (regime permanente), conforme mencionado anteriormente. Essa é a informação mais básica a respeito de um fluido e uma das mais usadas na prática de engenharia (28).

Nas Figuras 4.14 e 4.15 estão os gráficos de curva de escoamento da poliacrilamida e da goma xantana, respectivamente. Nesses mesmos gráficos encontram-se também os testes de taxa de cisalhamento constante (0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000) 1/s. Observa-se que os testes de taxa de cisalhamento constante e a curva de escoamento coincidiram, significando que todos os pontos da curva de escoamento foram medidos em regime permanente.

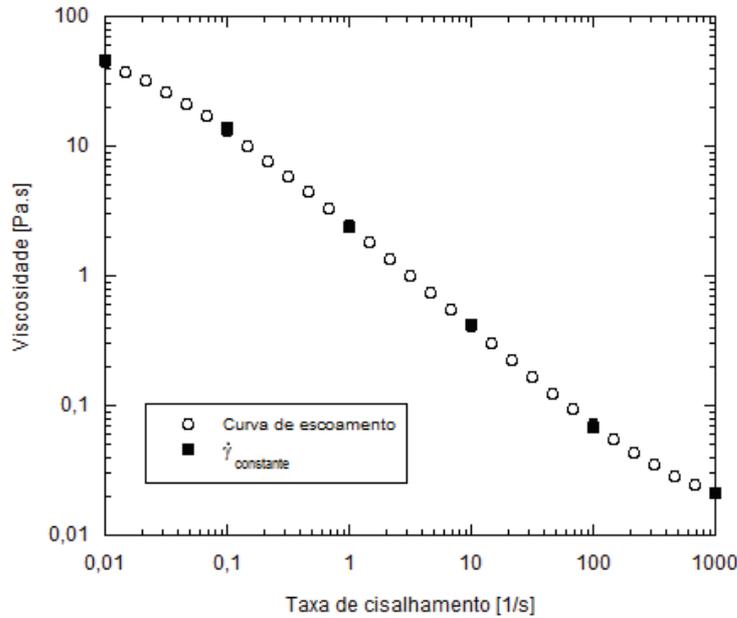


Figura 4.14: Curva de escoamento (*Flow curve*) da poliacrilamida 0,25%.

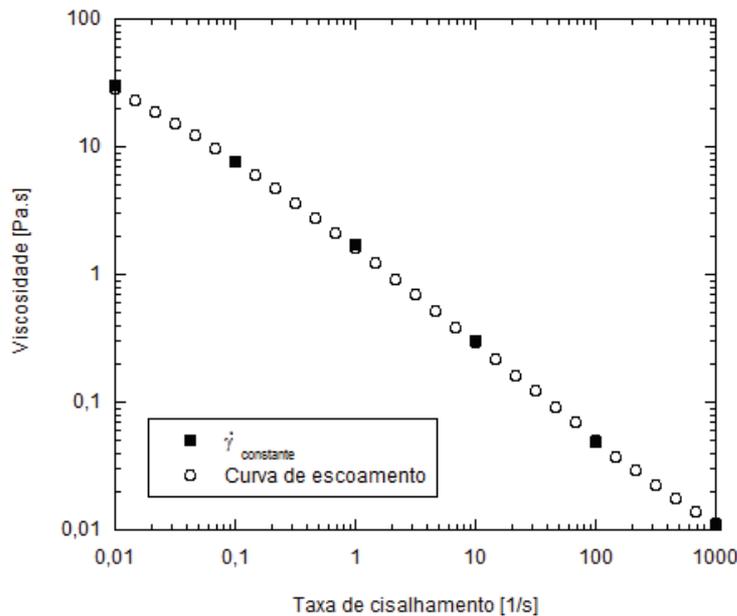


Figura 4.15: Curva de escoamento (*Flow curve*) da goma xantana 0,40%.

A poliacrilamida é um fluido não newtoniano modelado por Carreau-Yasuda. Como a modelagem é um pouco mais complicada utilizando esse modelo, para a faixa utilizada nos testes de visualização (1 a 1000 1/s) será considerado um fluido modelado por *power-law*, Figura 4.16. Essa aproximação não é boa para taxas de cisalhamento muito baixas e muito altas. A mesma aproximação foi feita com a goma xantana, porém o resultado foi melhor, como pode ser visto na Figura 4.17.

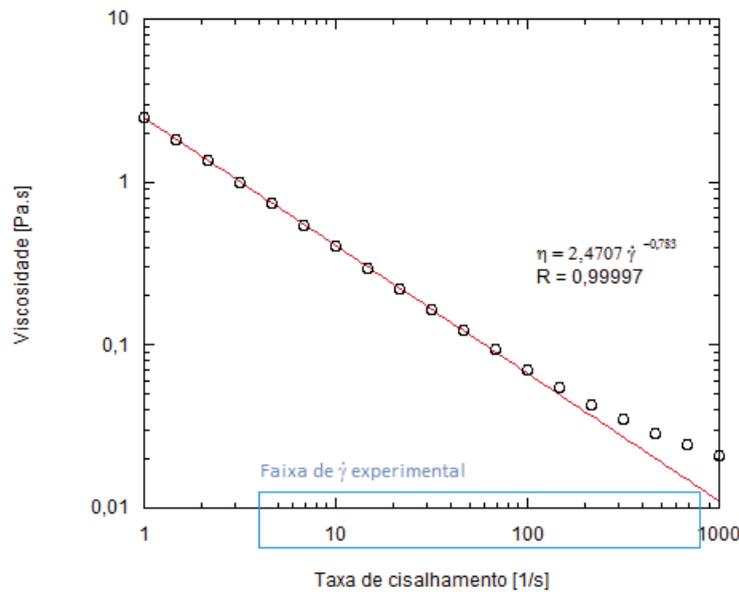


Figura 4.16: Curva de escoamento da poliacrilamida modelada por *power law*.

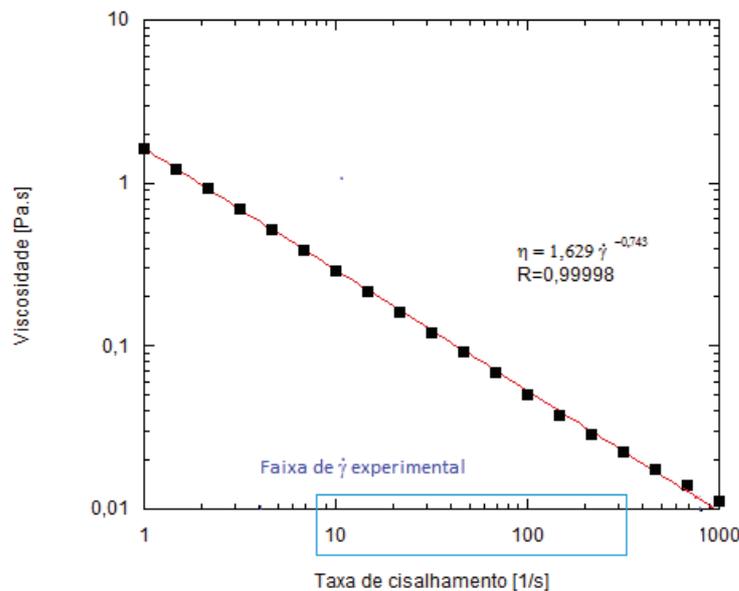


Figura 4.17: Curva de escoamento da goma xantana modelada por *power law*.

Tabela 4.1: Tabela de resumo da caracterização reológica da poliacrilamida e da goma xantana.

	Índice de consistência (k)	Índice de comportamento (n)
Poliacrilamida	2,471	0,217
Goma xantana	1,629	0,257

Uma diminuição gradual da viscosidade sob uma tensão de cisalhamento seguida por uma recuperação gradual da estrutura quando esta tensão é removida é chamado tixotropia. De uma maneira geral e mais conhecida a tixotropia é a variação da viscosidade com o tempo. O comportamento oposto, envolvendo um aumento gradual da viscosidade, sob tensão, seguido de recuperação, é chamado de reopexia ou anti-tixotropia. Tixotropia ocorre em circunstâncias nas quais o fluido tem um comportamento pseudoplástico, já os reopéticos, geralmente, estão associados a fluidos dilatantes (1).

Os melhores testes para se medir corretamente a tixotropia são aqueles nos quais a amostra a ser testada é submetida a uma alta taxa de cisalhamento até o equilíbrio ser obtido, e depois rapidamente, quanto possível, a taxa de cisalhamento é alterada para um outro valor menor, como pode ser visto na Figura 4.18. A maneira como a microestrutura se recupera determinará se há ou não a presença de tixotropia.

Havendo a ocorrência de tixotropia o histórico de escoamento torna-se importante para se prever os possíveis problemas relacionados a ele. Por exemplo, o escoamento de um fluido tixotrópico em um duto longo é complicado pela possibilidade de mudança de viscosidade ao longo do duto.

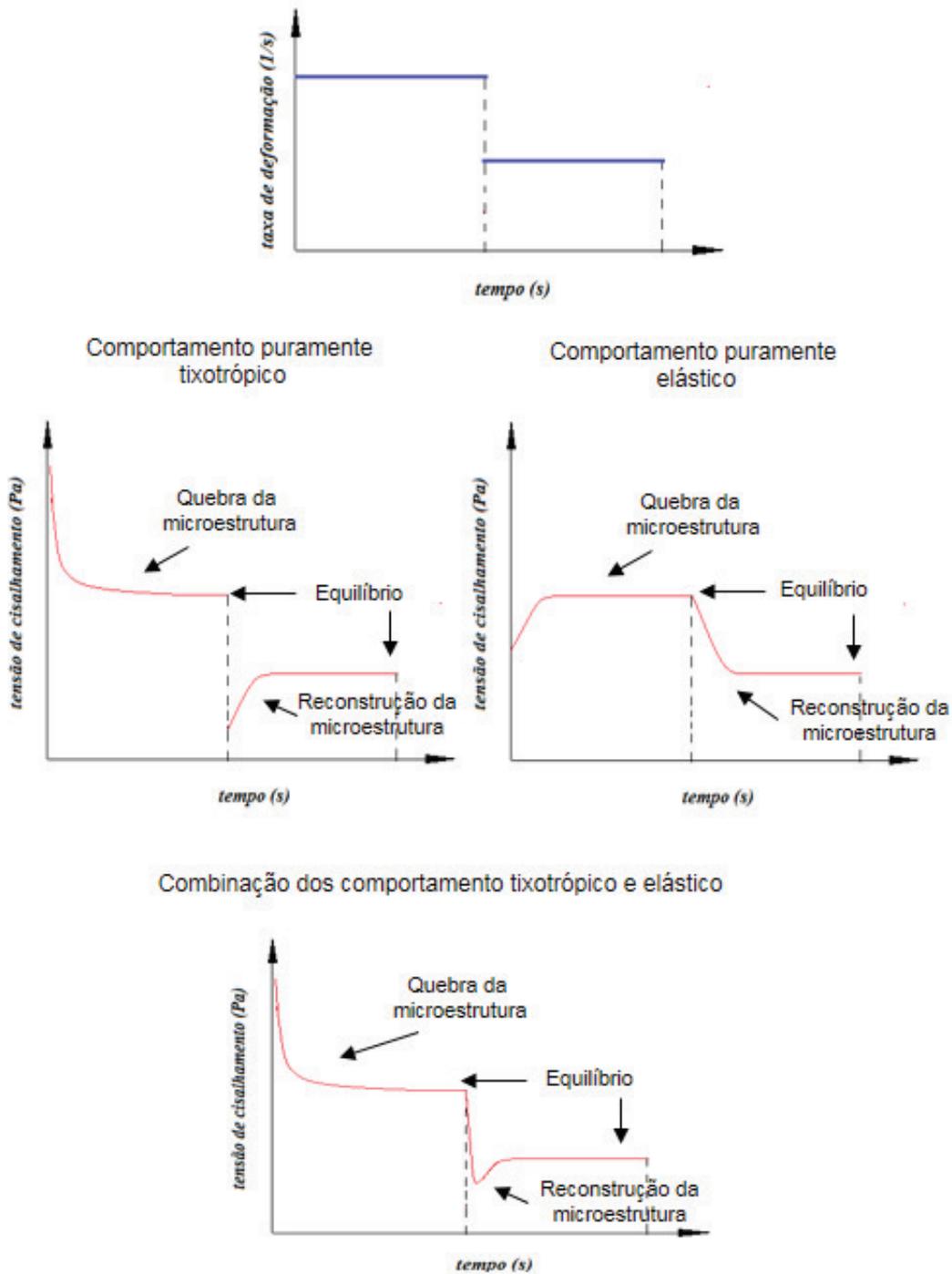


Figura 4.18: Representação esquemática da resposta de um material tixotrópico.

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam os resultados dos testes de *step change* da poliacrilamida e da goma xantana, respectivamente. Os quais mostram o comportamento de um líquido tixotrópico, inicialmente em repouso, e, em seguida, submetido a uma taxa de cisalhamento elevada, seguida por uma taxa de cisalhamento mais baixa.

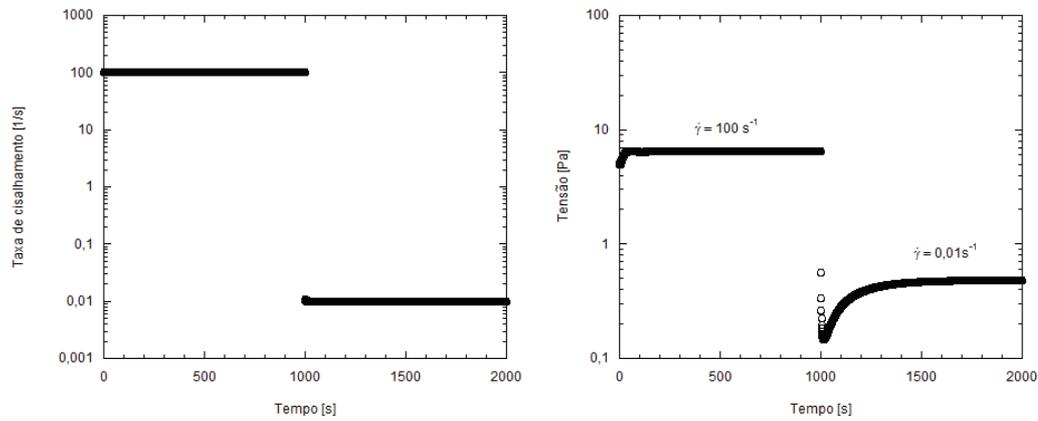


Figura 4.19: *Step change* poliacrilamida 0,25%.

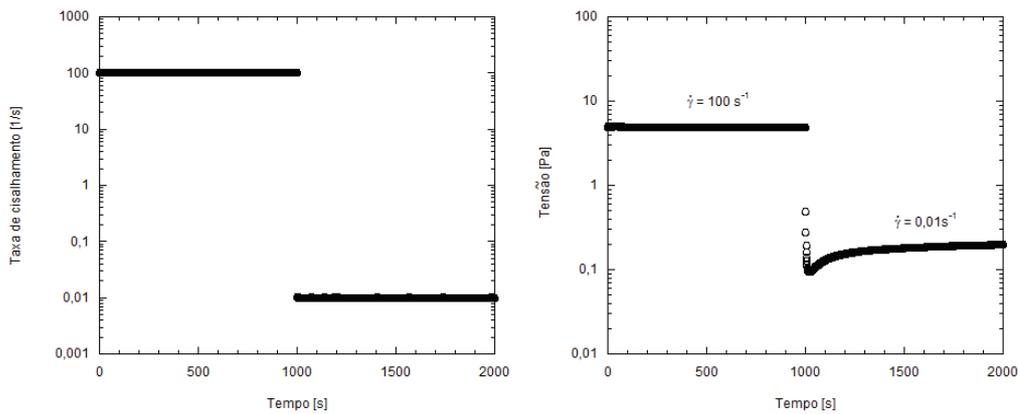


Figura 4.20: *Step change* goma xantana 0,40%.

4.2 Experimentos de visualização

Tabela 4.2: Parâmetros geométricos da célula de Hele-Shaw.

Folga b [mm]	0,7
Comprimento total da célula L [mm]	700
Comprimento real de visualização l [mm]	250
Largura w [mm]	120
Área transversal [m^2]	0,000084
Volume total da célula [m^3]	0,0000588
Volume efetivo (volume constante a ser deslocado) [m^3]	0,0000210
D_h [m] - Diâmetro hidráulico	0,001392
Permeabilidade k [D]	40833,3

4.2.1

Validação da bancada experimental

Para validar a bancada experimental usou-se dois fluidos newtonianos, os quais os comportamentos são conhecidos, duas soluções de glicerina (60% e 80%) e óleo mineral.

As equações adimensionais para o escoamento de dois fluidos newtonianos são mostradas nas Equações 4-2 e 4-3. Determinou-se duas equações adimensionais uma, para a viscosidade e outra para a densidade, as quais são calculadas a partir da razão entre as viscosidades e densidades do fluido deslocado e deslocador.

$$\mu^* = \frac{\mu_{\text{fluido_deslocado}}}{\mu_{\text{fluido_deslocador}}} \quad (4-2)$$

$$\rho^* = \frac{\rho_{\text{fluido_deslocado}}}{\rho_{\text{fluido_deslocador}}} \quad (4-3)$$

O perfil de *fingers* na interface do escoamento na célula de Hele-Shaw se deu através do deslocamento do óleo mineral pela glicerina. Analisando os resultados observa-se que o óleo é mais viscoso que as duas soluções de glicerina a 25 °C, como pode ser observado nas Figuras 4.21 a 4.97.

Já no padrão de formação de interface plana, *plug*, o escoamento é o inverso do explicado acima, ou seja, o óleo mineral deslocando as soluções de glicerina. Esses testes de visualização são mostrados nas Figuras 4.24 a 4.26. As Figuras 4.27 e 4.28 mostram os testes realizados com o óleo mineral deslocando o ar em duas velocidades diferentes, ou seja, é o caso no qual um fluido viscoso desloca um fluido de viscosidade próxima de zero ($1,84 \cdot 10^{-5} Pa.s$), formando um *plug* perfeito.

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 encontram-se as propriedades do óleo mineral e das soluções aquosas de glicerina, respectivamente.

A tensão interfacial entre dois líquidos imiscíveis apresenta geralmente um valor intermediário entre os valores das tensões superficiais dos líquidos participantes. Pela regra de Antonoff a tensão interfacial é aproximadamente igual à diferença das tensões superficiais de cada fase, $\sigma_i = \sigma_{s1} - \sigma_{s2}$, onde σ_i é a tensão interfacial, σ_{s1} é a tensão superficial da fase 1 e σ_{s2} é a tensão superficial da fase 2 (45).

Tabela 4.3: Propriedade do óleo mineral a $25^\circ C$.

$\mu [Pa.s]$	0,134
$\sigma [mN/m]$	28,4
$\rho [kg/m^3]$	867,6

Tabela 4.4: Propriedades das soluções aquosas de glicerina a $25^\circ C$

	Glicerina 60%	Glicerina 80%
$\rho [kg/m^3]$	1150,5	1191,1
$\mu [Pa.s]$	0,00996	0,0251
$\sigma [mN/m]$ -Glicerina	55,0	58,9
$\sigma [mN/m]$ -Glicerina-Óleo	26,6	30,5

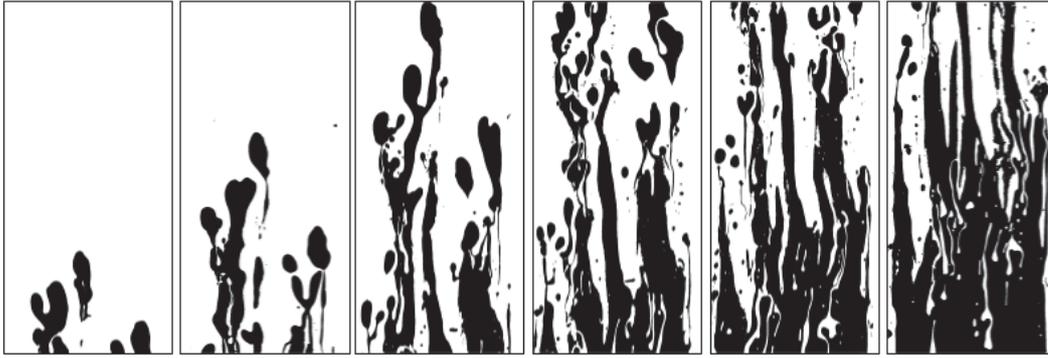


Figura 4.21: Solução de glicerina 80% deslocando óleo mineral – $\mu^* = 3,260$; $\rho^* = 0,728$; $\dot{m} = 2,180$ g/s; $We = 2,45$; $Ca = 5,76 \cdot 10^{-4}$; $Re = 1,98$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 57,706\%$; *Fingers*.

