

Referências Bibliográficas

- [1] ALIMOV, M. M.. **Competition between fingers in hele–shaw flows.** Fluid Dynamics, 43(5):751–762, 2008.
- [2] AMAR, M. B.; POIRÉ, E. C.. **Pushing a non-newtonian fluid in a hele-shaw cell: From fingers to needles.** Physics of Fluids, 11(7):1757–1767, July 1999.
- [3] AYUB, M.; BENTSEN, R. G.. **Interfacial viscous coupling: a myth or reality?** Journal of Petroleum Science and Engineering, 23:13–26, 1999.
- [4] BARNES, H. A.. **A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character, and cure.** J. Non-Newtonian Fluid Mech., 56(3):221–251, 1995.
- [5] BARNES, H. A.. **The yield stress—a review.** J. Non-Newt. Fluid Mech., 81:133–178, 1999.
- [6] BARNES, H. A.. **A handbook of elementary rheology.** University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000.
- [7] BENSIMON, D.. **Stability of viscous fingering.** Physical Review A, 33(2):1302–1308, 1986.
- [8] BENSIMON, D.; KADANOFF, L. P.; LIANG, S.; SHRAIMAN, B. I. ; TANG, C.. **Viscous flows in two dimensions.** Rev. Mod. Phys., 58(4):977–999, 1986.
- [9] BIRD, R. B.; ARMSTRONG, R. C. ; HASSAGER, O.. **Dynamics of polymeric liquids.** John Wiley & Sons, 1987.
- [10] BIRDI, K. S.. **Surface and colloid chemistry: principles and applications.** CRC Press: Taylor & Francis Group, 2009.
- [11] BONN, D.; MEUNIER, J.. **Viscoelastic free-boundary problems: Non-newtonian viscosity vs normal stress effects.** Physical Review Letters, 79(14):2662–2665, October 1997.

- [12] CANNY, J.. **A computational approach to edge-detection.** IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, 8(6):679–698, 1986.
- [13] CASADEMUNT, J.. **Viscous fingering as a paradigm of interfacial pattern formation: recent results and new challenges.** CHAOS, 14(3):809–824, 2004.
- [14] CHAN, R. H.; HO, C. W. ; NIKOLOVA, M.. **Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization.** IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, 14(10):1479–1485, 2005.
- [15] CHEN, C. Y.; CHEN, C. H. ; MIRANDA, J. A.. **Numerical study of miscible fingering in a time-dependent gap hele-shaw cell.** Physical Review E, 71(5):056304–1 – 056304–14, 2005.
- [16] CHEVALIER, C.; AMAR, M. B.; BONN, D. ; LINDNER, A.. **Inertial effects on saffman–taylor viscous fingering.** J. Fluid Mech, 552:83–97, 2006.
- [17] COUSSOT, P.. **Saffman-taylor instability in yield-stress fluids.** J. Fluid Mech., 380:363–376, 1999.
- [18] DE SOUZA MENDES, P. R.. **Dimensionless non-Newtonian fluid mechanics.** J. Non-Newt. Fluid Mech., 147(1-2):109–116, 2007.
- [19] DE SOUZA MENDES, P. R.; NACCACHE, M. F.; VARGES, P. R. ; MARCHESINI, F. H.. **Flow of viscoplastic liquids through axisymmetric expansions-contractions.** J. Non-Newtonian Fluid Mech., 142(1-3):207–217, 2007.
- [20] DENIS, J.; BRIANT, J. ; HIPEAUX, J.-C.. **Lubricant properties analysis & testing.** Editions Technip, Paris, 2000.
- [21] FURATI, K.. **History effects on oil recovery efficiency.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 19:295–308, 1998.
- [22] GLAND, N.; PISARENKO, D.. **Pressure oscillation effects on the saffman-taylor instability.** Pure and Applied Geophysics, 160:977–988, 2003.
- [23] GREENKORN, R. A.; HARING, P. E.; JAHNS, H. O. ; SHALLENBERGER, L. K.. **Flow in heterogeneous hele-shaw models.** Society of Petroleum Engineers Journal, 1964.

