

Patricia Emidio de Azevedo

**Deslocamento de líquidos não newtonianos
em células de Hele-Shaw**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Rio de Janeiro
julho de 2015

Patricia Emidio de Azevedo

**Deslocamento de líquidos não newtonianos
em células de Hele-Shaw**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de julho de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Patricia Emidio de Azevedo

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2011.

Ficha Catalográfica

Azevedo, Patricia Emidio de
Deslocamento de líquidos não newtonianos em células de Hele-Shaw / Patricia Emidio de Azevedo; orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes. – 2015.
136 f.: il. (color.); 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Células de Hele-Shaw. 3. Invasão de fluido de perfuração. 4. Estabilidade de interface. 5. Fluido não newtoniano. I. Mendes, Paulo Roberto de Souza. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

Aos meus pais e meu noivo

Agradecimentos

Gostaria primeiramente de agradecer ao meu orientador, professor Paulo Roberto de Souza Mendes, pela oportunidade e confiança depositada em mim para realizarmos em conjunto essa pesquisa.

A minha família pelo apoio e carinho. Agradeço, em especial, à minha mãe e ao meu pai que sempre me apoiaram, me incentivaram e me ajudaram de todas as maneiras possíveis para a realização desse sonho, sofrendo em cada decepção e vibrando por cada sucesso.

Ao meu noivo, melhor amigo e companheiro de todas as horas, Marcelo Silval, pelo carinho, compreensão, amor e solidariedade. Obrigada por estar ao meu lado durante esses nove anos, como amigo, namorado e depois como noivo, sempre me apoiando e me ajudando.

Obrigada a todos do Grupo de Reologia da PUC-Rio e amigos. Ao Bruno Fonseca, um irmão, que me ajudou nos momentos mais difíceis tanto emocionalmente quanto profissionalmente. Ao Alexandre Fernandes com sua experiência de vida que sempre me motivou e encorajou. Agradeço a eles também por me auxiliarem na montagem e manutenção da bancada experimental. À Caroline Grossi, técnica em química do laboratório e amiga, que me ajudou no preparo dos fluidos e na caracterização reológica dos mesmos, além de ajudar a solucionar problemas os quais não dominava devido a minha formação acadêmica. À Paula Nascimento, estagiária do laboratório e amiga, que com sua proatividade sempre me ajudou a solucionar problemas decorrentes e me ouvia sempre que necessário. À Deborah Sanches, uma amiga que me apoiou e me ajudou nos momentos mais difíceis, sempre me auxiliando a tomar as decisões corretas.

Agradeço a todos os meus colegas do mestrado da PUC-Rio, em destaque: Behbood Abedi, William Lopez e Himer Miele. Obrigada pelas boas risadas e descontração na sala da pós-graduação, além da ajuda nas matérias do curso.

A todos os professores que trabalharam para que eu pudesse ter uma formação de excelência, em destaque: professor Luis Fernando Azevedo; professor Márcio Carvalho; professora Mônica Naccache; professor Paulo Roberto de Souza Mendes; professor Ivan Fabio Mota de Menezes; professor João Carlos Ribeiro Plácido e professor Geraldo Spinelli Ribeiro.

A todos do Departamento de Engenharia Mécanica pela colaboração no decorrer desses dois anos.

