

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Alexandre Willig Quintino de Souza

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE UM LÍQUIDO CONTIDO EM
UM MEIO POROSO POR INJEÇÃO DE LÍQUIDOS NEWTONIANOS E
NÃO-NEWTONIANOS**

VITÓRIA
2018

ALEXANDRE WILLIG QUINTINO DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE UM LÍQUIDO CONTIDO EM
UM MEIO POROSO POR INJEÇÃO DE LÍQUIDOS NEWTONIANOS E
NÃO-NEWTONIANOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira

Co-orientador: Prof. Dr. Edson José Soares

VITÓRIA
2018

ALEXANDRE WILLIG QUINTINO DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE UM LÍQUIDO CONTIDO EM
UM MEIO POROSO POR INJEÇÃO DE LÍQUIDOS NEWTONIANOS E
NÃO-NEWTONIANOS**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Vitória, ES, 17 de agosto de 2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira - Orientador

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires - Membro Externo

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Fábio de Assis Ressel Pereira - Membro Externo

Universidade Federal do Espírito Santo

Vitória

2018

"É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem vitória nem derrota."

- Theodore Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve ao meu lado nos momentos de vitória e me guiou e iluminou nos momentos de dificuldade.

À toda a minha família, que sempre me deu incentivo e suporte ao longo da execução deste trabalho, em especial à minha esposa, Jacqueline Willig, e à minha mãe, Jeyce Willig, pela paciência, por sempre me manter motivado a crescer cada vez mais como profissional e pesquisador e pelo suporte nos momentos mais difíceis.

Ao professor e orientador Renato do Nascimento Siqueira, pela orientação, confiança e incentivo durante este trabalho. Agradeço também ao professor e coorientador Edson José Soares, por compartilhar o seu conhecimento, pelo incentivo neste trabalho e durante todo este curso e ao professor Patrício Pires, por dividir comigo o seu conhecimento sobre solos e pelo companheirismo.

Aos colegas e companheiros do Laboratório de Reologia (LABREO), em especial ao Hilton Moulin Caliman, pelo compartilhamento de conhecimento e técnicas que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho, e do laboratório de solos (LABGEO), por permitir o uso dos equipamentos e pelo suporte dado à execução dos experimentos.

Resumo

A aplicação de métodos de recuperação terciária para aumentar o fator de recuperação de campos de petróleo, especialmente nos reservatórios que contêm óleos viscosos de baixo grau API, tem aumentado bastante em função da eficiência de recuperação dos métodos de recuperação primária e secundária de petróleo não ultrapassar os 30%. Dentre estes métodos, pode ser citado a injeção de produtos químicos. Para aplicar estes métodos de recuperação, é importante compreender a fenomenologia do deslocamento líquido-líquido que ocorre dentro de um meio poroso. Neste trabalho, há o interesse de analisar como a razão de viscosidades e as propriedades não-newtonianas, particularmente a viscoplasticidade e a viscoelasticidade, influenciam na massa recuperada de um líquido inicialmente contido em um meio poroso. Utilizando uma abordagem experimental, diferentes soluções newtonianas, uma solução viscoplástica e uma solução viscoelástica foram utilizadas para deslocar um líquido newtoniano que preenche os poros. Para o caso newtoniano, foi mostrado que quanto menor a razão de viscosidades, maior é a fração de líquido deslocado recuperada. Já no caso viscoplástico, a fração de massa perdida foi maior do que o caso newtoniano equivalente devido à ocorrência de reação química entre os fluidos. Por sua vez, no cenário viscoelástico, dependendo da concentração de PEO utilizada, a eficiência de recuperação foi idêntica ou maior quando comparada ao cenário newtoniano correspondente.

Palavras-chave: recuperação; meio poroso; deslocamento líquido-líquido; viscoplástico; viscoelástico.

Abstract

The application of tertiary recovery methods to increase the recovery factor of oil fields, especially in heavy oil reservoirs, has increased considerably due to the efficiency of primary and secondary oil recovery methods do not be more than 30%. Among these methods, the injection of chemicals can be cited. To apply these methods, it is important to understand the phenomenology of liquid-liquid displacement occurring within a porous medium. In this work, the influence of the viscosity ratio and the non-Newtonian properties, particularly viscoplasticity and viscoelasticity, on the recovered mass of a liquid initially contained in a porous medium was analysed. Using an experimental approach, different Newtonian solutions, a viscoplastic solution and a viscoelastic solution were used to displace a Newtonian liquid that fills the pores. In this work, it was shown for the Newtonian case that the lower the viscosity ratio, the greater the displaced liquid fraction recovered. In the viscoplastic case, the lost mass fraction was greater than the equivalent Newtonian case due to a chemical reaction between the fluids. On the other hand, in the viscoelastic scenario, depending on the concentration of PEO used, the recovery efficiency was identical or greater than the corresponding Newtonian scenario.

Keywords: recovery; porous medium; liquid-liquid displacement; viscoplastic; viscoelastic.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquema do escoamento dentro de um meio poroso - Fonte: Caliman (2016).	9
1.2	Padrões de fluxo em um meio poroso variando a razão de viscosidades, mantendo o número de capilaridade fixo em 1 - Fonte: Modificada de Lenormand <i>et al.</i> (1988).	14
2.1	Distribuição do tamanho dos grãos.	22
2.2	Curva de compactação do solo que compõe o meio poroso.	23
2.3	Esquemático de um viscosímetro tipo Cannon-Fenske - Fonte: Caliman (2016).	27
2.4	Acompanhamento da força imposta ao anel durante a medição da tensão interfacial. Comparação do caso newtoniano e viscoplástico.	29
2.5	Esquemático da bancada experimental.	32
3.1	Fração de massa perdida em função do número de capilaridade e razão de viscosidades.	39
3.2	<i>Flowcurve</i> da solução viscoplástica com concentração de gel de 7,7%.	41
3.3	Fração de massa perdida em função do número de plasticidade.	43
3.4	Comparação dos testes com razão de viscosidade 4,4.	44
3.5	<i>Flowcurve</i> da solução viscoplástica com concentração de gel de 14 %.	45
3.6	Comparativo entre a <i>flowcurve</i> da solução original e da solução resultante após passar pelo meio poroso.	46
3.7	<i>Flowcurve</i> da solução viscoelástica com 20% de PEG e 0,1% de PEO.	47
3.8	<i>Flowcurve</i> da solução viscoelástica com 20% de PEG e 0,25% de PEO.	48

3.9	Coeficiente da primeira diferença de tensão normal da solução viscoelástica com 20% de PEG e 0,25% de PEO.	49
3.10	<i>Flowcurve</i> da solução viscoelástica com 20% de PEG e 0,3% de PEO.	50
3.11	Coeficiente da primeira diferença de tensão normal da solução viscoelástica com 20% de PEG e 0,3% de PEO.	51
3.12	Comparação do cenário viscoelástico com o cenário newtoniano utilizando uma solução viscoelástica com 20% em massa de PEG e 0,1% em massa de PEO.	53
3.13	Comparação do cenário viscoelástico com o cenário newtoniano utilizando uma solução viscoelástica com 20% em massa de PEG e 0,25% em massa de PEO.	55
3.14	Comparação do cenário viscoelástico com o cenário newtoniano utilizando uma solução viscoelástica com 20% em massa de PEG e 0,3% em massa de PEO.	56
3.15	Comparação dos cenários viscoelásticos com o cenário newtoniano.	58

LISTA DE TABELAS

2.1	Propriedades do meio poroso.	24
3.1	Propriedades das soluções base água.	37
3.2	Propriedades das soluções base óleo.	38
3.3	Resultado da combinação das soluções do caso newtoniano.	38
3.4	Resultado da combinação da solução viscoplástica, com concentração de gel de 7,7%, com o óleo de mamona.	41
3.5	Resultado da combinação das soluções viscoelásticas com o óleo de soja.	52
3.6	Resultados viscoelásticos em comparação com newtonianos obtidos pela injeção de uma solução de 20% em massa de PEG e 0,1% em massa de PEO.	52
3.7	Resultados viscoelásticos em comparação com newtonianos obtidos pela injeção de uma solução de 20% em massa de PEG e 0,25% em massa de PEO.	54
3.8	Resultados viscoelásticos em comparação com newtonianos obtidos pela injeção de uma solução de 20% em massa de PEG e 0,3% em massa de PEO.	56

NOMENCLATURAS

- A: Área da seção transversal
- Bo: Número de Bond
- C: Circunferência do anel
- Ca: Número de capilaridade
- D: Diâmetro médio dos grãos
- De: Número de Deborah
- λ : Tempo de relaxamento
- F_{max} : Força máxima
- D_h : Diâmetro hidráulico
- g: Aceleração da gravidade
- I_v : Índice de vazios
- K: Índice de consistência
- L: Comprimento característico
- m: Fração de massa geométrica depositada
- n: Índice de comportamento

- NBR: Norma brasileira
- PI: Número de plasticidade
- r : Raio do tubo capilar
- ψ_1 : Coeficiente da primeira diferença de tensão normal
- ψ_2 : Coeficiente da segunda diferença de tensão normal
- Re: Número de Reynolds
- P_c : Pressão capilar
- m_e : Fração de massa perdida
- U : Velocidade da interface gás-líquido
- U_c : Velocidade característica
- V_v : Volume de vazios
- V_s : Volume de solo
- V_t : Volume total do leito poroso
- N_μ : Razão de viscosidades
- U_m : Velocidade média do líquido deslocado
- μ : Viscosidade newtoniana
- μ_b : Viscosidade de Bingham
- μ_c : Viscosidade característica
- ϕ : Porosidade
- ρ : Massa específica
- σ : Tensão superficial

- σ_i : Tensão interfacial
- τ : Tensão de cisalhamento
- τ_0 : Tensão limite de escoamento
- $\dot{\gamma}$: Taxa de deformação
- Q: Vazão volumétrica
- UEP: Unidade estacionária de produção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Fundamentação Teórica	2
1.2.1	Fluidos Viscoplasticos	2
1.2.2	Fluidos Viscoelásticos	3
1.2.3	Escoamento em Meios Porosos	5
1.3	Estado da Arte	8
1.4	Caracterização do problema	19
1.5	Objetivos	19
1.5.1	Objetivos Gerais	19
1.5.2	Objetivos Específicos	20
2	METODOLOGIA	21
2.1	Caracterização da areia utilizada no meio poroso	21
2.2	Seleção de Fluidos	24
2.3	Preparo e Caracterização dos Fluidos	25
2.3.1	Soluções Newtonianas	25
2.3.2	Solução Viscoplastica	28
2.3.3	Solução Viscoelástica	30
2.4	Aparato Experimental	31
3	RESULTADOS	37
3.1	Caso Newtoniano	37
3.2	Caso Viscoplastico	40
3.3	Caso Viscoelástico	46

4 CONCLUSÃO

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O deslocamento de um líquido através da injeção de um fluido em um meio poroso é um problema frequentemente utilizado em diversas aplicações, como por exemplo, exploração de campos de petróleo.

Atualmente, grande parte da energia consumida pela população mundial advém do petróleo, que é uma fonte de energia não renovável. Devido ao aumento da demanda do consumo para geração de energia e como matéria-prima nas indústrias, a procura por petróleo passou a ser focada nas águas profundas e ultra-profundas. Por isso, a compreensão do problema do escoamento de fluidos em meios porosos é de extrema importância para maximizar a quantidade de óleo recuperado.

No início da vida produtiva, muitos poços conseguem elevar o petróleo até a superfície ou até uma unidade estacionária de produção (UEP) por apresentar energia suficientemente elevada. Esta energia é denominada de energia primária e está relacionada com os mecanismos de produção por gás em solução, por influxo de água e capa de gás. Com o tempo, a energia contida no reservatório sofre um processo de depleção em função da descompressão dos fluidos e pelas resistências associadas às forças viscosas e forças capilares (MUSSE, 2009). Os campos de petróleo que produzem utilizando os mecanismos de produção primária apresentam baixos fatores de

recuperação e, por consequência, grande parte do petróleo fica retida no reservatório.

Buscando aumentar a quantidade de óleo recuperado, foram desenvolvidos e implementados os métodos de recuperação secundária, que consistem em recuperar a energia do reservatório através da injeção de fluidos nativos do próprio reservatório. Dentre eles pode ser citado a injeção de água.

Existem reservatórios, especialmente aqueles que apresentam óleos muito viscosos e pesados, que o aumento do fator de recuperação é baixo ao utilizar os métodos primários e/ou secundários. Por isso, foram desenvolvidos os métodos de recuperação terciária, ou métodos de recuperação avançada, que consistem em quatro técnicas principais: métodos térmicos, como a injeção de vapor, métodos miscíveis, como a injeção de CO_2 , métodos químicos, tendo como exemplo a injeção de polímeros, e métodos microbiológicos (MUSSE, 2009; VELOSO, 2014).

Desta forma, buscando aumentar o fator de recuperação de um fluido contido em uma rocha reservatório, é importante o conhecimento e compreensão da fenomenologia do escoamento de fluidos em meios porosos e os parâmetros que o influenciam, tais como o número de capilaridade, a razão de viscosidades e a reologia dos fluidos envolvidos.

1.2 Fundamentação Teórica

1.2.1 Fluidos Viscoplasticos

A realização de uma análise dos parâmetros reológicos pode depender da escolha de um modelo adequado. O modelo que primeiramente descreveu o comportamento de um fluido viscoplastico foi o modelo de Bingham, também conhecido como modelo plástico ideal, representado pela Equação 1.1.

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \mu_b \dot{\gamma} & \text{se } \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{se } \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (1.1)$$

O parâmetro τ_0 é a tensão limite de escoamento, e μ_b é a viscosidade de Bingham.

Outra função que é comumente utilizada para modelar fluidos viscoplásticos é o modelo de Herschel-Bulkley, dada pela Equação 1.2.

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n & \text{se } \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{se } \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (1.2)$$

O parâmetro K é chamado de índice de consistência e n é o índice de comportamento.

Para o modelo Herschel-Bulkley, a viscosidade definida pela Equação 1.3.

$$\begin{cases} \eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1} & \text{se } \tau \geq \tau_0 \\ \eta = \infty & \text{se } \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (1.3)$$

Pode-se observar que quando $n = 1$, a equação reproduz o modelo de Bingham; enquanto, se $\tau_0 = 0$, tem-se o modelo *power-law* e para $n = 1$ e $\tau_0 = 0$, tem-se o modelo de fluido newtoniano.

1.2.2 Fluidos Viscoelásticos

Durante o escoamento simples de um fluido viscoelástico, há o aparecimento de uma força normal, que é resultante de uma deformação da estrutura interna do fluido. Esta deformação dá origem ao coeficiente da primeira diferença de tensão normal, ψ_1 . Esta propriedade material é definida pela razão entre a primeira diferença de tensão normal, N_1 , e o quadrado da taxa de deformação, $\dot{\gamma}$. A Equação 1.4 mostra esta definição.

$$\psi_1 = \frac{N_1}{\dot{\gamma}^2} = \frac{\tau_{rr} - \tau_{zz}}{\dot{\gamma}^2} \quad (1.4)$$

Outra propriedade material presente em um fluido viscoelástico é o coeficiente da segunda diferença de tensão normal, ψ_2 , definida como a razão entre a segunda diferença de tensão normal e o quadrado da taxa de deformação. Esta definição está definida na Equação 1.5.

$$\psi_2 = \frac{N_2}{\dot{\gamma}^2} = \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{\dot{\gamma}^2} \quad (1.5)$$

Na literatura, observa-se que para fluidos viscoelásticos o valor absoluto de ψ_2 é sempre bem inferior ao valor de ψ_1 .

Um parâmetro adimensional importante do escoamento de fluidos viscoelásticos é o número de Deborah, De , definido como a razão entre o tempo característico de um material específico e o tempo do processo, t_p . O número de Deborah é dado pela Equação 1.6. O tempo característico do material é o tempo de relaxamento, λ , dado pela Equação 1.7 e o tempo do processo é a taxa de deformação característica. Quando $De \rightarrow 0$, o fluido se comporta como um fluido newtoniano. À medida que De aumenta, a relevância dos efeitos elásticos também aumenta.

$$De = \frac{\lambda}{t_p} \quad (1.6)$$

$$\lambda = \frac{\psi_{10}}{2\eta_0} \quad (1.7)$$

Onde ψ_{10} é o coeficiente da primeira diferença de tensão normal em baixas taxas de deformação e η_0 é a viscosidade dinâmica do fluido com taxa de deformação tendendo a zero.

1.2.3 Escoamento em Meios Porosos

Um meio poroso é um conjunto de poros (espaços vazios) interconectados que propiciam a circulação de fluidos (CALIMAN, 2016). Neste trabalho, os parâmetros mais importantes que caracterizam o meio poroso são a porosidade, ϕ , e o diâmetro médio dos grãos, que é baseado em uma distribuição de tamanho de grãos previamente conhecida. Contudo, o parâmetro que relaciona o volume de vazios que é obtido diretamente da caracterização do solo é o índice de vazios, I_v , que é definido pela razão entre o volume de vazios, V_v , e o volume de sólidos, V_s . O índice de vazios é dada pela Equação 1.8 .

$$I_v = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.8)$$

O índice de vazios pode ser obtido por meio da massa específica dos grãos e da massa específica aparente seca do solo por meio da Equação 1.9

$$I_v = \frac{\rho_{graos}}{\rho_{aparente}} - 1 \quad (1.9)$$

Onde o parâmetro ρ_{graos} é a massa específica dos grãos e $\rho_{aparente}$ é a massa específica aparente do solo seco.

A porosidade absoluta, assim como o índice de vazios, também está relacionada com o volume de vazios. Porém, é definida como a razão entre o volume de vazios e o volume total do meio poroso, V_t , dada pela soma do volume de sólidos, V_s , e o volume de vazios, V_v . ϕ é definido pela Equação 1.10.

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} \quad (1.10)$$

Por apresentarem definições muito semelhantes, é possível obter uma relação direta

entre o índice de vazios e a porosidade. Baseado nas Equações 1.8 e 1.10, a relação entre a porosidade e o índice de vazios é dada pela Equação 1.11.

$$\phi = \frac{I_v}{I_v + 1} \quad (1.11)$$

A partir da porosidade e o diâmetro médio dos grãos, é possível obter o comprimento característico do meio poroso. Para definir o comprimento característico é importante conhecer a definição de raio hidráulico. O raio hidráulico, conforme descrito por Costa (2006) e Epstein (1989), é definido pela razão entre o volume de vazios e a área da interface líquido-meio poroso. Tal conceito deve ser introduzido para substituir o diâmetro do meio poroso, pois mesmo em um meio naturalmente homogêneo, é impossível definir um raio representativo (COSTA, 2006). A Equação 1.12 apresenta as definições descritas.

$$R_h = \frac{\phi}{(1 - \phi)a_v} \quad (1.12)$$

Onde a_v é a área superficial interna específica, definida como a razão entre a área da superfície do grão e o volume do grão, V .