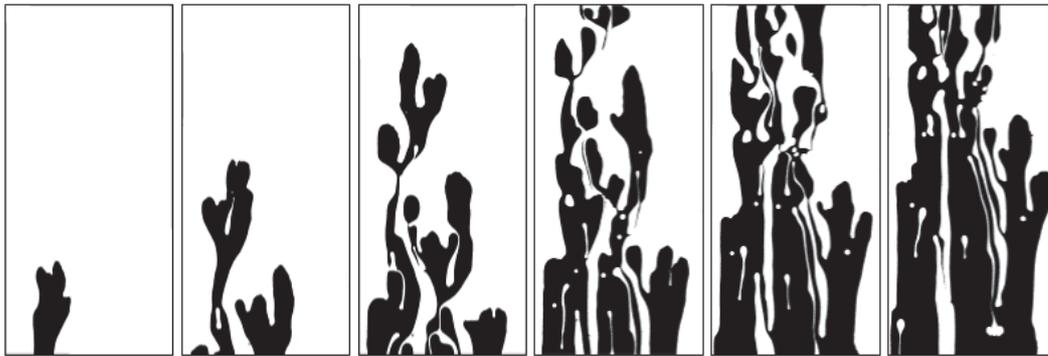


Figura 4.22: Solução de glicerina 80% deslocando óleo mineral – $\mu^* = 3,395$; $\rho^* = 0,728$; $\dot{m} = 0,44$ g/s; $We = 0,098$; $Ca = 5,76 \cdot 10^{-4}$; $Re = 0,39$; $T = 25^\circ C$; $\varepsilon = 54,863\%$; *Fingers*.

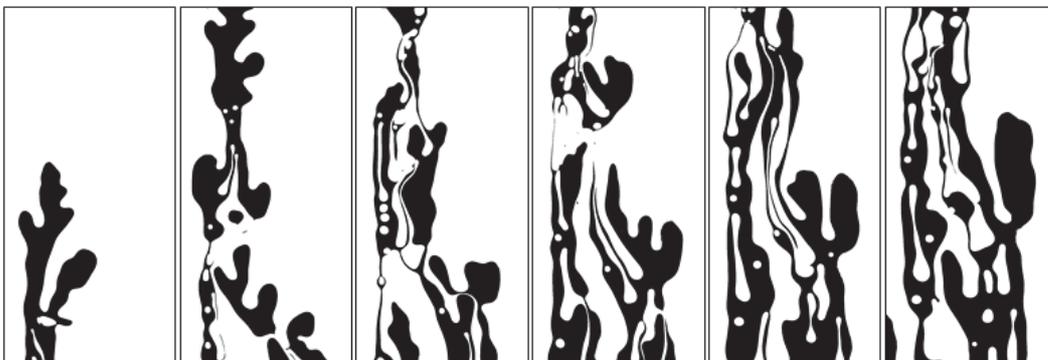


Figura 4.23: Solução de glicerina 60% deslocando óleo mineral – $\mu^* = 16,761$; $\rho^* = 0,754$; $\dot{m} = 0,367$ g/s; $We = 0,077$; $Ca = 2,62 \cdot 10^{-4}$; $Re = 0,81$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 36,549\%$; *Fingers*.

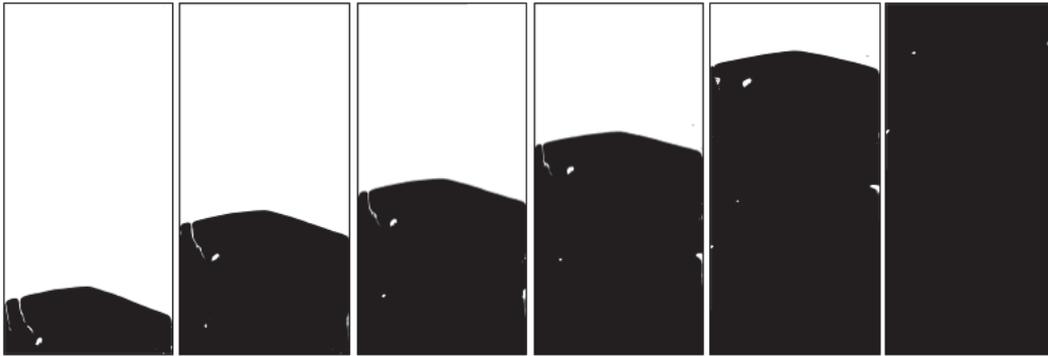


Figura 4.24: Óleo mineral deslocando solução de glicerina 80% – $\mu^* = 0,307$; $\rho^* = 1,373$; $\dot{m} = 2,561g/s$; $We = 1,30$; $Ca = 3,07.10^{-3}$; $Re = 0,23$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,645\%$; *Plug*.

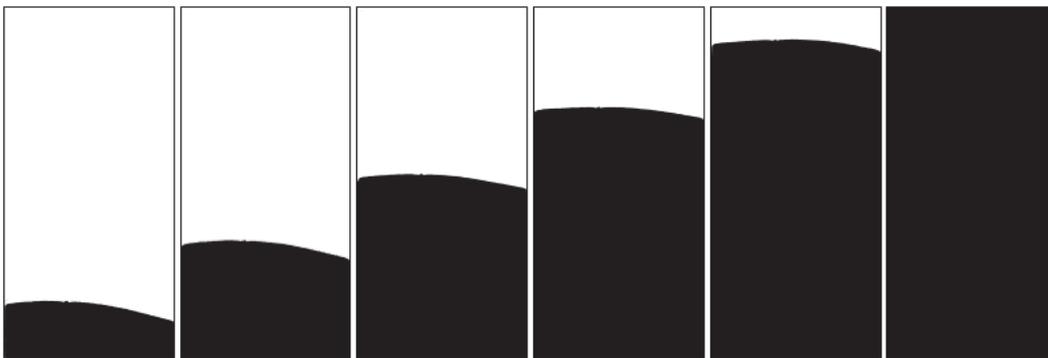


Figura 4.25: Óleo mineral deslocando solução de glicerina 80% – $\mu^* = 0,302$; $\rho^* = 1,373$; $\dot{m} = 0,490g/s$; $We = 0,049$; $Ca = 3,07.10^{-3}$; $Re = 0,044$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 100,00\%$; *Plug*.

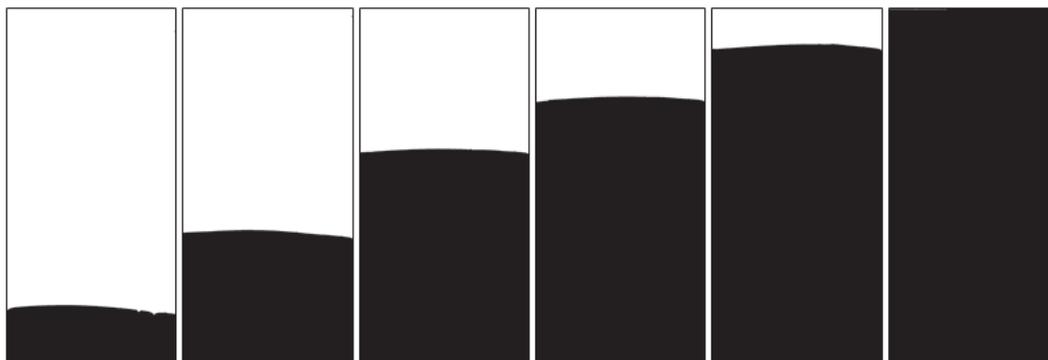


Figura 4.26: Óleo mineral deslocando solução de glicerina 60% – $\mu^* = 0,056$; $\rho^* = 1,373$; $\dot{m} = 0,475g/s$; $We = 0,551$; $Ca = 3,52.10^{-3}$; $Re = 0,044$; $T = 21^\circ C$; $\varepsilon = 100,00\%$; *Plug*.

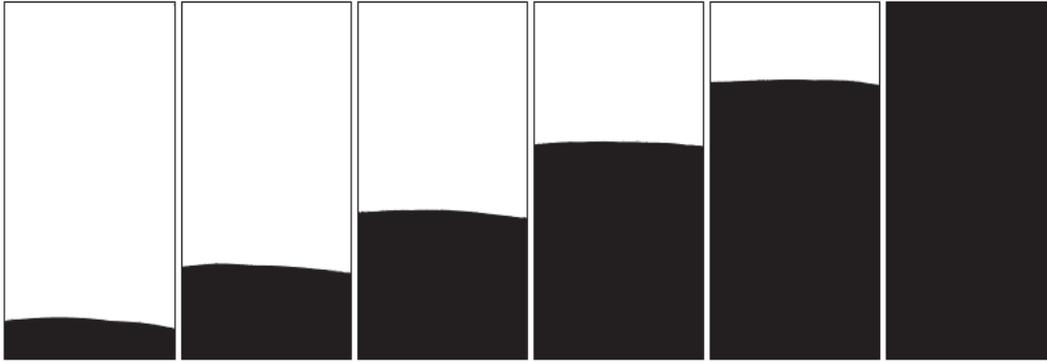


Figura 4.27: Óleo mineral deslocando ar - $\mu^* = 1,37.10^{-4}$; $\rho^* = 0,0014$; $\dot{m} = 0,344g/s$; $We = 0,0478$; $Ca = 2,15.10^{-4}$; $Re = 0,042$; $T = 25^{\circ}C$ $\varepsilon = 100,00\%$, *Plug*.

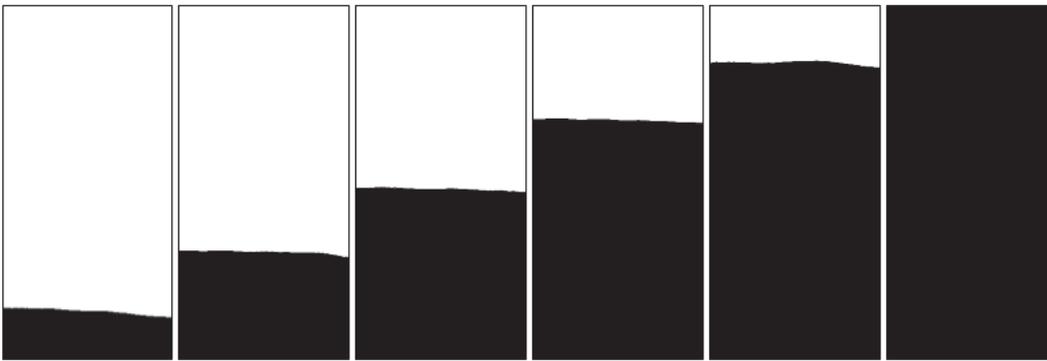


Figura 4.28: Óleo mineral deslocando ar - $\mu^* = 1,37.10^{-4}$; $\rho^* = 0,0014$; $\dot{m} = 3,644g/s$; $We = 5,346$; $Ca = 3,30.10^{-3}$; $Re = 0,451$; $T = 25^{\circ}C$ $\varepsilon = 99,99\%$, *Plug*.

4.2.2
 Testes de visualização utilizando poliacrilamida

Tabela 4.5: Parâmetros da poliacrilamida 0,25% a 25°C.

$n[]$	0,217
$k[Pa.s^n]$	2,471
$\rho[kg/m^3]$ -HPAM	996,4
$\sigma[mN/m]$ -HPAM	58,8
$\sigma[mN/m]$ -HPAM-Óleo	30,40

Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida

As Figuras 4.29 a 4.46 apresentam as imagens tratadas do escoamento do óleo mineral deslocando poliacrilamida 0,25%. As Figuras são apresentadas em ordem crescente da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$).

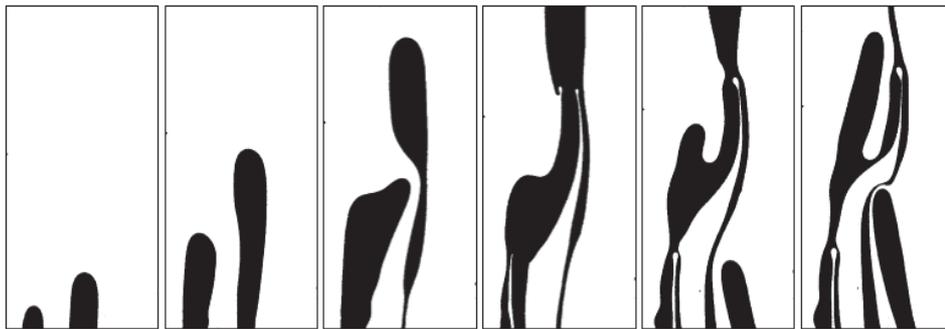


Figura 4.29: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 4,000$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,198$; $\eta^* = 3,172$; $\dot{m} = 0,021$ g/s; $Re = 0,002$; $We = 1,299.10^{-6}$; $Ca = 8,476.10^{-2}$; $T = 20^\circ C$; $\varepsilon = 26,832\%$, *Fingers*.

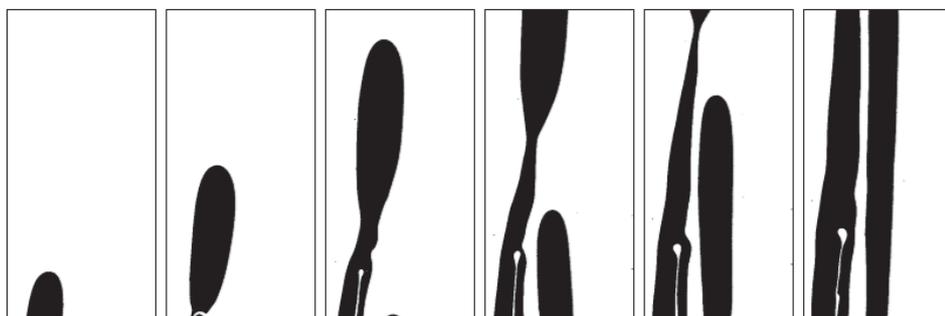


Figura 4.30: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 10,858$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,538$; $\eta^* = 1,555$; $\dot{m} = 0,058$ g/s; $Re = 0,004$; $We = 9,571.10^{-6}$; $Ca = 8,476.10^{-2}$; $T = 20^\circ C$; $\varepsilon = 40,046\%$, *Fingers*.

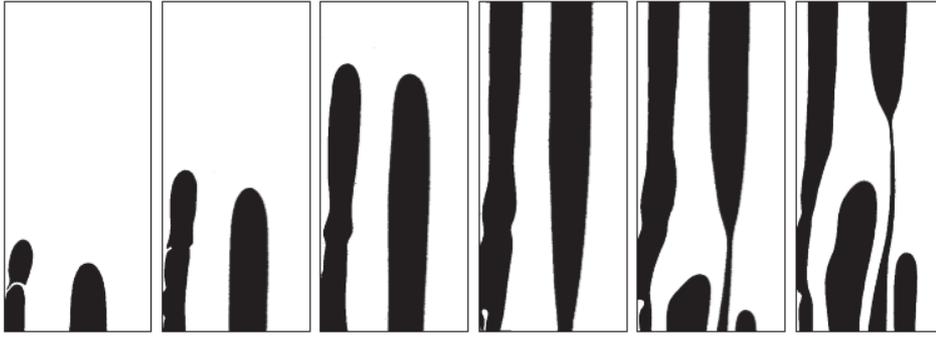


Figura 4.31: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 12,876$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,638$; $\eta^* = 1,377$; $\dot{m} = 0,069$ g/s; $Re = 0,005$; $We = 1,346 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 8,476 \cdot 10^{-2}$; $T = 20^\circ C$; $\varepsilon = 39,376\%$, *Fingers*.

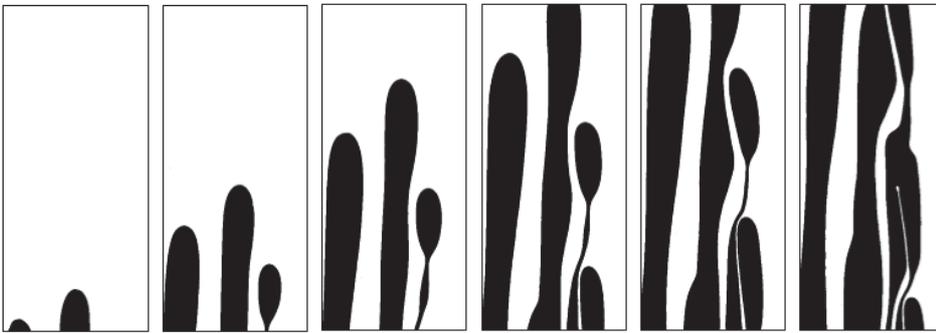


Figura 4.32: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 18,919$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,777$; $\eta^* = 1,198$; $\dot{m} = 0,101$ g/s; $Re = 0,009$; $We = 2,906 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 54,559\%$, *Fingers*.

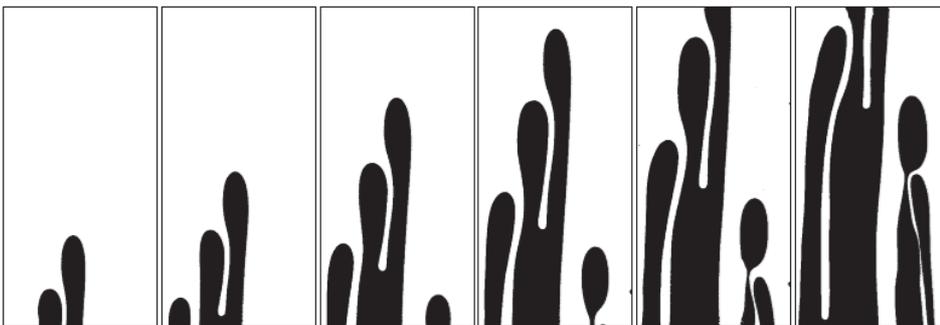


Figura 4.33: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 37,859$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,057$; $\eta^* = 0,598$; $\dot{m} = 0,202$ g/s; $Re = 0,014$; $We = 1,164 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,301 \cdot 10^{-2}$; $T = 19^\circ C$; $\varepsilon = 54,108\%$, *Fingers*.

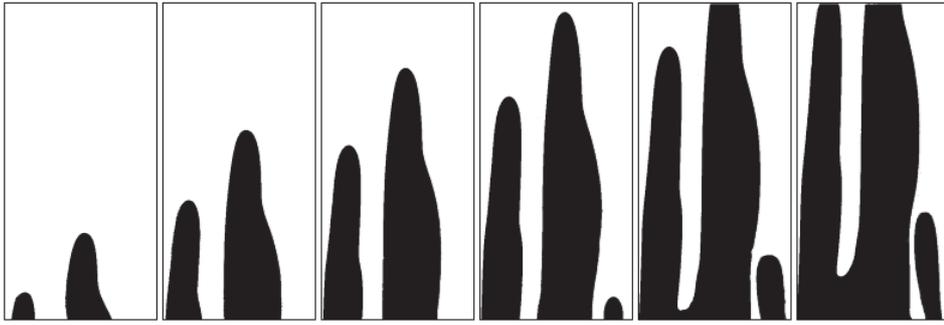


Figura 4.34: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 38,991$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,601$; $\eta^* = 0,715$; $\dot{m} = 0,208$ g/s; $Re = 0,018$; $We = 1,234 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 64,416\%$, *Fingers*.

