

Víctor Raúl Guillén Núñez

**Deslocamento de Óleo em
um Meio Poroso Através de
Injeção de Emulsões
Óleo-em-Água: Análise de
Fluxo Linear**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

**Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica**

Rio de Janeiro
Março de 2007

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Víctor Raúl Guillén Núñez

**Deslocamento de Óleo em um Meio
Poroso Através de Injeção de Emulsões
Óleo-em-Água: Análise de Fluxo Linear**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Márcio da Silveira Carvalho
Co-Orientador: Prof. Vladimir Alvarado Basante

Rio de Janeiro
Março de 2007



Víctor Raúl Guillén Núñez

**Deslocamento de Óleo em um Meio
Poroso Através de Injeção de Emulsões
Óleo-em-Água: Análise de Fluxo Linear**

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

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Prof. Vladimir Alvarado Basante

Co-Orientador

Department of Chemical and Petroleum Engineering —
University of Wyoming

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 02 de Março de 2007

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

Víctor Raúl Guillén Núñez

Graduou-se em Engenharia Mecânica na *Universidad Católica de Santa María* - UCSM (Arequipa, Perú) em 2002.

Ficha Catalográfica

Guillén Núñez, Víctor Raúl

Deslocamento de Óleo em um Meio Poroso Através de Injeção de Emulsões Óleo-em-Água: Análise de Fluxo Linear / Víctor Raúl Guillén Núñez ; orientador: Márcio da Silveira Carvalho ; co-orientador: Vladimir Alvarado Basante. — 2007.

88 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Emulsão. 3. Recuperação avançada de óleo. 4. Meio poroso. 5. Deslocamento de óleo. 6. Fator de recuperação. I. Carvalho, Márcio. II. Alvarado, Vladimir. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Márcio Carvalho pelo apoio e a confiança depositados em mim, e ter guiado pelo caminho certo este trabalho e pelo apoio outorgado, mesmo em assuntos não relacionados com a pesquisa.

Ao meu co-orientador, Professor Vladimir Alvarado pelos oportunos comentários e sugestões imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao Joel, pelas sempre certas sugestões e ajuda durante o desenvolvimento e redação deste trabalho.

Ao Eudes por permitir utilizar os equipamentos do seu laboratório e pela ajuda no início da etapa experimental, o Severiano e o David, pela ajuda outorgada na montagem da bancada experimental.

Aos professores membros da banca, pela participação, comentários e sugestões feitas a este trabalho.

Minha eterna gratidão ao meu pai Javier Guillén, minha mãe Ana María Núñez, meu irmão Javier e a minha avó María no Perú, pelo incentivo e carinho oferecidos, especialmente a minha irmã Milagros pela sua paciência e incondicional apoio no Brasil.

A todos os amigos conhecidos durante o curso de Mestrado que tornam a minha estadia no Brasil mais agradável. Passados e atuais companheiros de apartamento Jose Luis, Sara Castillo, Gerardo Castillo, Franklin Sanchez, Javier Montalvo, Hugo Barreda, Gustavo, Juan Valdez, Gilmar Romero. Passados e atuais companheiros de sala e laboratório Joel Romero, Sygifredo Cobos, Melisa Zambrano, Danmer Maza, Teresa Peña, Juliana Valerio, Mao Romero, Roney Thompson, Marco Perez, Julio Cuisano, David Maldonado, Fabio Hoelz, Eduardo Ramos, André Isnar e para o Epifanio Mamani.

Minha gratidão também para o CNPq, ANP, CAPES pelo apoio econômico e a PUC-Rio pela oportunidade de estudar em esta instituição, sem os quais este trabalho não poderia ter sido possível.

Resumo

Guillén Núñez, Víctor Raúl; Carvalho, Márcio; Alvarado, Vladimir. **Deslocamento de Óleo em um Meio Poroso Através de Injeção de Emulsões Óleo-em-Água: Análise de Fluxo Linear** Rio de Janeiro, 2007. 88p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A injeção de emulsão é um método comum para melhorar o varrido do reservatório e manter-lo pressurizado. A eficiência de recuperação de óleo no caso de óleos pesados é limitada pela alta razão de mobilidade entre a água injetada e o óleo. Um método de reduzir o problema relativo à alta razão de viscosidade é por injeção de soluções poliméricas. Porém, a interação líquido-rocha, os grandes volumes e o preço associado dos polímeros podem fazer esta técnica não aplicável em caso de campos gigantes. Diferentes métodos de recuperação avançada de óleo estão sendo desenvolvidos como alternativas à injeção de polímeros. A injeção de dispersões, em particular a injeção de emulsões, têm sido tratadas com relativo sucesso como um método de recuperação avançada de óleo, mas as técnicas não são totalmente desenvolvidas ou compreendidas. O uso de cada método requer uma completa análise dos diferentes regimes de fluxo de emulsões dentro do espaço poroso de um reservatório. A maioria das análises de fluxo de emulsões em um meio poroso utiliza uma descrição macroscópica. Esta aproximação é só válida para emulsões com o tamanho da fase dispersa muito menor do que o tamanho do poro. Se o tamanho de gota da fase dispersa é da mesma ordem de magnitude do tamanho de poro, as gotas podem aglomera-se e particularmente podem bloquear o fluxo através dos poros. Este regime de fluxo pode ser utilizado para controlar a mobilidade do líquido injetado, conduzindo a um fator de recuperação maior.