Considerando que os grãos que compõem o meio poroso são esféricos, a área da superfície é $4\pi R^2$ e o volume $\frac{4}{3}\pi R^3$. Portanto, para um grão esférico, após a implementação dos algebrismos, temos que a_v é dada pela equação 1.13.

$$a_v = \frac{6}{D} \quad (1.13)$$

onde D é o diâmetro médio dos grãos.

Assim, o diâmetro hidráulico, considerando os grãos esféricos, é definido pela equação 1.14.

$$D_h = \frac{\phi D}{6(1 - \phi)} \quad (1.14)$$

Para avaliar a influência das propriedades não-newtonianas na fração de massa perdida, cada resultado não-newtoniano deve ser comparado com um ponto newtoniano equivalente com a mesma razão de viscosidades. Para tal, é necessário definir uma taxa de deformação característica, que é composta pelo comprimento característico do meio poroso e por uma velocidade característica. Neste trabalho, a velocidade característica do experimento será a velocidade média do escoamento. A velocidade média é dada pela Equação 1.15.

$$U_m = \frac{Q}{A} \quad (1.15)$$

Onde A é a área frontal do escoamento do escoamento e Q é a vazão volumétrica média do fluido recuperado, dada pela Equação 1.16.

$$Q = \frac{m_r}{\rho t} \quad (1.16)$$

onde t é o tempo do ensaio cronometrado, ρ é a massa específica do fluido e m_r é a massa de fluido recuperada.

Contudo, as áreas do escoamento do meio poroso são muito irregulares, fazendo com que o fluido sofra acelerações e desacelerações com frequência, tornando mais difícil a determinação da velocidade. Para que seja feito um paralelo com o tubo capilar, no presente trabalho, a área efetivamente aberta ao fluxo é dada pelo produto entre a área frontal do meio poroso e a porosidade. Sendo assim, a velocidade característica do problema é dada pela Equação 1.17.

$$U_c = \frac{Q}{\phi A} \quad (1.17)$$

Onde A é a área da seção transversal do escoamento, Q é a vazão volumétrica média do fluido recuperado e ϕ é a porosidade. Com isso, é possível obter a taxa de deformação característica, dividindo a velocidade característica pelo comprimento característico. A taxa de deformação característica, dada pela Equação 1.18, é um parâmetro importante para realizar a análise dos cenários não-newtonianos, pois a viscosidade dinâmica dos fluidos não-newtonianos utilizados dependem deste parâmetro.

$$\dot{\gamma}_c = \frac{U_c}{D_h} \quad (1.18)$$

onde U_c é dada pela Equação 1.17 e D_h pela Equação 1.14.

1.3 Estado da Arte

Existem diversos trabalhos, de caráter numérico e experimental, relacionados ao escoamento de fluidos em meios porosos na literatura, tanto de natureza monofásica como de natureza bifásica. Dentre estes trabalhos, pode-se citar aqueles que têm como objetivo estudar o comportamento do escoamento de um fluido contido em um meio poroso quando é deslocado por outro fluido.

Nos meios porosos, por apresentarem dimensões de canais equivalentes ou menores que as de um tubo capilar que interconectam os poros, os efeitos capilares devem ser considerados. Por isso, para melhor entendimento da fenomenologia do escoamento em meios porosos, durante a realização da pesquisa bibliográfica, trabalhos relacionados ao escoamento em tubos capilares foram estudados. A Figura 1.1 mostra o esquemático do fluxo de fluidos dentro de um meio poroso.

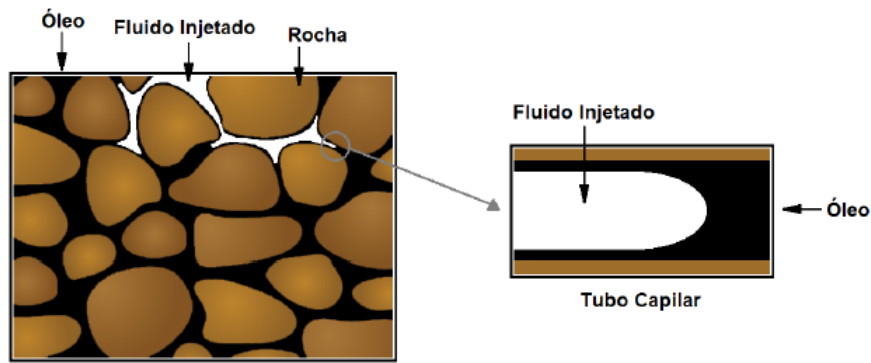


Figura 1.1: Esquema do escoamento dentro de um meio poroso - Fonte: Caliman (2016).

Um estudo pioneiro sobre o deslocamento de um fluido viscoso contido em um tubo capilar através da injeção de outro fluido, foi realizado na década de 30 por Fairbrother e Stubbs (1935). O estudo em questão teve como objetivo quantificar a fração de massa m que fica aderida à parede do tubo, que está diretamente relacionada à espessura do filme de líquido após deslocar com gás um líquido imerso em um tubo capilar. O valor de m , por simples balanço de volume, pode ser definido pela Equação 1.19:

$$m = \frac{U - U_m}{U} \quad (1.19)$$

Onde U é a velocidade da interface gás-líquido e U_m é a velocidade média do líquido deslocado. Os autores propuseram uma relação empírica para valores baixos de m , descrito pela Equação 1.20

$$m = 1 - \frac{R_b^2}{R_0^2} = \sqrt{\frac{\mu U}{\sigma}} = \sqrt{Ca} \quad (1.20)$$

Onde Ca é definido como número de capilaridade, μ é a viscosidade dinâmica do líquido newtoniano, σ é a tensão superficial entre o líquido e o gás, R_b é o raio do filme de líquido deslocador e R_0 é o raio do tubo.

Posteriormente, buscando desenvolver um modelo matemático para prever o perfil do escoamento de uma bolha de ar ao deslocar um líquido imerso em um tubo capilar, Bretherton (1961) realizou estudos experimentais abordando dois cenários: O escoamento em um tubo horizontal com raio pequeno o suficiente para que fosse possível desconsiderar os efeitos gravitacionais e o escoamento em tubos verticais, ambos com inércia desprezível. A equação para a fração de massa depositada na parede do tubo proposta pelo autor somente é válida para valores baixos de número de capilaridade.

Taylor (1961) reproduziu os experimentos descritos anteriormente com o objetivo de investigar o comportamento de m com valores maiores de Ca . O autor demonstrou que a relação obtida por Fairbrother e Stubbs (1935) somente era válida para valores de Ca até 0,09. Além disso, por ter utilizado fluidos muito viscosos, foi possível obter valores de até 1,9 para o número de capilaridade. Foi também observado que a medida que o número de capilaridade aumentava, a espessura do fluido aderida à parede do tubo também aumentava até atingir o valor assintótico de 0,55. Ainda, o autor propôs regimes de escoamento que dependiam do valor de m .

Um outro trabalho abordando o problema da recuperação de um fluido viscoso imerso em um tubo capilar foi realizado por Cox (1962). O Autor utilizou um fluido com alta viscosidade para preencher o tubo capilar com o intuito de estudar o comportamento de m para números de capilaridade maiores que 10. Neste estudo, foi confirmado que a fração de massa depositada na parede do tubo fica constante e igual a 0,6. O autor também buscou correlacionar os estudos teóricos realizados com as equações obtidas por Bretherton (1961). Porém, não houve sucesso, visto que o trabalho desenvolvido por este autor somente é válido para valores de números de capilaridade menores que 0,005.

Através de simulações numéricas e experimentos laboratoriais, Soares *et al.* (2005) estudaram, o deslocamento de um líquido newtoniano por outro líquido newtoniano. Neste estudo, foi analisado como a fração de massa depositada na parede do tubo se comportava variando Ca e a razão de viscosidade, N_μ . Os autores, para garantir a validação do modelo numérico e experimental, realizaram simulações computacionais com $N_\mu = 1000$ e experimentos com $N_\mu = 20$ e confirmaram que os resultados obtidos estavam de acordo com o esperado por Taylor (1961). Ainda, constataram que N_μ

= 20 é suficientemente alto para representar o cenário $N_\mu = \infty$. Além disso, fizeram experimentos com $N_\mu = 12$; 4 e 2, e observaram que m aumenta com o aumento do número de capilaridade até Ca atingir um valor entre 1 e 10, pois a partir deste valor, a espessura do filme de líquido não variava com Ca . Neste trabalho, foi observado também que ao diminuir a razão de viscosidades, m aumenta.

O deslocamento de um líquido viscoplástico por um gás em um tubo capilar foi estudado por Mendes *et al.* (2007). Os autores observaram que escoamentos com velocidades médias maiores levaram a valores maiores de m . Ainda, para cada líquido utilizado, existe uma velocidade crítica abaixo da qual o escoamento é perfeito, ou seja, não há película de líquido aderida à parede ($m = 0$).

No mesmo sentido, Dimakopoulos e Tsamopoulos (2007) abordaram numericamente o problema do escoamento transiente de um fluido newtoniano e um fluido viscoplástico contidos em tubos com geometrias complexas através da injeção de ar. Os autores notaram que os efeitos viscoplásticos retardam a penetração do gás e provocam a redução da espessura do filme de líquido depositado na parede do tubo. Também foi constatado que os efeitos de inércia, quando relevantes, tendem a reduzir m .

Ainda, Huzyak e Koelling (1997) e Gauri e Koelling (1999) realizaram estudos experimentais injetando gás em um tubo capilar que inicialmente continha um fluido viscoelástico. Os autores constataram que com baixas taxas de deformação, os efeitos elásticos não eram relevantes. Por isso, a espessura do filme de líquido na parede do tubo foi praticamente idêntica ao caso newtoniano. À medida que as velocidades do escoamento aumentam, os efeitos elásticos tornam-se mais relevantes, provocando um incremento da fração de massa depositada na parede do tubo capilar.

Por sua vez, Soares *et al.* (2008) investigaram como os efeitos viscoelásticos afetam a espessura do filme de um líquido inicialmente contido em um tubo capilar através da injeção de um outro líquido. Primeiramente, foram realizados experimentos com dois fluidos newtonianos, com razão de viscosidades, $N_\mu = 1,8$, e a fração de massa de fluido deslocado depositada na parede do tubo foi computada variando o número de capilaridade, Ca . Posteriormente, foram preparadas duas soluções aquosas com diferentes concentrações de polietilenoglicol (PEG) e óxido de polietileno (PEO) e dois ensaios viscoelásticos foram realizados. O primeiro ensaio foi a injeção de um fluido

viscoelástico para recuperar um fluido newtoniano. Os autores constataram que com baixos valores de Ca , a espessura do filme de líquido resultante é idêntica se comparada com o caso newtoniano. Contudo, para altos valores de Ca , foi observado que a fração de massa de líquido aderida à parede do tubo foi menor quando comparada com o caso newtoniano correspondente. O segundo ensaio consistiu em injetar um fluido newtoniano para deslocar um fluido viscoelástico e os autores verificaram que a espessura do filme de líquido era maior quando comparado com o caso newtoniano correspondente.

Soares *et al.* (2015) realizaram estudos numéricos e experimentais para estudar o deslocamento imiscível de um líquido viscoso utilizando um outro líquido viscoso dentro de um tubo capilar. Entretanto, diferente dos trabalhos anteriormente citados, os autores, além de analisarem o comportamento da fração de massa geométrica depositada, estudaram também o comportamento da fração de massa perdida, m_e . Tais parâmetros foram investigados variando o número de capilaridade e a razão de viscosidades. Durante a execução dos ensaios experimentais, o fluido deslocado (base óleo) foi mantido fixo, com viscosidade da ordem de 52,3 mPa s e diferentes fluidos deslocadores foram utilizados. Através da variação das porcentagens de etanol e PEG nas soluções, foram obtidos diferentes valores de viscosidades para cada fluido deslocador utilizado, mantendo a razão de densidades próxima de 1 para excluir a influência da gravidade nos experimentos.

Para validar a bancada experimental, ensaios considerando $N_\mu = 18,2$ também foram realizados por Soares *et al.* (2015), e os resultados obtidos foram comparados com os observados por Taylor (1961). Nesta etapa de validação, foi observado que o comportamento de m obtido experimentalmente foi idêntico ao obtido pelo autor citado. Além disso, os autores verificaram que a razão de viscosidade de 18,2 era suficientemente alta para representar o deslocamento do líquido por um gás e que em cenários de alta razão de viscosidade, m_e e m são numericamente iguais. Isto ocorre devido ao fato do arraste imposto pelo cisalhamento do fluido deslocador no fluido deslocado ser desprezível. Ainda, baseado nos resultados obtidos numérico e experimentalmente, para diferentes valores de razão de viscosidades e número de capilaridades, os autores concluíram que a diminuição da razão de viscosidade, para um mesmo valor de capilaridade, a eficiência de recuperação do óleo aumenta e m também aumenta.

Assim, foi constatado que para toda a faixa de razão de viscosidades estudada, tanto a fração de massa perdida quanto m aumentam com o aumento de Ca até que um valor assintótico seja atingido, fenômeno que ocorre quando as forças interfaciais são desprezíveis se comparadas com as forças viscosas.

O comportamento da pressão capilar durante o deslocamento de um fluido contido em um meio poroso pela injeção de um outro fluido foi observado por Lenormand *et al.* (1983). Neste trabalho, os autores concluíram que na ausência de forças viscosas e gravitacionais, em cenários onde o fluido deslocado molha preferencialmente o meio poroso, o escoamento é governado por forças capilares. Portanto, o fluido injetado (que não molha) não é capaz de entrar no meio poroso espontaneamente. O fluido que não molha pode somente entrar em uma garganta porosa de raio r quando a pressão na entrada desta garganta exceder o valor da pressão capilar entre os dois fluidos, representada pela Equação 1.21.

$$P_c = \frac{2 \sigma_i}{r} \quad (1.21)$$

Onde σ_i é a tensão interfacial entre os dois líquidos e r é o raio do tubo capilar pelo qual o fluido está escoando. Sob essas condições, a distribuição de pressão em ambos os fluidos é uniforme e o tamanho dos poros controla o processo de deslocamento. Uma frente de deslocamento avança por invadir a maioria dos corpos porosos e gargantas disponíveis, levando a uma menor resistência capilar. Quando forças viscosas também tornam-se importantes, a distribuição de pressão torna-se não-uniforme e as diferenças de pressão podem permitir a invasão do fluido que não molha para gargantas de poros menores.

No mesmo sentido, Lenormand *et al.* (1988) realizaram estudos numéricos e experimentais para descrever o escoamento de um fluido contido em um meio poroso (fluido deslocado) pela injeção de um outro fluido imiscível (fluido deslocador). Contudo, os parâmetros utilizados para avaliar o estudo foram a razão de viscosidades e o número de capilaridade. Neste trabalho, foram observados três padrões de fluxo: *fingering* capilar, *fingering* viscoso e fluxo estável. Ainda, constataram que, ao reduzir a razão de

viscosidades, mantendo o número de capilaridade constante, a razão entre o volume de fluido deslocador que ocupa os vazios e o volume total de vazios no ato do *breakthrough* (fenômeno caracterizado pela chegada de fluido deslocador na saída do meio poroso) aumenta. Conseqüentemente, a fração de massa perdida diminui. Os autores também concluíram que em cenários de alta razão de viscosidades, a saturação do fluido deslocador no *breakthrough* diminui com o aumento do número de capilaridade, indicando que menos fluido deslocado é recuperado. A evolução do padrão de escoamento *fingering* viscoso para fluxo estável mapeada pelos autores está ilustrada na Figura 1.2.

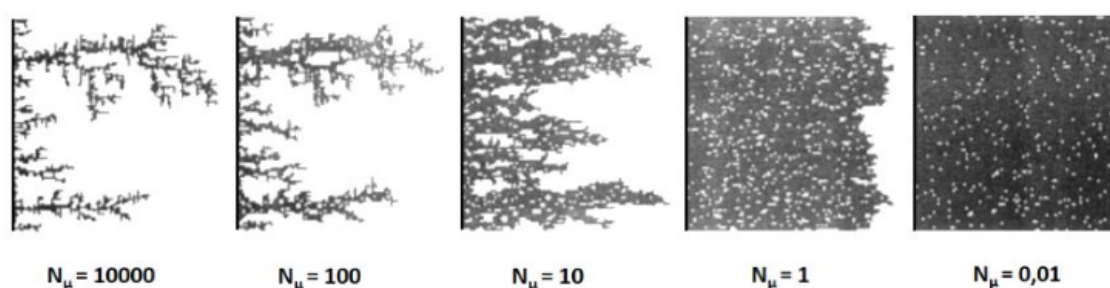


Figura 1.2: Padrões de fluxo em um meio poroso variando a razão de viscosidades, mantendo o número de capilaridade fixo em 1 - Fonte: Modificada de Lenormand *et al.* (1988).

A Figura 1.2 mostra a evolução do padrão de escoamento *fingering* viscoso, característico de cenários de altas razões de viscosidades, para o padrão fluxo estável, à medida que N_μ varia de 10000 a 0,01, mantendo o número de capilaridade constante igual a 1.

Para definir o melhor posicionamento de um poço produtor e um poço injetor, a fim de maximizar o fator de recuperação do poço produtor, Algharaib *et al.* (2006) analisaram numericamente o deslocamento imiscível em um meio poroso com paredes horizontais, avaliando os efeitos gravitacionais, o número de capilaridade e a razão de mobilidade (variável relacionada com a razão de viscosidades) entre o fluido produzido e o fluido deslocador. Os autores observaram que a redução da razão de mobilidade, a qual ocorre quando o fluido deslocador apresenta mobilidade semelhante ao fluido deslocado, provoca um aumento da fração de óleo recuperada no *breakthrough*. Constatou-se também que o aumento da influência dos efeitos gravitacionais no es-

coamento tende a melhorar a eficiência de recuperação quando o poço produtor está posicionado no topo e diminuir a eficiência quando o poço produtor está posicionado na base.