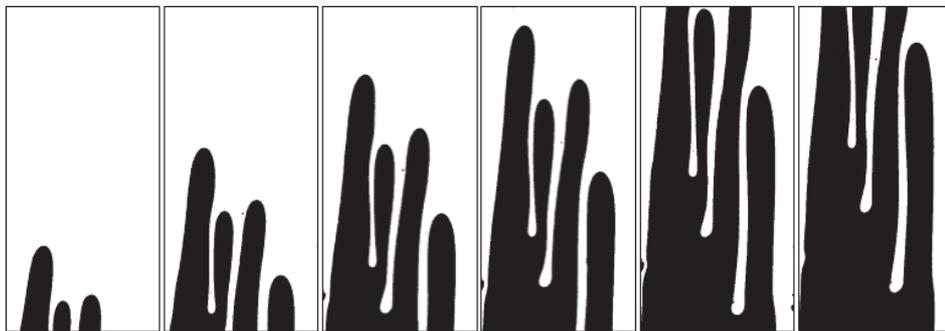


Figura 4.35: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 42,616$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,113$; $\eta^* = 0,586$; $\dot{m} = 0,227$ g/s; $Re = 0,017$; $We = 1,474 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,476 \cdot 10^{-2}$; $T = 20^\circ C$; $\varepsilon = 69,298\%$, *Fingers*.

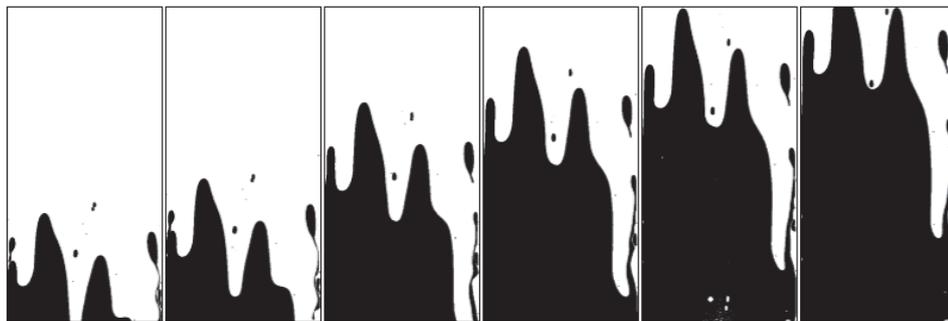


Figura 4.36: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 62,097$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,805$; $\eta^* = 0,479$; $\dot{m} = 0,331$ g/s; $Re = 0,026$; $We = 3,130 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,659 \cdot 10^{-2}$; $T = 21^\circ C$; $\varepsilon = 77,717\%$, *Transição*.

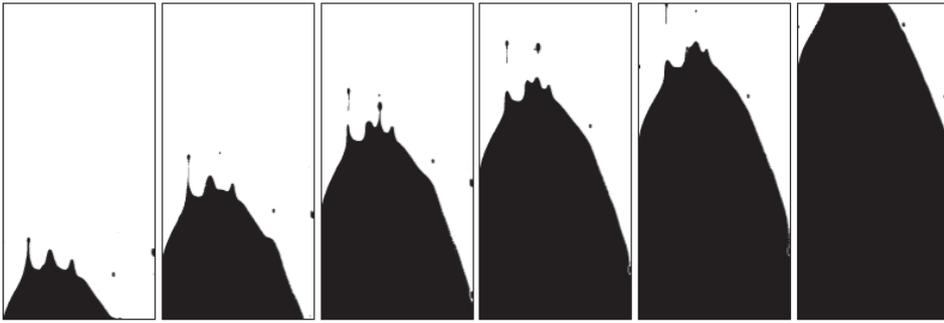


Figura 4.37: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 115,824$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 4,755$; $\eta^* = 0,329$; $\dot{m} = 0,618$ g/s; $Re = 0,052$; $We = 1,089 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 90,388\%$, *Transição*.

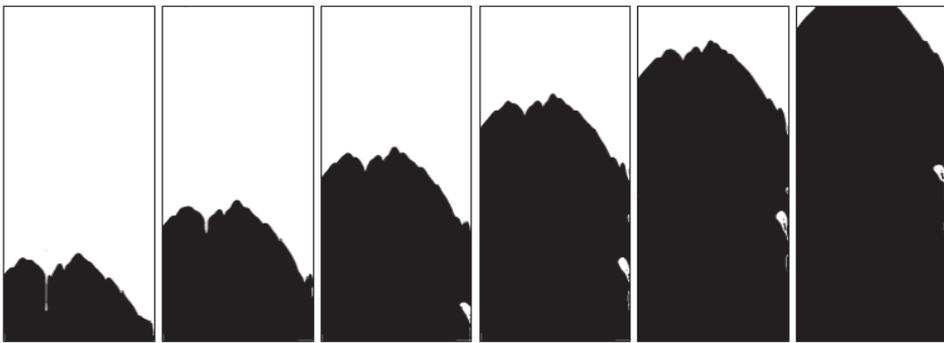


Figura 4.38: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 175,348$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 7,198$; $\eta^* = 0,245$; $\dot{m} = 0,936$ g/s; $Re = 0,079$; $We = 2,496 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 96,199\%$, *Plug*.

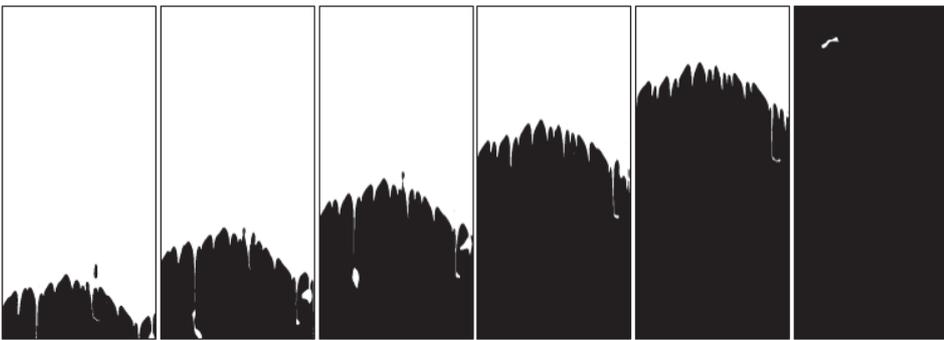


Figura 4.39: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 283,711$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 11,646$; $\eta^* = 0,173$; $\dot{m} = 1,514$ g/s; $Re = 0,128$; $We = 6,535 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,885\%$, *Plug*.

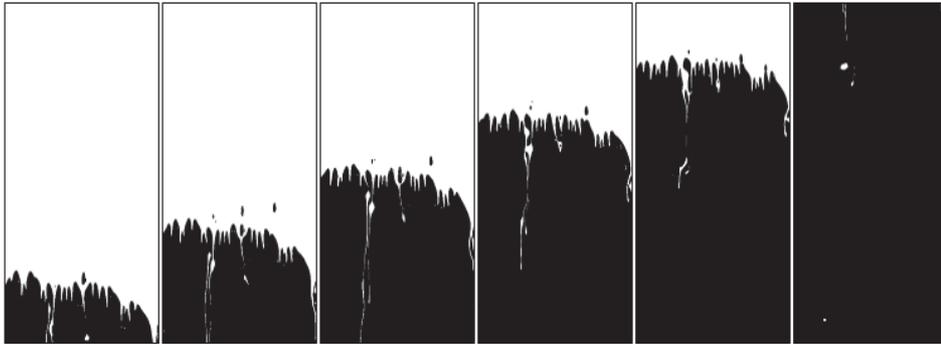


Figura 4.40: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 380,686$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 15,627$; $\eta^* = 0,141$; $\dot{m} = 2,031$ g/s; $Re = 0,171$; $We = 1,177 \cdot 10^{-2}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,715\%$, *Plug*.

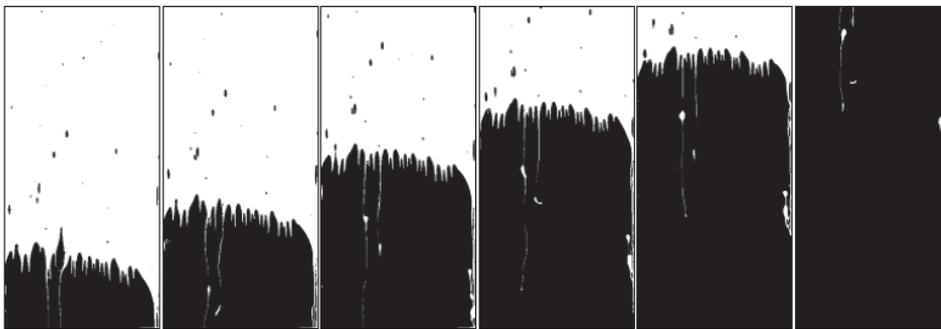


Figura 4.41: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 405,088$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 16,629$; $\eta^* = 0,135$; $\dot{m} = 2,161$ g/s; $Re = 0,182$; $We = 1,332 \cdot 10^{-2}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,000\%$, *Plug*.



Figura 4.42: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 462,862$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 22,952$; $\eta^* = 0,107$; $\dot{m} = 2,470$ g/s; $Re = 0,182$; $We = 1,739 \cdot 10^{-2}$; $Ca = 8,476 \cdot 10^{-2}$; $T = 20^\circ C$; $\varepsilon = 99,526\%$, *Plug*.

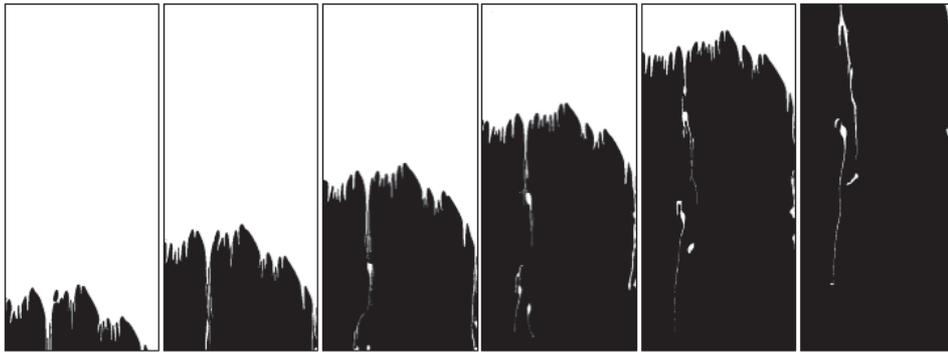


Figura 4.43: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 487,003 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 21,996$; $\eta^* = 0,110$; $\dot{m} = 2,598 \text{ g/s}$; $Re = 0,205$; $We = 1,925 \cdot 10^{-2}$; $Ca = 8,659 \cdot 10^{-2}$; $T = 21^\circ C$; $\varepsilon = 98,513\%$, *Plug*.

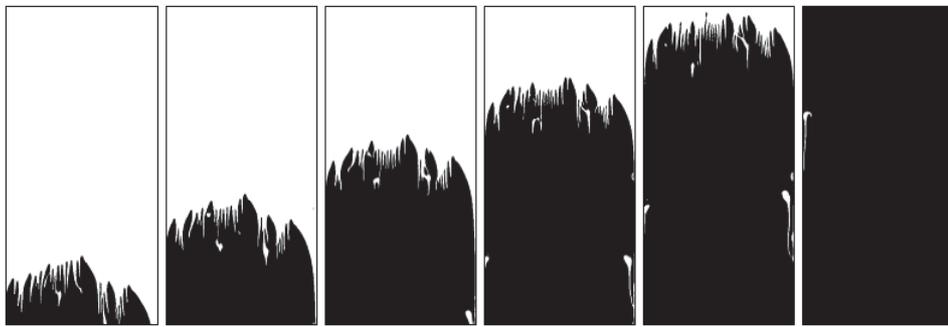


Figura 4.44: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 562,269 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 23,081$; $\eta^* = 0,106$; $\dot{m} = 3,000 \text{ g/s}$; $Re = 0,253$; $We = 2,567 \cdot 10^{-2}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,799\%$, *Plug*.

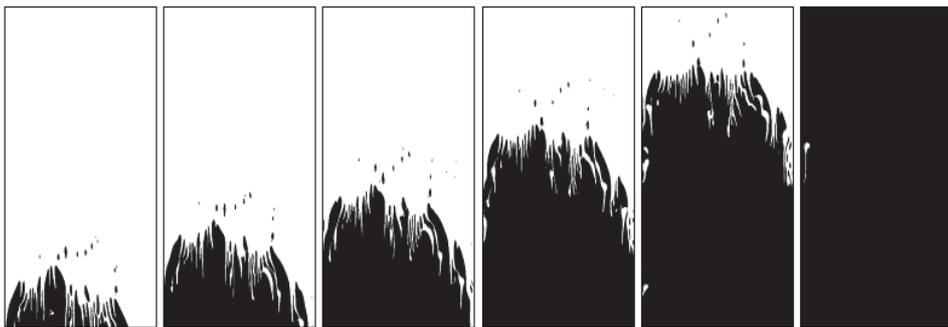


Figura 4.45: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 652,857 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 26,799$; $\eta^* = 0,096$; $\dot{m} = 3,483 \text{ g/s}$; $Re = 0,294$; $We = 3,460 \cdot 10^{-2}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,874\%$, *Plug*.

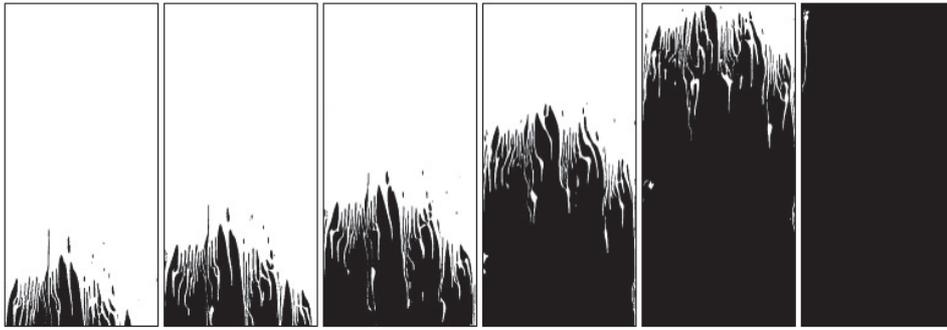


Figura 4.46: Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 805,919$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 33,083$; $\eta^* = 0,082$; $\dot{m} = 4,300$ g/s; $Re = 0,362$; $We = 5,273 \cdot 10^{-2}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,757\%$, *Plug*.

As Figuras 4.29 a 4.35 mostram os testes que apresentam instabilidade na interface e portanto a formação de *fingers*, já nas Figuras 4.38 a 4.46 há a ocorrência de *plug*. A partir da análise visual é possível observar que a transição acontece em uma taxa de cisalhamento adimensional ($\dot{\gamma}^*$) entre 2,8 e 4, diferente do que ocorre com fluidos newtonianos que é próxima a 1.

Também é possível observar que o número de Weber (We) é inferior a 1, significando que as forças de tensão superficiais foram mais importantes que as forças inerciais. Além do número de Weber é possível observar que como desejado o número de Reynolds (Re) é inferior a 1, significando que todos os testes foram realizados bem lentamente e que as forças viscosas foram superiores as forças inerciais (Figura 4.47). Já o número de Capilaridade (Ca) manteve-se inferior a 1, mostrando que as forças capilares foram mais relevantes que as viscosas em todos os testes.

Além disso é possível observar que a partir da Figura 4.39 algumas pequenas perturbações surgem na interface entre os fluidos. Essas perturbações são similares a mini *fingers* que apresentam velocidades parecidas, o que possibilita uma interface estável, o *plug*, apesar da presença dessas perturbações.

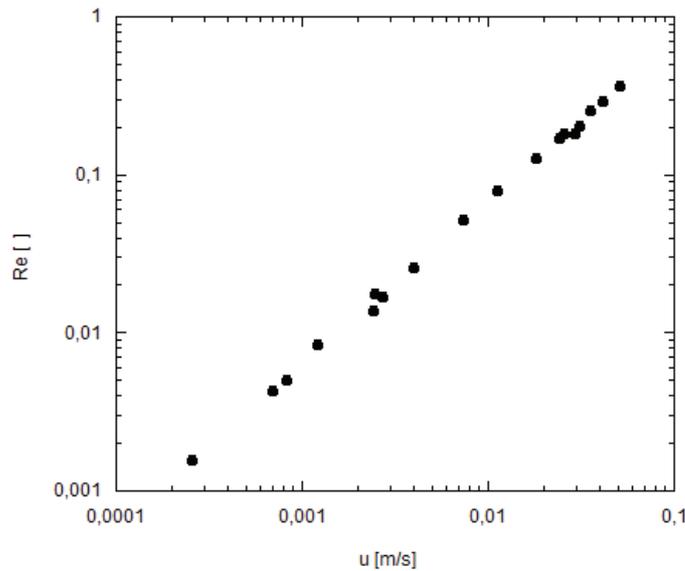


Figura 4.47: Óleo deslocando solução de poliacrilamida - Reynolds em função da velocidade.

A Figura 4.48 ilustra a eficiência em função da velocidade adimensional. Observa-se que com o aumento da velocidade adimensional, u^* , a eficiência aumenta, isso porque inicialmente o óleo é menos viscoso que a poliacrilamida, formando assim os *fingers*. Com o aumento da velocidade adimensional e conseqüentemente da taxa de cisalhamento a viscosidade da poliacrilamida diminui, tornando o óleo cuja viscosidade se manteve constante (fluido newtoniano) mais viscoso que a poliacrilamida, resultando em uma interface estável, plug. Conseqüentemente ocorre o aumento da eficiência.

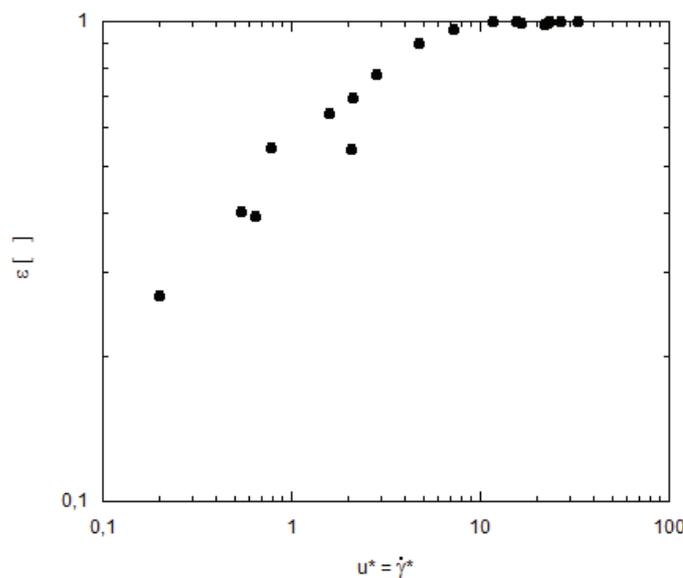


Figura 4.48: Óleo deslocando solução de poliacrilamida - Eficiência em função da velocidade adimensional.

A Figura 4.49 é um complemento da Figura 4.48, na qual é representada a eficiência em função da viscosidade adimensional. Como explicado anteriormente, o aumento da viscosidade adimensional provoca um decréscimo na eficiência. Já a Figura 4.50 mostra os valores reais da viscosidade da poliacrilamida em cada teste para uma determinada taxa de cisalhamento, obtida pela variação da velocidade de escoamento.

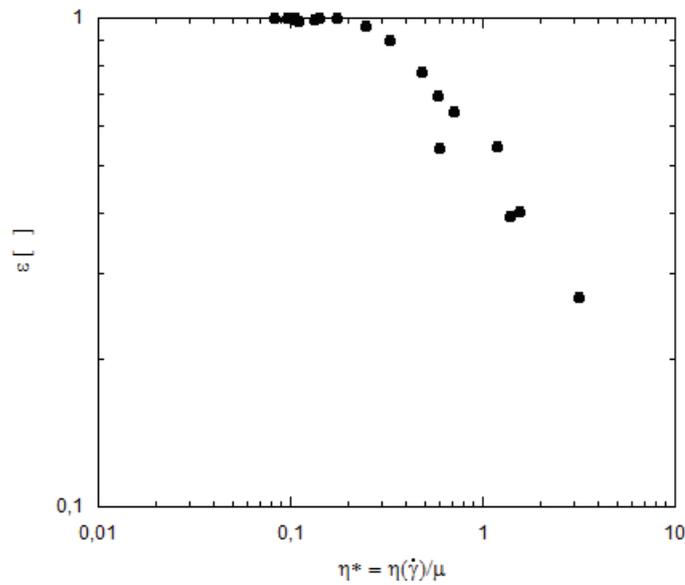


Figura 4.49: Óleo deslocando solução de poliacrilamida - Eficiência em função da viscosidade adimensional.