À Petrobras, PUC-Rio e ao CAPES, pelo auxílio concedido, sem os quais esse trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Azevedo, Patricia Emidio de; Mendes, Paulo Roberto de Souza. **Deslocamento de líquidos não newtonianos em células de Hele-Shaw**. Rio de Janeiro, 2015. 136p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A perfuração de poços de petróleo, principalmente em ambientes offshore, é uma operação que demanda um custo muito elevado, portanto a minimização de problemas e danos ao reservatório produtor é muito importante. O projeto de um fluido de perfuração que garanta a mínima invasão na rocha reservatório é um tópico fundamental, como consequência a indústria petrolífera tem investido em estudos com o intuito de evitar que este problema ocorra. Sendo assim, nesse trabalho estudou-se o escoamento de fluidos em um meio poroso ideal, a célula de Hele-Shaw. Para realizar esse trabalho foram utilizados dois fluidos não newtonianos: uma solução aquosa de um polímero flexível, a poliacrilamida; e uma solução aquosa de um polímero rígido, a goma xantana. Esses fluidos não newtonianos representaram o fluido de perfuração, já o papel do petróleo presente na rocha reservatório foi desempenhado pelo óleo mineral. A partir desse experimento é possível observar a instabilidade de *Saffman-Taylor* ou *viscous fingers*, que é um fenômeno observado quando um fluido de menor viscosidade desloca outro de maior viscosidade. Esse fenômeno é muito importante em diversas aplicações, tais como: invasão de fluido de perfuração em meios porosos (caso que será estudado), recuperação secundária e terciária de petróleo, fraturamento hidráulico, processamento de polímeros, hidrologia e filtração. O experimento consiste em analisar a evolução da interface entre os dois fluidos através de uma câmera filmadora. A partir das imagens é determinada qualitativamente a eficiência do deslocamento. Com o conjunto de imagens é possível observar também em quais parâmetros dinâmicos e reológicos ocorre a transição *fingers* (interface instável) para *plug* (interface estável), e vice-versa. Também foram realizados testes reológicos nos quais foi possível conhecer o comportamento dos fluidos não newtonianos utilizados. Com base nos dados coletados observou-se que tanto para a poliacrilamida quanto para a goma xantana a transição ocorre a uma taxa de cisalhamento adimensional próxima de 3.

Palavras-chave

Célula de Hele-Shaw; Invasão de fluido de perfuração; Estabilidade de interface; Fluido não newtoniano;

Abstract

Azevedo, Patricia Emidio de; Mendes, Paulo Roberto de Souza (Advisor). **Liquid-liquid displacement flows in a Hele-Shaw cell including non-Newtonian effects**. Rio de Janeiro, 2015. 136p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The drilling of oil wells, particularly in offshore environments, is an operation which demands a high cost, thus, the minimization of problems and damage to the producing reservoir is very important. The design of a drilling fluid that ensures minimum invasion into the reservoir rock is a major topic, consequently the oil industry has invested in research in order to prevent this problem from occurring. Therefore, this research studied the displacement of fluids in an ideal porous medium, a Hele-Shaw cell. To accomplish this task, the following two non-Newtonian fluids were used: an aqueous solution of a flexible polymer, polyacrylamide; and the other an aqueous solution of a rigid polymer, xanthan gum. Such non-Newtonian fluids represent the drilling fluid, while the function of oil present in the reservoir rock was represented by mineral oil. From this experiment it is possible to observe the Saffman-Taylor instability or viscous fingers, which is a phenomenon observed when a low viscosity fluid displaces a higher viscosity fluid. This phenomenon is very important in many applications, such as drilling fluid invasion in porous media, secondary and tertiary oil recovery, hydraulic fracturing, polymer processing, hydrology and filtration. The experiment consists in analyzing the evolution of the interface between two fluids through a digital camera, and determining the displacement efficiency qualitatively from the imagens. With the set of images is possible to observe in which dynamic and rheological parameters the transition from fingers (unstable interface) to plug (stable interface) occurs, and vice versa. Also, rheological tests were performed in which it was possible to know the behavior of non-Newtonian fluids used in the study. From the data collected it was observed that both the polyacrylamide and for xanthan gum transition occurs near the dimensionless shear rate of 3.