A influência das forças gravitacionais no deslocamento de uma gota por um outro fluido imiscível através de um canal estreito foi investigada por Kang *et al.* (2002) por meio de simulações numéricas. Os autores avaliaram como o formato das gotas é influenciado pelo número de Bond, Bo , e como a razão de viscosidades e razão de densidades afetam o número de Bond crítico. O número de Bond, que é definido como a razão entre as forças gravitacionais e as forças capilares, é representado pela Equação 1.22.

$$Bo = \frac{\Delta \rho g L^2}{\sigma_i} \quad (1.22)$$

A variável $\Delta \rho$ é a diferença de densidades, g é a aceleração da gravidade e L é um comprimento característico e σ_i é a tensão interfacial entre os dois fluidos.

Ainda, foi verificado que quanto maior a viscosidade da gota em relação à viscosidade do fluido deslocador ou quanto menor a densidade da gota em relação à densidade do outro fluido, o Bo crítico diminui. Neste trabalho, os autores concluíram que a deformação da gota aumenta quando o número de Bond aumenta.

Um estudo utilizando um fluido viscoelástico, representado por uma solução de goma xantana, para recuperar um fluido newtoniano imerso em um meio poroso foi investigado experimentalmente por Rangel *et al.* (2012). Os autores constataram que a partir de 500 ppm, ao aumentar a concentração do polímero, a quantidade de fluido recuperada é maior se comparada com a injeção de água pura. Além disso, foi realizada uma análise separada dos efeitos viscosos cisalhantes e extensionais. Os autores observaram que os efeitos viscosos cisalhantes provocam um aumento na quantidade de fluido deslocado recuperado devido ao aumento do número de poros que são varridos pelo fluido deslocador. Por sua vez, os efeitos viscosos extensionais provocam uma melhora no fluxo dentro do poro, como também provoca um aumento da eficiência de recuperação.

A utilização de esferas de vidro para constituir o meio poroso foi testada por Silva (2012). Neste estudo, o autor realizou ensaios experimentais para avaliar a eficiência de recuperação de líquidos newtonianos contidos em meios porosos utilizando ar para deslocar o líquido. A influência do número de capilaridade, Ca , do diâmetro médio dos grãos e dos efeitos de inércia na fração de massa perdida, m_e , foi analisada. Os resultados mostraram que quanto maior Ca , menos líquido é recuperado. A fração de massa perdida atinge um patamar constante próximo de 90% a partir de $Ca = 0,01$. Caso a vazão de ar seja alta o suficiente para que os efeitos inerciais tornem-se relevantes, m_e tende a diminuir com o aumento do número de Reynolds. Ainda, a massa de fluido recuperada diminui quando o diâmetro médio dos grãos diminui.

Por meio da implementação de um algoritmo numérico, o escoamento e deslocamento de um fluido de Bingham por um fluido newtoniano dentro de um meio poroso foi estudado por Chen *et al.* (2005). Os parâmetros adimensionais para realização de análise de sensibilidade foram Ca e a razão de viscosidades. Os autores observaram que o aumento da razão de viscosidades provoca um aumento na vazão e uma eficiência de varrido menor. Constatou-se também três diferentes padrões de fluxo, que ocorrem em diferentes faixas de valores de número de capilaridade e razão de viscosidades. Quando o valor de Ca é baixo, ou seja, as forças viscosas são irrelevantes comparadas às forças capilares, o escoamento é caracterizado por retorno de fluido para poros já varridos, fenômeno conhecido por *capillary fingering*. Em cenários de altos valores de Ca , para baixos valores de razão de viscosidades, o meio poroso é varrido de maneira mais uniforme, caracterizando o fluxo estável. Por outro lado, para altos valores de N_μ , há o aparecimento de *fingerings* viscosos caracterizados por caminhos preferenciais pelos quais o fluido injetado percorre.

Zhang *et al.* (2011) deram continuidade ao trabalho desenvolvido por Lenormand *et al.* (1988), que fez uso de técnicas de microscopia, iluminação fluorescente e filtros de comprimento de onda para visualização de um escoamento de um fluido newtoniano sendo deslocado por outro fluido newtoniano em um meio poroso. Com estas técnicas, os autores conseguiram imagens nítidas dos dois fluidos separadamente, possibilitando mapear três padrões de escoamento: *fingering* capilar, *fingering* viscoso e deslocamento estável. Quando o *fingering* viscoso ocorre, o fluido injetado desloca somente a parcela de fluido deslocado contido nos maiores poros, caracteri-

zando a formação dos caminhos preferenciais. Já na ocorrência do *fingering* capilar, caracterizado por baixos números de capilaridade, o fluido pode retornar para poros previamente varridos. Ainda, à medida que a viscosidade do fluido injetor fica mais próxima da viscosidade do fluido deslocado, o número de poros que são varridos pelo fluido deslocador aumenta, diminuindo a fração de massa perdida.

Uma solução analítica para o deslocamento no meio poroso de um fluido newtoniano por injeção de um fluido não-newtoniano de características afinantes, representado por um modelo *power-law*, foi proposta por Wu *et al.* (1991). Os resultados foram comparados com os resultados obtidos por meio de simulação numérica. A eficiência de recuperação do fluido newtoniano em função do índice de comportamento, n , e da vazão de fluido injetado foi analisada. Os autores concluíram que mantendo a viscosidade do fluido deslocado constante, a quantidade de fluido recuperado aumenta quanto menor for a vazão do fluido injetado e quanto menos afinante for o fluido deslocador (n mais próximo de 1).

No mesmo sentido, Wu *et al.* (1992) realizaram uma análise semelhante à do trabalho anterior. Porém, foi considerado o deslocamento de um fluido de Bingham por um fluido newtoniano em um meio poroso. Os autores observaram que a eficiência de varrido aumenta quanto menor for τ_0 e menor a viscosidade de Bingham. Ainda, a fração de fluido de Bingham recuperada diminui com a redução da vazão de fluido newtoniano injetado.

Uma análise teórica a respeito dos números adimensionais de fluidos viscoplásticos foi proposta por Thompson e Soares (2016). Os autores adimensionalizaram a equação de Cauchy utilizando o número de Bingham usual e o número de plasticidade, PI , que considera a tensão característica como a intensidade da extra-tensão avaliada em uma taxa de deformação característica máxima. Esta definição inclui a tensão limite de escoamento em todos os números adimensionais que tem relação com os efeitos viscosos, tais como o número de Reynolds e razão de viscosidades. O número de plasticidade é definido pela Equação 1.23.

$$PI = \frac{\tau_0}{\tau_0 + \mu_c (V_c/L)} \quad (1.23)$$

O parâmetro μ_c representa uma viscosidade característica, V_c/L a taxa de deformação característica máxima e τ_0 a tensão limite de escoamento do fluido. Neste trabalho, foi demonstrado que o número de plasticidade conseguiu representar melhor os efeitos plásticos se comparado com o número de Bingham.

Sousa *et al.* (2007) fizeram simulações numéricas para determinar o comportamento do escoamento e a espessura da película de líquido aderida à parede do tubo capilar ao deslocar um líquido utilizando gás. Neste trabalho, foram considerados dois tipos de fluidos newtonianos generalizados: um fluido com uma função de viscosidade *power-law* e um fluido viscoplástico. Os parâmetros utilizados para análise foram o número de capilaridade, o índice de comportamento, n , e o número de plasticidade, Pl . Para validar o modelo numérico, foi realizada uma simulação considerando o fluido deslocado newtoniano e o resultado foi comparado com os dados experimentais obtidos por Taylor (1961) e Cox (1962). Os resultados obtidos a partir desta simulação mostraram estar de acordo com os resultados destes autores. Para o cenário de fluido *power-law*, foi observado que o comportamento afinante resulta na diminuição da fração de massa depositada na parede do tubo e na diminuição do fluxo recirculante. Já no cenário de fluido viscoplástico, foi constatado que o aumento do valor de Pl provoca uma diminuição de m e a recirculação também diminui.

Na mesma linha de investigação, Freitas *et al.* (2011) estudaram, por meio de simulação numérica, como a fração geométrica de massa depositada na parede e os padrões de escoamento são afetados pela variação do número de plasticidade, do número de capilaridade e da razão de viscosidades. Os autores realizaram as simulações considerando $N_\mu = 8$ e 4 , enquanto que Pl variou de 0 (caso newtoniano) a $0,8$. Através dos resultados obtidos, os autores concluíram que m aumenta com o aumento de Ca e com a diminuição de N_μ . Também foi observado que a espessura do filme de líquido diminui com o aumento de Pl . Ainda, a influência do número de plasticidade em m diminui à medida que a razão de viscosidades aumenta e o número de capilaridade diminui. Com relação aos padrões de escoamento, foi constatado que, para um mesmo valor de Ca , com o aumento de Pl e o aumento de N_μ a ocorrência de recirculação do fluido deslocado diminui. Em contrapartida, diminuindo o número de capilaridade, mantendo a razão de viscosidades e número de plasticidade constantes,

umenta a tendência de ocorrer recirculação do fluido deslocado.

1.4 Caracterização do problema

O problema estudado neste trabalho consiste na recuperação de um líquido viscoso inicialmente contido em um meio poroso constituído de areia através da injeção de um outro líquido viscoso imiscível. As características mais relevantes do meio poroso são a massa específica real dos grãos, a distribuição do tamanho dos grãos, os índices de vazios máximo e mínimo do meio poroso e a permeabilidade. O fluido a ser recuperado é denominado de fluido deslocado (ou Fluido 2) e o fluido a ser injetado é o fluido deslocador (ou Fluido 1). Ao ser injetado por uma das extremidades, o Fluido 1 escoar no interior do meio poroso, empurrando e arrastando o Fluido 2, que transborda na extremidade oposta e ao final do processo de deslocamento uma parte do fluido deslocado é recuperada e a massa recuperada é medida para calcular a fração de massa perdida, m_e . O parâmetro m_e é o parâmetro de maior interesse para o estudo do problema. Portanto, é importante investigar os fatores que o influenciam. Neste trabalho, os parâmetros que merecem destaque são o número de capilaridade, que está diretamente relacionado com a vazão de injeção do fluido, razão de viscosidades, N_μ , número de plasticidade, Pl e a viscoelasticidade do fluido injetado.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivos Gerais

Estudar e compreender a fenomenologia do escoamento de fluidos em meios porosos e os parâmetros envolvidos, visando maximizar a recuperação destes fluidos.

1.5.2 Objetivos Específicos

Investigar a influência da razão de viscosidades na eficiência de recuperação de um fluido newtoniano contido em um meio poroso injetando um outro fluido newtoniano.

Analisar a eficiência de recuperação de fluido deslocado injetando um fluido viscoplástico, através da comparação da massa recuperada resultante da injeção do fluido viscoplástico com a massa recuperada ao injetar um fluido newtoniano, considerando a mesma razão de viscosidades.

Analisar a eficiência de recuperação de fluido deslocado injetando um fluido viscoelástico, através da comparação da massa recuperada resultante da injeção do fluido viscoelástico com a massa recuperada ao injetar um fluido newtoniano, considerando a mesma razão de viscosidades.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA

2.1 Caracterização da areia utilizada no meio poroso

O material utilizado para compor o meio poroso foi areia quartzosa não cimentada. Os ensaios de caracterização necessários para obter as características do meio poroso foram a densidade real dos grãos, análise granulométrica, curvas de compactação, os índices de vazios máximo e mínimo e a permeabilidade. Antes da execução dos ensaios, a areia ficou no mínimo 12 horas em uma estufa a 100°C para secagem.

O ensaio de obtenção da massa específica dos grãos foi realizado de acordo com a NBR 6508/84 - grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. A massa específica real dos grãos utilizados foi de 2,68 g/cm³.

O procedimento de execução da análise granulométrica da areia foi realizado de acordo com a norma NBR 7181/84 - Solo: Análise granulométrica. A execução envolveu as etapas de peneiramento fino e sedimentação. O peneiramento grosso não foi necessário pelo fato do diâmetro dos grãos se enquadrarem como grãos finos ou médios.

Baseado na granulometria, foi calculado o diâmetro médio dos grãos, parâmetro de suma importância para a determinação do número de Reynolds, do comprimento característico e da taxa de deformação característica. Para cada duas peneiras, o

diâmetro médio dos grãos que ficaram em uma dada peneira foi a média aritmética do diâmetro passante da peneira atual e da peneira anterior. Por exemplo, diâmetro médio das partículas retidas na peneira de 1 mm, dado que a peneira anterior utilizada foi de 2 mm, foi considerado de 1,5 mm. Este procedimento foi repetido para todas as peneiras utilizadas no ensaio. A Figura 2.1 apresenta o gráfico da distribuição do tamanho dos grãos, onde a abcissa é o diâmetro da peneira e a ordenada é a porcentagem de grãos que passam por uma peneira específica.

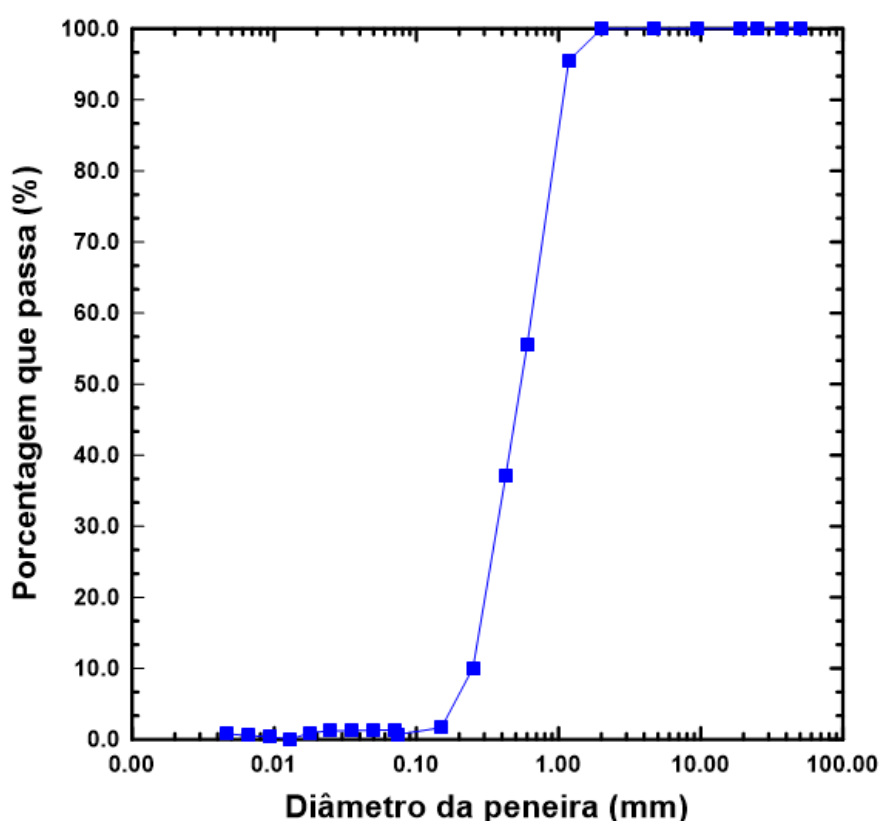


Figura 2.1: Distribuição do tamanho dos grãos.

Para obter o índice de vazios máximo, foi aplicada a norma NBR 12004/90 - Solo: Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. O procedimento consistiu em inserir cuidadosamente a areia em um molde utilizando um funil, buscando atingir a menor compactação possível do material. Foi medida a massa específica aparente do solo seco na condição de menor compactação, que apresentou um valor de $1,437 \text{ g/cm}^3$. A partir deste parâmetro e da massa específica dos grãos, o índice de vazios máximo foi calculado aplicando a Equação 1.9. O índice de vazios

máximo foi de 0,865.

O índice de vazios mínimo foi obtido por meio da aplicação da norma NBR 12051/91 - Solo: Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Foram realizados ensaios de compactação adicionando diferentes teores de água em diferentes amostras de solo, buscando obter uma curva de compactação. Para diferentes teores de umidade, foi obtida a massa específica aparente do solo seco. A partir destes pontos, a curva de compactação foi gerada e a umidade que corresponde à massa específica aparente do solo seco máxima foi obtida. A partir da massa específica aparente do solo seco máxima, que apresentou um valor de $1,683 \text{ g/cm}^3$ e da massa específica dos grãos, foi obtido o índice de vazios mínimo por meio da Equação 1.9. O índice de vazios mínimo foi de 0,592. A Figura 2.2 ilustra a curva de compactação do solo que compõe o meio poroso, onde a abcissa é a umidade da amostra do solo e a ordenada é a massa específica aparente do solo seco.

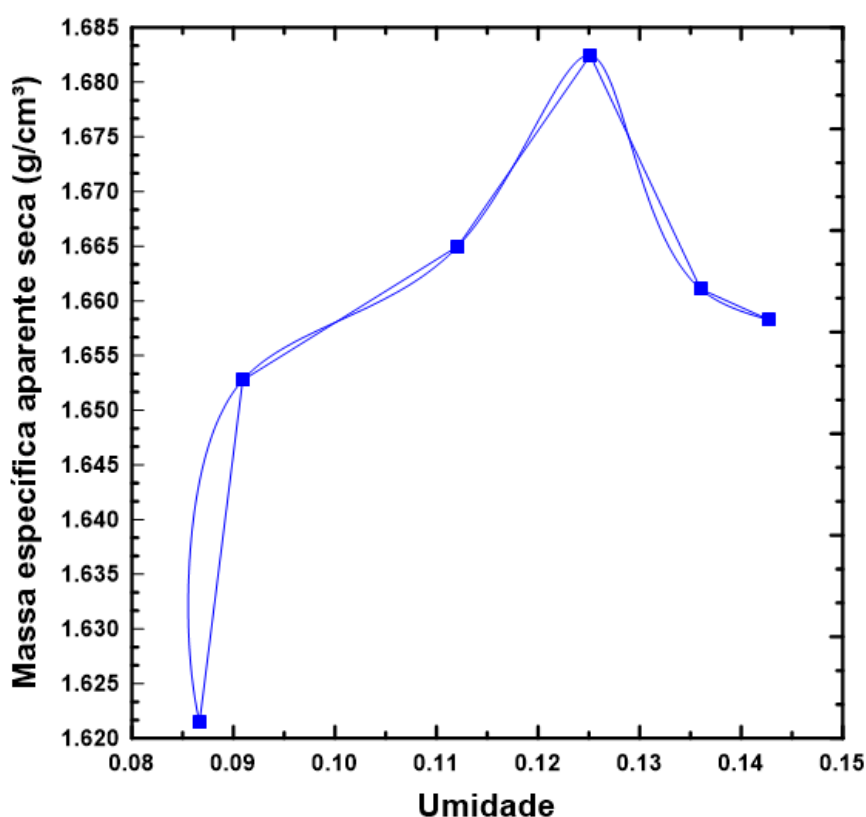


Figura 2.2: Curva de compactação do solo que compõe o meio poroso.