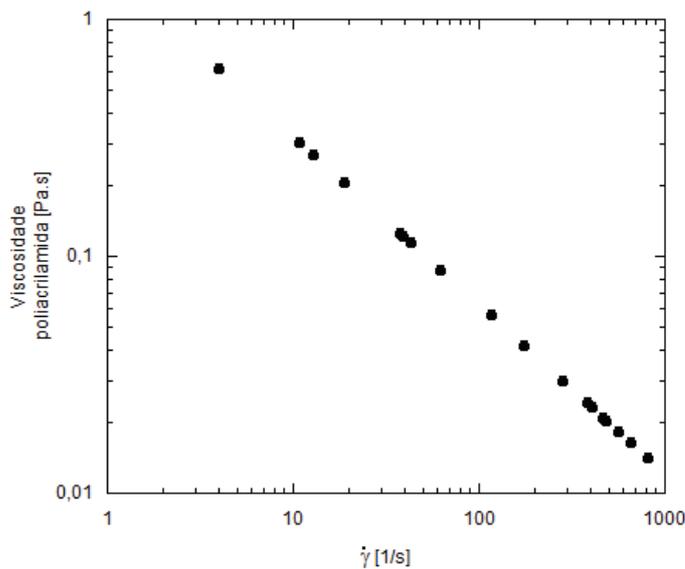


Figura 4.50: Óleo deslocando solução de poliacrilamida - Viscosidade adimensional em função da taxa de cisalhamento adimensional.

A Figura 4.51 ilustra os padrões de escoamento: *fingers* e *plug*. Observe-se que a transição do escoamento não ocorre em 1 como acontece com os fluidos newtonianos, mas próximo a 2,11.

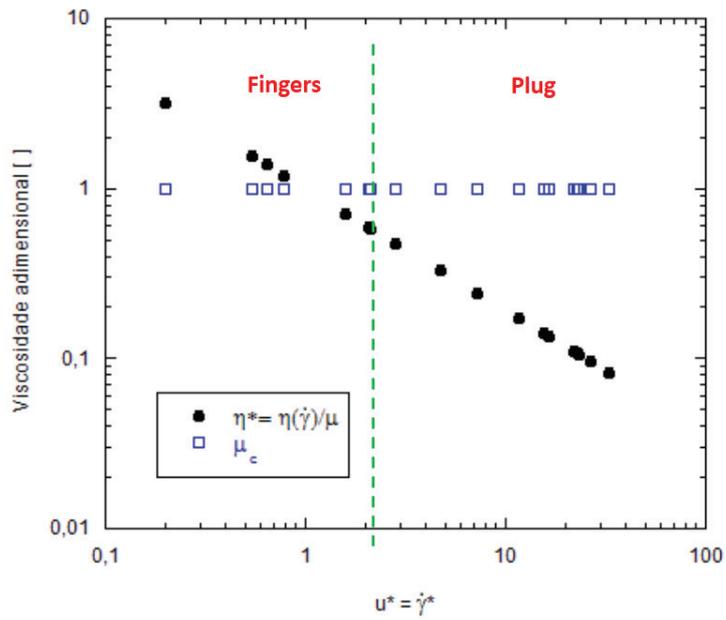


Figura 4.51: Óleo deslocando solução de poliácridamida - Padrões de escoamento, *fingers* e *plug*.

Solução de poliacrilamida deslocando óleo mineral

As Figuras 4.52 a 4.71 apresentam as imagens tratadas do escoamento da poliacrilamida 0,25% deslocando o óleo mineral. As Figuras são apresentadas em ordem crescente da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$)

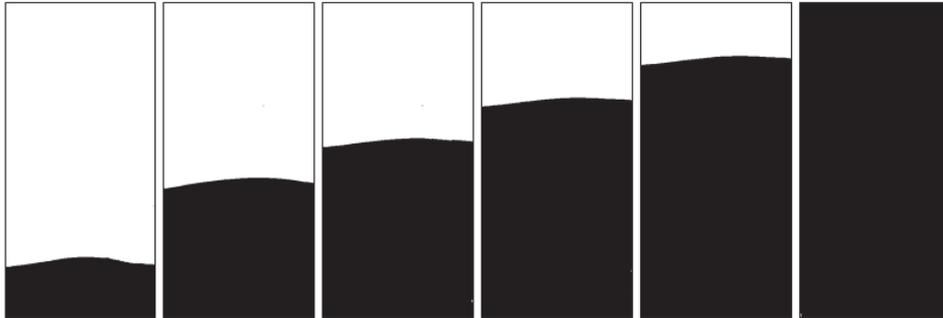


Figura 4.52: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 4,7461/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,160$; $\eta^* = 3,699$; $\dot{m} = 0,022$ g/s; $Re = 0,0008$; $We = 2,100.10^{-9}$; $Ca = 3,425.10^{-1}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 100\%$, *Plug*.

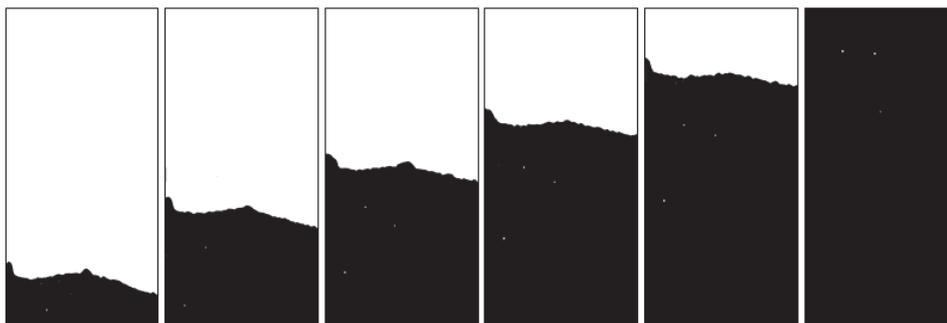


Figura 4.53: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 14,791$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,578$; $\eta^* = 1,478$; $\dot{m} = 0,069$ g/s; $Re = 0,005$; $We = 2,040.10^{-8}$; $Ca = 1,323.10^{-1}$; $T = 22,5^\circ C$; $\varepsilon = 99,984\%$, *Plug*.

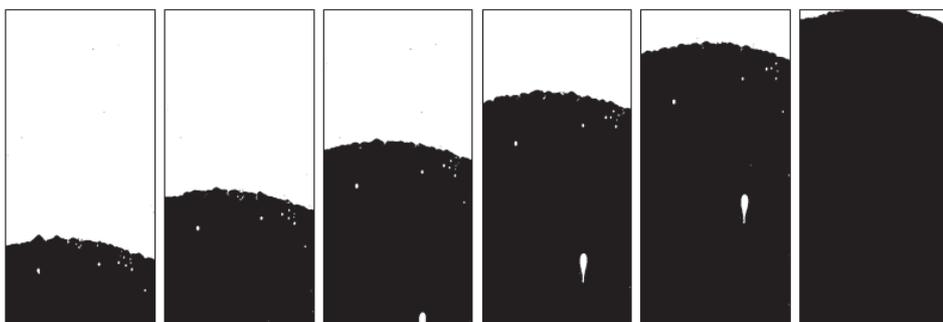


Figura 4.54: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 33,5011/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,129$; $\eta^* = 0,917$; $\dot{m} = 0,156$ g/s; $Re = 0,022$; $We = 1,046.10^{-7}$; $Ca = 8,494.10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 98,940\%$, *Plug*.

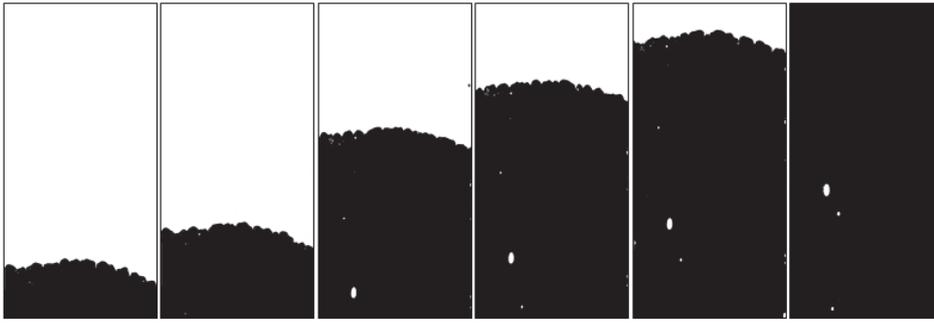


Figura 4.55: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 36,8881/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,414$; $\eta^* = 0,781$; $\dot{m} = 0,171$ g/s; $Re = 0,026$; $We = 1,269.10^{-7}$; $Ca = 7,019.10^{-2}$; $T = 22,7^\circ C$; $\varepsilon = 99,751\%$, *Plug*.

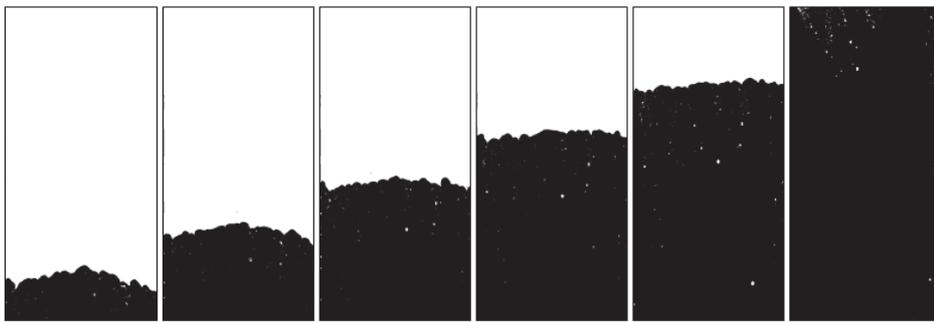


Figura 4.56: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 42,9321/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,646$; $\eta^* = 0,701$; $\dot{m} = 0,199$ g/s; $Re = 0,033$; $We = 1,719.10^{-7}$; $Ca = 6,299.10^{-2}$; $T = 22,7^\circ C$; $\varepsilon = 99,734\%$, *Plug*.

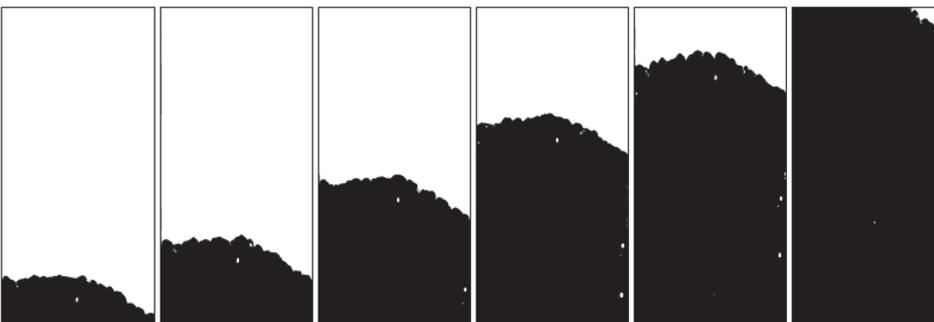


Figura 4.57: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 47,1111/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,824$; $\eta^* = 0,651$; $\dot{m} = 0,219$ g/s; $Re = 0,039$; $We = 2,069.10^{-7}$; $Ca = 5,841.10^{-2}$; $T = 22,6^\circ C$; $\varepsilon = 98,956\%$, *Plug*.

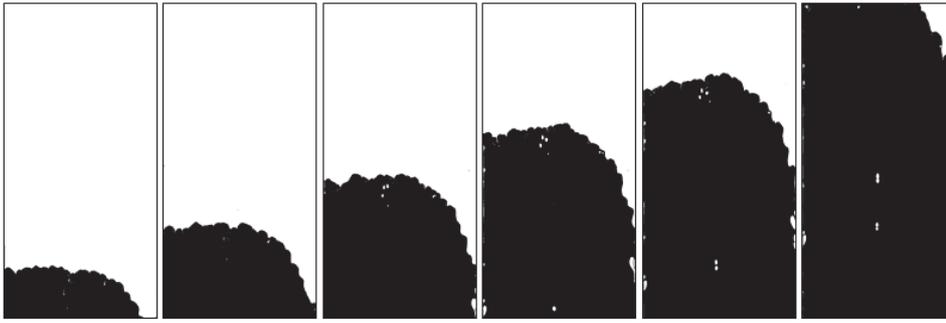


Figura 4.58: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 59,2641/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,295$; $\eta^* = 0,553$; $\dot{m} = 0,275$ g/s; $Re = 0,058$; $We = 3,270.10^{-7}$; $Ca = 4,959.10^{-2}$; $T = 22,6^\circ C$; $\varepsilon = 96,888\%$, *Plug*.

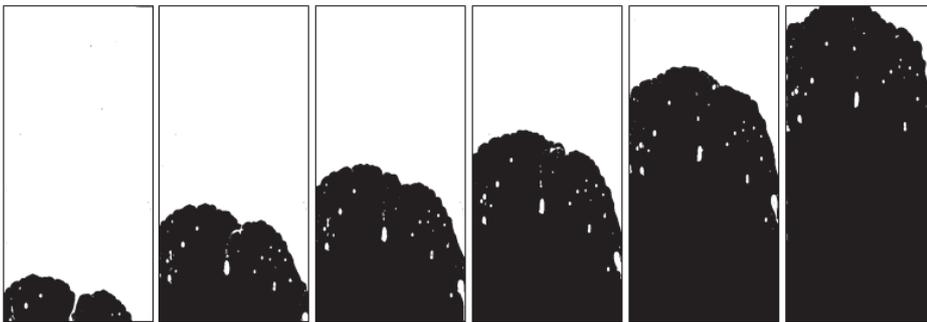


Figura 4.59: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 64,431/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,170$; $\eta^* = 0,575$; $\dot{m} = 0,299$ g/s; $Re = 0,067$; $We = 3,870.10^{-7}$; $Ca = 5,327.10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 94,03\%$, *Plug*.

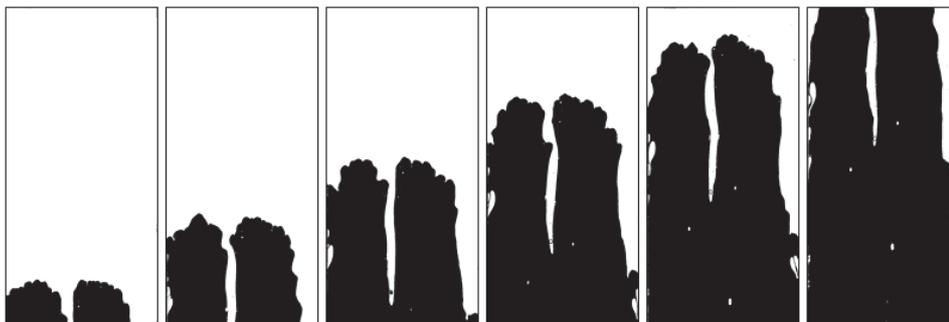


Figura 4.60: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 82,1471/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,150$; $\eta^* = 0,441$; $\dot{m} = 0,382$ g/s; $Re = 0,101$; $We = 6,292.10^{-7}$; $Ca = 3,965.10^{-2}$; $T = 22,7^\circ C$; $\varepsilon = 89,899\%$, *Transição*.

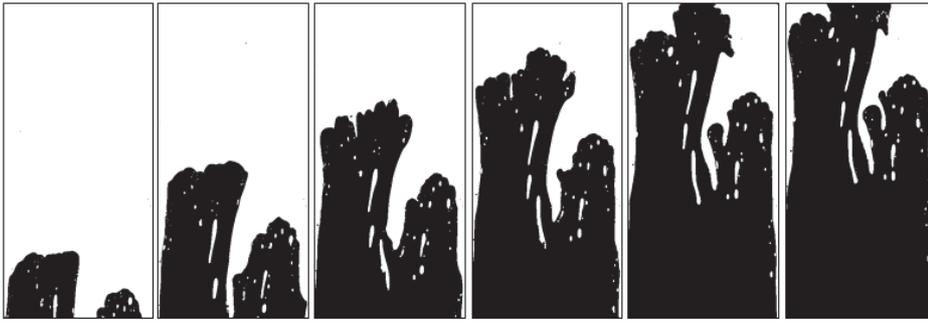


Figura 4.61: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 98,0931/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,304$; $\eta^* = 0,426$; $\dot{m} = 0,456$ g/s; $Re = 0,137$; $We = 8,972 \cdot 10^{-7}$; $Ca = 3,946 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 77,100\%$, *Transição*.

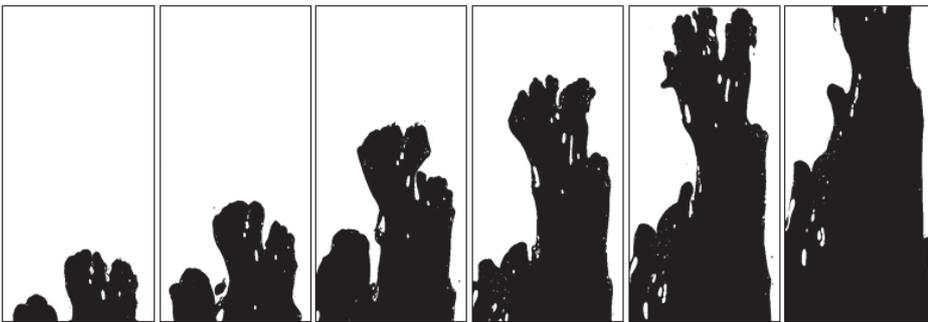


Figura 4.62: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 132,4221/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 4,930$; $\eta^* = 0,320$; $\dot{m} = 0,615$ g/s; $Re = 0,229$; $We = 1,635 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 2,900 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 71,760\%$, *Fingers*.

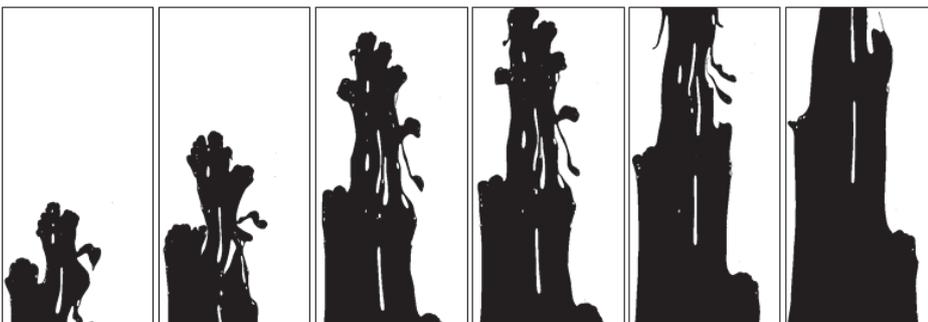


Figura 4.63: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 157,1361/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 5,850$; $\eta^* = 0,284$; $\dot{m} = 0,730$ g/s; $Re = 0,307$; $We = 2,302 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 2,566 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 61,770\%$, *Fingers*.



Figura 4.64: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 186,5201/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 6,944$; $\eta^* = 0,251$; $\dot{m} = 0,867$ g/s; $Re = 0,412$; $We = 3,244.10^{-6}$; $Ca = 2,271.10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 65,960\%$, *Fingers*.



Figura 4.65: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 228,3481/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 9,374$; $\eta^* = 0,203$; $\dot{m} = 1,061$ g/s; $Re = 0,582$; $We = 4,862.10^{-6}$; $Ca = 1,793.10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 55,940\%$, *Fingers*.

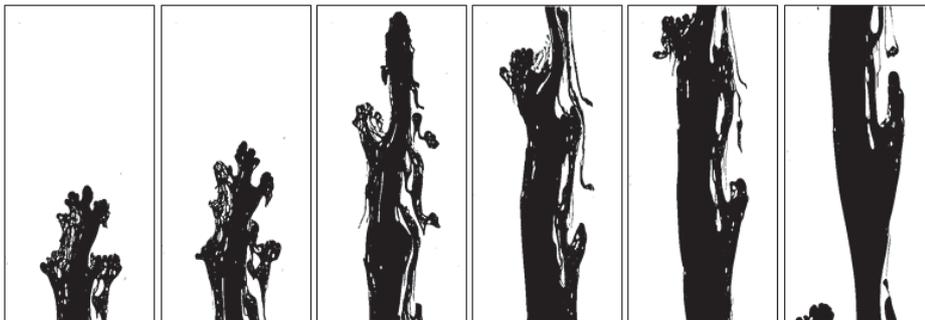


Figura 4.66: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 272,8951/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 12,326$; $\eta^* = 0,167$; $\dot{m} = 1,268$ g/s; $Re = 0,790$; $We = 6,943.10^{-6}$; $Ca = 1,443.10^{-2}$; $T = 21^\circ C$; $\varepsilon = 33,620\%$, *Fingers*.