Keywords

Hele-Shaw cell; Invasion and drilling fluid; Viscous fingering; non-Newtonian fluid;

Sumário

1	Introdução	21
1.1	Motivação	21
1.2	Objetivos	24
1.3	Revisão bibliográfica	24
2	Metodologia Experimental	34
2.1	Fluidos	34
2.2	Bancada experimental	34
2.3	Procedimento experimental	42
3	Formulação matemática	48
3.1	Equacionamento	48
3.2	Análise Adimensional	54
3.3	Analogia entre uma célula de Hele-Shaw homogênea e um meio poroso homogêneo	57
4	Resultados	59
4.1	Caracterização reológica	59
4.2	Experimentos de visualização	74
5	Conclusões	122
5.1	Conclusões	122
5.2	Recomendações para futuras pesquisas	123
	Referências	124
A	Goma Xantana	129
B	Poliacrilamida	131
C	Reologia	132

Lista de figuras

1.1	Esquema da invasão do fluido de perfuração na rocha reservatório.	22
1.2	Esquema da invasão do fluido de perfuração na rocha reservatório.	22
1.3	Esquema da célula de Hele-Shaw (38).	25
1.4	Representação da instabilidade de Saffman-Taylor ou <i>viscous fingering</i> .	26
1.5	Testes Homsy.	28
2.1	Primeira versão da célula de <i>Hele-Shaw</i> .	35
2.2	Segunda versão da célula de <i>Hele-Shaw</i> .	35
2.3	Terceira versão da célula de <i>Hele-Shaw</i> .	36
2.4	Quarta versão da célula de <i>Hele-Shaw</i> .	36
2.5	Quinta versão da célula de <i>Hele-Shaw</i> .	36
2.6	Sexta versão da célula de <i>Hele-Shaw</i> .	37
2.7	Sétima versão da célula de <i>Hele-Shaw</i> .	37
2.8	Oitava versão da célula de <i>Hele-Shaw</i> .	37
2.9	Dimensões da célula de Hele-Shaw.	39
2.10	Imagem explodida da Célula de <i>Hele-Shaw</i> .	39
2.11	Detalhes da célula de <i>Hele-Shaw</i> .	40
2.12	Célula de <i>Hele-Shaw</i> .	40
2.13	Bancada experimental.	41
2.14	Posição favorável ao escoamento.	42
2.15	Posição desfavorável ao escoamento.	42
2.16	Bomba peristáltica da Cole-parmer.	42
2.17	Controlador da bomba peristáltica da Cole-parmer.	43
2.18	Interface do programa Fiji.	44
2.19	(a) Imagem original (b) Área de corte (c) Imagem após seção cortada.	44
2.20	(a) Imagem original (b) Imagem aplicada o filtro passa baixa.	45
2.21	Étapas para binarização das imagens.	45
2.22	Última imagem analisada, $\epsilon = 54,56\%$ do óleo deslocando a poliacrilamida 0,25%.	46
2.23	Óleo deslocando PHPA 0,25% (a) Imagens antes de serem binarizadas. (b) Imagens binarizadas.	46
2.24	Esquema do procedimento experimental.	47
3.1	Desenho esquemático da célula de Hele-Shaw.	48
3.2	Modelo adimensional - Fluido newtoniano deslocando fluido não newtoniano.	56
3.3	Modelo adimensional - Fluido não newtoniano deslocando fluido newtoniano.	56
3.4	Modelo da seção de Hele-Shaw.	57
4.1	(a) Reômetro DHR (<i>Discovery Hybrid Rheometers</i>) da <i>TA Instruments</i> (b) <i>Peltier</i> de placas e geometria cônica de 60 mm e 1° (c) <i>Peltier</i> de cilindros concêntricos e geometria de cilindros concêntricos.	59
4.2	Curva de escoamento (<i>Flow curve</i>) do óleo mineral - T= 25 °C.	61