A partir do índice de vazios, a porosidade absoluta pôde ser obtida pela Equação

1.11. Ainda, como a areia é não cimentada, a porosidade absoluta é equivalente e porosidade efetiva são equivalentes, ou seja, todos os poros estão interconectados entre si. Para garantir que em cada ensaio as características do meio poroso sejam constantes, o mesmo foi preparado sempre na condição de máxima compactidade.

Para finalizar a caracterização do meio poroso, foi preparado um corpo de prova com a areia em questão para obter a permeabilidade do solo. Para a obtenção deste parâmetro, o ensaio de permeabilidade foi executado seguindo a norma NBR 13292/95 - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. O solo foi preparado e compactado de tal forma que o índice de vazios mínimo fosse obtido, ou seja, o solo em sua máxima compactidade. A carga foi ajustada e definida por meio da diferença do nível de água entre 2 tubos manométricos. Para cada carga, a velocidade de fluxo ajustada para 20°C foi calculada. A razão entre a velocidade de fluxo e a carga aplicada é a permeabilidade do solo em cm/s.

A Tabela 2.1 apresenta os resultados da caracterização do solo utilizado para os ensaios.

Tabela 2.1: Propriedades do meio poroso.

Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,68
Diâmetro médio dos grãos (mm)	0,65
Índice de vazios máximo	0,865
Índice de vazios mínimo	0,592
Porosidade na máxima compactidade	0,372
Permeabilidade do solo (cm/s)	0,028

2.2 Seleção de Fluidos

A avaliação da influência das propriedades não newtonianas na recuperação do fluido contido em um meio poroso foi realizada utilizando o cenário newtoniano como referência. Para construir o cenário newtoniano, primeiramente foi definida uma faixa de

razão de viscosidades compatíveis com as razões encontradas na literatura. Sendo assim, os valores 40; 21,8; 8; 4,2; 2,2; 1,1 e 0,5 foram as razões de viscosidades escolhidas para este estudo.

Para obter as razões de viscosidade desejadas, dois líquidos imiscíveis foram selecionados: uma solução de óleo de mamona e óleo de soja (base óleo) e uma solução de água, polietilenoglicol (PEG) e álcool etílico grau 92,8 (base água). O uso de soluções tem como vantagem ajustar as propriedades das mesmas de acordo com a quantidade colocada de cada substância. Desta forma, foi possível realizar o ajuste fino tanto da viscosidade quanto da massa específica dos fluidos. Para o caso viscoplástico, foi utilizado uma solução de água e gel fixador como fluido deslocador. Para o caso viscoelástico, o fluido deslocante escolhido foi uma solução de água, PEG e óxido de polietileno (PEO).

2.3 Preparo e Caracterização dos Fluidos

Os fluidos base óleo foram escolhidos para saturar o meio poroso por apresentarem viscosidades maiores, tornando possível obter altos valores de número de capilaridade mesmo com baixas velocidades do escoamento. A viscosidade, que é a propriedade mais importante dos fluidos utilizados, apresenta uma forte dependência da temperatura. Portanto, foi necessário definir previamente uma temperatura para a caracterização dos fluidos. A temperatura escolhida foi 23 °C. Durante os ensaios, com o auxílio de um termômetro de mercúrio e do controle da temperatura por meio do condicionador de ar, foi possível garantir que a temperatura do laboratório ficasse no valor estipulado.

2.3.1 Soluções Newtonianas

Os parâmetros dos fluidos newtonianos mais importantes para a realização deste trabalho foram a massa específica e a viscosidade dinâmica.

Para determinar a massa específica, foi utilizado um picnômetro calibrado de 10 ml. O picnômetro vazio e com tampa foi posicionado em uma balança de precisão que foi tarada em seguida. O picnômetro então foi limpo e seco exteriormente e pesado em seguida. O valor indicado na balança representou a massa de 10 ml do fluido avaliado. De posse desses dados a massa específica pôde ser determinada dividindo-a pelo volume.

A viscosidade das soluções foi medida utilizando um viscosímetro do tipo Cannon-Fenske, da marca *SCHOTT Instruments*. O procedimento de medição da viscosidade consistiu nos seguintes passos: inverter a posição do viscosímetro para que o tubo capilar fosse submerso no líquido, aplicar uma sucção no tubo de ventilação até que o nível de líquido atingisse a marcação de tempo inferior (T2), posicionar o viscosímetro na sua posição padrão imerso em um banho térmico com temperatura controlada em 23°C, temperatura de interesse. O equipamento utilizado para o banho foi o CT 52 da *SCHOTT Instruments*. Cada viscosímetro possui um fator k associado. O produto entre este fator e o tempo que o fluido leva para percorrer o trecho entre a marca T1 e a marca T2 é a viscosidade cinemática, dada em mm^2/s . Para cada fluido, um viscosímetro foi selecionado, de tal forma que a viscosidade do fluido estivesse dentro da faixa de medição do viscosímetro. A Figura 2.3 ilustra um esquemático de um viscosímetro tipo Cannon-Fenske. A viscosidade utilizada na análise experimental, no entanto, foi a viscosidade dinâmica. Para obtê-la, bastou multiplicar a viscosidade cinemática, convertida para m^2/s , pela massa específica.

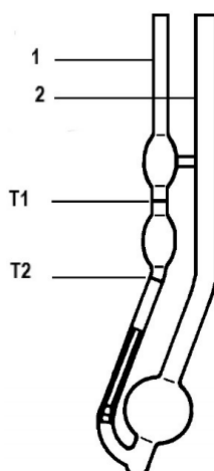


Figura 2.3: Esquemático de um viscosímetro tipo Cannon-Fenske - Fonte: Caliman (2016).

Uma vez que uma dada combinação de fluidos reproduza a razão de viscosidades, é necessário avaliar a tensão interfacial entre os dois fluidos. Para tal, primeiramente foi despejado o fluido de maior massa específica em um recipiente onde o teste foi conduzido e em seguida, com o auxílio de um tensiômetro Radian Series 300 da Thermo Scientific, um anel Du Nouy foi lentamente inserido no fluido até ficar completamente submerso no mesmo. Posteriormente, foi despejado com cuidado o outro fluido no mesmo recipiente. Finalmente, um comando foi dado ao equipamento para que o anel começasse a subir até romper a interface. Após o teste ter sido finalizado, a tensão interfacial foi calculada a partir da maior força, F_{max} obtida durante o rompimento da interface com base na Equação 2.1.

$$\sigma_i = \frac{F_{max}}{2C} \quad (2.1)$$

sendo C a circunferência do anel.

Dependendo dos valores da massa específica dos fluidos envolvidos, pode haver migração do fluido menos denso para cima e do fluido mais denso para baixo, pois o escoamento ocorre na direção vertical. Por isso, além da razão de viscosidades e

tensão interfacial, buscando verificar a influência dos efeitos gravitacionais nos experimentos, para cada par de fluidos, o número de Bond, Bo , foi avaliado. Para garantir que a diferença de massa específica não influencie no resultado dos experimentos, Bo deve apresentar valores muito menores que 1, ou seja, as forças gravitacionais devem ser desprezíveis se comparadas com as forças capilares. ($Bo \ll 1$).

2.3.2 Solução Viscoplástica

As soluções viscoplásticas utilizadas nos experimentos foram preparadas por meio da mistura de gel fixador da marca BOZZANO sem álcool. Foi utilizada uma solução de 7,7%, em massa de gel. O procedimento para obter a massa específica da solução foi o mesmo para os fluidos newtonianos, ou seja, utilizando um picnômetro.

Já o procedimento para calcular a tensão interfacial foi diferente para os fluidos newtonianos. Pelo fato do material viscoplástico apresentar uma tensão limite de escoamento, o mesmo impõe uma resistência ao movimento do anel que não está relacionada às forças interfaciais. Desta forma, a parcela da força registrada pelo tensiômetro que está relacionada somente com a tensão limite de escoamento deve ser desprezada. Para tal, foi subtraído, da força máxima obtida, o valor referente à força registrada enquanto o anel estava imerso no fluido viscoplástico (abaixo do outro fluido). O resultado desta subtração foi utilizado para calcular a tensão interfacial conforme a Equação 2.1. A Figura 2.4 mostra o comparativo do comportamento da força para o deslocamento do anel durante a medição da tensão interfacial no caso newtoniano e caso viscoplástico.

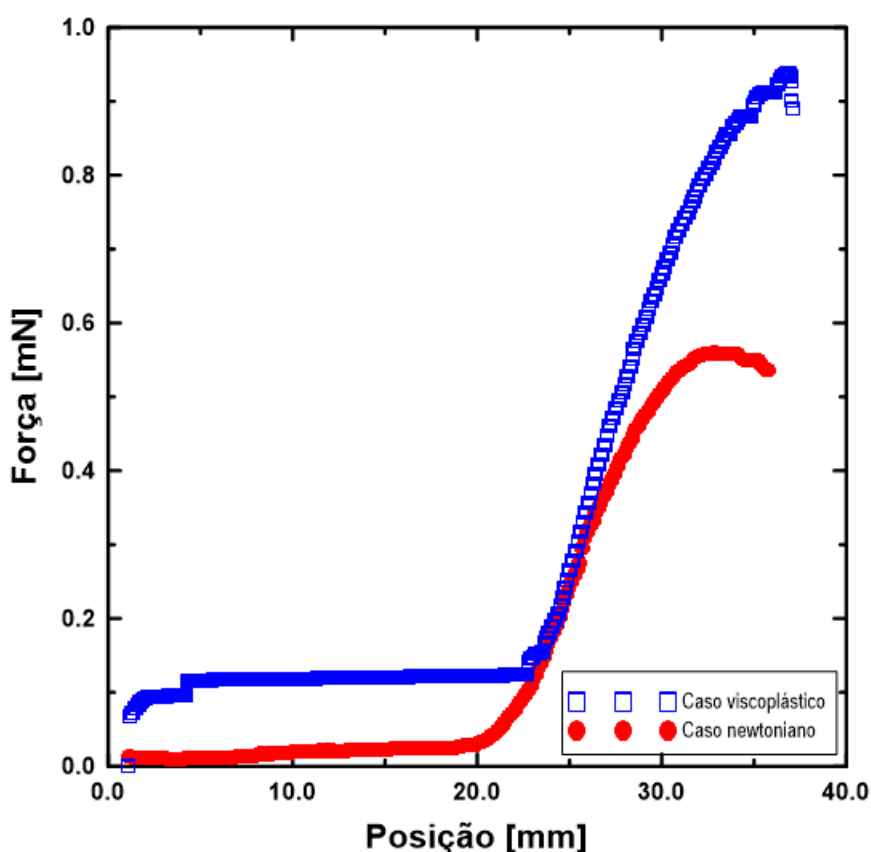


Figura 2.4: Acompanhamento da força imposta ao anel durante a medição da tensão interfacial. Comparação do caso newtoniano e viscoplástico.

De acordo com os gráficos, é possível perceber que a força referente ao atrito do anel com o fluido, durante seu deslocamento, medida antes deste atingir a interface, é desprezível para o caso newtoniano. Contudo, para o caso viscoplástico, foi registrado uma força que está relacionada à presença de uma tensão limite de escoamento, propriedade inerente aos fluidos viscoplásticos. Em ambos os casos, quando o anel atingiu a interface, a força medida aumentou até atingir um valor máximo.

Para determinar as propriedades reológicas dos fluidos viscoplásticos, foi utilizado o reômetro *Haake Mars III* da *Thermo Scientific*, fazendo uso da configuração de placas paralelas com uma geometria ranhurada *P35 Ti L* com folga de 0,5 mm. O uso da geometria ranhurada contribui para minimizar os efeitos do deslizamento do fluido na geometria, que provocam alterações nas medições dos parâmetros reológicos. Um volume de 0,5 ml de solução foi adicionado ao equipamento e a obtenção da curva de

viscosidades foi obtida através da variação da tensão de cisalhamento, mantendo a mesma constante por 20 segundos. Para cada tensão, uma taxa de deformação era obtida para compor a curva de viscosidade.

2.3.3 Solução Viscoelástica

As soluções viscoelásticas utilizadas nos ensaios experimentais como fluido injetado apresentaram 20% em massa de PEG e três diferentes concentrações de PEO: 0,1%, 0,25% e 0,3% em massa. A determinação da massa específica e da tensão interfacial com o fluido deslocado foi realizada da mesma forma que nos fluidos newtonianos.

A preparação destas soluções consistiram em duas etapas. Primeiro, foi realizada a mistura do PEG com água deionizada utilizando o misturador até garantir uma solução homogênea. Em seguida, a quantidade necessária de PEO foi cuidadosamente incorporada à solução. Esta solução permaneceu em repouso por pelo menos 20 dias, podendo este tempo ser ultrapassado dependendo da concentração de PEO resultante, até a dissolução completa desta substância pela ação do tempo. O uso do misturador para dissolver o PEO não é recomendado, pois a formação de vórtices causado pela ação do magneto imerso na solução pode levar à degradação do PEO por arrasto.

Para determinar as propriedades reológicas do fluido viscoelástico, especificamente a curva de viscosidade dinâmica e o coeficiente da primeira diferença de tensão normal, foi utilizado o reômetro *Haake Mars III* da *Thermo Scientific*, fazendo uso da configuração cone placa com uma geometria lisa *C60\1 Ti* com folga de 0,52 mm. Um volume de 1 ml de solução foi adicionado ao equipamento e a obtenção da *flowcurve* foi obtida através da variação da taxa de deformação, mantendo a mesma constante por 15 segundos. Para cada taxa, uma tensão de cisalhamento era obtida para compor a curva de viscosidade e a curva do coeficiente da primeira diferença de tensão normal.

2.4 Aparato Experimental

A bancada experimental é constituída por uma prensa de velocidade variável, por um atuador hidráulico, que possui um pistão de 4 cm de diâmetro apenas no topo da prensa e uma base que fica apoiada na parte inferior. Anexo ao topo da prensa, foi colocado um tanque armazenador de fluido deslocador, tornando possível a saturação do atuador hidráulico por gravidade. O curso máximo da prensa é 10 cm e o volume de fluido deslocador máximo que pode ser injetado no meio poroso, considerando o diâmetro do pistão, é de 125,7 cm³. Uma mangueira de baixa pressão interligava o tanque ao atuador. A conexão entre o atuador hidráulico e o meio poroso era feita por uma mangueira de alta pressão. O meio poroso era inserido e compactado em um redutor de diâmetro previamente inserido no tubo metálico. O comprimento do meio poroso dos experimentos foi estipulado em 70 mm e o tubo metálico sem o redutor de diâmetro apresenta 80 mm de diâmetro. Com isso, baseado na caracterização do meio poroso, o volume de vazios ficaria em torno de 325 cm³. Desta forma, a redução do diâmetro da seção frontal do escoamento foi reduzida para 35 mm a fim de garantir que o volume de vazios do meio poroso fosse inferior ao volume máximo permitido de fluido injetado. Na saída do tubo metálico, uma mangueira de baixa pressão permitia que o fluido recuperado fosse coletado em um béquer. Ainda no tubo metálico, foi instalada uma válvula de alívio para permitir a substituição do ar presente dentro deste tubo pelo fluido deslocador. A Figura 2.5 apresenta o esquemático da bancada.

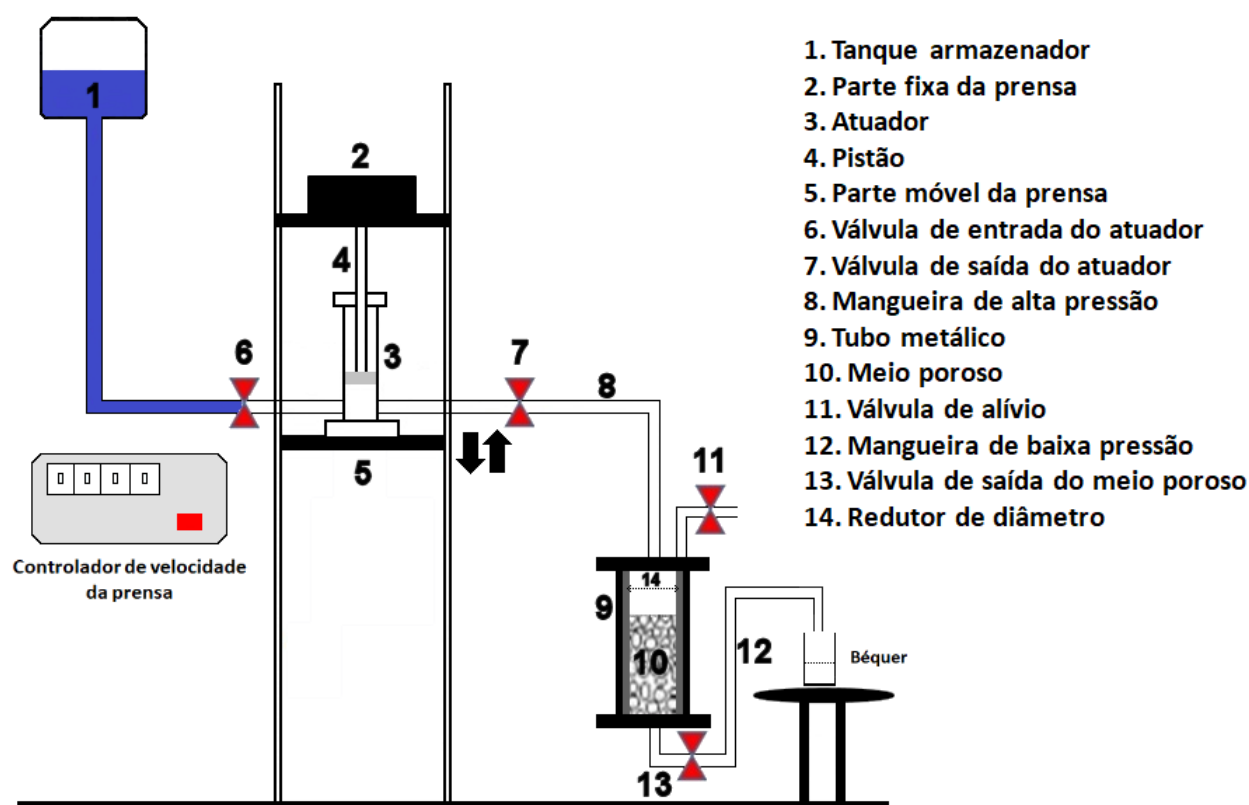


Figura 2.5: Esquemático da bancada experimental.

Antes de iniciar os experimentos, a areia utilizada para compor o meio poroso foi previamente colocada em uma estufa a 100°C , a fim de remover toda a umidade do solo, já que este foi caracterizado sem umidade externa. Além disso, a prensa foi devidamente nivelada.