- [24] GUAN, X.; PITCHUMANI, R.. **Viscous fingering in a hele-shaw cell with finite viscosity ratio and interfacial tension.** Journal of fluids engineering - Transactions of the ASME, 125(2):354–364, 2003.
- [25] HELE-SHAW, H.. **The flow of water.** Nature, 58(1489):33–36, 1898.
- [26] HOMSY, G.. **Viscous fingering in porous media.** Ann. Rev. Fluid Mech., 19:271–311, 1987.
- [27] JOHNSEN, Ø.; TOUSSAINT, R.; MÅLØY, K. J.; FLEKKØY, E. G. ; SCHMITTBUHL, J.. **Coupled air/granular flow in linear hele-shaw cell.** Physical Review E, 77(1), 2008.
- [28] KAWAGUSHI, M.; SHIBATA, A.; SHIMOMOTO, K. ; KATO, T.. **Effect of geometry and anisotropy of hele-shaw cell on viscous fingering of polymer solutions.** Physical Review E, 58(1):785–788, 1998.
- [29] KONDIC, L.; SHELLEY, M. J. ; PALFFY-MUHORAY, P.. **Non-newtonian hele-shaw flow and the saffman-taylor instability.** Physical Review Letters, 80(7):1433–1436, February 1998.
- [30] LINDNER, A.; BONN, D. ; MEUNIER, J.. **Viscous fingering in a shear-thinning fluid.** Physics of Fluids, 12(2):256–261, 2000.
- [31] LINDNER, A.; BONN, D. ; MEUNIER, J.. **Viscous fingering in complex fluids.** J.of Physics-Condensed Matter, 12(8A):A477–A482, 2000.
- [32] LINDNER, A.; BONN, D.; POIRÉ, E. C.; AMAR, M. B. ; MEUNIER, J.. **Viscous fingering in non-newtonian fluids.** J. Fluid Mech., 469:237–256, 2002.
- [33] LINDNER, A.; COUSSOT, P. ; BONN, D.. **Viscous fingering in a yield stress fluid.** Physical Review Letters, 85(2):314–317, July 2000.
- [34] MAGDALENO, F. X.; CASADEMUNT, J.. **Two-finger selection theory in the saffman-taylor problem.** Physical Review E, 60(5):R5013–R5016, 1999.
- [35] MARTINS, A. L.; WALDMANN, A. T. A.; RIBEIRO, D. C. ; MASSARANI, G.. **O projeto conceitual de um fluido de perfuração não invasivo isento de sólidos.** Boletim técnico da Produção de Petróleo, 2(1):7–27, 2007.
- [36] MARTINS, J.; PINTO, E.. **Materiais de construção I: o vidro.** Materiais. 2004.

- [37] MCCLOUD, K. V.; MAHER, J. V.. **Experimental perturbations to saffman-taylor flow.** *Phys. Rep.*, 260:139–185, 1995.
- [38] MCLEAN, J. W.; SAFFMAN, P. G.. **The effect of surface tension on the shape of fingers in hele-shaw cell.** *J. Fluid Mech.*, 102:455–469, 1981.
- [39] MOGHADASI, J.; MÜLLER-STEINHAGEN, H.; JAMIALAHMADI, M. ; SHARIF, A.. **Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection.** *J.Petr. Sci. Eng.*, 43:163–181, 2004.
- [40] MUSTAFA, G. S.; SOUZA, A. O. A. B. ; ROCHA, P. S. M. V.. **Utilização de emissões industriais gasosas para rejuvenescimento de campos maduros de petróleo.** *Eng. Sanitária e Ambiental*, 8(4):209–212, 2003.
- [41] NAIR, M. S.; REVATHY, K. ; TATAVARTI, R.. **Removal of salt and pepper noise in images: A new decision-based algorithm.** *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2008, I*, 2008.
- [42] PARK, C. W.; HOMSY, G. M.. **2-phase displacement in hele-shaw cells - theory.** *J. Fluid Mech.*, 139:291–308, 1984.
- [43] POPE, D. S.; LEUNG, L. K.; GULBIS, J. ; CONSTIEN, V. G.. **Effects of viscous fingering on fracture conductivity.** *SPE 28511*, 1996.
- [44] ROCHEFORT, W.; MIDDLEMAN, S.. **Rheology of xanthan gum: Salt, temperature, and strain effects in oscillatory and steady shear experiments.** *J. Rheol.*, 31(4):337–369, 1987.
- [45] S., T.. **Surprises in viscous fingering.** *J. Fluid Mech.*, 409:273–308, 2000.
- [46] SAFFMAN, P.. **Viscous fingering in hele-shaw cells.** *J. Fluid Mech.*, 173:73–94, 1986.
- [47] SAFFMAN, P. G.; TAYLOR, G. I.. **The penetration of a fluid into a porous medium or hele-shaw cell containing a more viscous liquid.** *Proc. R. Soc. Lond.*, 245(1242):312, 329 1958.
- [48] SOUZA MENDES, P. R.. **Modeling the thixotropic behavior of structured fluids.** *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 164(1-3):66–75, 2009.

- [49] THOMAS, J. E. E. A.. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Interciência, 2001.
- [50] VICSEK, T.. **Fractal Growth Phenomena, Chap. 10**. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., second edition, 1992.
- [51] VOSSOUGH, S.. **Profile modification using in situ gelation technology — a review**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 26:199–209, 2000.
- [52] WALDMANN, A. T. A.; ANDRADE, A. R.; MARTINS, A. L.; LOMBA, R. F. T. ; ARAGÃO, A. F. L.. **Sobre os mecanismos responsáveis por minimizar a invasão do fluido de perfuração na rocha reservatório**. In: ENAHPE 2006 - ENCONTRO NACIONAL DE HIDRÁULICA DE PERFURAÇÃO E COMPLETAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS, 2006.
- [53] WHITCOMB, P.; MACOSKO, C.. **Rheology of xanthan gum**. J. Rheol., 22(5):493–505, 1978.
- [54] WILSON, S.. **The taylor-saffman problem for a non-newtonian liquid**. J. Fluid Mech., 220:413–425, 1990.
- [55] YAMAMOTO, T.. **Numerical and experimental analyses of unsteady viscoelastic flow in complex flow field**. Journal of the Society of Rheology, Japan, 34(5):283–289, 2006.
- [56] YAMAMOTO, T.; KAMIKAWA, H.; MORI, N. ; NAKAMURA, K.. **Numerical simulation of viscous fingering in non-newtonian fluids in a hele-shaw cell**. Journal of the Society of Rheology, Japan, 30(3):121–127, 2002.
- [57] YAMAMOTO, T.; KAMIKAWA, H.; TANAKA, H.; NAKAMURA, K. ; MORI, N.. **Viscous fingering of non-newtonian fluids in a rectangular hele-shaw cell**. Journal of the Society of Rheology, Japan, 29(2):81–87, 2001.
- [58] YAMAMOTO, T.; KIMOTO, R. ; MORI, N.. **Tip velocity of viscous fingers in shear-thinning fluids in a hele-shaw cell**. JSME International Journal, 48(4):756–762, 2005.
- [59] YAMAMOTO, T.; NAKAMURA, Y.; YAMASHITA, A.; HASHIMOTO, T. ; MORI, N.. **Anomalous motion of viscous fingers in surfactant solutions in a hele-shaw cell**. Rheol Acta, 45:250–259, 2006.