4.3	Rampa de temperatura (<i>Temperature ramp</i>) do óleo mineral.	61
4.4	Varredura da amplitude de tensão (<i>Stress sweep</i>) do óleo mineral T= 25 °C.	62
4.5	Varredura da amplitude de tensão (<i>Stress sweep</i>) da poliacrilamida 0,25%.	63
4.6	Varredura da amplitude de tensão (<i>Stress sweep</i>) da goma xantana 0,4%.	63
4.7	Varredura de tempo (<i>Time sweep</i>) da poliacrilamida 0,25%.	64
4.8	Varredura de tempo (<i>Time sweep</i>) da goma xantana 0,40%.	65
4.9	Varredura de frequência (<i>Frequency sweep</i>) da poliacrilamida 0,25%.	66
4.10	Varredura de frequência (<i>Frequency sweep</i>) da goma xantana 0,4%.	66
4.11	O comportamento de fluido não newtoniano viscoelástico generali- zando variando a frequência.	67
4.12	Taxa de cisalhamento constante - $\dot{\gamma} = 0,011/s$ da poliacrilamida 0,25%.	68
4.13	Taxa de cisalhamento constante - $\dot{\gamma} = 0,011/s$ da goma xantana 0,40%.	68
4.14	Curva de escoamento (<i>Flow curve</i>) da poliacrilamida 0,25%.	69
4.15	Curva de escoamento (<i>Flow curve</i>) da goma xantana 0,40%.	69
4.16	Curva de escoamento da poliacrilamida modelada por <i>power law</i> .	70
4.17	Curva de escoamento da goma xantana modelada por <i>power law</i> .	70
4.18	Representação esquemática da resposta de um material tixotrópico.	72
4.19	<i>Step change</i> poliacrilamida 0,25%.	73
4.20	<i>Step change</i> goma xantana 0,40%.	73
4.21	Solução de glicerina 80% deslocando óleo mineral - $\mu^* = 3,260$; $\rho^* = 0,728$; $\dot{m} = 2,180$ g/s; $We = 2,45$; $Ca = 5,76 \cdot 10^{-4}$; $Re = 1,98$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 57,706\%$; <i>Fingers</i> .	76
4.22	Solução de glicerina 80% deslocando óleo mineral - $\mu^* = 3,395$; $\rho^* = 0,728$; $\dot{m} = 0,44g/s$; $We = 0,098$; $Ca = 5,76 \cdot 10^{-4}$; $Re = 0,39$; $T = 25^\circ C$; $\varepsilon = 54,863\%$; <i>Fingers</i> .	76
4.23	Solução de glicerina 60% deslocando óleo mineral - $\mu^* = 16,761$; $\rho^* = 0,754$; $\dot{m} = 0,367g/s$; $We = 0,077$; $Ca = 2,62 \cdot 10^{-4}$; $Re = 0,81$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 36,549\%$; <i>Fingers</i> .	76
4.24	Óleo mineral deslocando solução de glicerina 80% - $\mu^* = 0,307$; $\rho^* = 1,373$; $\dot{m} = 2,561g/s$; $We = 1,30$; $Ca = 3,07 \cdot 10^{-3}$; $Re = 0,23$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,645\%$; <i>Plug</i> .	77
4.25	Óleo mineral deslocando solução de glicerina 80% - $\mu^* = 0,302$; $\rho^* = 1,373$; $\dot{m} = 0,490g/s$; $We = 0,049$; $Ca = 3,07 \cdot 10^{-3}$; $Re = 0,044$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 100,00\%$; <i>Plug</i> .	77
4.26	Óleo mineral deslocando solução de glicerina 60% - $\mu^* = 0,056$; $\rho^* = 1,373$; $\dot{m} = 0,475g/s$; $We = 0,551$; $Ca = 3,52 \cdot 10^{-3}$; $Re = 0,044$; $T = 21^\circ C$; $\varepsilon = 100,00\%$; <i>Plug</i> .	77
4.27	Óleo mineral deslocando ar - $\mu^* = 1,37 \cdot 10^{-4}$; $\rho^* = 0,0014$; $\dot{m} = 0,344g/s$; $We = 0,0478$; $Ca = 2,15 \cdot 10^{-4}$; $Re = 0,042$; $T = 25^\circ C$ $\varepsilon = 100,00\%$, <i>Plug</i> .	78
4.28	Óleo mineral deslocando ar - $\mu^* = 1,37 \cdot 10^{-4}$; $\rho^* = 0,0014$; $\dot{m} = 3,644g/s$; $We = 5,346$; $Ca = 3,30 \cdot 10^{-3}$; $Re = 0,451$; $T = 25^\circ C$ $\varepsilon = 99,99\%$, <i>Plug</i> .	78