Para obter a fração de massa perdida, que é o objetivo final de cada ensaio executado, primeiramente, o meio poroso foi preparado e caracterizado. Baseada na curva de compactação do solo, uma massa de solo seco e uma massa de fluido deslocado foram colocados em dois béqueres separados (com massas conhecidas) e medidas em uma balança com precisão de duas casas decimais. A razão entre a massa de fluido deslocado e a massa de solo seco deve ser a que promove a maior compactação possível do solo. Posteriormente, foi adicionado ao solo seco o fluido deslocado e a massa do solo úmido foi medida na balança.

Após a obtenção do solo úmido, a próxima etapa foi a preparação do meio poroso, que consistiu primeiramente em molhar com vaselina o redutor de diâmetro onde seria colocada a areia umedecida, a fim de evitar vazamentos de fluidos durante o experimento. Posteriormente, este redutor foi inserido dentro do tubo metálico e um filtro circular foi colocado no fundo para garantir a contenção da areia. Após este passo, parte da areia umedecida foi inserida dentro do redutor e, utilizando um compactador, foi comprimida com quinze golpes cuja energia foi resultado da queda livre do compactador. Este procedimento de compactação foi repetido por mais 2 vezes, visando garantir que o meio poroso estivesse na máxima compacidade. Por fim, a massa de solo umedecido remanescente no béquer foi pesada e, pela diferença entre a massa total de solo úmido e a massa remanescente no béquer, foi calculada a massa que compõe o meio poroso. O comprimento do meio poroso foi então medido utilizando um paquímetro e, a partir deste comprimento, o volume do meio poroso foi calculado. Com a massa e o volume obtidos, foi possível calcular a massa específica do meio poroso. A partir da massa específica, o índice de vazios foi calculado e, consequentemente, a porosidade, pelas Equações 1.8 e 1.11, respectivamente. Concluída a caracterização do meio poroso, um segundo filtro circular foi colocado sobre o leito, a fim de separar o fluido deslocador do meio poroso.

A próxima etapa consistiu em saturar o meio poroso com o fluido deslocado. Para realizar este procedimento, a válvula presente na mangueira de baixa pressão que liga o tubo metálico ao béquer foi aberta. Em seguida, a mangueira foi preenchida com fluido deslocado, possibilitando a saturação do meio poroso por gravidade. Desta forma, o fluido irá percorrer o meio poroso. Para garantir que o meio poroso estivesse totalmente preenchido com o fluido deslocado, foi necessário aguardar o aparecimento de fluido na parte superior do meio poroso. Concluída esta etapa, a válvula descrita acima foi fechada. Após o fechamento da válvula, a mangueira de saída do meio poroso foi totalmente preenchida com o fluido deslocado, a fim de garantir que, ao iniciar o experimento o fluido produzido caísse no béquer coletor. A massa de fluido deslocado necessária para saturar o meio poroso foi calculada pela Equação 2.2.

$$m_i = \frac{\pi d^2 \rho \phi L_{meio}}{4} \quad (2.2)$$

onde ρ é a massa específica do fluido contido no meio poroso, L_{meio} é o comprimento do meio poroso e d é o diâmetro da seção transversal e ϕ é a porosidade.

Finalmente, o atuador hidráulico foi completamente saturado com o fluido deslocador. Para tal, a válvula presente na mangueira de alta pressão foi fechada e a válvula instalada na mangueira de baixa pressão que conecta o tanque armazenador ao atuador hidráulico foi aberta. É importante ressaltar que a câmara interna do atuador, onde o fluido deslocador foi armazenado, esteja isenta de ar. Após preencher totalmente o atuador hidráulico com o líquido a ser injetado no meio poroso, a mangueira de alta pressão foi totalmente preenchida com o fluido injetado. Para realizar esta etapa, a válvula presente na mangueira de alta pressão, que sai do atuador hidráulico, foi aberta. O fluido presente no tanque de armazenamento escoou por gravidade e, quando apareceu fluido deslocador na outra extremidade da mangueira, a válvula da mangueira de alta pressão foi fechada. Em seguida, foi colocado o *o-ring* na parte superior do tubo metálico e molhado com vaselina, para evitar vazamentos nesta parte da bancada. A fim de isolar o meio poroso do ambiente externo, o tubo metálico foi fechado e parafusado. Para substituir o ar remanescente no tubo metálico por fluido injetado, a válvula da mangueira de alta pressão e a válvula de alívio foram abertas e, ao ser constatada a saída de fluido deslocador pela válvula de alívio, esta foi fechada, encerrando esta etapa. Por fim, a válvula da mangueira de baixa pressão presente na entrada do atuador hidráulico também foi fechada.

Depois de concluída toda a montagem da bancada experimental, a velocidade de subida da parte inferior da prensa, que promove a descida do pistão, foi ajustada e o cronômetro preparado para iniciar o tempo do experimento. A prensa foi ligada, a válvula de saída do meio poroso foi aberta para iniciar a recuperação do fluido deslocado e o cronômetro iniciado para medir o tempo do experimento. O experimento foi concluído quando traços de fluido deslocador apareceram na saída do meio poroso.

Ao final do ensaio, o óleo contido no béquer foi pesado para que fosse obtida a massa de óleo recuperada, m_r . Para tal, a massa total medida na balança foi subtraída da massa do béquer anotada previamente. A partir da massa de óleo recuperada e da massa de óleo inicialmente contida no meio poroso, m_i , calculada pela Equação 2.2,

foi possível obter a fração de massa perdida, m_e , dada pela Equação 2.3.

$$m_e = \frac{m_i - m_r}{m_i} \quad (2.3)$$

O comprimento característico foi calculado previamente por meio da equação 1.14. Com o valor da massa recuperada e do tempo do experimento devidamente anotados, foi possível calcular a velocidade característica do escoamento pela Equação 1.17 e a taxa de deformação característica pela Equação 1.18. A partir da velocidade característica, do comprimento característico e das propriedades do fluido deslocado, foi possível calcular o número de Reynolds, Re , dada pela Equação 2.4 e o número de capilaridade, Ca , dada pela Equação 2.5.

$$Re = \frac{\rho_2 U_c D_h}{\mu_2} \quad (2.4)$$

$$Re = \frac{\mu_2 U_c}{\sigma_i} \quad (2.5)$$

O parâmetro ρ_2 é a massa específica do fluido deslocado, U_c é a velocidade característica, D_h é o comprimento característico do ensaio e μ_2 é a viscosidade do fluido deslocado e σ_i é a tensão interfacial entre o fluido deslocado e o fluido deslocador.

A obtenção da taxa de deformação característica de cada ensaio possibilita calcular a viscosidade dinâmica do fluido viscoplástico e do fluido viscoelástico, permitindo, para cada taxa, obter a razão de viscosidades. Assim, a fração de massa perdida obtida em cada experimento do caso não-newtoniano é comparada com a fração de massa perdida que se obteria com a mesma razão de viscosidade injetando fluidos newtonianos.

Finalizado o ensaio experimental, toda a bancada foi submetida a um rigoroso pro-

cesso de limpeza para viabilizar o uso da mesma para os experimentos subsequentes. Os componentes que continham o meio poroso foram lavados com detergente neutro. A mangueira de baixa pressão com o fluido base óleo foi lavada com querosene, em seguida, com detergente e água. Por último, foi circulado álcool isopropílico para acelerar o processo de secagem da mangueira. A mangueira de alta pressão continuou saturada com fluido deslocador, sendo este removido após encerrar todos os experimentos do dia. A limpeza da bancada foi finalizada com a circulação de água e álcool isopropílico pela mangueira de alta pressão.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Caso Newtoniano

Para construir o cenário newtoniano, foi necessário obter as propriedades dos fluidos e o resultado da combinação resultante de cada par de fluidos. As propriedades das soluções newtonianas elaboradas e utilizadas neste trabalho estão apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2 e os parâmetros obtidos a partir da combinação de uma solução base óleo com uma solução base água estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.1: Propriedades das soluções base água.

Solução	% Água	% Etanol	%PEG	ρ (kg/m ³)	μ (mPas)
Solução A	35	65	0	907,1	2,53
Solução B	13	61,5	25,5	939,0	24,9
Solução C	25	60	15	931,2	12,5
Solução D	16	43	41	990,6	81,3
Solução E	35	22,7	42,3	1036,6	111
Solução F	30	58	12	933,1	9,8

Tabela 3.2: Propriedades das soluções base óleo.

Solução	% Óleo de Mamona	% Óleo de Soja	ρ (kg/m ³)	μ (mPas)
Solução G	0	100	916,8	55
Solução H	20	80	922,9	81
Solução I	30	70	929,2	103,1
Solução J	100	0	959,7	791,3

Tabela 3.3: Resultado da combinação das soluções do caso newtoniano.

Fluido deslocador	Fluido deslocado	N_μ	N_ρ	σ_i (mN/m)	Bo
Solução A	Solução I	40,1	1,02	3,89	0,0156
Solução A	Solução G	21,82	1,01	5,5	0,0007
Solução F	Solução H	8,2	0,992	3,86	-0,0082
Solução C	Solução G	4,4	0,976	6,43	-0,0147
Solução B	Solução G	2,2	0,972	5,6	-0,0185
Solução D	Solução H	0,93	0,93	4,6	-0,0610
Solução E	Solução G	0,5	0,88	4,72	-0,105

A partir das razões de viscosidades obtidas, cada par de fluidos foi levado para a bancada experimental a fim de obter a fração de massa perdida. Os experimentos foram realizados de tal forma que o número de Reynolds, Re , fosse muito menor do que um e o número de capilaridade, Ca , não exercesse influência na eficiência de recuperação, possibilitando isolar o efeito da variação da razão de viscosidades, N_μ , na fração de massa perdida, m_e . Os valores de N_μ foram fixados em: 40; 21,8; 8; 4,4; 2,2; 1 e 0,5. A Figura 3.1 mostra o comportamento da fração de massa perdida em função do número de capilaridade, para diferentes valores de razão de viscosidade.

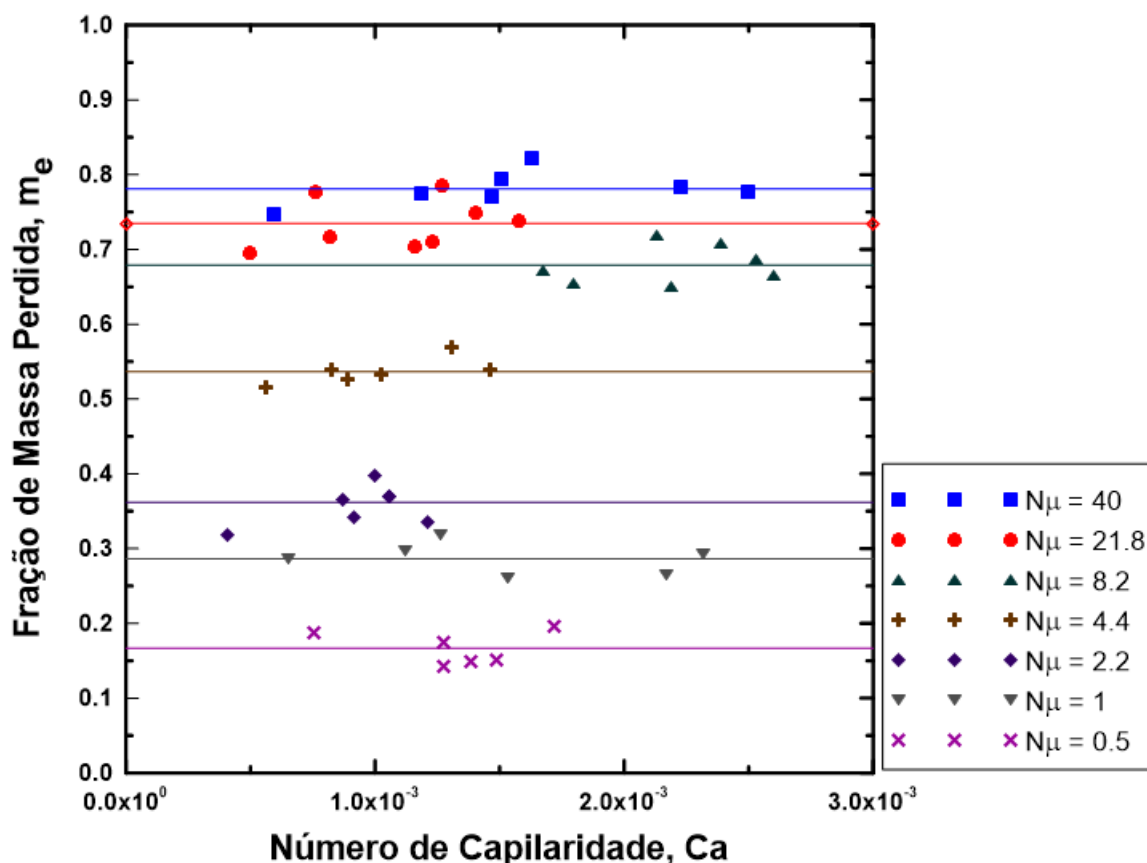


Figura 3.1: Fração de massa perdida em função do número de capilaridade e razão de viscosidades.

Baseado nos resultados apresentados na Figura 3.1, para toda faixa de razão de viscosidade estudada, foi observado que Ca em todos os experimentos foi suficientemente alto para que a fração de massa perdida independesse deste parâmetro. Este fenômeno está de acordo com o esperado por Taylor (1961), Cox (1962) e Silva (2012). Ainda, os valores obtidos para o número de capilaridade foram muito menores se comparado com cenários em que este mesmo fenômeno foi observado nos tubos capilares. Nos trabalhos realizados por Soares *et al.* (2005), Soares *et al.* (2015) e Sousa *et al.* (2007), a ordem de grandeza do número de capilaridade que leva a uma eficiência de recuperação constante com relação a este número é entre 1 e 10. Contudo, neste trabalho, o número de capilaridade variou entre 10^{-4} e 10^{-2} , indo ao encontro dos trabalhos de Silva (2012) e Lenormand *et al.* (1988).

Ainda na Figura 3.1, foi observado que a fração de massa perdida aumenta à me-

didada que a razão de viscosidades aumenta. Ao reduzir a razão de viscosidades, ou seja, quando a viscosidade dinâmica do fluido deslocador aproxima-se da viscosidade dinâmica do fluido deslocado, a força de cisalhamento sofrida pelo fluido deslocado é maior, contribuindo para o aumento da quantidade de líquido arrastado para fora do meio poroso, levando a uma diminuição de m_e . Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Caliman (2016) e Soares *et al.* (2015). Além disso, a redução da razão de viscosidades contribui para que o número de poros que são varridos pelo fluido injetado seja maior, aumentando o fator de recuperação. Isto é consequência do aumento da força de cisalhamento que supera a força capilar presente nos poros menores, permitindo o escoamento de fluido deslocado contido em poros menores que antes não era possível serem varridos.

Adicionalmente, foi possível relacionar os padrões de escoamento obtidos por Lenormand *et al.* (1988) e Zhang *et al.* (2011) durante a ocorrência do deslocamento de um líquido newtoniano em um meio poroso através da injeção de um outro fluido newtoniano imiscível com a fração de massa perdida obtida nos experimentos. Nos cenários de alta razão de viscosidades, que apresentaram baixa eficiência de recuperação (altos valores para m_e), o padrão de escoamento que ocorreu foi o *fingerling* viscoso, caracterizado pelo aparecimento de caminhos preferenciais. Este padrão de escoamento ocorre devido à baixa quantidade de poros varridos pelo fluido deslocador, cuja força de cisalhamento imposta no fluido deslocado não supera a força capilar em grande parte dos poros. Por outro lado, nos cenários de baixa razão de viscosidades o meio poroso é varrido de maneira mais uniforme, amplificando a quantidade de fluido deslocado recuperado. O padrão de escoamento *fingerling* capilar não foi observado nos experimentos, pois este ocorre em cenários onde o número de capilaridade exerce influência na fração de massa perdida.

3.2 Caso Viscoplastico

Para obter os resultados viscoplasticos, o primeiro passo foi determinar a reologia do fluido utilizado na análise experimental, que foi a solução de gel de 7,7% em massa. A *flowcurve* está apresentada na Figura 3.2.

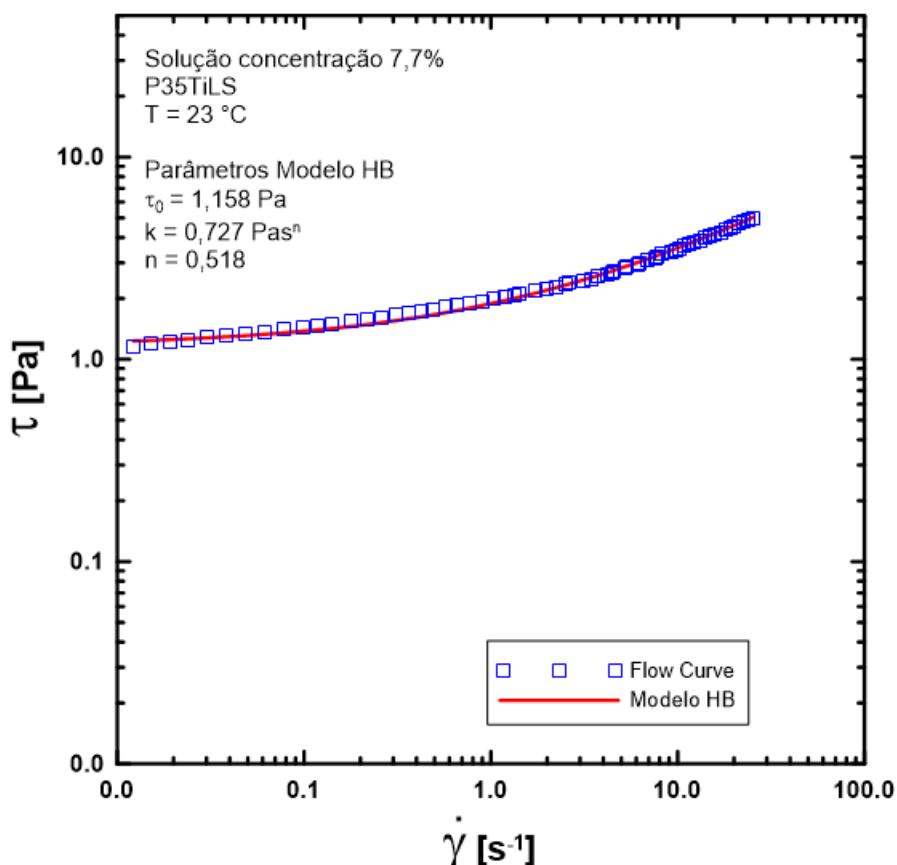


Figura 3.2: Flowcurve da solução viscoplástica com concentração de gel de 7,7%.