Figura 4.67: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 303,9781/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 12,48$; $\eta^* = 0,165$; $\dot{m} = 1,412 \text{ g/s}$; $Re = 0,951$; $We = 8,615 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 1,462 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 63,940\%$, *Fingers*.



Figura 4.68: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 311,3391/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 14,062$; $\eta^* = 0,152$; $\dot{m} = 1,446 \text{ g/s}$; $Re = 0,990$; $We = 9,039 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 1,313 \cdot 10^{-2}$; $T = 21^\circ C$; $\varepsilon = 63,940\%$, *Fingers*.



Figura 4.69: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 355,4471/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 14,591$; $\eta^* = 0,148$; $\dot{m} = 1,651 \text{ g/s}$; $Re = 1,243$; $We = 1,178 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,307 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 56,198\%$, *Fingers*.

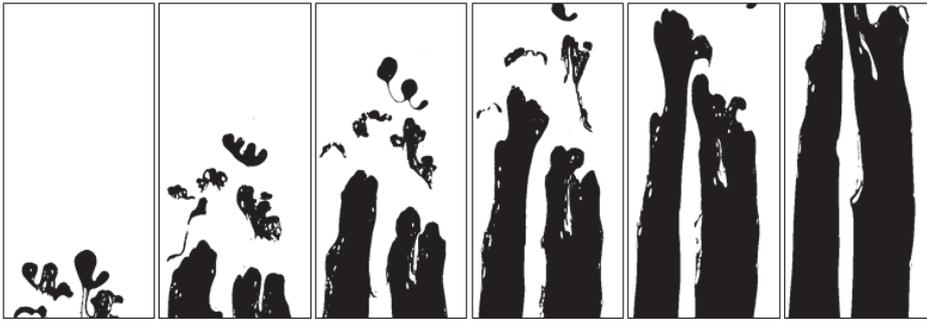


Figura 4.70: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 410,9721/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 16,870$; $\eta^* = 0,133$; $\dot{m} = 1,909$ g/s; $Re = 1,594$; $We = 1,575 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,179 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 61,920\%$, *Fingers*.

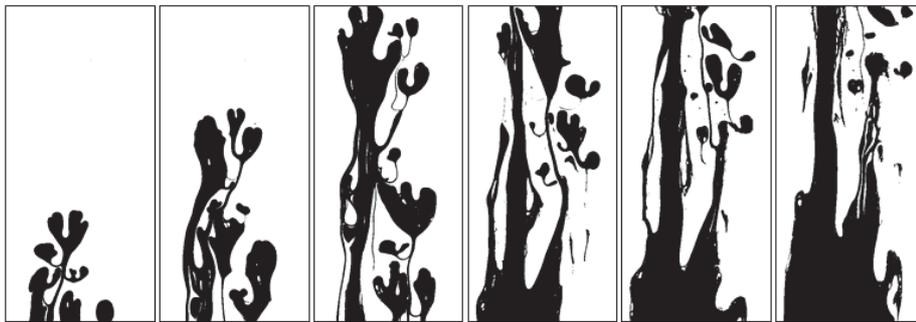


Figura 4.71: Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 478,5131/s$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 19,643$; $\eta^* = 0,119$; $\dot{m} = 2,223$ g/s; $Re = 2,068$; $We = 2,135 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,057 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 41,143\%$, *Fingers*.

As Figuras 4.52 a 4.59 mostram os testes que apresentam o padrão na interface de *plug*, interface estável, já nas Figuras 4.62 a 4.71 há a ocorrência de *fingers*, o inverso do que acontece quando o óleo desloca a solução de poliacrilamida. A partir da análise visual é possível observar que a transição acontece em uma taxa de cisalhamento adimensional ($\dot{\gamma}^*$) entre 3 e 4.

Também é possível observar que o número de Weber (We) é menor do que 1, significando que as forças inerciais foram menos importantes que as forças de tensão superficial. Observando a Figura 4.72 é possível verificar que nos três últimos testes (Figuras 4.69, 4.70 e 4.71) o número de Reynolds foi superior a 1 (entre 1 e 2), demonstrando assim que para esses últimos testes as forças de inércia foram maiores que as forças viscosas. Nos demais testes o número de Reynolds permaneceu inferior a 1, significando que estes foram realizados lentamente e que as forças viscosas foram superiores as forças inerciais. O número de Capilaridade (Ca) manteve-se inferior a 1, mostrando que as forças capilares foram mais relevantes que as viscosas em todos os testes, assim como nos experimentos nos quais o óleo deslocou a solução de poliacrilamida.

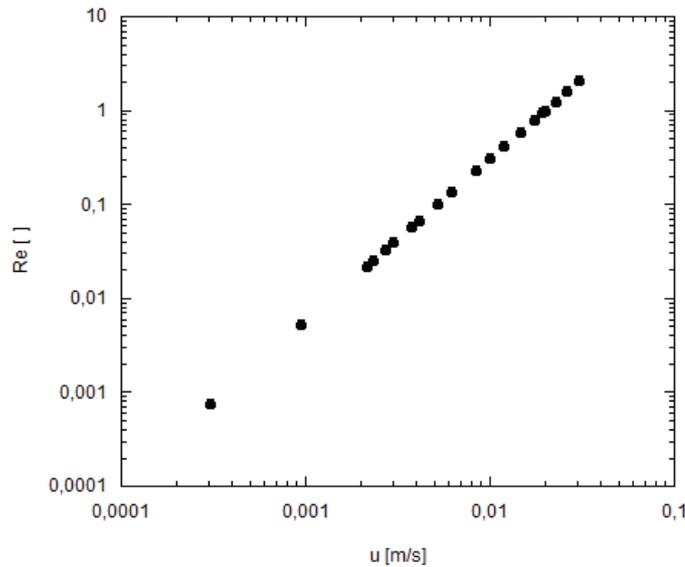


Figura 4.72: Solução de poliacrilamida deslocando óleo - Reynolds em função da velocidade.

A Figura 4.73 ilustra a eficiência em função da velocidade adimensional. Observa-se que com o aumento da velocidade adimensional, u^* , a eficiência diminui. Isso ocorre, assim como nos testes anteriores do óleo deslocando poliacrilamida, pois inicialmente o óleo é menos viscoso que a poliacrilamida, formando assim o *plug*. Com o aumento da velocidade adimensional e consequentemente da taxa de cisalhamento a viscosidade da poliacrilamida diminuiu, resultando em uma interface instável, *fingers*. Consequentemente ocorre a diminuição da eficiência.

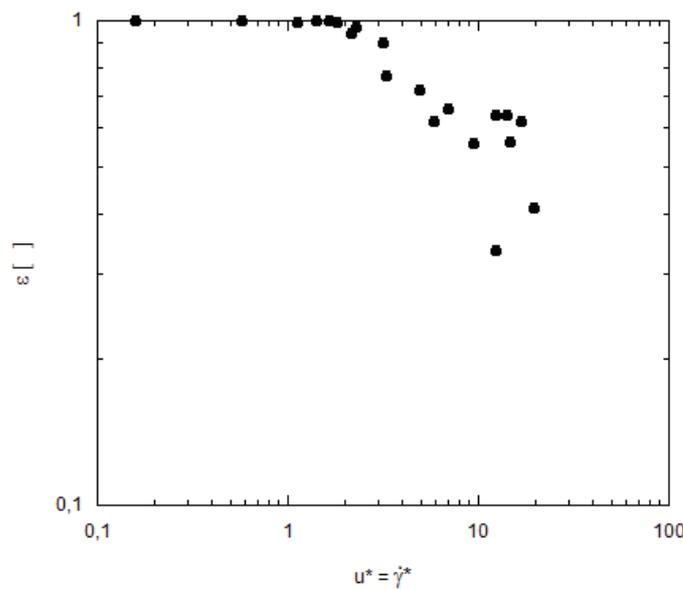


Figura 4.73: Solução de poliacrilamida deslocando óleo - Eficiência em função da velocidade adimensional.

A Figura 4.74 é um complemento da Figura 4.73, na qual é representada a eficiência em função da viscosidade adimensional. Como explicado, o aumento da viscosidade adimensional provoca um aumento na eficiência. Já a Figura 4.75 mostra os valores reais da viscosidade da poliacrilamida em cada teste para uma determinada taxa de cisalhamento, obtida pela variação da velocidade de escoamento.

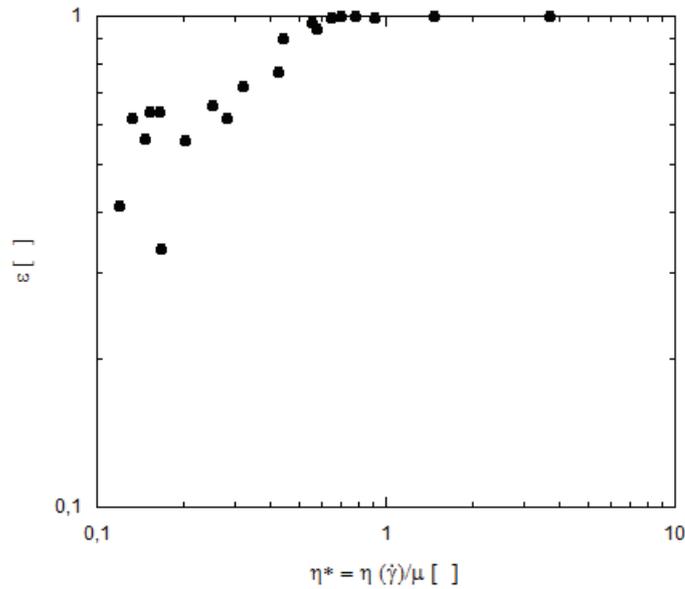


Figura 4.74: Solução de poliacrilamida deslocando óleo - Eficiência em função da viscosidade adimensional.

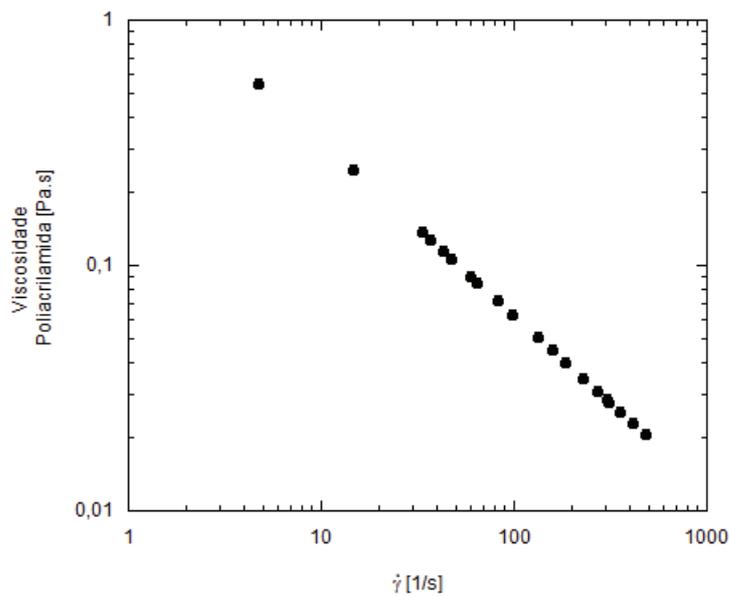


Figura 4.75: Solução de poliacrilamida deslocando óleo - Viscosidade adimensional em função da taxa de cisalhamento adimensional.

A Figura 4.76 ilustra os padrões de escoamento: *fingers* e *plug*. Observe-se que a transição do escoamento não ocorre em 1 como acontece com os fluidos newtonianos, mas entre 3 e 5.

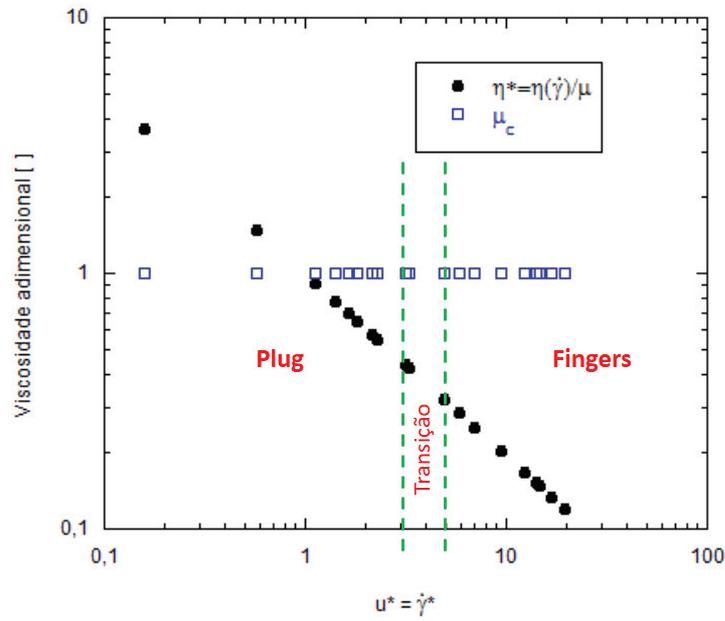


Figura 4.76: Solução de poliacrilamida deslocando óleo - Padrões de escoamento, *fingers* e *plug*.

4.2.3

Testes de visualização utilizando a goma xantana

Tabela 4.6: Parâmetros da solução de goma xantana 0,40% a 25°C.

$n[]$	0,257
$k[Pa.s^n]$	1,629
$\rho[kg/m^3]$ -GX	988,0
$\sigma[mN/m]$ -GX	58,2
$\sigma[mN/m]$ -GX-Óleo	29,8

Óleo mineral deslocando solução de goma xantana

As Figuras 4.77 a 4.97 apresentam as imagens tratadas do escoamento do óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%. As Figuras são apresentadas em ordem crescente da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$).

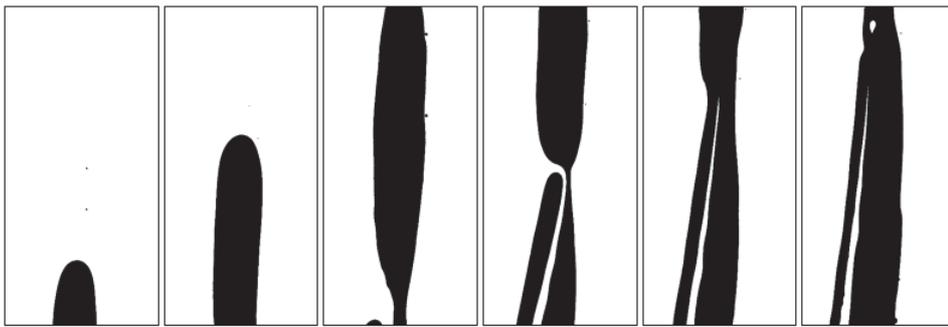


Figura 4.77: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40% – $\dot{\gamma} = 10,650$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,467$; $\eta^* = 1,760$; $\dot{m} = 0,052$ g/s; $Re = 0,005$; $We = 8,160 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 8,545 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 31,023\%$, *Fingers*.

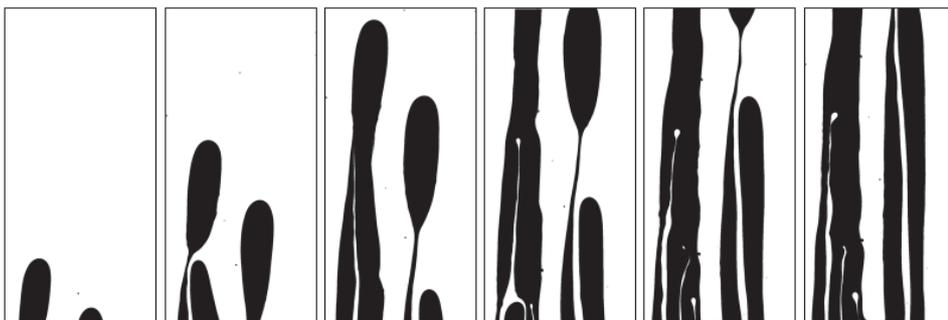


Figura 4.78: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40% – $\dot{\gamma} = 16,307$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,816$; $\eta^* = 1,163$; $\dot{m} = 0,080$ g/s; $Re = 0,007$; $We = 1,913 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 8,263 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 47,154\%$, *Fingers*.

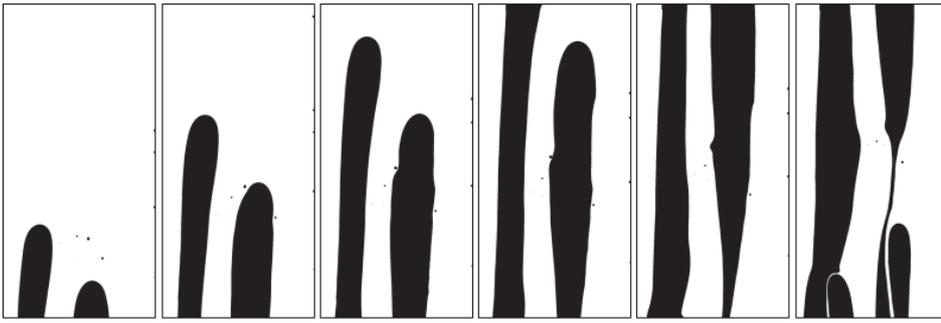


Figura 4.79: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 18,585$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,816$; $\eta^* = 1,164$; $\dot{m} = 0,092$ g/s; $Re = 0,008$;
 $We = 2,485 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 8,545 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 39,267\%$, *Fingers*.

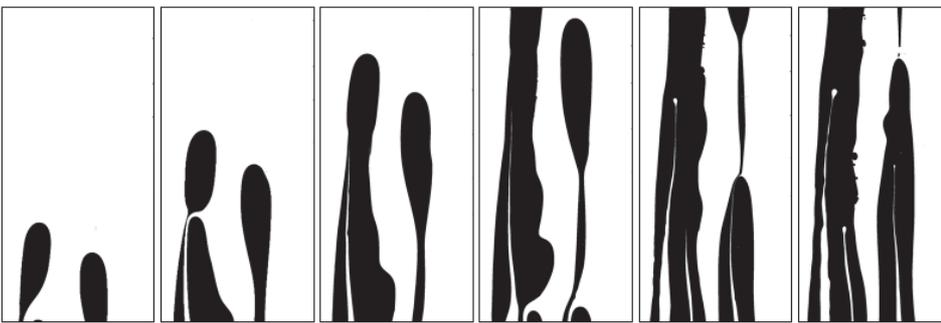


Figura 4.80: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 32,044$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,406$; $\eta^* = 0,776$; $\dot{m} = 0,158$ g/s; $Re = 0,014$;
 $We = 7,386 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 8,545 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 41,865\%$, *Fingers*.

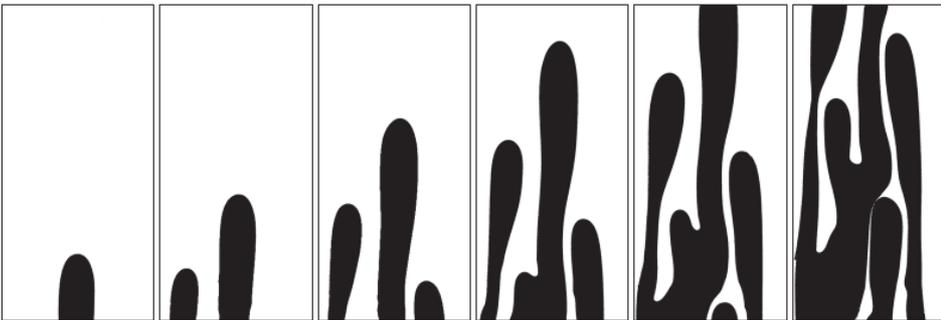


Figura 4.81: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 34,599$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,518$; $\eta^* = 0,733$; $\dot{m} = 0,171$ g/s; $Re = 0,016$;
 $We = 8,612 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 8,545 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 58,836\%$, *Fingers*.