- [60] ZIRNSAK, M.; BOGER, D. ; TIRTAATMADJA, V.. **Steady shear and dynamic rheological properties of xanthan gum solutions in viscous solvents.** J. Rheol., 43(3):627–650, 1999.

A

Escoamentos bidimensionais em meios porosos: célula de Hele-Shaw

A analogia entre o escoamento em célula retangular de Hele-Shaw e em meios porosos é facilmente verificada (23).

Deve-se assumir um sistema de coordenadas cartesianas conforme descrito na Figura 1.2. A direção do escoamento deve sempre ser paralela às placas de vidro e a velocidade deve variar de um valor máximo no centro da célula ($z = 0$) até zero ($z = \pm b/2$).

Para o caso de um escoamento em regime permanente, com fluido incompressível, sem efeitos de inércia e desconsiderando as forças de corpo, obtém-se a seguinte equação para o escoamento viscoso:

$$\nabla p = \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (\text{A-1})$$

sendo p a pressão, μ a viscosidade e \vec{V} o vetor velocidade com as componentes u , v e w nas direções x , y e z , respectivamente.

Nesse caso, $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$ e $w = 0$ e as derivadas de \vec{V} em relação a x e y são pequenas em comparação as derivadas na direção z . Assim,

$$\nabla p = \mu \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial z^2} \quad (\text{A-2})$$

sendo ∇p e \vec{V} vetores bidimensionais no plano xy .

Após duas integrações em relação a z , obtém-se:

$$\vec{V} = \frac{\nabla p}{2\mu} \left(z^2 - \frac{h^2}{4} \right) \quad (\text{A-3})$$

sendo considerada a condição de contorno $\vec{V} = 0$ em $z = \pm b/2$.

A velocidade média é

$$\vec{V}_0 = \frac{1}{b} \int_{-b/2}^{+b/2} \vec{V} dz \quad (\text{A-4})$$

$$V_0 = -\frac{b^2}{12\mu} \nabla p \quad (\text{A-5})$$

Sendo a velocidade potencial

$$\phi = -\frac{b^2 p}{12\mu} \quad (\text{A-6})$$

Assim, a velocidade média \vec{V}_0 satisfaz a condição para o escoamento potencial bidimensional em um plano xy .

Para escoamentos em meios porosos, a Lei de Darcy é expressa por:

$$\vec{V}^* = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (\text{A-7})$$

onde \vec{V}^* é a velocidade de Darcy e k é a permeabilidade.

A velocidade potencial de V^* é

$$\phi^* = \frac{kp}{\mu} \quad (\text{A-8})$$

Pode-se observar a partir da análise das equações A-5 e A-7 ou A-6 e A-8 que existe uma analogia direta entre um escoamento bi-dimensional em uma célula de Hele-Shaw e um escoamento bidimensional em um meio poroso.

Se $\phi = \phi^*$, a permeabilidade é

$$k = \frac{b^2}{12} \quad (\text{A-9})$$

B Goma Xantana

A goma xantana é um polissacarídeo sintetizado por uma bactéria fitopatogênica do gênero *Xanthomonas* (60). Economicamente, a goma xantana é o polissacarídeo microbiano mais importante, com uma produção mundial de cerca de 40 a 50 mil toneladas por ano, movimentando aproximadamente 270 milhões de dólares anualmente. As indústrias de alimentos, farmacêutica e petroquímica exploram esse biopolímero devido a sua capacidade de formar soluções viscosas em baixas concentrações, por apresentar características espessantes, gelificantes, estabilizantes e por ser um agente suspensivo.

Soluções de xantana apresentam como principal característica a capacidade de modificar o comportamento do escoamento através de suas propriedades reológicas. Apresentam um comportamento pseudoplástico, ou seja, a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento como pode ser visto na Fig.B.1.