Neste trabalho, experimentos de deslocamento de óleo foram executados em um corpo de prova de arenito. Os resultados mostram que a injeção de uma emulsão mudou o fator de recuperação de óleo, elevando este desde 40%, obtido só por injeção de água, até um valor aproximado de 75%, seja em modo primário ou depois do influxo da água.

Palavras-chave

Emulsão, recuperação avançada de óleo, meio poroso, deslocamento de óleo, fator de recuperação.

Abstract

Guillén Núñez, Víctor Raúl; Carvalho, Márcio; Alvarado, Vladimir. **Oil Displacement in a Porous Media Through Injection of Oil-in-Water Emulsion: Analysis of Linear Flow**. Rio de Janeiro, 2007. 88p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Water injection is a common method to improve the reservoir sweep and maintain its pressure. The efficiency of oil recovery in the case of heavy oils is limited by the high mobility ratio between the injected water and oil. A method of reducing the problem related to the high viscosity ratio is by polymer solution injection. However, the liquid-rock interaction, the large volume and the associated cost of polymer may make this technique not applicable in the case of giant fields. Different enhanced oil recovery methods are being developed and studied as alternatives to polymer injection. Dispersion injection, in particular oil-water emulsion injection, has been tried with relative success as an enhanced oil recovery method, but the techniques are not fully developed or understood. The use of such methods requires a complete analysis of the different flow regimes of emulsions inside the porous space of a reservoir. Most analyses of flow of emulsion in a porous media use a macroscopic description. This approach is only valid for dilute emulsion which the size of the disperse phase is much smaller of the pore throat. If the drop size of the disperse phase is of the same order of magnitude of the pore size, the drops may agglomerate and partially block the flow through pores. This flow regime may be used to control the mobility of the injected liquid, leading to higher recovery factor. In this work, experiments of oil displacement were performed in a sandstone plug. The results show that injection of an emulsion changed the oil recovery factor, raising it from approximately 40%, obtained with water injection alone, to approximately 75%, whether in primary mode or after water flooding.

Keywords

Emulsion, enhanced oil recovery, porous media, oil displacement, recovery factor.

Conteúdo

1	Introdução	15
1.1	Conceitos Fundamentais	15
1.1.1	Origem do Petróleo	15
1.1.2	Recuperação do óleo	16
1.1.3	Métodos de Recuperação	17
1.1.4	Rocha Reservatório	18
1.2	Motivação	20
1.3	Objetivo	21
1.4	Escopo	21
2	Conceitos Fundamentais	23
2.1	Porosidade	23
2.1.1	Volume Poroso Absoluto	23
2.1.2	Volume Poroso Efetivo	24
2.2	Molhabilidade	24
2.3	Pressão Capilar	26
2.4	Permeabilidade	30
2.4.1	Absoluta ou Específica	31
2.4.2	Efetiva	31
2.4.3	Relativa	32
2.4.4	Curvas de Permeabilidade Relativa	32
2.5	Determinação da Permeabilidade	34
2.6	Forças Viscosas	35
2.7	Número Capilar	35
2.8	Mobilidade	36
2.9	Eficiência de Deslocamento	36
2.10	Emulsões	38
2.10.1	Estabilidade das Emulsões	39
2.11	Revisão Bibliográfica	39
3	Montagem da bancada experimental	42
3.1	Descrição da bancada experimental	42
3.1.1	Bomba	44
3.1.2	Mecanismo cilindro-pistão	44
3.1.3	Câmara “porta-amostra”, tipo Hassler	45
3.1.4	Corpo de prova	47
3.1.5	Transdutores de pressão	48
3.1.6	Aquisição e armazenamento de dados	48
3.1.7	Balança eletrônica	49
3.1.8	Óleos (Talpa 30 e Tivela 460)	49
3.2	Procedimento experimental	50
3.2.1	Preparação da bancada	50
3.2.2	Processo 1: Saturação da amostra de rocha com óleo	51