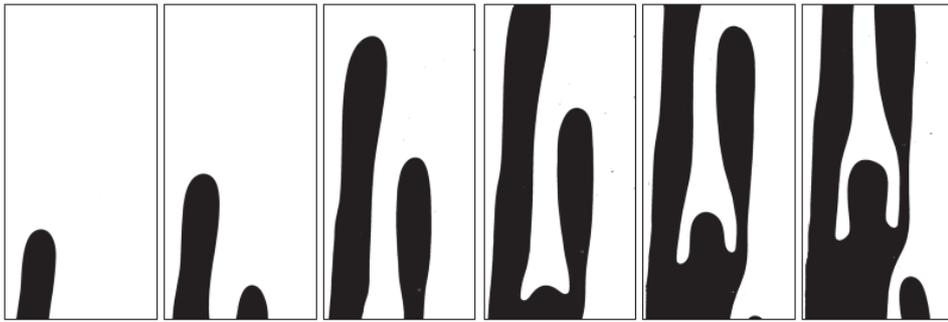


Figura 4.82: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 34,828 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,679$; $\eta^* = 0,681$; $\dot{m} = 0,172 \text{ g/s}$; $Re = 0,015$;
 $We = 8,726 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 8,342 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 50,764\%$, *Fingers*.

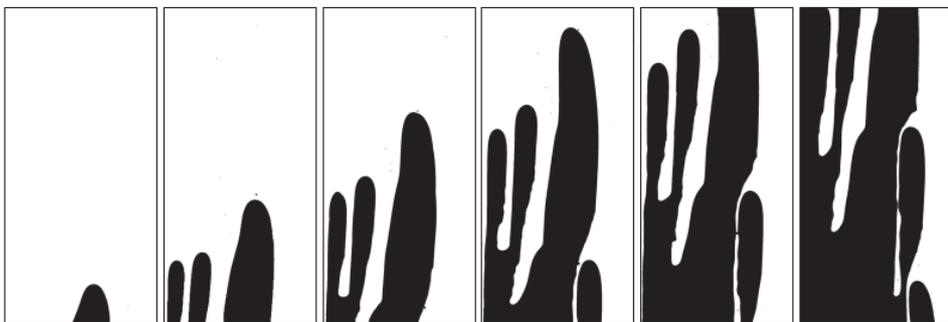


Figura 4.83: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 38,717 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,238$; $\eta^* = 0,550$; $\dot{m} = 0,191 \text{ g/s}$; $Re = 0,014$;
 $We = 1,078 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 7,962 \cdot 10^{-2}$; $T = 20^\circ C$; $\varepsilon = 67,772\%$, *Fingers*.

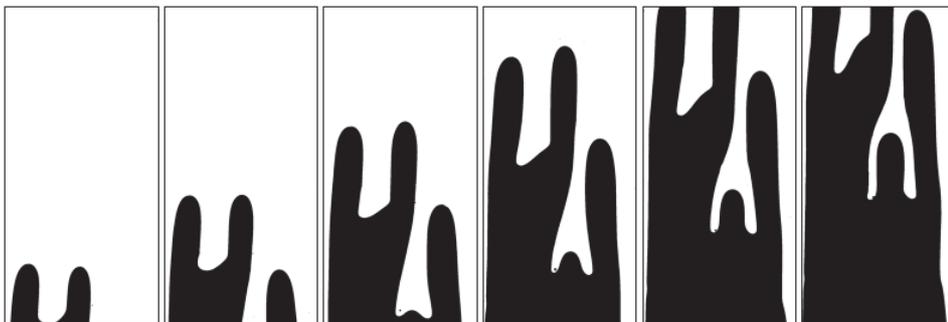


Figura 4.84: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 53,261 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,427$; $\eta^* = 0,517$; $\dot{m} = 0,263 \text{ g/s}$; $Re = 0,023$;
 $We = 2,041 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,463 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 76,563\%$, *Fingers*.

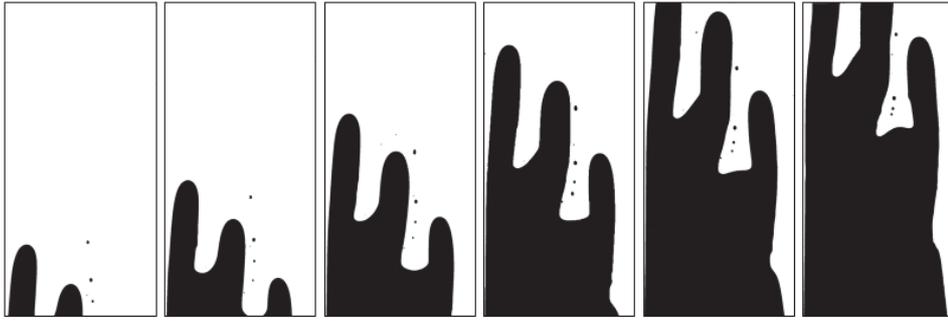


Figura 4.85: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 53,285$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,616$; $\eta^* = 0,489$; $\dot{m} = 0,263$ g/s; $Re = 0,022$;
 $We = 2,042 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,302 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 76,037\%$, *Fingers*.

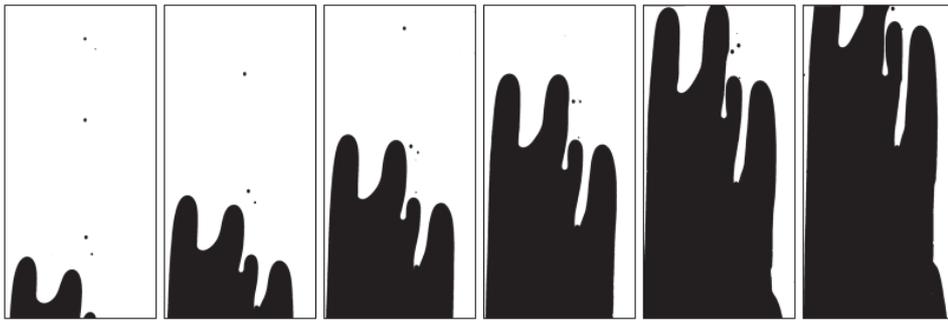


Figura 4.86: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 58,781$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,755$; $\eta^* = 0,471$; $\dot{m} = 0,290$ g/s; $Re = 0,025$;
 $We = 2,486 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,402 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 80,178\%$, *Fingers*.

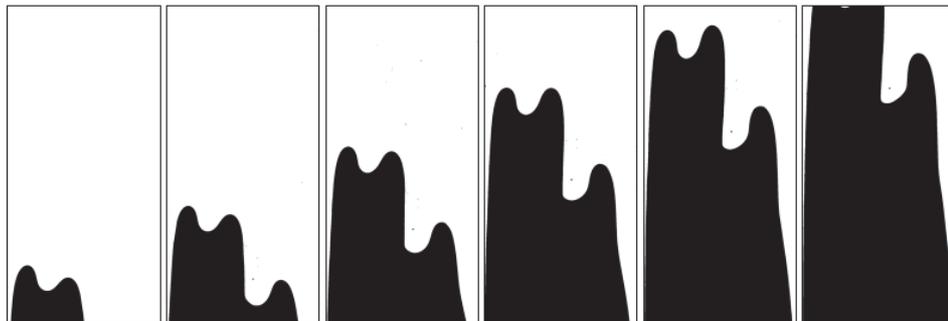


Figura 4.87: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 63,496$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,056$; $\eta^* = 0,436$; $\dot{m} = 0,313$ g/s; $Re = 0,027$;
 $We = 2,891 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,342 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 81,234\%$, *Fingers*.

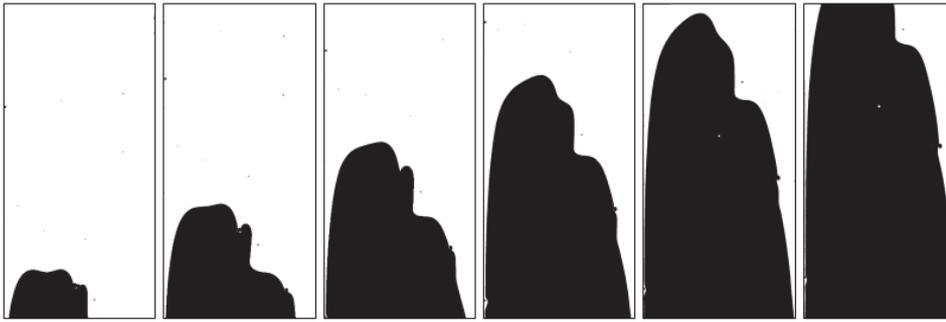


Figura 4.88: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 63,529 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,387$; $\eta^* = 0,404$; $\dot{m} = 0,313 \text{ g/s}$; $Re = 0,025$;
 $We = 2,903.10^{-4}$; $Ca = 8,128.10^{-2}$; $T = 21^\circ C$; $\varepsilon = 85,118\%$, *Transição*.

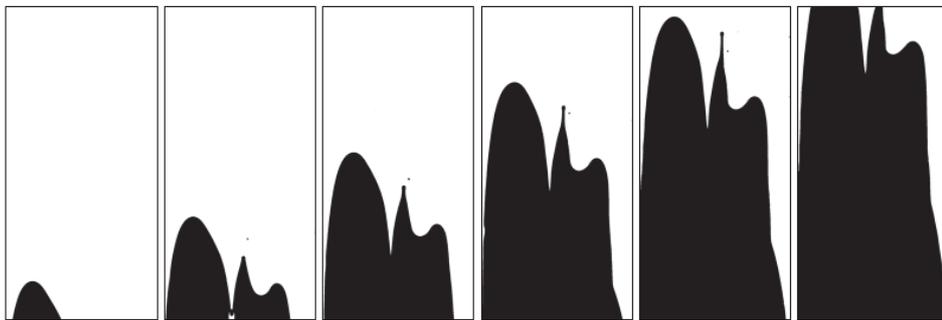


Figura 4.89: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 68,633 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,217$; $\eta^* = 0,420$; $\dot{m} = 0,338 \text{ g/s}$; $Re = 0,029$;
 $We = 3,389.10^{-4}$; $Ca = 8,402.10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 82,483\%$, *Transição*.

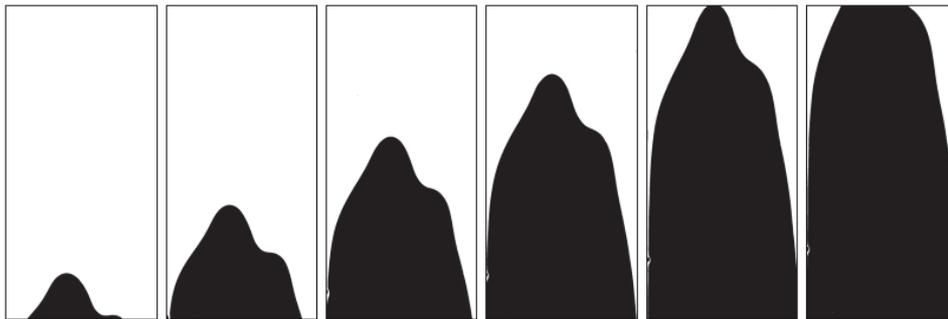


Figura 4.90: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 74,168 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,380$; $\eta^* = 0,405$; $\dot{m} = 0,366 \text{ g/s}$; $Re = 0,032$;
 $We = 3,957.10^{-4}$; $Ca = 8,463.10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 89,019\%$, *Transição*.

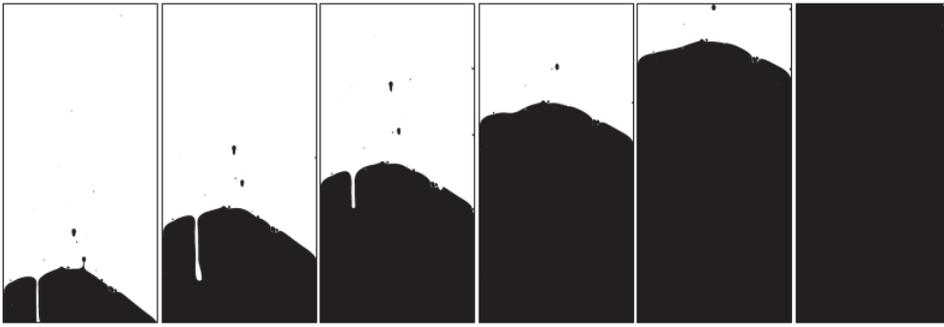


Figura 4.91: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 197,714 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 8,676$; $\eta^* = 0,201$; $\dot{m} = 0,975 \text{ g/s}$; $Re = 0,089$;
 $We = 2,812 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,545 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 99,931\%$, *Plug*.

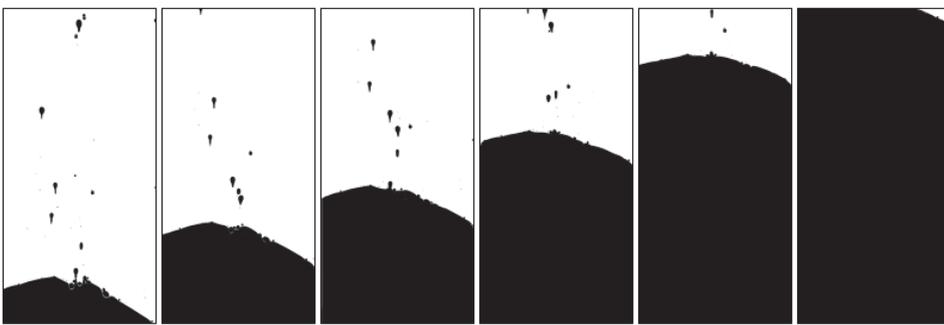


Figura 4.92: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 229,365 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 9,596$; $\eta^* = 0,186$; $\dot{m} = 1,131 \text{ g/s}$; $Re = 0,107$;
 $We = 3,784 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,651 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 99,696\%$, *Plug*.

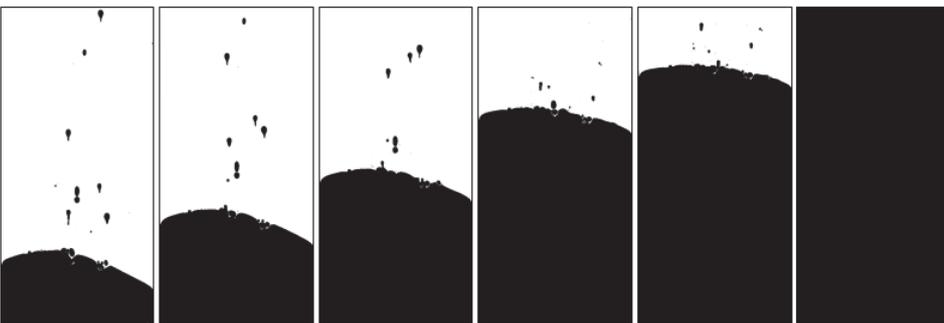


Figura 4.93: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 249,621 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 9,952$; $\eta^* = 0,181$; $\dot{m} = 1,231 \text{ g/s}$; $Re = 0,120$;
 $We = 4,482 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,759 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 100\%$, *Plug*.

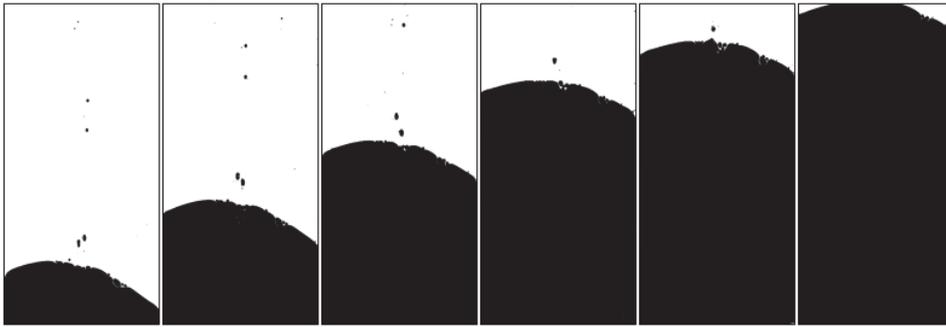


Figura 4.94: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 254,012 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 11,360$; $\eta^* = 0,164$; $\dot{m} = 1,252 \text{ g/s}$; $Re = 0,113$;
 $We = 4,642 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,504 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 98,434\%$, *Plug*.

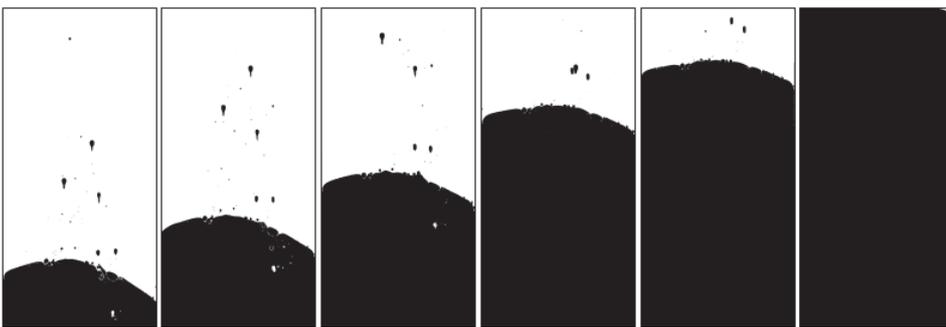


Figura 4.95: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 275,304 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 10,976$; $\eta^* = 0,169$; $\dot{m} = 1,357 \text{ g/s}$; $Re = 0,133$;
 $We = 5,452 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,759 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 99,919\%$, *Plug*.

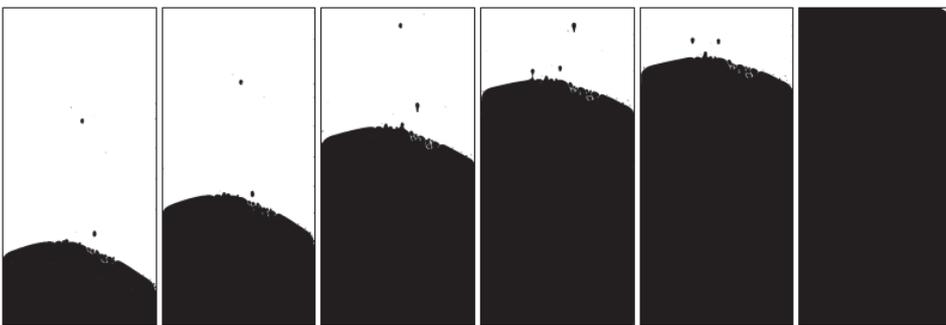


Figura 4.96: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%—
 $\dot{\gamma} = 282,736 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 13,629$; $\eta^* = 0,144$; $\dot{m} = 1,394 \text{ g/s}$; $Re = 0,118$;
 $We = 5,751 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,342 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,908\%$, *Plug*.

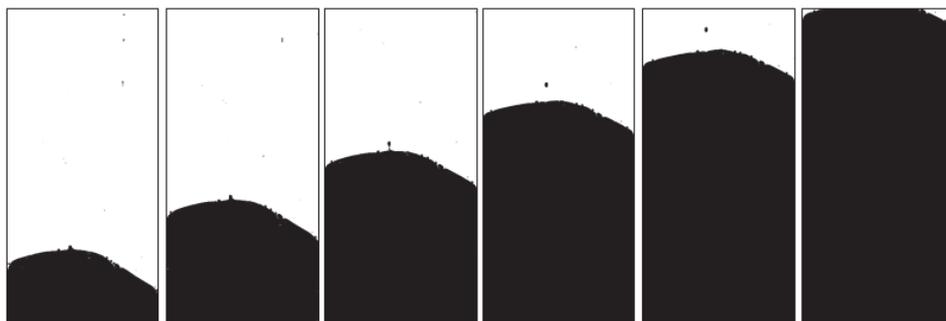


Figura 4.97: Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 313,614$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 14,564$; $\eta^* = 0,137$; $\dot{m} = 1,546$ g/s; $Re = 0,135$; $We = 7,075 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,422 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,319\%$, *Plug*.