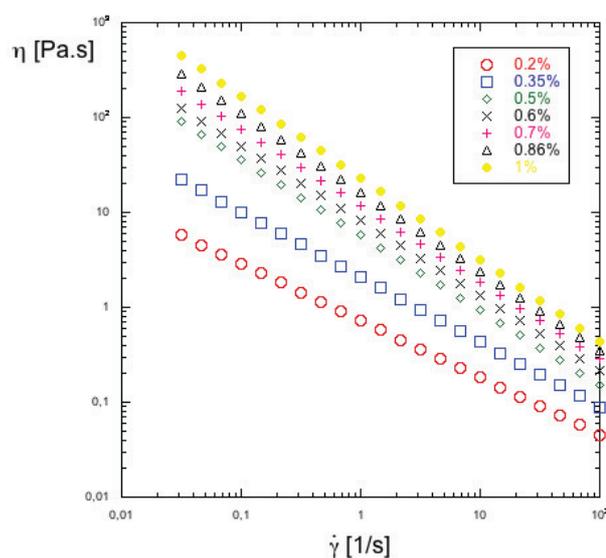


Figura B.1: Reologia de diferentes concentrações de goma xantana

A goma xantana possui propriedades que superam todos os outros polissacarídeos disponíveis no mercado (44, 53, 60), como por exemplo:

- Alto peso molecular;

- Irreversibilidade de ser degradada em altas taxas de cisalhamento;
- Estabilidade em amplas faixas de pH (2 – 11), em altas concentrações de eletrólitos e em temperaturas acima de 90°C;
- Grande escala de produção em curto espaço de tempo por processo fermentativo;
- É um pó quase branco de coloração levemente amarelada, prontamente solúvel em água quente ou fria.
- Mesmo em baixas concentrações, apresenta um alto valor de viscosidade, sendo usado como um agente espessante efetivo (as concentrações em sistemas de alimentos variam de 0.05% a 0.5%).
- As características pseudoplásticas garantem a facilidade de seu bombeamento.
- É compatível com a maioria dos hidrocolóides.
- Apresenta uma excelente estabilidade durante o congelamento e sua adição não afeta o ponto de congelamento do fluido.
- A adição de galactomanonas (gomas) resulta num aumento sinérgico da viscosidade.

O método de preparo da Goma Xantana utilizada foi o seguinte:

- Seleciona-se a porcentagem de polímero desejada;
- Coloca-se o volume desejado de água deionizada em um recipiente;
- O recipiente é posicionado no agitador mecânico (marca Fisaton, modelo 723) com a pá âncora a 300rpm;
- Acrescenta-se a goma xantana aos poucos, pela lateral, evitando despejar o pó na pá;
- A solução é agitada por 15 minutos;
- A seguir, adicionam-se os bactericidas;
- Mistura-se a solução por 1 hora;
- Mantém-se a solução em repouso por 24 horas antes dos testes.

Foram adicionados dois bactericidas sugeridos pela Plury Química (fornecedor de goma xantana): Benzoato de Sódio e Sorbato de Potássio. A concentração utilizada foi de 0,5% de cada bactericida. A não utilização correta destes bactericidas resulta em um crescimento bacteriano na superfície do fluido e conseqüentemente na sua inutilidade, como pode ser visto na Fig. B.2. A adição de bactericida na solução garantiu um prazo mais longo de validade a solução, porém após aproximadamente duas semanas foram observadas as tais formas microbianas.



Figura B.2: Organismos microbianos

C

Desenvolvimento da bancada experimental

Nesta seção são apresentadas algumas etapas da construção da bancada experimental.

Versão 1

As Figuras C.1 e C.2 ilustram a primeira bancada experimental desenvolvida e a Fig. C.3 apresenta alguns resultados para ilustrar a qualidade das imagens obtidas. Essa bancada era composta por três reservatórios para comportar o fluido deslocador, o fluido deslocado e água para limpeza, duas bombas de deslocamento positivo, uma câmera fotográfica e uma célula de Hele-Shaw. As dimensões do canal, formado por placas de vidro de 6 mm de espessura, eram: 150mm de comprimento, 100mm de largura e 1mm de espaçamento (folga). Os fluidos utilizados foram soluções aquosas de Carbopol e óleo mineral.

As válvulas guilhotina foram projetadas com o objetivo de bloquear a passagem dos fluidos. Isso permitiu a lavagem e o preenchimento das células, além de serem essenciais para as condições de início do teste. As células de entrada e saída foram acopladas a célula de Hele-Shaw garantindo a estabilidade da injeção do fluido deslocador, a continuidade do escoamento e a uniformidade da interface.

Em função da diferença de densidades entre o óleo e o Carbopol, a folga entre as placas paralelas de 1mm não foi suficientemente pequena. Outro problema desse projeto, diz respeito a vazamentos na entrada da célula. As guilhotinas não foram bem projetadas, de modo que seu manuseio exigia força.