3.2.3	Processo 2: Deslocamento do óleo por injeção de água	53
3.2.4	Processo 3: Deslocamento do óleo por injeção contínua de emulsão	55
3.2.5	Processo 4: Recuperação terciária de óleo por injeção de água e emulsão em forma alternada	56
3.2.6	Processo 5: Medição da permeabilidade	56
4	Caracterização do Corpo de prova e dos Fluidos	58
4.1	Determinação das propriedades do corpo de prova	58
4.1.1	Volume Poroso efetivo	59
4.1.2	Permeabilidade	61
4.1.3	Saturação de óleo	62
4.1.4	Diâmetro de poro	63
4.1.5	Velocidade média do fluido através corpo de prova	64
4.1.6	Taxa de cisalhamento num poro	65
4.2	Líquidos utilizados	66
4.3	Caracterização dos líquidos	66
4.3.1	Óleo, água e solução água-carbopol	67
4.3.2	Emulsões	68
5	Apresentação e Discussão dos Resultados	71
5.1	Deslocamento do óleo por injeção de água	71
5.2	Deslocamento do óleo por injeção de emulsões	77
5.3	Recuperação avançada de óleo por injeção de água e emulsão em forma alternada	81
5.4	Análise de incertezas	84
6	Conclusões e Comentários Finais	86
	Referências Bibliográficas	86

Lista de Figuras

1.1	Estrutura esquemática de um reservatório de petróleo.	16
1.2	(a) Fotografia de uma Canteira do Afloramento do Botucatu, (b) Bloco de Arenito, (c) Amostra de arenito do Afloramento do Botucatu.	19
2.1	Matriz rochosa e espaço poroso.	24
2.2	Equilíbrio de forças na interface óleo-água.	25
2.3	Molhabilidade em sistemas óleo-água.	26
2.4	Elevação de água num tubo capilar.	27
2.5	Capilaridade num empacotamento de grãos esféricos.	28
2.6	Curvas de pressão capilar na drenagem e embebição.	30
2.7	fluxo linear em um meio poroso horizontal.	31
2.8	Curvas típicas de permeabilidade relativa de rocha molhada por água.	32
2.9	Efeito da variação da saturação sob a permeabilidade relativa de um sistema água-óleo [3].	33
2.10	Determinação da Permeabilidade absoluta.	34
2.11	Fotografia de uma emulsão óleo em água, tomada com microscópio eletrônico [S.C. Urdaneta].	38
3.1	Representação esquemática da bancada experimental, onde percursos (i) 3-4 quando água é injetada, (ii) 3'-4' para injetar o óleo, e (iii) 3''-4'' para injetar a emulsão.	42
3.2	Fotografia da bancada experimental.	43
3.3	Esquema mostrando os componentes da câmara portadora de amostras.	46
3.4	Esquema mostrando os componentes da câmara portadora de amostras.	47
3.5	A amostra de rocha.	47
3.6	Representação esquemática da bancada experimental, onde os percursos 1-2 + (I) 3-4 para injeção de água, (II) 3'-4' para injeção de óleo, e (III) 3''-4'' para injeção da emulsão.	50
3.7	Recuperação de óleo por injeção de água a uma vazão de alimentação de $Q_2 = 0.010$ ml/min.	54
4.1	Fotografia do corpo de prova mostrando suas dimensões.	58
4.2	Fotografia do método utilizado para embeber o corpo de prova em água.	59
4.3	Curva de Vazão-Diferencial de Pressão.	62
4.4	Fotografia mostrando as medidas dos diâmetros dos poros no corpo de prova obtidas nesta foto.	63
4.5	Diagrama mostrando os valores e a repetição dos tamanhos de poros aparentes do corpo de prova.	64