As Figuras 4.77 a 4.87 mostram os testes que apresentam o padrão na interface de *fingers*, interface instável, já nas Figuras 4.91 a 4.97 há a ocorrência de uma interface estável, *plug*. A partir da análise visual é possível observar que a transição acontece em uma taxa de cisalhamento adimensional ($\dot{\gamma}^*$) próxima a 3,5, também diferente do que ocorre com fluidos newtonianos que é próxima a 1.

É possível observar que o número de Weber (We) é sempre inferior a 1, ou seja, as forças inerciais foram menos importantes que as forças de tensão superficial. Quanto ao número de Reynolds (Re), observa-se que foi inferior a 1 em todos os testes, significando que os mesmos foram realizados bem lentamente e que as forças viscosas foram superiores às forças inerciais (Figura 4.98). O número de Capilaridade (Ca) manteve-se inferior a 1, mostrando que as forças capilares foram mais relevantes que as viscosas em todos os testes.

Outra observação importante é que diferente do que aconteceu com os testes realizados com a poliacrilamida (óleo mineral deslocando a solução da poliacrilamida - a partir da Figura 4.39), não houve a ocorrência da formação de mini *fingers* na interface entre os dois fluidos. Podendo assim responsabilizar as características elásticas da poliacrilamida para que essa situação ocorra.

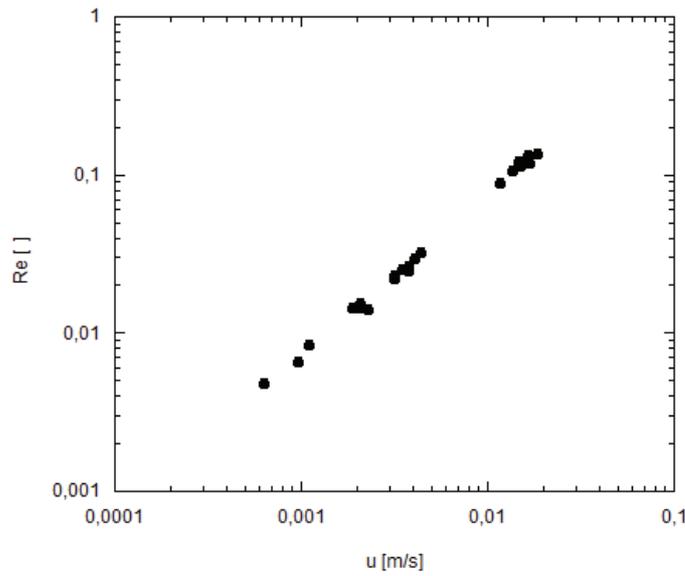


Figura 4.98: Óleo deslocando solução de goma xantana - Reynolds em função da velocidade.

A Figura 4.99 ilustra a eficiência em função da velocidade adimensional. Observa-se que com o aumento da velocidade adimensional, u^* , a eficiência aumenta, isso porque inicialmente o óleo é menos viscoso que a goma xantana, formando assim os *fingers*. Com o aumento da velocidade adimensional e consequentemente da taxa de cisalhamento a viscosidade da goma xantana diminui, tornando o óleo, cuja viscosidade se manteve constante (fluido newtoniano), mais viscoso que a goma xantana, resultando em uma interface estável, plug. Consequentemente ocorre o aumento da eficiência.

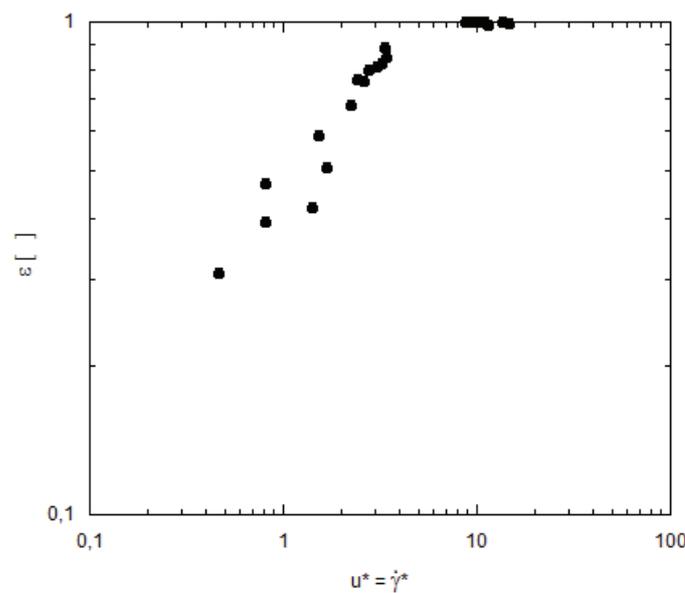


Figura 4.99: Óleo deslocando solução de goma xantana - Eficiência em função da velocidade adimensional.

A Figura 4.100 representa a eficiência em função da viscosidade adimensional. Como explicado anteriormente, o aumento da viscosidade adimensional provoca um decréscimo na eficiência. Já a Figura 4.101 mostra os valores reais da viscosidade da goma xantana em cada teste para uma determinada taxa de cisalhamento, obtida pela variação da velocidade de escoamento.

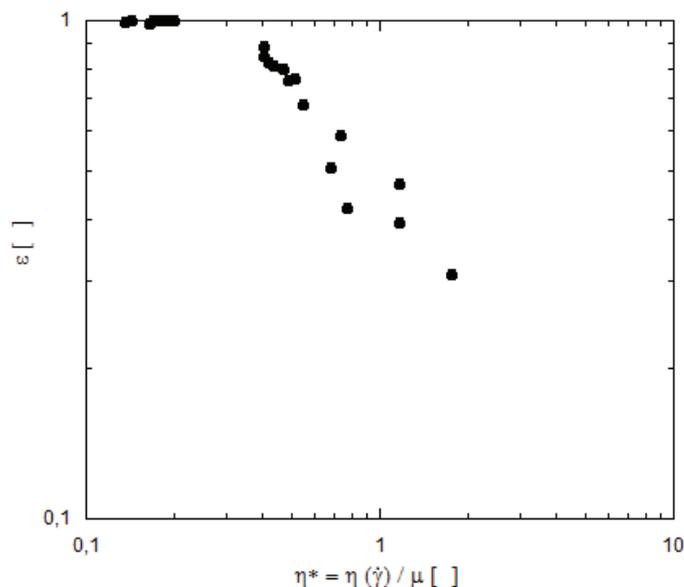


Figura 4.100: Óleo deslocando solução de goma xantana - Eficiência em função da viscosidade adimensional.

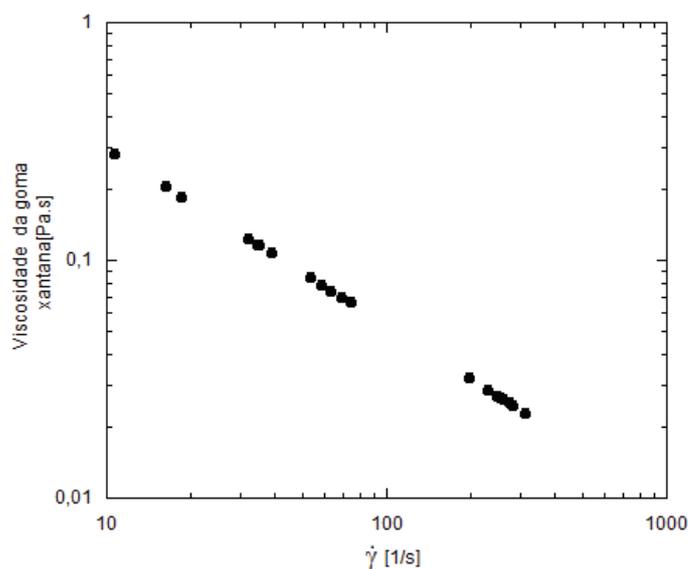


Figura 4.101: Óleo deslocando solução de goma xantana - Viscosidade adimensional em função da taxa de cisalhamento adimensional.

A Figura 4.102 ilustra os padrões de escoamento: *fingers* e *plug*. Observe-se que a transição do escoamento não ocorre em 1 como acontece com os fluidos newtonianos, mas próximo a 3,5.

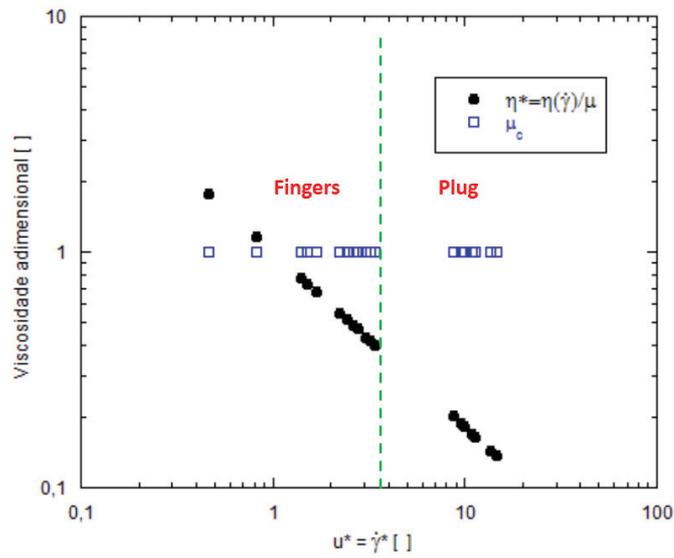


Figura 4.102: Óleo deslocando solução de goma xantana - Padrões de escoamento, *fingers* e *plug*.

Solução de goma xantana deslocando óleo mineral

As Figuras 4.103 a 4.125 apresentam as imagens tratadas do escoamento da solução de goma xantana 0,40% deslocando o óleo mineral. As Figuras são apresentadas em ordem crescente da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$).

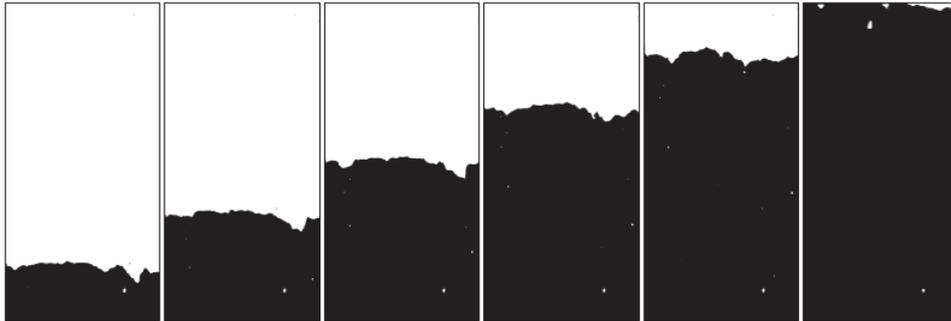


Figura 4.103: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 7,886$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,314$; $\eta^* = 2,362$; $\dot{m} = 0,034$ g/s; $Re = 0,004$; $We = 5,095 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 2,069 \cdot 10^{-1}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 99,454\%$, *Plug*.

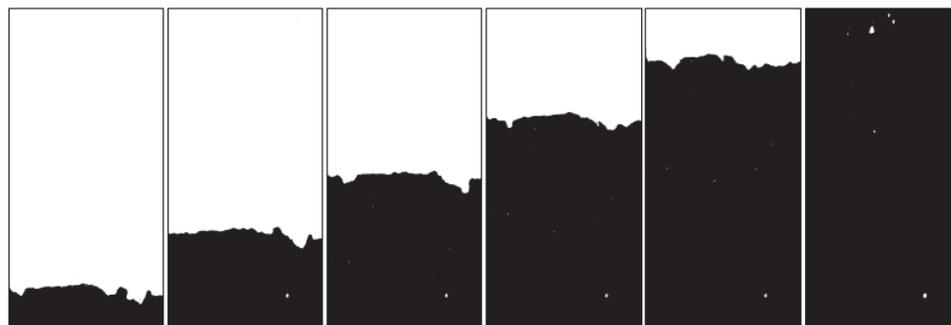


Figura 4.104: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 11,183$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,446$; $\eta^* = 1,822$; $\dot{m} = 0,048$ g/s; $Re = 0,003$; $We = 1,025 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,596 \cdot 10^{-1}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 99,876\%$, *Plug*.



Figura 4.105: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 12,477$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,408$; $\eta^* = 1,946$; $\dot{m} = 0,054$ g/s; $Re = 0,004$; $We = 1,275 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,793 \cdot 10^{-1}$; $T = 26^\circ C$; $\varepsilon = 99,293\%$, *Plug*.

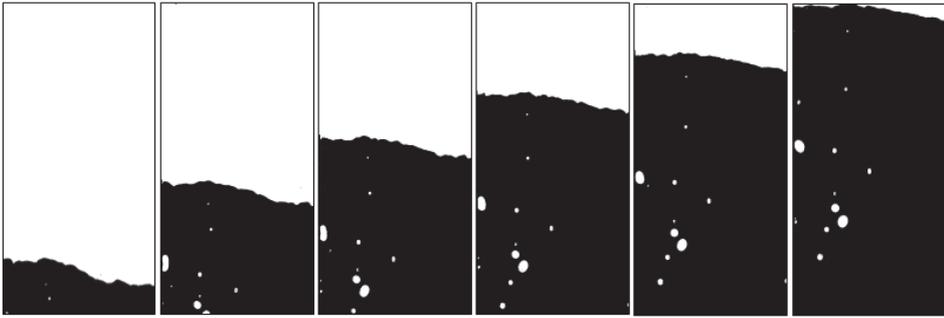


Figura 4.106: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 12,547 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,410$; $\eta^* = 1,938$; $\dot{m} = 0,054 \text{ g/s}$; $Re = 0,004$; $We = 1,290 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,786 \cdot 10^{-1}$; $T = 26^\circ C$; $\varepsilon = 97,472\%$, *Plug*.

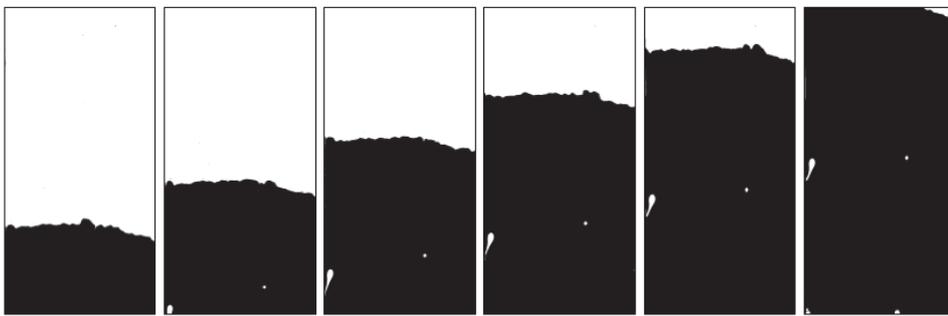


Figura 4.107: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 21,368 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,772$; $\eta^* = 1,121$; $\dot{m} = 0,093 \text{ g/s}$; $Re = 0,010$; $We = 3,740 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,088 \cdot 10^{-1}$; $T = 25^\circ C$; $\varepsilon = 99,347\%$, *Plug*.

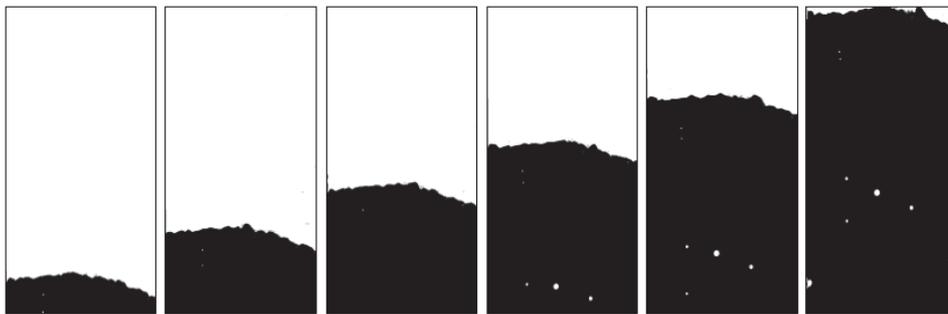


Figura 4.108: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 23,281 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,842$; $\eta^* = 1,137$; $\dot{m} = 0,101 \text{ g/s}$; $Re = 0,012$; $We = 4,440 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,021 \cdot 10^{-1}$; $T = 25^\circ C$; $\varepsilon = 98,011\%$, *Plug*.

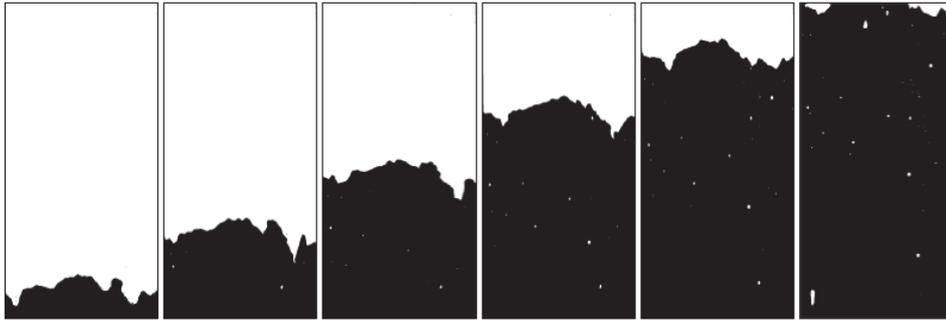


Figura 4.109: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 33,629$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,341$; $\eta^* = 0,804$; $\dot{m} = 0,146$ g/s; $Re = 0,023$; $We = 9,265 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 7,044 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 98,291\%$, *Plug*.

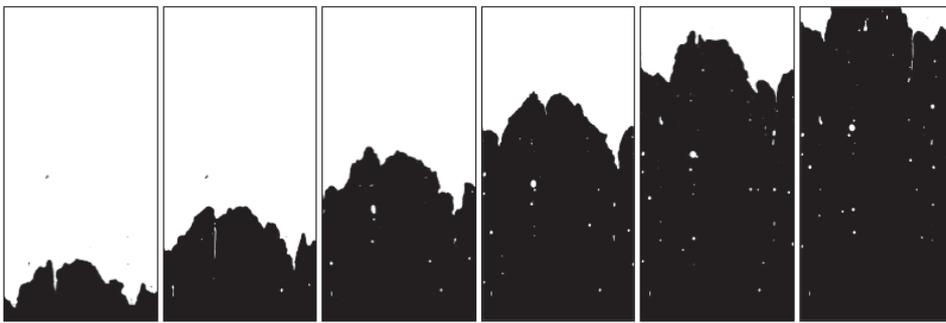


Figura 4.110: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 42,338$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,688$; $\eta^* = 0,678$; $\dot{m} = 0,183$ g/s; $Re = 0,034$; $We = 1,468 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 5,936 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 95,365\%$, *Plug*.

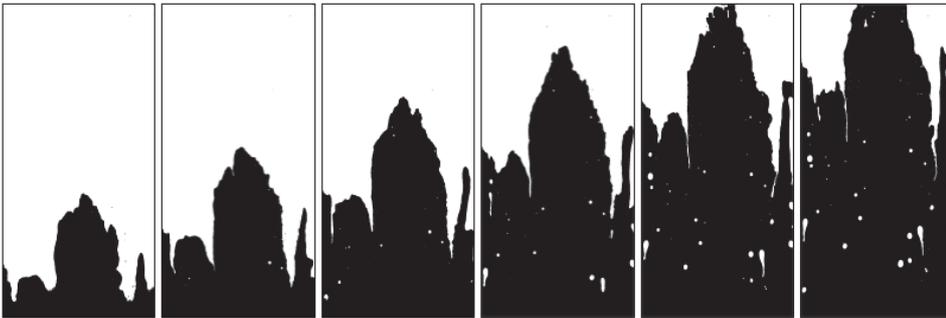


Figura 4.111: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 56,787$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,264$; $\eta^* = 0,545$; $\dot{m} = 0,246$ g/s; $Re = 0,034$; $We = 2,642 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 4,773 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 83,656\%$, *Transição*.



Figura 4.112: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 64,077$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,555$; $\eta^* = 0,498$; $\dot{m} = 0,277$ g/s; $Re = 0,071$; $We = 3,363 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 4,363 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 75,448\%$, *Fingers*.