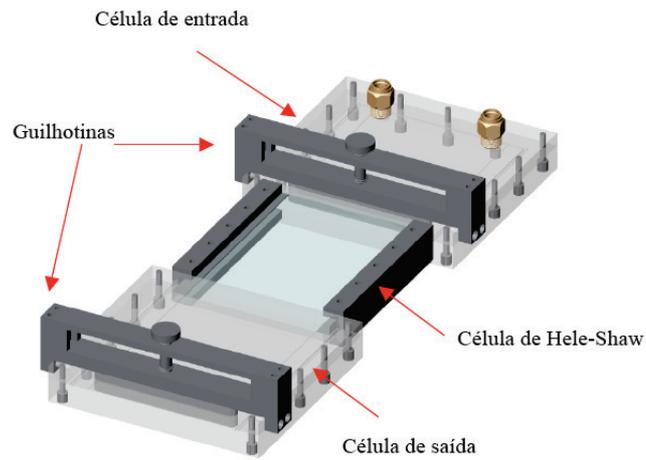


Figura C.1: Primeiro projeto de construção de uma célula de Hele-Shaw

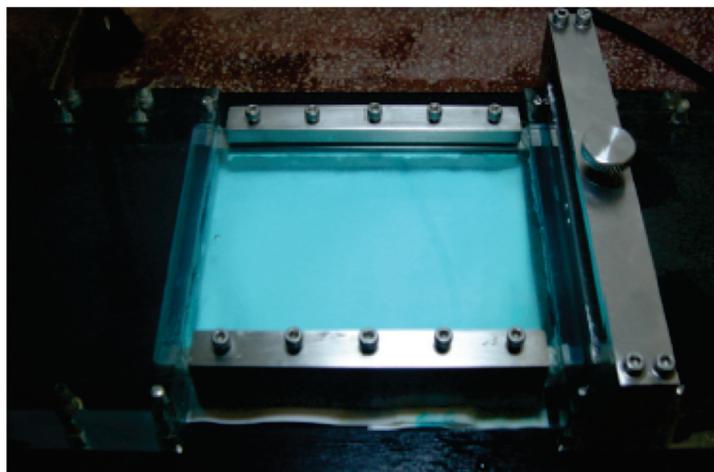


Figura C.2: Primeira bancada experimental desenvolvida

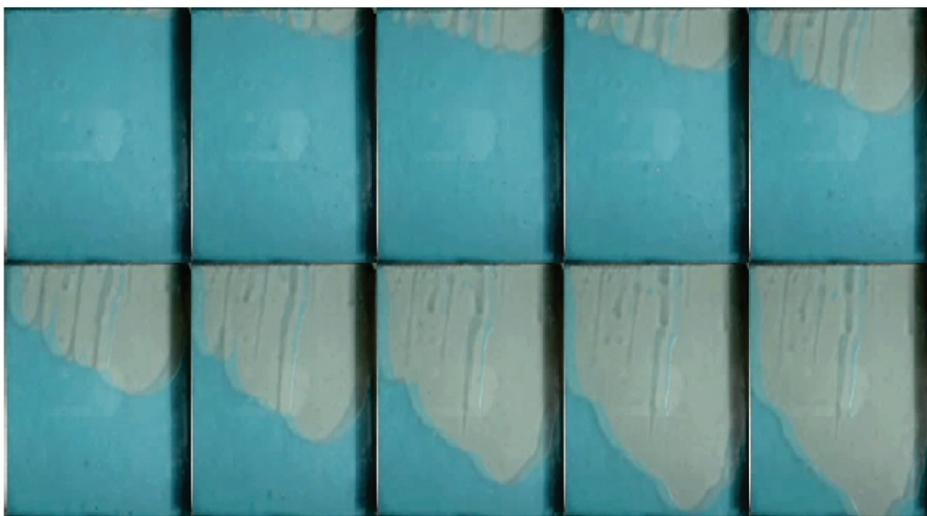


Figura C.3: Óleo deslocando Carbopol

Versão 2

Devido as dificuldades da versão anterior, uma nova célula de Hele-Shaw foi projetada e construída. Esta foi desenvolvida buscando focar no conceito de simplicidade. A célula era composta por duas placas planas de vidro, separadas por um espaçador de folga (utilizado em tornos mecânicos) e vedadas nas laterais através de fitas adesivas (modelo *Silver tape*) como pode ser visto na Fig. C.4. Com o intuito de melhorar a visualização da interface, um negatoscópio foi utilizado sob a seção de testes para minimizar os efeitos de sombra e maximizar o contraste entre os fluidos.

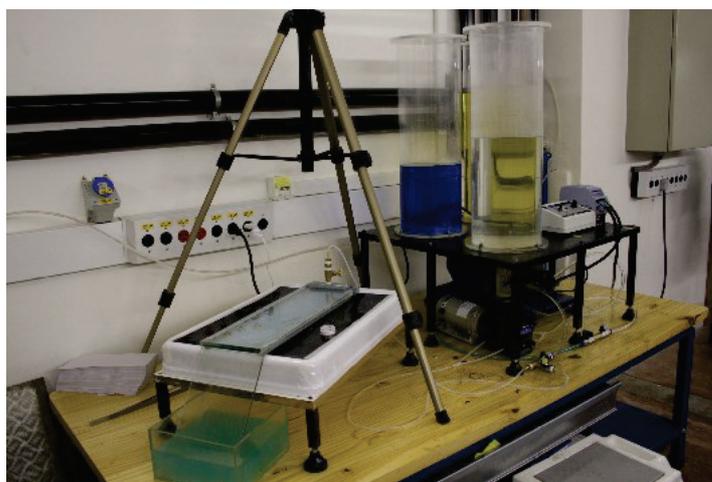


Figura C.4: Segundo projeto de construção de uma célula de Hele-Shaw.