- 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; $Re = 0,002$; $We = 1,299 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 8,476 \cdot 10^{-2}$; $T = 20^\circ C$; $\varepsilon = 26,832\%$, *Fingers*. 79
- 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; $Re = 0,004$; $We = 9,571 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 8,476 \cdot 10^{-2}$; $T = 20^\circ C$; $\varepsilon = 40,046\%$, *Fingers*. 79
- 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*. 80
- 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*. 80
- 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*. 80
- 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*. 81
- 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*. 81
- 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*. 81
- 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*. 82
- 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*. 82
- 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*. 82
- 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*. 83

- 4.41 Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 405,088 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 16,629$; $\eta^* = 0,135$; $\dot{m} = 2,161 \text{ g/s}$; $Re = 0,182$; $We = 1,332 \cdot 10^{-2}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,000\%$, *Plug*. 83
- 4.42 Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 462,862 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 22,952$; $\eta^* = 0,107$; $\dot{m} = 2,470 \text{ g/s}$; $Re = 0,182$; $We = 1,739 \cdot 10^{-2}$; $Ca = 8,476 \cdot 10^{-2}$; $T = 20^\circ C$; $\varepsilon = 99,526\%$, *Plug*. 83
- 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*. 84
- 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*. 84
- 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*. 84
- 4.46 Óleo mineral deslocando solução de poliacrilamida 0,25% – $\dot{\gamma} = 805,919 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 33,083$; $\eta^* = 0,082$; $\dot{m} = 4,300 \text{ g/s}$; $Re = 0,362$; $We = 5,273 \cdot 10^{-2}$; $Ca = 8,850 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 99,757\%$, *Plug*. 85
- 4.47 Óleo deslocando solução de poliacrilamida - Reynolds em função da velocidade. 86
- 4.48 Óleo deslocando solução de poliacrilamida - Eficiência em função da velocidade adimensional. 86
- 4.49 Óleo deslocando solução de poliacrilamida - Eficiência em função da viscosidade adimensional. 87
- 4.50 Óleo deslocando solução de poliacrilamida - Viscosidade adimensional em função da taxa de cisalhamento adimensional. 87
- 4.51 Óleo deslocando solução de poliacrilamida - Padrões de escoamento, *fingers e plug*. 88
- 4.52 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 4,7461 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,160$; $\eta^* = 3,699$; $\dot{m} = 0,022 \text{ g/s}$; $Re = 0,0008$; $We = 2,100 \cdot 10^{-9}$; $Ca = 3,425 \cdot 10^{-1}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 100\%$, *Plug*. 89
- 4.53 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 14,791 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,578$; $\eta^* = 1,478$; $\dot{m} = 0,069 \text{ g/s}$; $Re = 0,005$; $We = 2,040 \cdot 10^{-8}$; $Ca = 1,323 \cdot 10^{-1}$; $T = 22,5^\circ C$; $\varepsilon = 99,984\%$, *Plug*. 89
- 4.54 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 33,5011 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,129$; $\eta^* = 0,917$; $\dot{m} = 0,156 \text{ g/s}$; $Re = 0,022$; $We = 1,046 \cdot 10^{-7}$; $Ca = 8,494 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 98,940\%$, *Plug*. 89