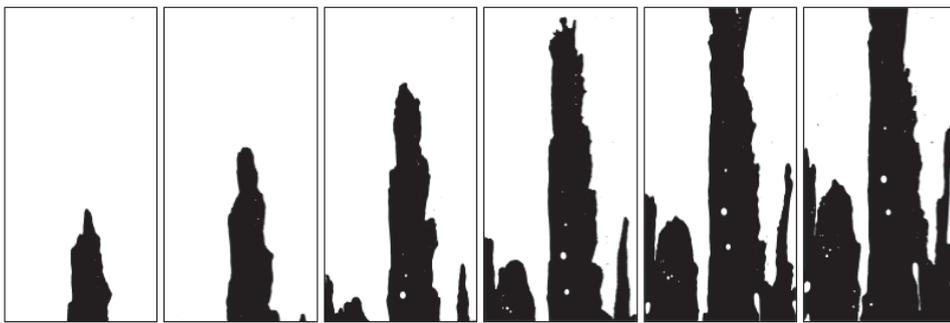


Figura 4.113: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 74,218$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,959$; $\eta^* = 0,447$; $\dot{m} = 0,321$ g/s; $Re = 0,091$; $We = 4,512 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 3,912 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 53,451\%$, *Fingers*.



Figura 4.114: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 80,803$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,222$; $\eta^* = 0,419$; $\dot{m} = 0,350$ g/s; $Re = 0,106$; $We = 5,349 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 3,672 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 65,525\%$, *Fingers*.



Figura 4.115: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 107,904$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 4,302$; $\eta^* = 0,338$; $\dot{m} = 0,467$ g/s; $Re = 0,175$; $We = 9,538 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 2,962 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 45,537\%$, *Fingers*.



Figura 4.116: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 136,417$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 5,439$; $\eta^* = 0,384$; $\dot{m} = 0,591$ g/s; $Re = 0,264$; $We = 1,524 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 2,489 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 37,168\%$, *Fingers*.

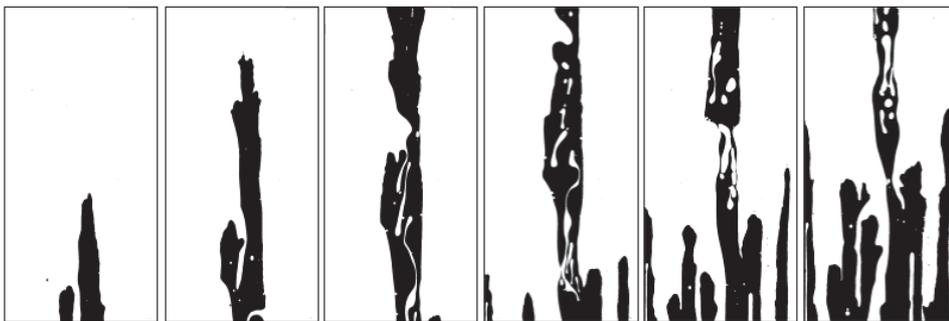


Figura 4.117: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 145,249$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 5,790$; $\eta^* = 0,271$; $\dot{m} = 0,629$ g/s; $Re = 0,294$; $We = 1,728 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 2,375 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 32,983\%$, *Fingers*.

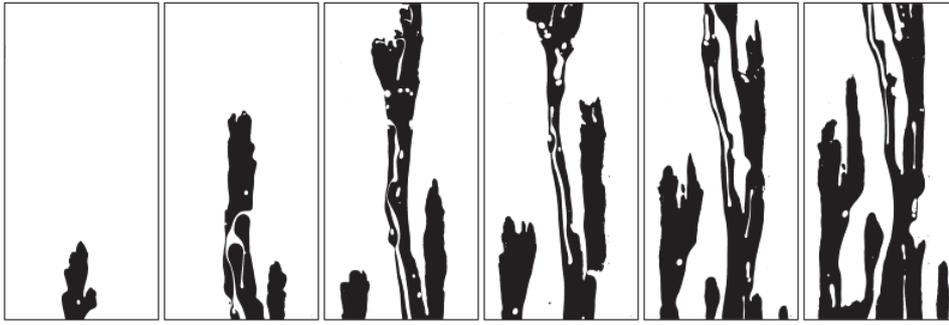


Figura 4.118: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 164,246$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 7,208$; $\eta^* = 0,230$; $\dot{m} = 0,711$ g/s; $Re = 0,365$; $We = 2,210 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 1,970 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 37,218\%$, *Fingers*.



Figura 4.119: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 179,466$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 7,15$; $\eta^* = 0,232$; $\dot{m} = 0,777$ g/s; $Re = 0,426$; $We = 2,638 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 2,030 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 32,940\%$, *Fingers*.

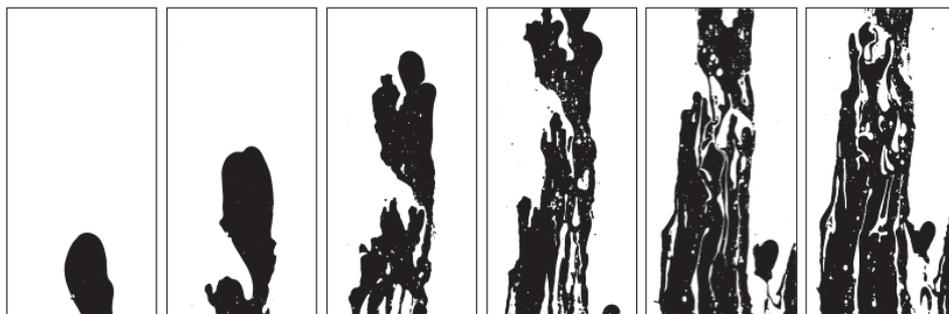


Figura 4.120: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 187,832$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 7,489$; $\eta^* = 0,224$; $\dot{m} = 0,813$ g/s; $Re = 0,461$; $We = 2,890 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 1,962 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 44,523\%$, *Fingers*.

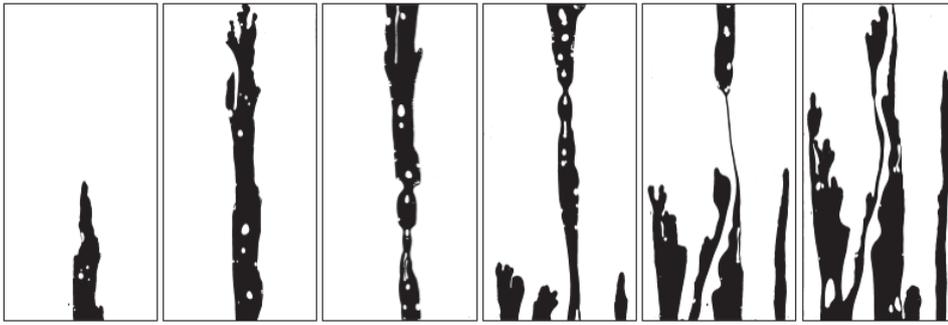


Figura 4.121: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 207,825$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 8,286$; $\eta^* = 0,208$; $\dot{m} = 0,900$ g/s; $Re = 0,550$; $We = 3,538.10^{-3}$; $Ca = 1,820.10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 30,436\%$, *Fingers*.



Figura 4.122: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 240,19$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 9,576$; $\eta^* = 0,187$; $\dot{m} = 1,040$ g/s; $Re = 0,707$; $We = 4,726.10^{-3}$; $Ca = 1,635.10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 28,370\%$, *Fingers*.



Figura 4.123: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 276,971$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 11,043$; $\eta^* = 0,168$; $\dot{m} = 1,199$ g/s; $Re = 0,907$; $We = 6,284.10^{-3}$; $Ca = 1,479.10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 25,609\%$, *Fingers*.

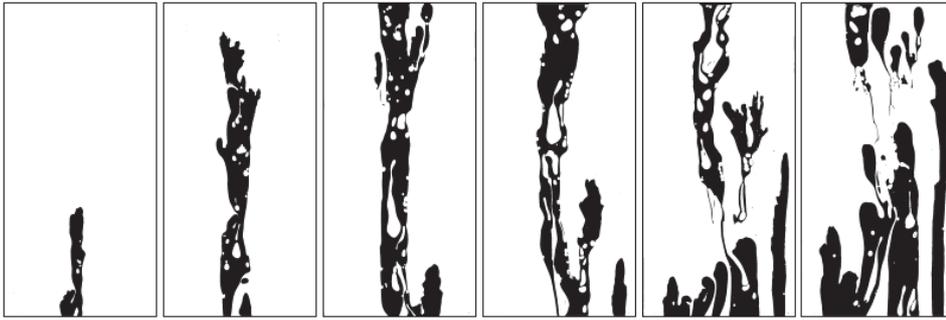


Figura 4.124: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 291,310$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 12,784$; $\eta^* = 0,151$; $\dot{m} = 1,261$ g/s; $Re = 0,990$; $We = 6,952 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 1,287 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 31,109\%$, *Fingers*.



Figura 4.125: Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 326,364$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 14,322$; $\eta^* = 0,138$; $\dot{m} = 1,413$ g/s; $Re = 1,207$; $We = 8,726 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 1,183 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 23,568\%$, *Fingers*.

As Figuras 4.103 a 4.110 mostram os testes que apresentam o padrão na interface de *plug*, interface estável, já nas Figuras 4.112 a 4.125 há a ocorrência de *fingers*, o inverso do que acontece quando o óleo desloca a solução de goma xantana. A partir da análise visual é possível observar que a transição acontece em uma taxa de cisalhamento adimensional ($\dot{\gamma}^*$) entre 2 e 2,5.

Também é possível observar, assim como nos outros testes, que o número de Weber (We) é menor que 1. Observando a Figura 4.126 é possível verificar que o número de Reynolds manteve-se inferior a 1, exceto no último teste (Figura 4.125), demonstrando que as forças de inércia foram menores que as forças viscosas. O número de Capilaridade (Ca) manteve-se inferior a 1. Além disso observa-se também que com o aumento da taxa de cisalhamento o número de capilaridade diminuiu.

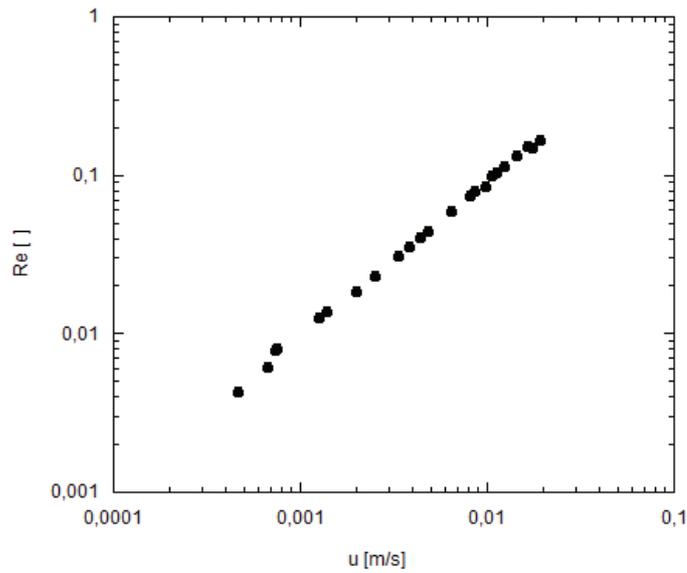


Figura 4.126: Solução de goma xantana deslocando óleo - Reynolds em função da velocidade.

A Figura 4.127 ilustra a eficiência em função da velocidade adimensional. Observa-se que com o aumento da velocidade adimensional, u^* , a eficiência diminui. Isso ocorre, assim como nos testes anteriores do óleo deslocando goma xantana, porque inicialmente o óleo é menos viscoso que a goma xantana, formando assim o *plug*. Com o aumento da velocidade adimensional e conseqüentemente da taxa de cisalhamento a viscosidade da goma xantana diminuiu, resultando em uma interface instável, *fingers*. Conseqüentemente ocorre a diminuição da eficiência.

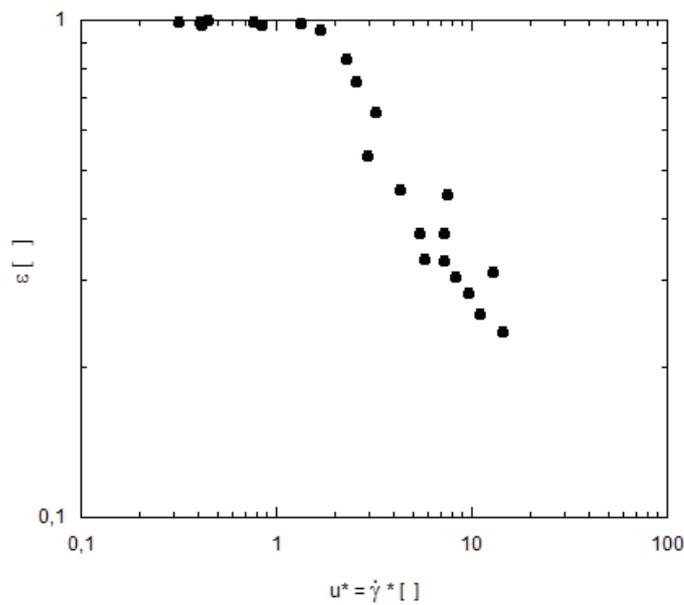


Figura 4.127: Solução de goma xantana deslocando óleo - Eficiência em função da velocidade adimensional.

A Figura 4.128 representa a eficiência em função da viscosidade adimensional. Como explicado, o aumento da viscosidade adimensional provoca um aumento na eficiência. Já a Figura 4.129 mostra os valores reais da viscosidade da goma xantana em cada teste para uma determinada taxa de cisalhamento, obtida pela variação da velocidade de escoamento.

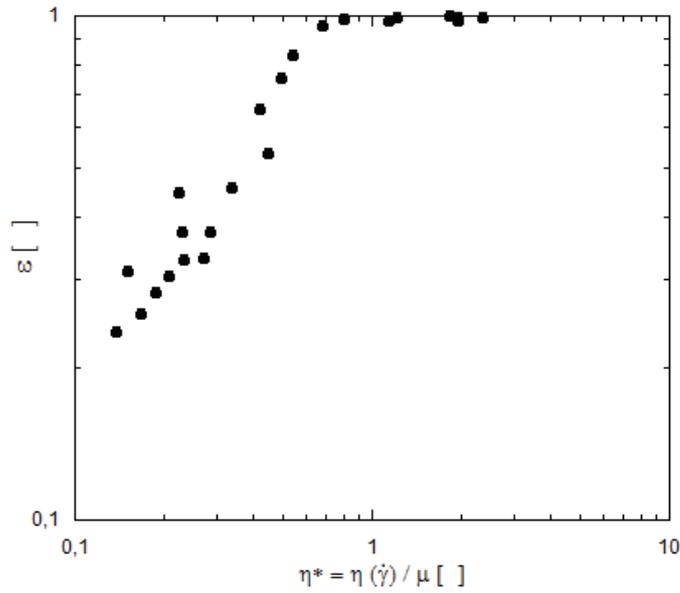


Figura 4.128: Solução de goma xantana deslocando óleo - Eficiência em função da viscosidade adimensional.

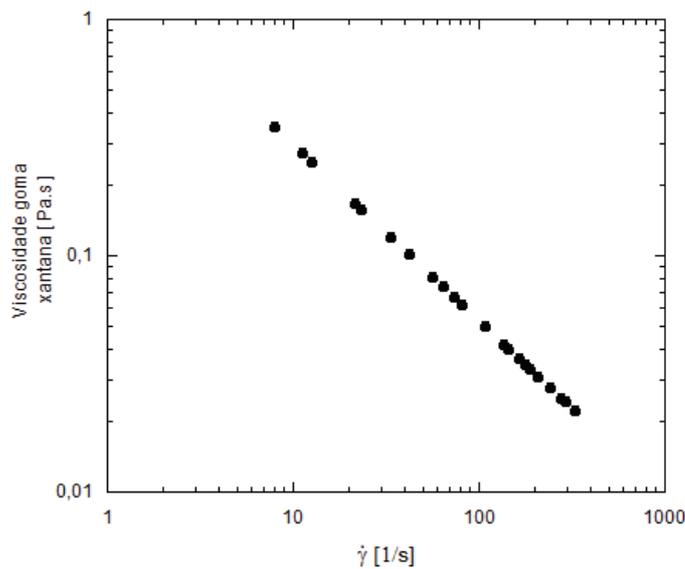


Figura 4.129: Solução de goma xantana deslocando óleo - Viscosidade adimensional em função da taxa de cisalhamento adimensional.

A Figura 4.130 ilustra os padrões de escoamento: *fingers* e *plug*. Observe-se que a transição do escoamento não ocorre em 1 como acontece com os fluidos newtonianos, mas próximo a 2,5.

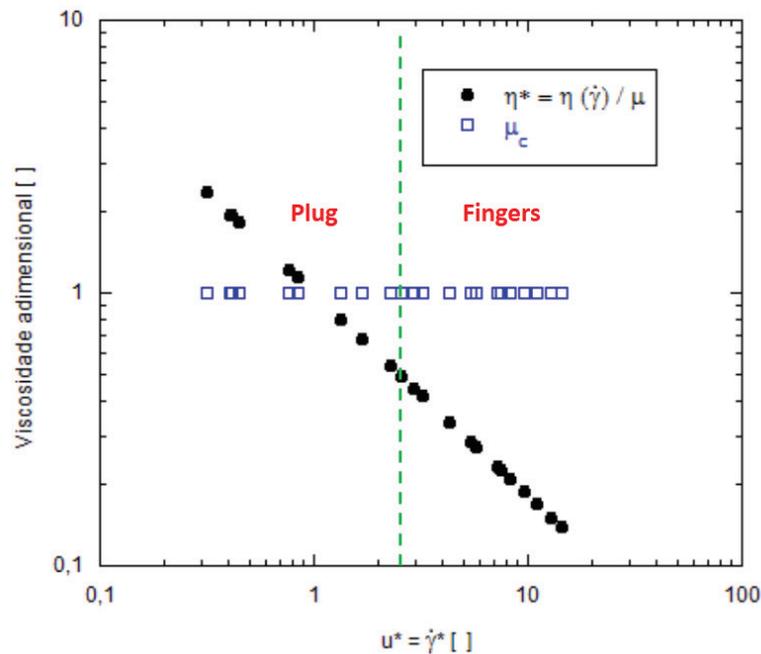


Figura 4.130: Solução de goma xantana deslocando óleo - Padrões de escoamento, *fingers* e *plug*.

Discussões sobre os resultados com a Poliacrilamida e Goma xantana

Os testes realizados com a poliacrilamida foram mais fáceis do que os testes com a goma xantana. Na goma xantana, apesar da espera de 24hs para o início dos testes, ainda era possível verificar a presença de microbolhas. Por isso, alguns pesquisadores acreditam que a goma xantana possui tensão limite de escoamento, τ_0 , muito baixo, porém o suficiente para aprisionar as microbolhas. Esse valor seria tão baixo que os reômetros não conseguem medir, extrapolando a faixa de torque mínimo dos mesmos.

Nos testes do óleo mineral deslocando a solução de poliacrilamida, foi possível constatar que com o aumento da velocidade, do número de Weber e do número de Reynolds, a interface se torna mais estável. Porém a instabilidade não desaparece, apenas diminui, formando mini *fingers* com velocidades aproximadas. Já nos testes inversos, poliacrilamida deslocando óleo mineral, ocorre o contrário, a interface se torna mais instável, *fingers*.

Nos testes do óleo deslocando goma xantana, foi possível constatar que com o aumento da velocidade, do número de Weber e do número de Reynolds, a interface se torna mais estável. Devido às características da goma

xantana, microbolhas atrapalharam o escoamento e o tratamento das imagens como pode ser observado nas mesmas. Já nos testes inversos, goma xantana deslocando óleo mineral, ocorre o contrário, a interface se torna mais instável, *fingers*.

Comparando os *fingers* obtidos nos testes com a goma xantana em relação aos obtidos nos testes da poliacrilamida, é possível observar que eles são mais estreitos. Esses *fingers* são mais estreitos devido a rigidez desse polímero, diferente da poliacrilamida que é um polímero flexível.

Ao comparar os resultados com a poliacrilamida e a goma xantana, apesar de serem polímeros de estruturas distintas os resultados obtidos não foram significativamente diferentes. Uma provável causa é que a elasticidade da poliacrilamida não interferiu muito nos testes, a não ser na interface com os mini *fingers*, que não deixou de ser *plug*.