De acordo com o gráfico da Figura 3.2, a solução viscoplástica em questão apresentou um τ_0 próximo de 1,16 Pa, um índice de consistência, K , de 0,727 Pa s ^{n} e um índice de comportamento, n , de 0,518.

Assim como no caso newtoniano, foi necessário obter os parâmetros de interesse resultantes da combinação dos dois fluidos. A Tabela 3.4 apresenta o resultado da combinação do fluido viscoplástico com o fluido base óleo utilizado, no caso o óleo de mamona.

Tabela 3.4: Resultado da combinação da solução viscoplástica, com concentração de gel de 7,7%, com o óleo de mamona.

Fluido deslocador	Fluido deslocado	N_ρ	σ_i (mN/m)	Bo
Gel a 7,7 %	Óleo de Mamona	0,962	6,64	-0,0239

Como mostra a Tabela 3.4, foi possível a priori definir a razão de densidades, a tensão interfacial e o número de Bond. Contudo, pelo fato da solução viscoplástica apresentar uma viscosidade dinâmica variável com a taxa de deformação, só foi possível obter a razão de viscosidades após calcular a taxa de deformação característica do ensaio.

Com os fluidos devidamente caracterizados, estes foram levados para a bancada experimental. A Figura 3.3 ilustra os resultados obtidos da massa perdida em função do número de plasticidade, através da injeção da solução viscoplástica com concentração de gel de 7,7 % para deslocar o óleo de mamona. Contudo, pode ser observado que a fração de massa perdida foi maior que a fração de massa perdida obtida no cenário newtoniano com razão de viscosidade 40. Durante os experimentos, foi constatado que à medida que o fluido deslocador era produzido, uma grande quantidade de espuma foi observada, indicando que o fluido viscoplástico alterou suas propriedades reológicas ao percorrer o meio poroso, transformando-se em um fluido newtoniano de baixa viscosidade. A formação de espuma pode ser explicada pela ocorrência de uma reação química entre o gel e o óleo de mamona.

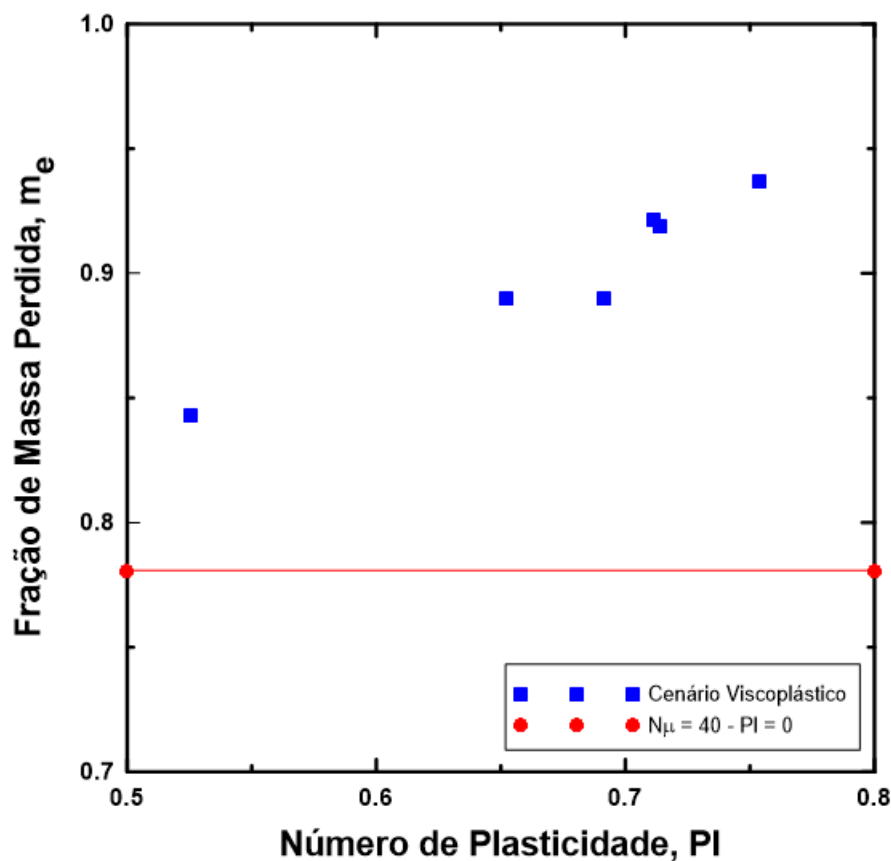


Figura 3.3: Fração de massa perdida em função do número de plasticidade.

Como os resultados obtidos divergiram da literatura, foi necessário verificar a metodologia de preparação do ensaio. Para isso, ensaios com fluidos newtonianos foram novamente realizados. A razão de viscosidade escolhida foi 4,4. Os fluidos utilizados para representar este caso newtoniano foram preparados e caracterizados novamente para confirmar suas propriedades. Posteriormente, estes fluidos foram aplicados nos ensaios para verificar a reprodução dos resultados anteriores. Assim, foi confirmada a repetição dos pontos experimentais. A Figura 3.4 mostra a comparação dos resultados obtidos dos dois testes com razão de viscosidade 4,4.

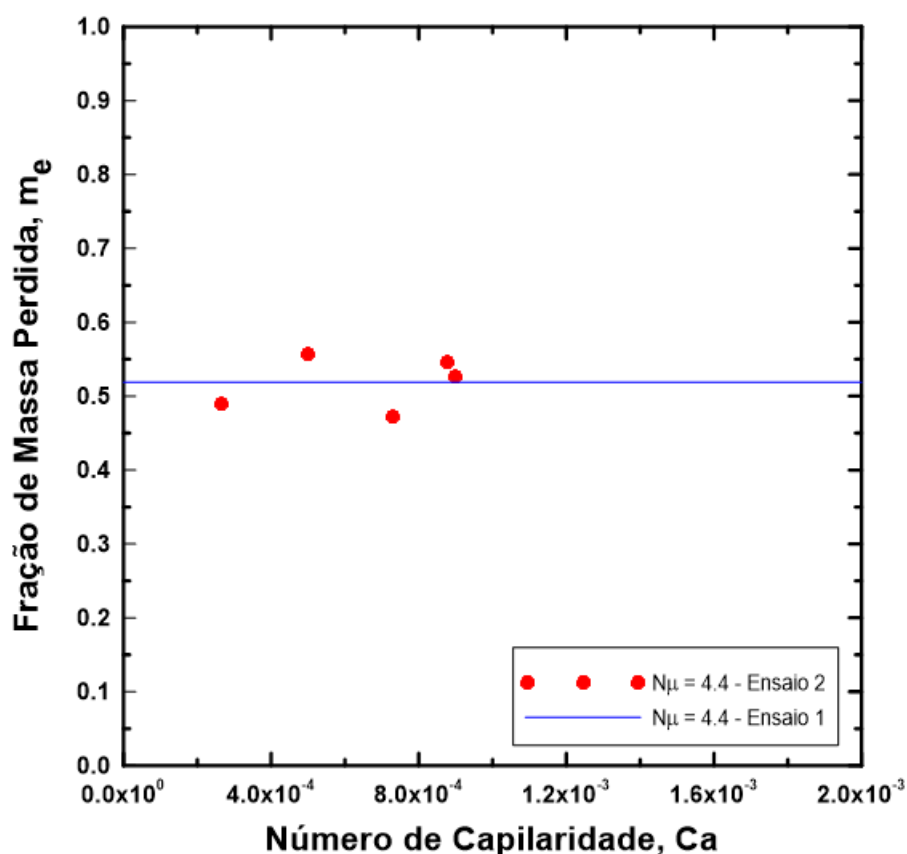


Figura 3.4: Comparação dos testes com razão de viscosidade 4,4.

Confirmada a reprodução dos ensaios newtonianos, foi excluída a possibilidade de erro durante a execução do procedimento de preparação dos experimentos, reforçando a hipótese da alteração das propriedades reológicas da solução viscoplástica. Para verificar esta hipótese, foi preparada uma solução viscoplástica com concentração de gel de 14% em massa, com o objetivo de aumentar a tensão limite de escoamento. A reologia da solução foi obtida através do uso do reômetro *Haake Mars III* com a geometria ranhurada *P35 Ti L*. A Figura 3.5 mostra a *flowcurve* da solução em questão.

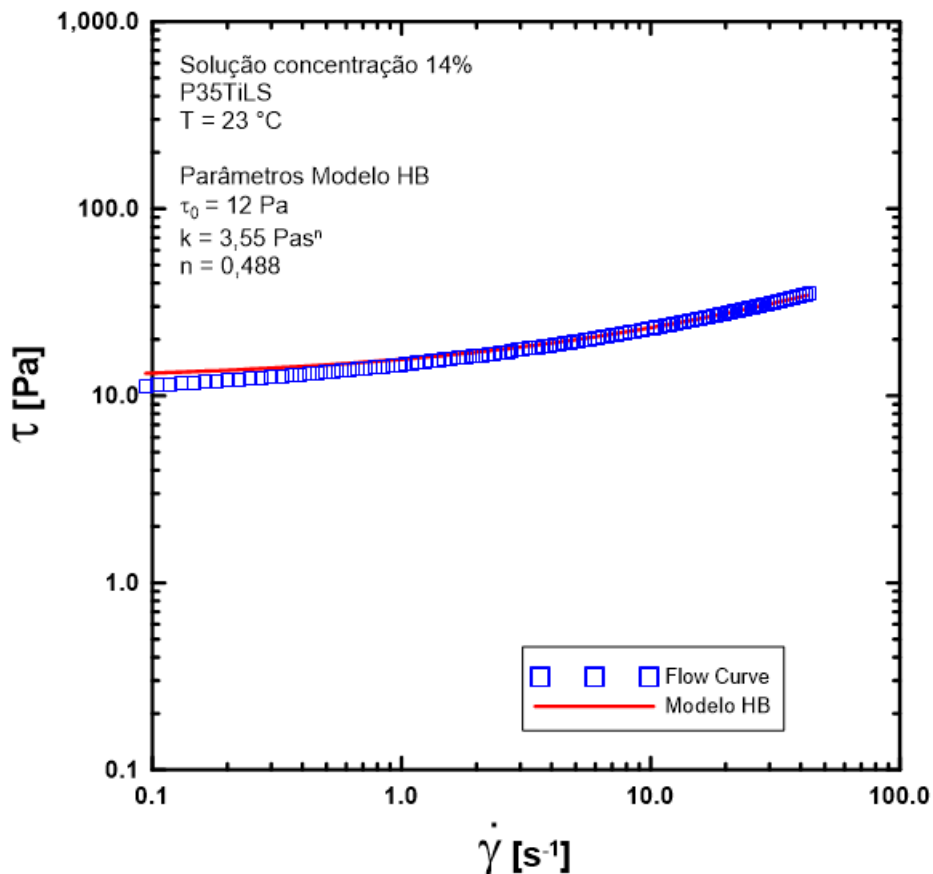


Figura 3.5: *Flowcurve* da solução viscoplástica com concentração de gel de 14 %.

A solução viscoplástica de 14 % em massa de gel foi testada na bancada experimental permitindo seu escoamento através do meio poroso, tornando possível a comparação da reologia da solução original com a reologia dos líquidos obtidos (Resíduo 1 e Resíduo 2). A Figura 3.6 ilustra os resultados obtidos desta análise.

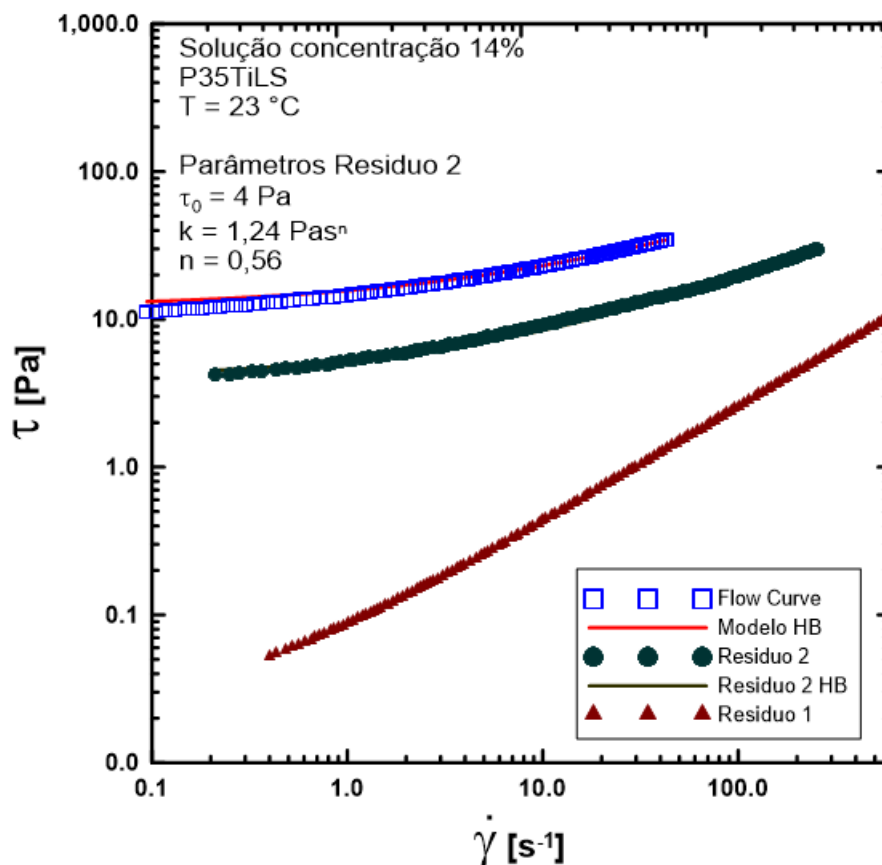


Figura 3.6: Comparativo entre a *flowcurve* da solução original e da solução resultante após passar pelo meio poroso.

Os gráficos apresentados na Figura 3.6 mostram que a solução viscoplástica com concentração de gel de 14 % em massa pode apresentar alteração das propriedades reológicas ao entrar no meio poroso. Esta mudança das propriedades ajuda a explicar a razão pela qual ao injetar a solução viscoplástica com concentração de 7,7% no meio poroso, a fração de massa perdida, m_e , foi elevada.

3.3 Caso Viscoelástico

Assim como no cenário newtoniano e viscoplástico, o primeiro passo foi caracterizar a massa específica e a reologia dos fluidos envolvidos. A *flowcurve* da solução com 20% em massa de PEG e 0,1% em massa de PEO está apresentada na Figura 3.7. O coeficiente da primeira diferença de tensão normal foi próximo de zero, portanto, não

representado graficamente.

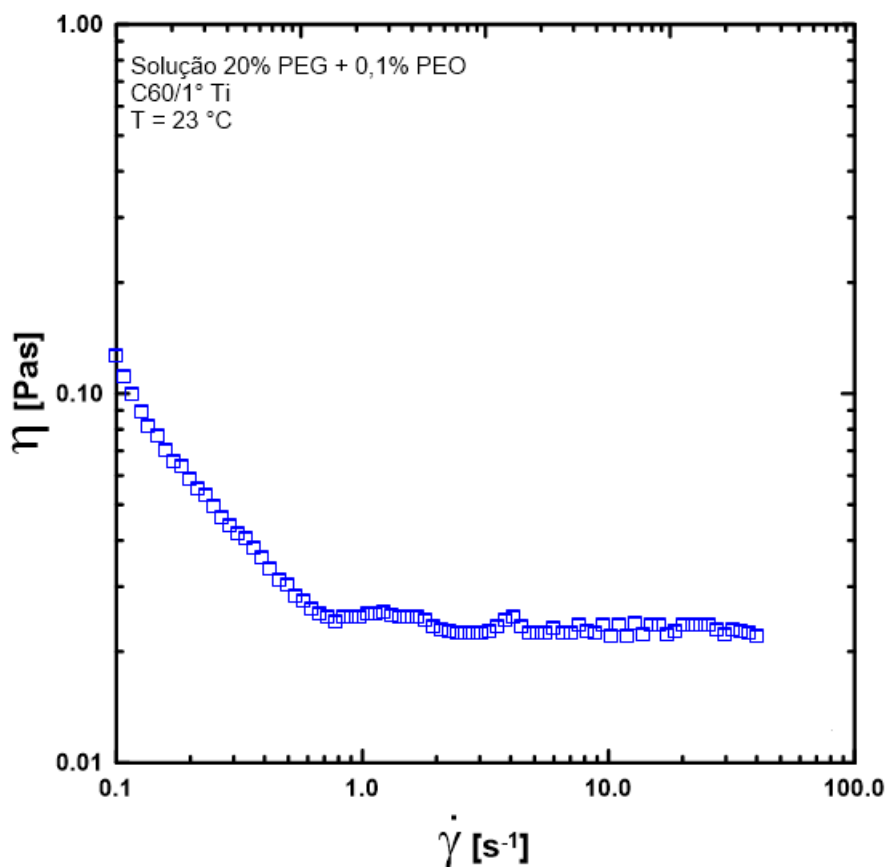


Figura 3.7: *Flowcurve* da solução viscoelástica com 20% de PEG e 0,1% de PEO.

Conforme mostrado no gráfico da Figura 3.7, a solução viscoelástica em questão apresentou um comportamento afinante, ou seja, a viscosidade dinâmica reduziu com o aumento da taxa de deformação, para taxas inferiores a $0,5 \text{ s}^{-1}$. Para valores de taxa de deformação superiores a $0,5 \text{ s}^{-1}$, a viscosidade dinâmica ficou constante em 23,3 mPa s.

A *flowcurve* e o coeficiente da primeira diferença de tensão normal da solução com 20% em massa de PEG e 0,25% em massa de PEO estão ilustrados nas Figuras 3.8 e 3.9 respectivamente.