- 4.55 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 36,8881/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,414$; $\eta^* = 0,781$; $\dot{m} = 0,171 \text{ g/s}$; $Re = 0,026$; $We = 1,269 \cdot 10^{-7}$; $Ca = 7,019 \cdot 10^{-2}$; $T = 22,7^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 99,751\%$, *Plug*. 90
- 4.56 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 42,9321/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,646$; $\eta^* = 0,701$; $\dot{m} = 0,199 \text{ g/s}$; $Re = 0,033$; $We = 1,719 \cdot 10^{-7}$; $Ca = 6,299 \cdot 10^{-2}$; $T = 22,7^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 99,734\%$, *Plug*. 90
- 4.57 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 47,1111/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,824$; $\eta^* = 0,651$; $\dot{m} = 0,219 \text{ g/s}$; $Re = 0,039$; $We = 2,069 \cdot 10^{-7}$; $Ca = 5,841 \cdot 10^{-2}$; $T = 22,6^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 98,956\%$, *Plug*. 90
- 4.58 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 59,2641/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,295$; $\eta^* = 0,553$; $\dot{m} = 0,275 \text{ g/s}$; $Re = 0,058$; $We = 3,270 \cdot 10^{-7}$; $Ca = 4,959 \cdot 10^{-2}$; $T = 22,6^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 96,888\%$, *Plug*. 91
- 4.59 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 64,431/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,170$; $\eta^* = 0,575$; $\dot{m} = 0,299 \text{ g/s}$; $Re = 0,067$; $We = 3,870 \cdot 10^{-7}$; $Ca = 5,327 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 94,03\%$, *Plug*. 91
- 4.60 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 82,1471/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,150$; $\eta^* = 0,441$; $\dot{m} = 0,382 \text{ g/s}$; $Re = 0,101$; $We = 6,292 \cdot 10^{-7}$; $Ca = 3,965 \cdot 10^{-2}$; $T = 22,7^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 89,899\%$, *Transição*. 91
- 4.61 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 98,0931/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,304$; $\eta^* = 0,426$; $\dot{m} = 0,456 \text{ g/s}$; $Re = 0,137$; $We = 8,972 \cdot 10^{-7}$; $Ca = 3,946 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 77,100\%$, *Transição*. 92
- 4.62 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 132,4221/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 4,930$; $\eta^* = 0,320$; $\dot{m} = 0,615 \text{ g/s}$; $Re = 0,229$; $We = 1,635 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 2,900 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 71,760\%$, *Fingers*. 92
- 4.63 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 157,1361/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 5,850$; $\eta^* = 0,284$; $\dot{m} = 0,730 \text{ g/s}$; $Re = 0,307$; $We = 2,302 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 2,566 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 61,770\%$, *Fingers*. 92
- 4.64 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 186,5201/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 6,944$; $\eta^* = 0,251$; $\dot{m} = 0,867 \text{ g/s}$; $Re = 0,412$; $We = 3,244 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 2,271 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 65,960\%$, *Fingers*. 93
- 4.65 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 228,3481/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 9,374$; $\eta^* = 0,203$; $\dot{m} = 1,061 \text{ g/s}$; $Re = 0,582$; $We = 4,862 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 1,793 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 55,940\%$, *Fingers*. 93
- 4.66 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 272,8951/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 12,326$; $\eta^* = 0,167$; $\dot{m} = 1,268 \text{ g/s}$; $Re = 0,790$; $We = 6,943 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 1,443 \cdot 10^{-2}$; $T = 21^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 33,620\%$, *Fingers*. 93