As dimensões do canal, formado por placas paralelas de vidro, eram 500mm de comprimento, 100mm de largura e 0.25mm de folga. Pode-se observar que a folga teve uma redução significativa.

A Figura C.5 ilustra o deslocamento de Carbopol 0,10% por água (com corante preto) em diferentes faixas de vazão mássica.



Figura C.5: Água deslocando Carbopol 0.10% nas respectivas vazões em [g/min]: 2, 48, 13, 15, 23, 81 e 50, 48

Entretanto, surgiram algumas dificuldades durante a operação desta célula. As fitas adesivas que vedavam as laterais da célula não foram boas o suficientes para evitar a ocorrência de vazamentos. A folga de 0,25mm não estava uniforme de modo que havia um escoamento com maior concentração de fluidos por um dos lados da célula em função da variação da resistência ao escoamento.

Versão 3

Para corrigir as dificuldades encontradas na versão anterior, foi projetada uma nova seção de testes. A nova célula de Hele-Shaw era composta por duas placas paralelas de vidro separadas por três espaçadores de folga de 0,25mm cada um. Os espaçadores eram posicionados nas extremidades das placas e, internamente, havia um o-ring para garantir a vedação. Grampos sargentos foram utilizados para pressionar o anel de borracha contra o vidro, garantindo assim a vedação do sistema.

O canal, similar ao da versão anterior, possuía 500mm de comprimento, 100mm de largura e 0,75mm de folga. Os fluidos eram injetados através de um furo de 10mm de diâmetro na placa de vidro superior. A Figura C.6 representa uma foto da bancada experimental e a Fig. C.7 ilustra a seção de testes.



Figura C.6: Terceira versão da bancada experimental

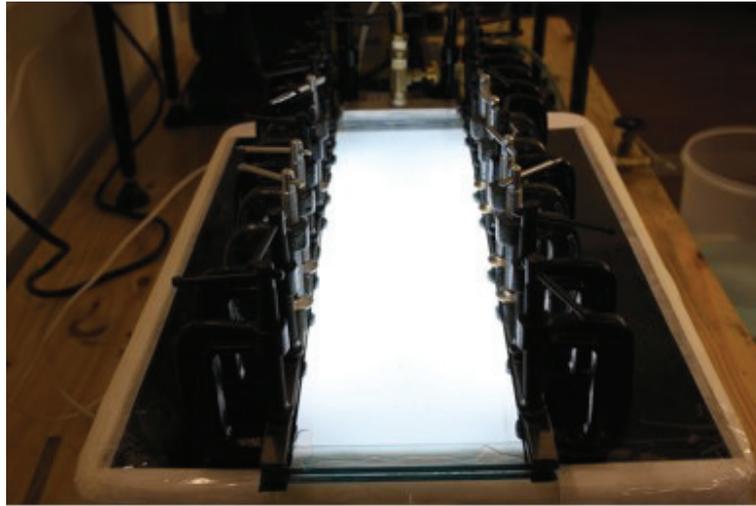


Figura C.7: Terceiro modelo desenvolvido de uma célula de Hele-Shaw

Foram obtidas algumas imagens do teste realizado com goma xantana 0,86% deslocando óleo mineral. Entretanto, o resultado não foi bem sucedido para altas vazões e pressões de deslocamento. A Figura C.8 ilustra uma sequência de imagens na maior vazão da bomba utilizada (marca Netzsch, modelo NM011BY02S12B). Pode-se observar que houve uma mistura dos fluidos dificultando a análise das imagens pois ocorreu a formação de uma emulsão indesejada na mangueira de injeção.



Figura C.8: Mistura dos fluidos

Versão 4

Mais uma vez, a bancada experimental foi aprimorada. Algumas modificações foram feitas na entrada da célula de Hele-Shaw a fim de evitar a mistura do fluido deslocado com o deslocador. A Figura C.9 exemplifica as mudanças realizadas. Pode-se observar que a entrada da célula possui um circuito independente para cada fluido.