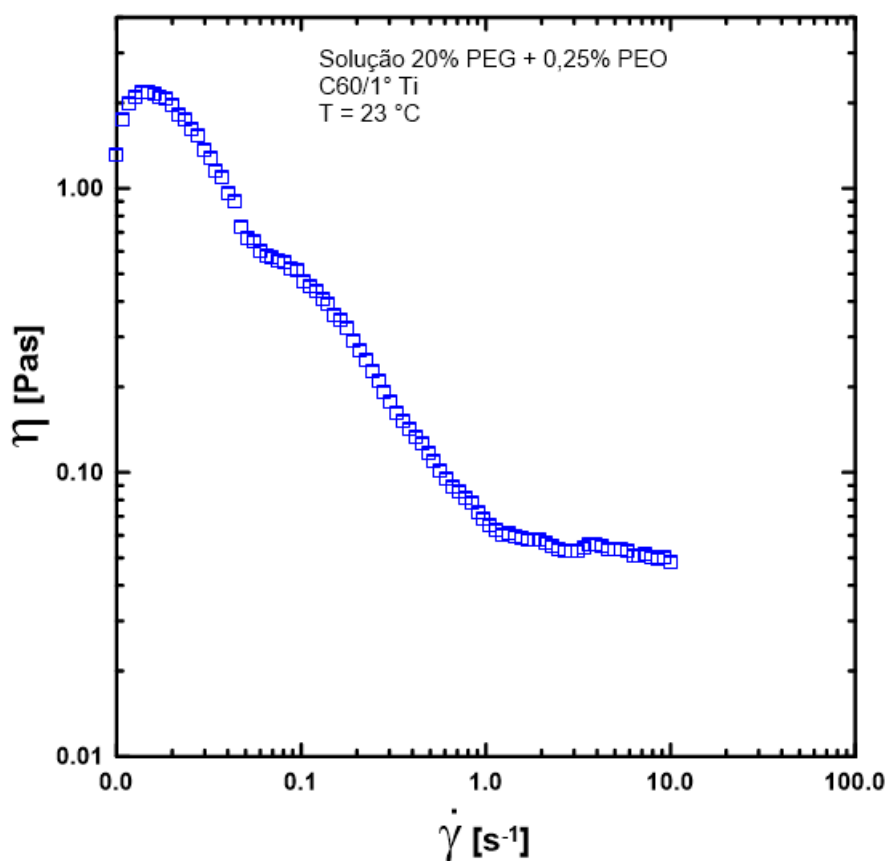


Figura 3.8: *Flowcurve* da solução viscoelástica com 20% de PEG e 0,25% de PEO.

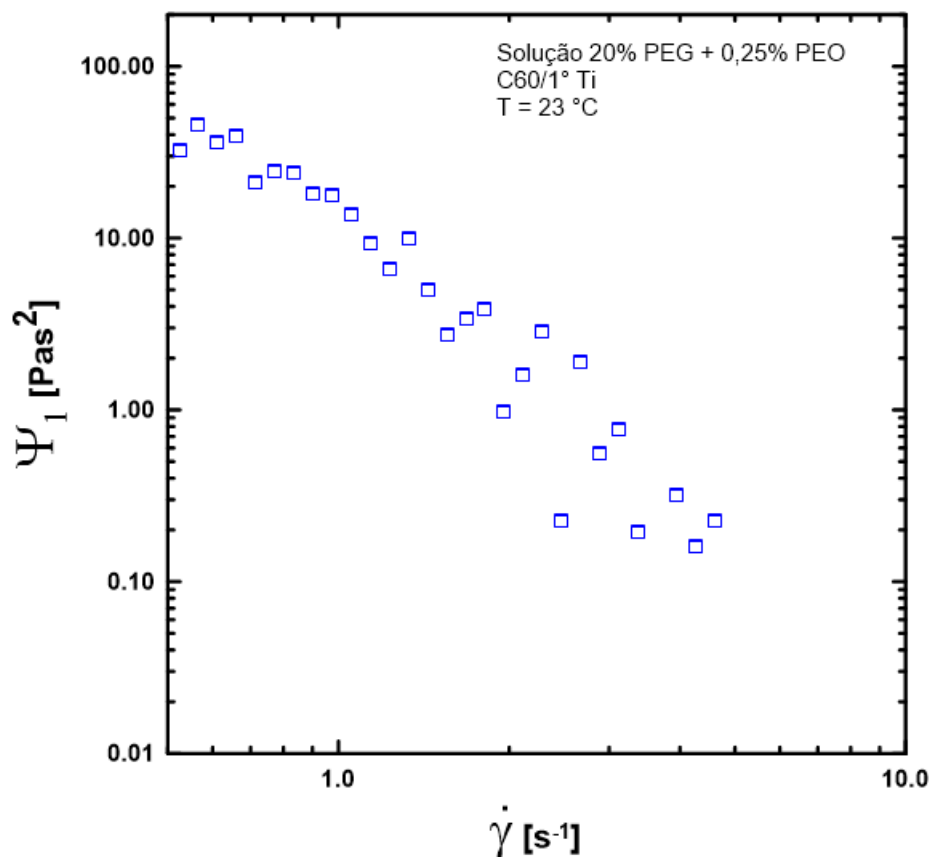


Figura 3.9: Coeficiente da primeira diferença de tensão normal da solução viscoelástica com 20% de PEG e 0,25% de PEO.

Baseado nos gráficos das Figuras 3.8 e 3.9, a solução apresenta uma viscosidade com taxa de deformação tendendo a zero em 2,1 Pa s e um comportamento afinante para toda faixa de taxa de deformação estudada. Ainda, a o coeficiente da primeira diferença de tensão normal em baixas taxas de deformação foi de 30 Pa s².

A *flowcurve* e o coeficiente da primeira diferença de tensão normal da solução com 20% em massa de PEG e 0,3% em massa de PEO estão ilustrados nas Figuras 3.10 e 3.11 respectivamente.

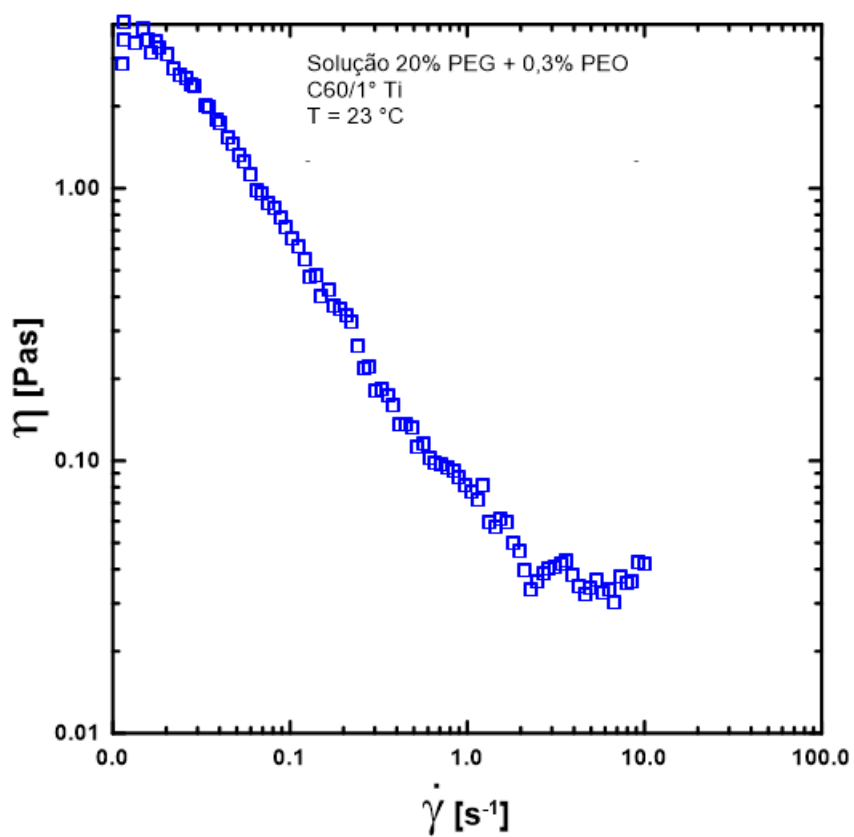


Figura 3.10: *Flowcurve* da solução viscoelástica com 20% de PEG e 0,3% de PEO.

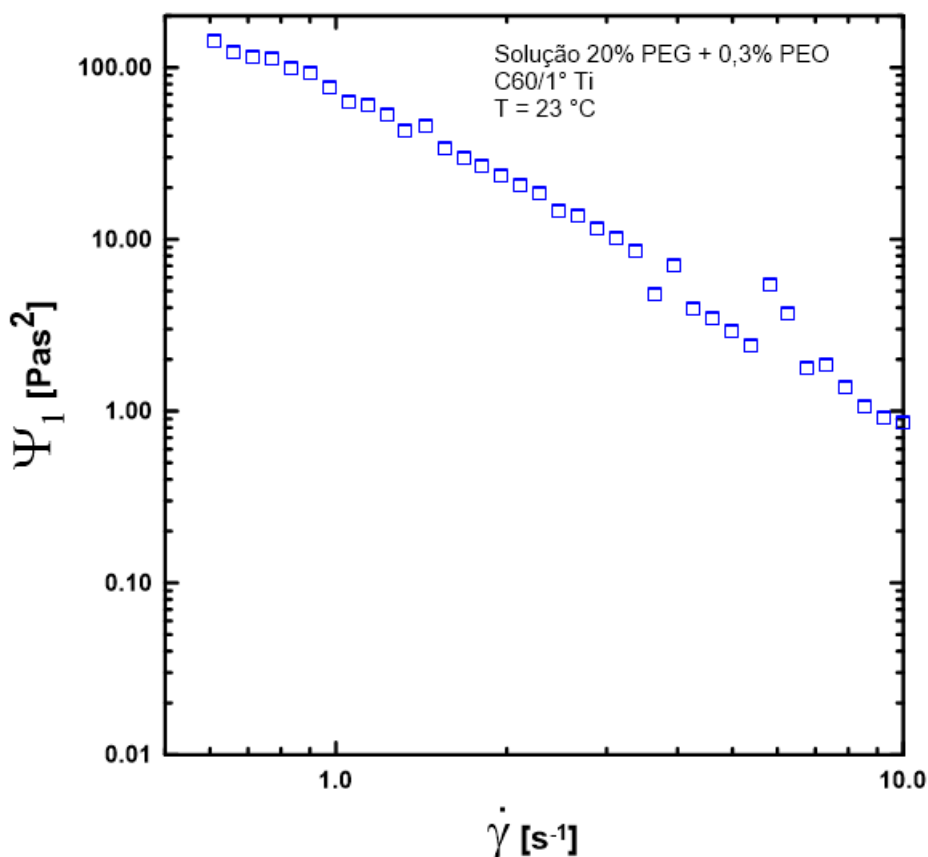


Figura 3.11: Coeficiente da primeira diferença de tensão normal da solução viscoelástica com 20% de PEG e 0,3% de PEO.

Baseado nos gráficos das Figuras 3.10 e 3.11, a solução apresenta uma viscosidade com taxa de deformação tendendo a zero em 7 Pa s e um comportamento afinante para toda faixa de taxa de deformação estudada. Ainda, a o coeficiente da primeira diferença de tensão normal em baixas taxas de deformação foi de 120 Pa s².

A Tabela 3.5, mostra o resultado da combinação entre os fluidos viscoelásticos e o fluido base óleo utilizado, no caso o óleo de soja.

Tabela 3.5: Resultado da combinação das soluções viscoelásticas com o óleo de soja.

Fluido deslocador	N_ρ	σ_i (mN/m)	Bo
Solução 20% PEG + 0,1% PEO	0,887	4,22	-0,1149
Solução 20% PEG + 0,25% PEO	0,887	4,2	-0,1141
Solução 20% PEG + 0,3% PEO	0,887	4,2	-0,1141

A Tabela 3.5 mostra os parâmetros que foram possíveis obter antes da execução dos ensaios. Contudo, assim como o fluido viscoplástico, as soluções viscoelásticas podem apresentar uma viscosidade dinâmica variável com a taxa de deformação. Por isso, só foi possível obter a razão de viscosidades após calcular a taxa de deformação característica do ensaio.

Para realizar a análise viscoelástica e comparar com o caso newtoniano, da mesma forma que no caso viscoplástico, para cada teste foi necessário calcular a taxa de deformação característica, pois, dependendo do valor desta taxa, a viscosidade pode variar.

Primeiro, foi injetado uma solução contendo 20% em massa de PEG e 0,1% em massa de PEO para recuperar óleo de soja contido no meio poroso. Os resultados obtidos para o cenário viscoelástico, utilizando a solução viscoelástica em questão para deslocar óleo de soja, estão apresentados na Tabela 3.6 e na Figura 3.12.

Tabela 3.6: Resultados viscoelásticos em comparação com newtonianos obtidos pela injeção de uma solução de 20% em massa de PEG e 0,1% em massa de PEO.

Ponto	De	μ_E (mPas)	N_μ	m_e^E	m_e^N	$\frac{m_e^E}{m_e^N}$
1	≈ 0	23,3	2,4	0,399	0,378	1,058
2	≈ 0	23,3	2,4	0,380	0,378	1,006
3	≈ 0	23,3	2,4	0,397	0,378	1,052
4	≈ 0	23,3	2,4	0,397	0,378	0,946

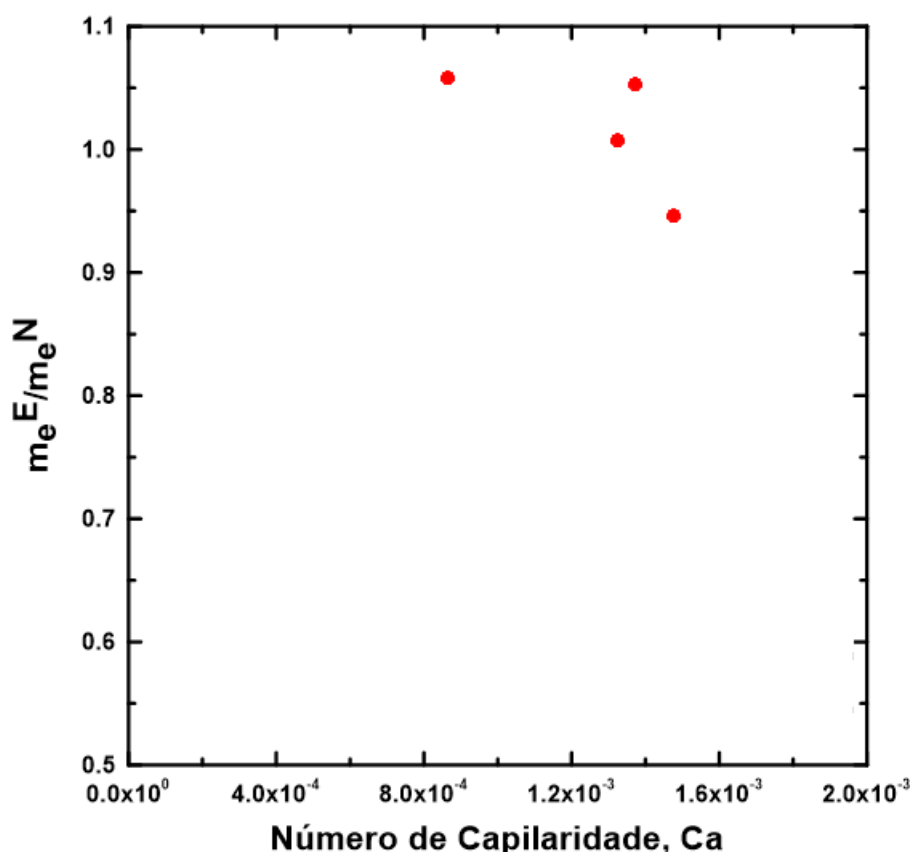


Figura 3.12: Comparação do cenário viscoelástico com o cenário newtoniano utilizando uma solução viscoelástica com 20% em massa de PEG e 0,1% em massa de PEO.

A Tabela 3.6 apresenta os resultados obtidos de cada experimento injetando o fluido viscoelástico em questão. Nela está contida o número de Deborah, De , que avalia a relevância da viscoelasticidade do fluido, a viscosidade do fluido viscoelástico calculada a partir da taxa de deformação, a razão de viscosidades resultante, a fração de massa perdida do cenário viscoelástico, a fração de massa perdida do cenário newtoniano de mesma razão de viscosidades e a razão entre a massa perdida viscoelástica e a massa perdida newtoniana. A fração de massa perdida newtoniana foi obtida através da interpolação linear entre duas razões de viscosidades, baseada na Figura 3.1.

Baseado no gráfico da Figura 3.12 e na Tabela 3.6, a eficiência de recuperação de fluido deslocado pela injeção deste fluido viscoelástico específico foi praticamente idêntica ao caso newtoniano correspondente. Este fato pode ser explicado pelo coefi-

ciente da primeira diferença de tensão normal do fluido deslocador ser muito próximo de zero e pelas taxas de deformação obtidas nos experimentos. A velocidade média do fluido recuperado de cada ensaio resultou em taxas de deformação que não ultrapassaram 2 s^{-1} , mesmo com velocidades próximas do limite máximo da prensa. Por isso, os tempos de processo foram altos e muito maiores que o tempo de relaxação do fluido viscoelástico. Consequentemente, o número de Deborah, De , de cada ensaio foi muito próximo de zero, significando que os efeitos elásticos foram pouco relevantes nos experimentos. Estes resultados estão de acordo com Soares *et al.* (2008), Huzyak e Koelling (1997) e Gauri e Koelling (1999). Vale ressaltar que nos experimentos de Soares *et al.* (2008), foi utilizado este mesmo fluido viscoelástico, contudo, foi possível obter velocidades médias do escoamento suficientemente altas para que o cenário viscoelástico fosse diferente do cenário newtoniano.

A solução viscoelástica com 20% em massa de PEG e 0,25% em massa de PEO foi utilizada visando obter efeitos viscoelásticos mais evidentes. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.7 e na Figura 3.13.

Tabela 3.7: Resultados viscoelásticos em comparação com newtonianos obtidos pela injeção de uma solução de 20% em massa de PEG e 0,25% em massa de PEO.