- 4.67 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 303,9781/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 12,48$; $\eta^* = 0,165$; $\dot{m} = 1,412 \text{ g/s}$; $Re = 0,951$; $We = 8,615 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 1,462 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 63,940\%$, *Fingers*. 94
- 4.68 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 311,3391/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 14,062$; $\eta^* = 0,152$; $\dot{m} = 1,446 \text{ g/s}$; $Re = 0,990$; $We = 9,039 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 1,313 \cdot 10^{-2}$; $T = 21^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 63,940\%$, *Fingers*. 94
- 4.69 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 355,4471/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 14,591$; $\eta^* = 0,148$; $\dot{m} = 1,651 \text{ g/s}$; $Re = 1,243$; $We = 1,178 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,307 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 56,198\%$, *Fingers*. 94
- 4.70 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 410,9721/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 16,870$; $\eta^* = 0,133$; $\dot{m} = 1,909 \text{ g/s}$; $Re = 1,594$; $We = 1,575 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,179 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 61,920\%$, *Fingers*. 95
- 4.71 Solução de poliacrilamida 0,25% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 478,5131/\text{s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 19,643$; $\eta^* = 0,119$; $\dot{m} = 2,223 \text{ g/s}$; $Re = 2,068$; $We = 2,135 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 1,057 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 41,143\%$, *Fingers*. 95
- 4.72 Solução de poliacrilamida deslocando óleo - Reynolds em função da velocidade. 96
- 4.73 Solução de poliacrilamida deslocando óleo - Eficiência em função da velocidade adimensional. 96
- 4.74 Solução de poliacrilamida deslocando óleo - Eficiência em função da viscosidade adimensional. 97
- 4.75 Solução de poliacrilamida deslocando óleo - Viscosidade adimensional em função da taxa de cisalhamento adimensional. 97
- 4.76 Solução de poliacrilamida deslocando óleo - Padrões de escoamento, *fingers e plug*. 98
- 4.77 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40% – $\dot{\gamma} = 10,650 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,467$; $\eta^* = 1,760$; $\dot{m} = 0,052 \text{ g/s}$; $Re = 0,005$; $We = 8,160 \cdot 10^{-6}$; $Ca = 8,545 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 31,023\%$, *Fingers*. 99
- 4.78 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40% – $\dot{\gamma} = 16,307 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,816$; $\eta^* = 1,163$; $\dot{m} = 0,080 \text{ g/s}$; $Re = 0,007$; $We = 1,913 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 8,263 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 47,154\%$, *Fingers*. 99
- 4.79 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40% – $\dot{\gamma} = 18,585 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,816$; $\eta^* = 1,164$; $\dot{m} = 0,092 \text{ g/s}$; $Re = 0,008$; $We = 2,485 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 8,545 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 39,267\%$, *Fingers*. 100
- 4.80 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40% – $\dot{\gamma} = 32,044 \text{ 1/s}$; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,406$; $\eta^* = 0,776$; $\dot{m} = 0,158 \text{ g/s}$; $Re = 0,014$; $We = 7,386 \cdot 10^{-5}$; $Ca = 8,545 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 41,865\%$, *Fingers*. 100

- 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*. 100
- 4.82 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 34,828$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 1,679$; $\eta^* = 0,681$; $\dot{m} = 0,172$ 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*. 101
- 4.83 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 38,717$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,238$; $\eta^* = 0,550$; $\dot{m} = 0,191$ 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*. 101
- 4.84 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 53,261$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 2,427$; $\eta^* = 0,517$; $\dot{m} = 0,263$ 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*. 101
- 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*. 102
- 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*. 102
- 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*. 102
- 4.88 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 63,529$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,387$; $\eta^* = 0,404$; $\dot{m} = 0,313$ g/s; $Re = 0,025$; $We = 2,903 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,128 \cdot 10^{-2}$; $T = 21^\circ C$; $\varepsilon = 85,118\%$, *Transição*. 103
- 4.89 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 68,633$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,217$; $\eta^* = 0,420$; $\dot{m} = 0,338$ g/s; $Re = 0,029$; $We = 3,389 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,402 \cdot 10^{-2}$; $T = 22^\circ C$; $\varepsilon = 82,483\%$, *Transição*. 103
- 4.90 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 74,168$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 3,380$; $\eta^* = 0,405$; $\dot{m} = 0,366$ g/s; $Re = 0,032$; $We = 3,957 \cdot 10^{-4}$; $Ca = 8,463 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 89,019\%$, *Transição*. 103
- 4.91 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 197,714$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 8,676$; $\eta^* = 0,201$; $\dot{m} = 0,975$ 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*. 104
- 4.92 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 229,365$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 9,596$; $\eta^* = 0,186$; $\dot{m} = 1,131$ 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*. 104