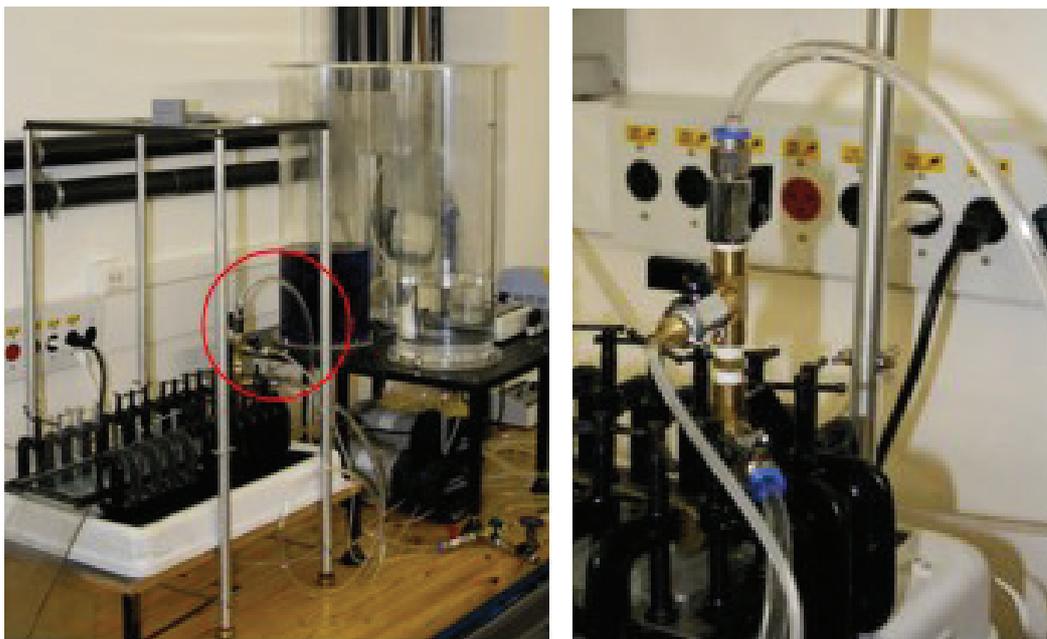


Figura C.9: Bancada experimental modificada

Observou-se que havia influência da gravidade durante a injeção do fluido deslocador e que este deslocava-se inicialmente para trás ocasionando a mistura dos fluidos.

Versão 5

Após diversas tentativas e reprojeto, finalmente foi determinado um modelo ótimo de construção de uma célula de Hele-Shaw. Em relação a versão anterior, a primeira alteração refere-se a instalação das válvulas de entrada dos fluidos na placa de vidro inferior a fim de minimizar o efeito de gravidade durante o início do escoamento. Foi necessário acrescentar mais dois furos na placa de vidro para que fosse possível separar as entradas dos fluidos na célula. Dessa forma, as entradas nas extremidades servem para o preenchimento da célula de Hele-Shaw e a entrada central serve para injetar o fluido deslocador. Também foi adicionada uma tira de nylon próxima aos furos para evitar que o fluido deslocador escoasse para parte de trás dos furos e se misturasse com o fluido deslocado. Essa configuração diz respeito a bancada atual a qual é descrita no capítulo 2.

D

Calibração das bombas

D.1

Bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S

As Figuras D.1 e D.2 apresentam a calibração, com óleo mineral a 25°C, da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 14 e 18, respectivamente. A Figura D.3 apresenta a calibração, com óleo mineral a 20°C, da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 18. Assim, para cada marcador da bomba foi determinada uma vazão mássica equivalente. Através de um cronômetro e de uma balança, foi possível determinar a massa do fluido acumulado em um determinado intervalo de tempo.

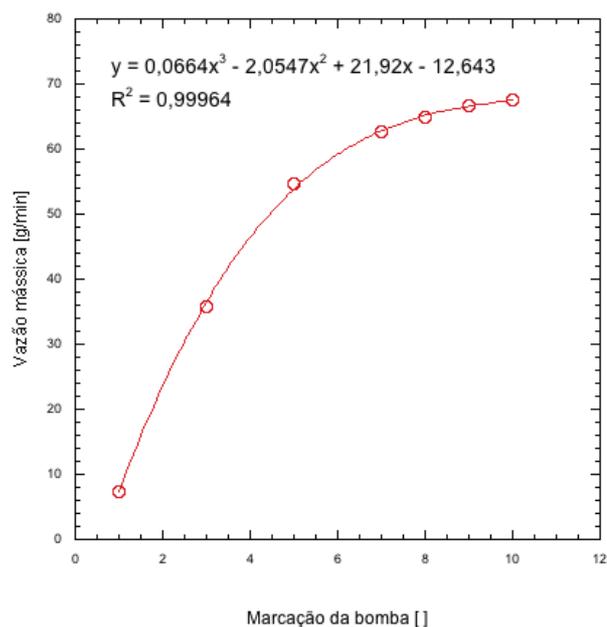


Figura D.1: Calibração com óleo mineral da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 14 a 25°C

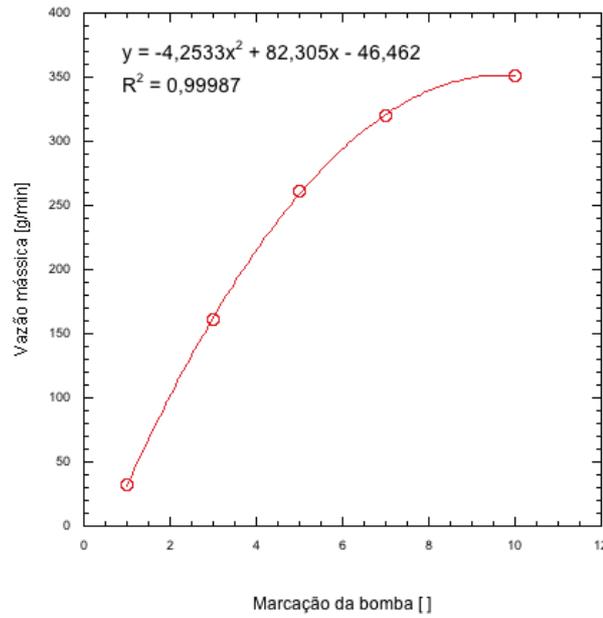


Figura D.2: Calibração com óleo mineral da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 18 a 25°C