Ponto	De	μ_E (mPas)	N_μ	m_e^E	m_e^N	$\frac{m_e^E}{m_e^N}$
1	6,19	76	0,731	0,218	0,222	0,981
2	7,85	63	0,882	0,238	0,258	0,922
3	9,06	61	0,911	0,226	0,265	0,845
4	9,54	60	0,927	0,227	0,268	0,846
5	10,75	59,5	0,934	0,238	0,270	0,879

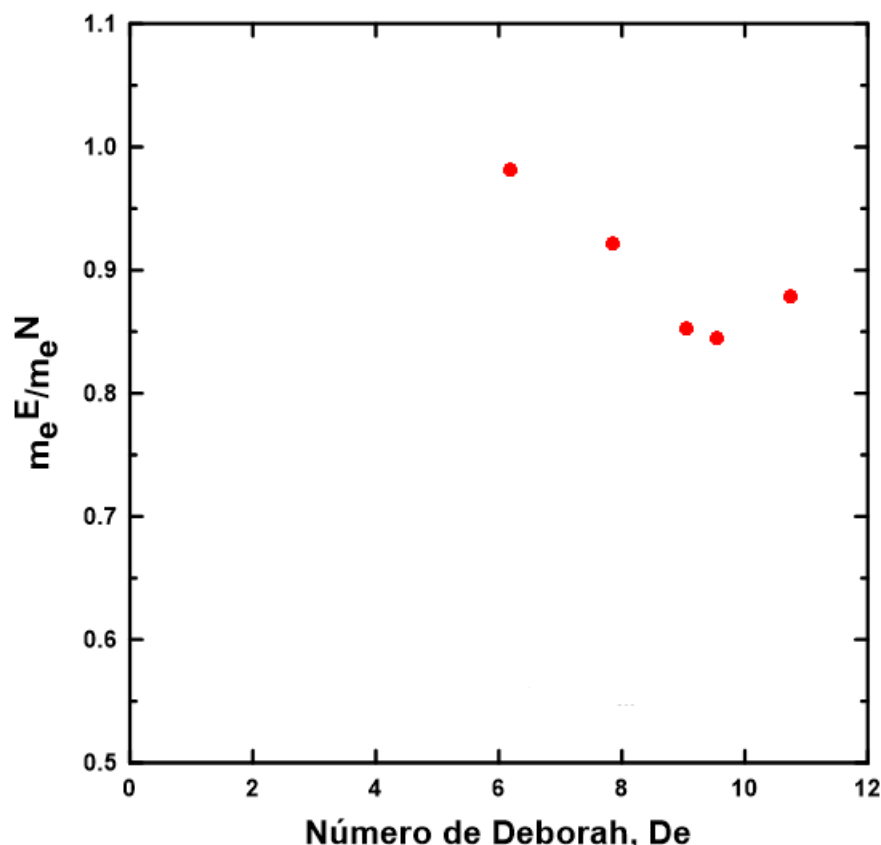


Figura 3.13: Comparação do cenário viscoelástico com o cenário newtoniano utilizando uma solução viscoelástica com 20% em massa de PEG e 0,25% em massa de PEO.

A Tabela 3.7 apresenta os resultados de cada experimento injetando o fluido viscoelástico contendo 0,25% em massa de PEO, seguindo a mesma lógica da tabela 3.6.

De acordo com a Tabela 3.7 e com o gráfico da Figura 3.13, por este fluido apresentar maior viscoelasticidade, foi possível constatar que a eficiência de recuperação com a injeção deste fluido viscoelástico foi maior do que a injeção de um fluido newtoniano correspondente. A elevação da concentração de PEO favoreceu o aumento do número de Deborah suficiente para tornar o cenário viscoelástico diferente do cenário newtoniano com razão de viscosidades equivalente. Ainda, o aumento da velocidade do escoamento tornou os efeitos viscoelásticos mais evidentes. Estas observações estão de acordo com os resultados obtidos por Soares *et al.* (2008), Huzyak e Koelling (1997) e Gauri e Koelling (1999).

Por fim, a solução viscoelástica com 20% em massa de PEG e 0,3% em massa de PEO foi preparada para deslocar o óleo de soja. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.8 e na Figura 3.14.

Tabela 3.8: Resultados viscoelásticos em comparação com newtonianos obtidos pela injeção de uma solução de 20% em massa de PEG e 0,3% em massa de PEO.

Ponto	De	μ_E (mPas)	N_μ	m_e^E	m_e^N	$\frac{m_e^E}{m_e^N}$
1	9,56	80,5	0,691	0,212	0,219	0,966
2	9,74	80,6	0,690	0,205	0,219	0,935
3	8,81	83,5	0,665	0,202	0,213	0,949
4	11,61	68	0,817	0,224	0,255	0,880
5	10,82	72	0,772	0,220	0,242	0,907

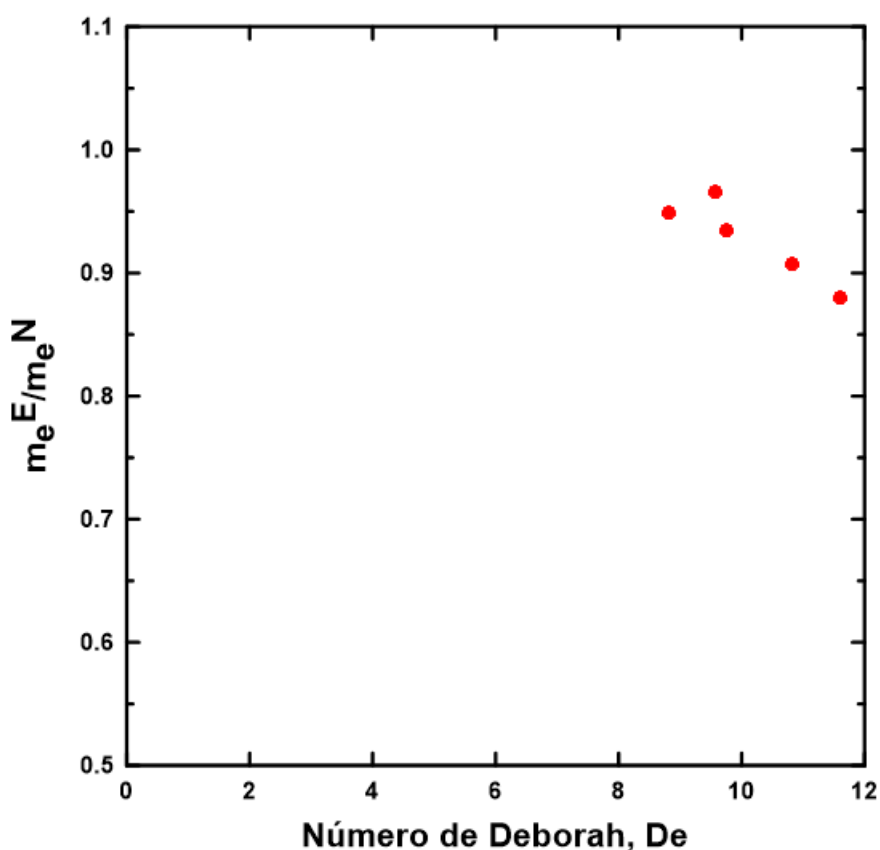


Figura 3.14: Comparação do cenário viscoelástico com o cenário newtoniano utilizando uma solução viscoelástica com 20% em massa de PEG e 0,3% em massa de PEO.

De acordo com a Tabela 3.8 e com o gráfico da Figura 3.14, por este fluido apresentar um teor relevante de viscoelasticidade, foi possível constatar que a eficiência de recuperação foi maior do que a injeção de um fluido newtoniano correspondente. A elevação da concentração de PEO favoreceu o aumento do número de Deborah suficiente para tornar o cenário viscoelástico diferente do cenário newtoniano com razão de viscosidades equivalente. Os números de Deborah obtidos foram semelhantes aos obtidos quando foi injetado o fluido com 0,25% de PEO. Assim, o incremento na recuperação de fluido foi praticamente o mesmo. Estas observações estão de acordo com os resultados obtidos por Soares *et al.* (2008), Huzyak e Koelling (1997) e Gauri e Koelling (1999). Ainda, pelo fato dos fluidos viscoelásticos apresentarem a primeira diferença de tensão normal diferente de zero, a pressão requerida para que o fluido viscoelástico percorra um poro é menor que a pressão necessária para um fluido newtoniano de viscosidade análoga invadir o mesmo poro. Conseqüentemente, uma quantidade maior de poros é varrida pelo fluido viscoelástico, aumentando o fator de recuperação. Estas constatações estão de acordo com Rangel *et al.* (2012). A Figura 3.15 apresenta o gráfico contendo todos os cenários viscoelásticos comparando com o caso newtoniano.

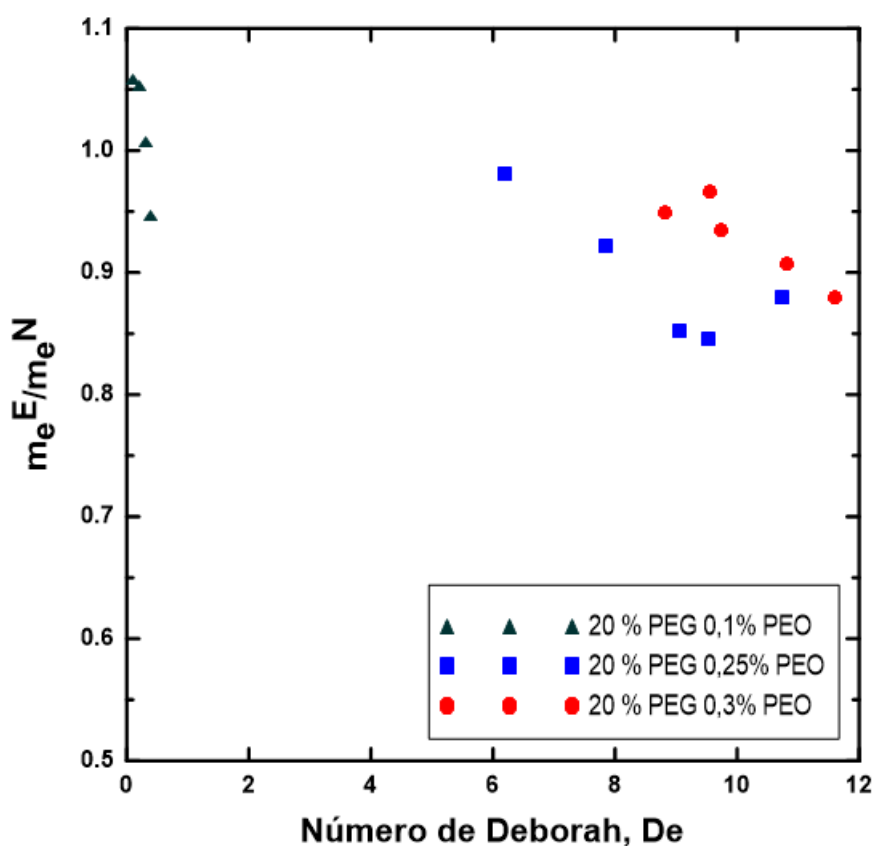


Figura 3.15: Comparação dos cenários viscoelásticos com o cenário newtoniano.

Baseado no gráfico da Figura 3.15, a fração de massa perdida ao injetar a solução viscoelástica de 20% em massa PEG e 0,1% em massa de PEO foi muito próxima à massa perdida do cenário newtoniano correspondente, pois o número de Deborah dos experimentos foi muito próximo de zero. A elevação da concentração de PEO para 0,25% e 0,3% em massa provocou o aumento da viscoelasticidade do fluido injetado, levando a um aumento do número de Deborah e da importância dos efeitos viscoelásticos. Os efeitos viscoelásticos, quando relevantes, provocaram um aumento da massa de fluido deslocado recuperada em comparação com a massa recuperada do caso newtoniano análogo.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO

No caso newtoniano, no que diz respeito à razão de viscosidades, foi constatado que a diminuição da mesma acarreta uma diminuição da fração de massa perdida. Este aumento na massa recuperada ocorre devido ao cisalhamento imposto pelo fluido injetado no fluido deslocado ser capaz de arrastar mais líquido para fora do meio poroso. Além disso, ocorre o aumento do número de poros que são varridos pelo fluido deslocador, contribuindo ainda mais para a diminuição da fração de massa perdida. Os resultados obtidos mostraram-se compatíveis com os resultados disponíveis na literatura.

Para o caso viscoplástico, foi observado que a solução viscoplástica, preparada a partir de gel e água, teve seus parâmetros reológicos alterados ao entrar em contato com o óleo de mamona. Este efeito ajuda a explicar o fato que ao injetar a solução viscoplástica com concentração de massa de gel em 7,7% para recuperar o óleo de mamona, a fração de massa perdida foi elevada, pois ao passar pelo meio poroso, as propriedades reológicas da solução de gel sofreram alterações, fazendo com que a razão de viscosidades do ensaio tendesse a infinito. Por isso, a escolha de um fluido viscoplástico que não reage com o fluido base óleo é fundamental.

Os resultados obtidos para o cenário viscoelástico mostraram-se coerentes com a literatura. Utilizando um fluido viscoelástico com 20% em massa de PEG e 0,1% em massa de PEO, a fração de massa perdida foi praticamente igual ao caso newtoni-

ano correspondente. A obtenção destes resultados é explicada pelas características reológicas do fluido e pelas baixas velocidades de escoamento. Este fluido apresentou um coeficiente de primeira diferença de tensão normal praticamente igual a zero. Contrariamente, a injeção de uma solução viscoelástica contendo 20% em massa de PEG e 0,25% em massa de PEO provocou um aumento da fração de massa recuperada quando comparada com a injeção de um fluido newtoniano equivalente. Ainda, o incremento da massa recuperada por meio da injeção de fluido viscoelástico contendo 0,3% de PEO foi equivalente ao injetar fluido com 0,25% de PEO. A depender das características viscoelásticas e da velocidade do escoamento empregada, a injeção de um fluido viscoelástico recupera uma quantidade maior ou igual de fluido deslocado quando comparado com o caso newtoniano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGHARAIB, M.; GHARBI, R. e MALALLAH, A. Scaling immiscible displacements in porous media with horizontal Wells. *Transport in Porous Media*, vol. 65, pp. 89-105, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**. Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12004**. Solo – determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12051**. Solo – determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**. Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

BRETHERTON, F.P. The motion of long bubbles in tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 10, pp. 166-188, 1961.

CALIMAN, Hilton Moulin. **Eficiência de recuperação de fluidos viscosos através da injeção de fluidos viscoplásticos em tubos capilares**. 2016. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

CHEN, M.; ROSSEN, W. e YORTSOS, Y.C. The flow and displacement in porous media of fluids with yield stress. *Chemical Engineering Science*, vol. 60, pp. 4183-4202, 2005.

COSTA, A. Permeability-porosity relationship: A reexamination of the kozenycarman equation based on a fractal pore-space geometry assumption. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no. 2, 2006.

COX, B.G. On driving a viscous fluid out of a tube. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 14, pp. 81-96, 1962.

DIMAKOPOULOS, Y. e TSAMOPOULOS, J. Transient displacement of newtonian and viscoplastic liquids by air in complex tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 142, pp. 162-182, 2007.

EPSTEIN, N. On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media. *Chemical Engineering Science*, vol. 44, no. 3, pp. 777-779, 1989.

FAIRBROTHER, F. e STUBS, A.E. 119. studies in electro-endosmosis. part VI. The "bubble-tube" method of measurement. *Journal of the Chemical Society*, vol. 1, no. 119, pp. 527-529, 1935.

FREITAS, J.F.; SOARES, E.J. e THOMPSON, R.L. Immiscible newtonian displacement by a viscoplastic material in a capillary plane channel. *Rheologica Acta*, vol. 50, pp. 403-422, 2011.

GAURI, V. e KOELLING, K.W. The motion of long bubbles through viscoelastic fluids in capillary tubes. *Rheologica Acta*, vol. 38, pp. 458-470, 1999.

HUZYAK, P. e KOELLING, K. The penetration of a long bubble through a viscoelastic fluid in a tube. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 71, pp. 73-88, 1997.

KANG, Q.; ZHANG, D. e CHEN, S. Displacement of a two-dimensional immiscible droplet in a channel. *Physics of Fluids*, vol. 14, pp. 3203-3214, 2002.

LENORMAND, R.; ZARCONE, C. e SARR, A. Mechanisms of the displacement of one fluid by another in a network of capillary ducts. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 135, pp. 337-353, 1983.

LENORMAND, R.; TOUBOUL, E. e ZARCONE, C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 189, pp. 165-187, 1988.

MENDES, P.R.S.; DUTRA, E.S.; SIFFERT, J.R. e NACCACHE, M.F. Gas displacement of viscoplastic liquids in capillary tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 145, pp. 30-40, 2007.

MUSSE, A.P.S. e QUINTELLA, C.M. Recuperação avançada de petróleo. *Cadernos de prospecção*, vol. 2, no. 1, pp. 12-22, 2009.

RANGEL, I.R.; THOMPSON, R.L.; PEREIRA, R.G. e ABREU, F.L.B. Experimental investigation of the enhanced oil recovery process using a polymeric solution. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 285-293, 2012.

SILVA, Ivanor Martins. **Análise experimental do deslocamento de líquidos em meios porosos artificiais por injeção de gás: Efeito da capilaridade, inércia e diâmetro médio dos grãos.** 2012. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

SOARES, E.J.; CARVALHO, M.S. e MENDES, P.R.S. Immiscible liquid-liquid displacement in capillary tubes. *Journal of Fluids Engineering*, vol. 127, no. 1, pp. 24-31, 2005.

SOARES, E.J.; MENDES, P.R.S. e CARVALHO, M.S. Immiscible liquid-liquid displacement in capillary tubes: viscoelastic effects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 30, pp. 160-165, 2008.

SOARES, E.J.; THOMPSON, R.L. e NIERO, D.C. Immiscible liquid-liquid pressuredriven flow in capillary tubes: Experimental results and numerical comparison. *Physics of Fluids*, vol. 27, 2015.

SOUSA, D.A.; SOARES, E.J.; QUEIROZ, R.S. e THOMPSON, R.L. Numerical investigation on gas-displacement of a shear-thinning liquid and a visco-plastic material in capillary tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 144, pp. 149-159, 2007.

TAYLOR, G.I. Deposition of a viscous fluid on the wall of a tube. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 10, pp. 161-165, 1961.

THOMPSON, R.L. e SOARES, E.J. Viscoplastic dimensionless numbers. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 238, pp. 57-64, 2016.

VELOSO, Y.; CRUZ, A.; MACHADO, L. e SANTANA, A.P.S.C. Método de recuperação avançada de petróleo utilizando injeção de glicerina bruta e polímeros. *Ciências Exatas e Tecnológicas*, vol. 2, no. 2, pp. 37-48, 2014.

WU, Y.-S.; PRUESS, K. e WITHERSPOON, P. Displacement of a newtonian fluid by a non-Newtonian fluid in a porous medium. *Transport in Porous Media*, vol. 6, pp. 115-142, 1991.

WU, Y.-S.; PRUESS, K. e WITHERSPOON P. Flow and displacement of bingham non-Newtonian fluids in porous media. *SPE Reservoir Engineering*, vol. 7, pp. 369-376, 1992.

ZHANG, C.; OOSTROM, M.; WIETSMA, T.W.; GRATE, J.W. e WARNER, M.G. Influence of viscous and capillary forces on immiscible fluid displacement: Pore-scale experimental study in a water-wet micromodel demonstrating viscous and capillary fingering. *Energy & Fuels*, vol. 25, pp. 3493-3505, 2011.