4.6	Diagrama mostrando a diferencia de velocidades que aparecem quando um fluido escoar entre dois grãos de rocha.	65
4.7	Viscosidade do óleo Talpa 30, utilizado para saturar o corpo de prova.	67
4.8	Viscosidade do óleo Tivela 460, utilizado na preparação das emulsões.	68
4.9	Fotografia mostrando as medidas de diâmetro das gotas da emulsão $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$.	69
4.10	Diagrama mostrando a média do diâmetro das gotas da emulsão $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$.	69
4.11	Viscosidade da emulsão com $\bar{D}_1 = 5 \mu\text{m}$.	70
4.12	Viscosidade da emulsão com $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$.	70
5.1	Resultado da recuperação de óleo, mediante a injeção de água.	72
5.2	Resultado do balanço de volumes produzidos, mediante a injeção de água.	73
5.3	Resultado da fração de óleo recuperado, mediante injeção de água.	75
5.4	Resultado da fração de recuperação de óleo, mediante a injeção de água para as três vazões Q_1 , Q_2 , Q_3 , e as pressões de injeção resultantes.	76
5.5	Resultados da fração de recuperação de óleo e balanço de volumes produzidos, mediante a injeção de água para as três vazões.	76
5.6	Resultado da recuperação de óleo e emulsão, mediante a injeção de emulsão.	77
5.7	Resultados do balanço de volumes produzidos do óleo e emulsão, mediante a injeção de emulsão.	78
5.8	Resultados da fração da recuperação de óleo, mediante a injeção de emulsão.	79
5.9	Comparação dos resultados da fração de recuperação de óleo, mediante a injeção de água Q_3 e a injeção de emulsões \bar{D}_1 e \bar{D}_2 à mesma vazão.	80
5.10	Resultado da fração de recuperação de óleo, mediante a injeção de emulsões \bar{D}_1 e \bar{D}_2 , e suas pressões de injeção resultantes.	81
5.11	Fração de recuperação de óleo, mediante a injeção alternada de água e emulsão de $20 \mu\text{m}$ a vazão de 0.015 ml/min .	82
5.12	Fração de recuperação de óleo e balanço de volumes produzidos para o óleo, mediante injeção alternada de água Q_3 e emulsão \bar{D}_2 .	83
5.13	Fração de recuperação de óleo, mediante a injeção alternada de água Q_3 e emulsão \bar{D}_2 , e as pressões resultantes.	83
5.14	Comparação de resultados f_R de óleo mediante experimentos de: injeção alternada de água e emulsão \bar{D}_2 , injeção de água Q_3 , injeção de emulsões de \bar{D}_1 e \bar{D}_2 a vazão de 0.015 ml/min .	84
5.15	Incerteza no experimento de injeção de emulsão \bar{D}_2 .	85

Lista de Tabelas

4.1	Dimensões do corpo de prova.	60
4.2	Tabela das Vazões utilizadas e seus diferenciais de Pressões resultantes ao atravessar o meio poroso	61
4.3	Líquidos utilizados.	66
4.4	Caracterização dos líquidos utilizados.	67
5.1	Tabela de resultados do deslocamento de óleo por injeção de água.	74
5.2	Tabela de resultados do deslocamento de óleo por injeção de água.	80

Lista de Símbolos

A	área transversal ou aparente, m^2
A_t	tensão de adesão, $dina/cm$
Ap_t	area porosa transversal, m^2
A/O	emulsão água-em-óleo
D_p	diâmetro de poro, m
\bar{D}	diâmetro médio, m
E	eficiencia de deslocamento
E_D	eficiencia de deslocamento microscópica
E_v	eficiencia de deslocamento macroscópica
e	espessura da parede do cilindro, m
g	aceleração da gravidade, m/s^2
h	elevação da água em um tubo capilar, m
k	permeabilidade absoluta do meio poroso, $mDarcy$
L	comprimento do meio poroso, m
m	massa, kg
N_{ca}	número de capilaridade
O/A	emulsão óleo-em-água
P_c	pressão capilar, Pa
P_m	pressão na fase molhante, Pa
p	pressão interna do cilindro, Pa
Q	vazão, ml/min
R	raio de curvatura da superfície esférica, m
r	raio interno do tubo capilar, m
r_c	raio interno do cilindro, m
S	saturação, %
S_{ac}	saturação de água conata,
S_{cm}	saturação crítica da fase molhante,
S_{oi}	saturação de óleo inicial,
T	Transdutor de pressão, Pa
V	volume, ml
VP	volume poroso, ml
v_m	velocidade média, m/s

Símbolos Gregos

ΔP	diferença de pressão, Pa
ϕ	porosidade, %
λ	mobilidade, k/μ
λ_a/λ_o	razão de mobilidade
μ	viscosidade, $Kg/m.s$
ρ	massa específica, kg/m^3
σ	tensão, mN/m
θ	ângulo de contato, °

Índices

a	água
ac	água conata ou irreduzível
c	capilar
g	gaseosa
D	deslocamento microscópico
i	inicial
m	molhante
nm	não molhante
o	óleo
or	óleo residual, óleo na rocha
oi	óleo inicial
p	poroso
r	relativa
t	total, tangencial
$a+o$	água mais óleo
1	número um
2	número dois
3	número três