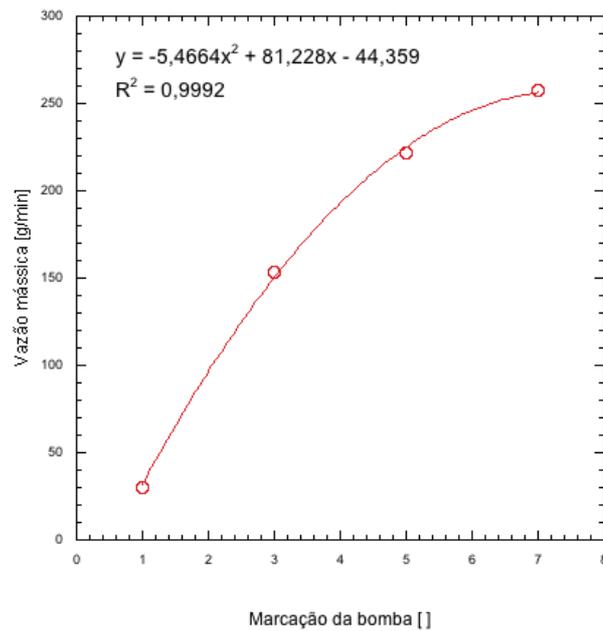


Figura D.3: Calibração com óleo mineral da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 18 a 20°C

D.2
Bomba marca Netzsch modelo Nemo NM015BY02S12B

A Figura D.4 apresenta a única vazão mássica, do deslocamento de óleo mineral a 20°C, analisada neste trabalho através da bomba Netzsch modelo

Nemo NM015BY02S12B. Essa bomba foi utilizada em conjunto com uma garrafa de transferência, conforme explicado no capítulo 2.

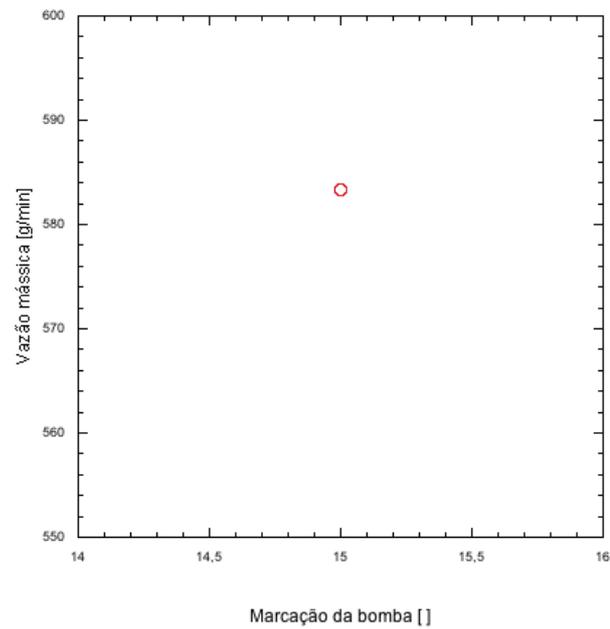


Figura D.4: Calibração com óleo mineral da bomba Bomba Netzsch modelo Nemo NM015BY02S12B a 20°C

E

Adimensionalização do problema para fluidos viscoplásticos

O problema é adimensionalizado de acordo com (18) e a função de viscosidade adimensional é descrita de acordo com os seguintes parâmetros:

$$\eta^* \equiv \frac{\eta \dot{\gamma}_1}{\tau_o} = \frac{1}{\dot{\gamma}^*} + \dot{\gamma}^{*n-1} \quad (\text{E-1})$$

$$\dot{\gamma}_1 \equiv \left(\frac{\tau_o}{K} \right)^{1/n} \quad (\text{E-2})$$

$$\dot{\gamma}^* \equiv \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} \quad (\text{E-3})$$

$$\tau^* = \frac{\tau}{\tau_o} \quad (\text{E-4})$$

Os parâmetros característicos e adimensionais que regem o escoamento são:

- Taxa de deformação característica:

$$\dot{\gamma}_1 = \left(\frac{\tau_o}{K} \right)^{1/n} \quad (\text{E-5})$$

- Velocidade média adimensional:

$$u^* = u / (\dot{\gamma}_1 b) \quad (\text{E-6})$$

- Número de capilaridade reológico:

$$Ca = \tau_o b / \sigma \quad (\text{E-7})$$

- Taxa de deformação adimensional na parede:

$$\dot{\gamma}_w^* = (2/n)(2n + 1)u^* \quad (\text{E-8})$$

- Viscosidade adimensional do fluido deslocado:

$$\eta^*(\dot{\gamma}_w^*) = \frac{1}{\dot{\gamma}_w^*} + (\dot{\gamma}_w^*)^{n-1} \quad (\text{E-9})$$

- Viscosidade adimensional do fluido newtoniano deslocador:

$$\mu^* = \mu \dot{\gamma}_1 / \tau_o \quad (\text{E-10})$$

– Razão de viscosidade:

$$R = \mu^* / \eta^*(\dot{\gamma}_w^*) \quad (\text{E-11})$$

Assim, conclui-se que os parâmetros que regem problema de escoamento com fluidos viscoplásticos, para cada caso simulado, são u^* e R .