- 4.93 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 249,621$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 9,952$; $\eta^* = 0,181$; $\dot{m} = 1,231$ g/s; $Re = 0,120$; $We = 4,482 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 8,759 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 100\%$, *Plug*. 104
- 4.94 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 254,012$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 11,360$; $\eta^* = 0,164$; $\dot{m} = 1,252$ 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*. 105
- 4.95 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 275,304$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 10,976$; $\eta^* = 0,169$; $\dot{m} = 1,357$ 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*. 105
- 4.96 Óleo mineral deslocando solução de goma xantana 0,40%— $\dot{\gamma} = 282,736$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 13,629$; $\eta^* = 0,144$; $\dot{m} = 1,394$ 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*. 105
- 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*. 106
- 4.98 Óleo deslocando solução de goma xantana - Reynolds em função da velocidade. 107
- 4.99 Óleo deslocando solução de goma xantana - Eficiência em função da velocidade adimensional. 107
- 4.100 Óleo deslocando solução de goma xantana - Eficiência em função da viscosidade adimensional. 108
- 4.101 Óleo deslocando solução de goma xantana - Viscosidade adimensional em função da taxa de cisalhamento adimensional. 108
- 4.102 Óleo deslocando solução de goma xantana - Padrões de escoamento, *fingers* e *plug*. 109
- 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*. 110
- 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*. 110
- 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*. 110
- 4.106 Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral — $\dot{\gamma} = 12,547$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,410$; $\eta^* = 1,938$; $\dot{m} = 0,054$ 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*. 111

- 4.107 Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 21,368$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,772$; $\eta^* = 1,121$; $\dot{m} = 0,093$ 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*. 111
- 4.108 Solução de goma xantana 0,40% deslocando óleo mineral – $\dot{\gamma} = 23,281$ 1/s; $u^* = \dot{\gamma}^* = 0,842$; $\eta^* = 1,137$; $\dot{m} = 0,101$ 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*. 111
- 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*. 112
- 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*. 112
- 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*. 112
- 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*. 113
- 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*. 113
- 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*. 113
- 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*. 114
- 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*. 114
- 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*. 114
- 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*. 115

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; $Re = 0,426$; $We = 2,638 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 2,030 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 32,940\%$, <i>Fingers</i> .	115
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; $Re = 0,461$; $We = 2,890 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 1,962 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 44,523\%$, <i>Fingers</i> .	115
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; $Re = 0,550$; $We = 3,538 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 1,820 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 30,436\%$, <i>Fingers</i> .	116
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; $Re = 0,707$; $We = 4,726 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 1,635 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 28,370\%$, <i>Fingers</i> .	116
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; $Re = 0,907$; $We = 6,284 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 1,479 \cdot 10^{-2}$; $T = 24^\circ C$; $\varepsilon = 25,609\%$, <i>Fingers</i> .	116
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; $Re = 0,990$; $We = 6,952 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 1,287 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 31,109\%$, <i>Fingers</i> .	117
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; $Re = 1,207$; $We = 8,726 \cdot 10^{-3}$; $Ca = 1,183 \cdot 10^{-2}$; $T = 23^\circ C$; $\varepsilon = 23,568\%$, <i>Fingers</i> .	117
4.126	Solução de goma xantana deslocando óleo - Reynolds em função da velocidade.	118
4.127	Solução de goma xantana deslocando óleo - Eficiência em função da velocidade adimensional.	118
4.128	Solução de goma xantana deslocando óleo - Eficiência em função da viscosidade adimensional.	119
4.129	Solução de goma xantana deslocando óleo - Viscosidade adimensional em função da taxa de cisalhamento adimensional.	119
4.130	Solução de goma xantana deslocando óleo - Padrões de escoamento, <i>fingers</i> e <i>plug</i> .	120
C.1	Classificação reológica dos fluidos.	132
C.2	Curva de viscosidade de um líquido Newtoniano.	133
C.3	Classificação dos fluidos.	135

Lista de tabelas

4.1	Tabela de resumo da caracterização reológica da poliacrilamida e da goma xantana.	71
4.2	Parâmetros geométricos da célula de Hele-Shaw.	74
4.3	Propriedade do óleo mineral a 25°C.	75
4.4	Propriedades das soluções aquosas de glicerina a 25° C	75
4.5	Parâmetros da poliacrilamida 0,25% a 25°C.	79
4.6	Parâmetros da solução de goma xantana 0,40% a 25°C.	99
5.1	Taxa de cisalhamento adimensional de transição.	122

A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.

Charles Chaplin