

Jane Celnik

**Deslocamento de Líquidos em
Espaços Anulares**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica

Rio de Janeiro
Dezembro de 2008



Jane Celnik

Deslocamento de Líquidos em Espaços Anulares

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Rio de Janeiro
Dezembro de 2008



Jane Celnik

Deslocamento de Líquidos em Espaços Anulares

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. Paulo Roberto de Souza Mendes

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de Dezembro de 2008

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

Jane Celnik

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio (Rio de Janeiro, Brasil) em 2006

Ficha Catalográfica

Celnik, Jane

Deslocamento de Líquidos em Espaços Anulares / Jane Celnik; orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes. – 2008.

71 f: il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Espaço Anular. 3. Deslocamento de Líquidos. 4. Cimentação Primária. I. Souza Mendes, Paulo Roberto de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

À minha querida família.

Agradecimentos

A D's, por tudo.

Ao meu orientador Paulo Roberto de Souza Mendes pela oportunidade, pela confiança, pelos ensinamentos, pela atenção e pela amizade.

Aos meus pais e meu irmão pelo apoio incondicional.

Aos meus amigos do laboratório, especialmente ao Flávio Marchesini pela contribuição.

Aos meus avós, tios, primos e amigos pela compreensão.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio pela minha formação.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio pelo suporte administrativo.

Ao CNPq, Capes e PUC-Rio pelos auxílios concedidos.

Resumo

Celnik, Jane; Souza Mendes, Paulo Roberto de. **Deslocamento de Líquidos em Espaços Anulares**. Rio de Janeiro, 2008. 71p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Durante a perfuração e cimentação de poços de petróleo e gás, diversos fluidos circulam no espaço anular formado entre a coluna de revestimento e a formação rochosa. A boa aderência do cimento à formação e à coluna de revestimento depende de quão bem o fluido de perfuração é deslocado para fora do espaço anular pelos fluidos lavadores e espaçadores e de quão bem a pasta de cimento desloca esses últimos. Falhas na cimentação podem comprometer a vedação hidráulica do poço causando sérios danos ambientais e perdas na produção. Portanto, é importante estudar o processo de deslocamento de fluidos em espaços anulares e determinar as condições que garantam a eficiência de deslocamento. Neste trabalho foi investigado experimentalmente o deslocamento de fluidos para regimes laminares em um espaço anular formado por cilindros concêntricos. A eficiência de deslocamento foi associada à configuração da interface formada entre os fluidos. Foram realizados testes de visualização na planta experimental existente no laboratório e foi construída uma nova planta experimental em menor escala. Na nova planta experimental, foi verificada a possibilidade da adição, ao fluido deslocador, de micropartículas que refletem a luz incidida por feixes de laser formando um plano de visualização. A maior dificuldade observada para a utilização desta técnica foi encontrar fluidos com índices de refração parecidos. Foram estudados o caso de um fluido newtoniano mais viscoso deslocando um menos viscoso e vice-versa para três diferentes vazões. Foi observado que quanto menor a vazão, mais plano é o formato da interface entre os fluidos, o que indica um deslocamento mais eficiente.

Palavras-chave

Espaço Anular. Deslocamento de Líquidos. Cimentação Primária.

Abstract

Celnik, Jane; Souza Mendes, Paulo Roberto de. **Displacement of Liquids in Annular Spaces** . Rio de Janeiro, 2008. 71p.
MsC Thesis — Departament of Mechanical Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

While drilling and cementing oil and gas wells, a number of fluids circulate in the annular space between the casing and the rock formation. Good cement bonding to the formation or the casing depends on how well the drilling mud can be washed out of the annular space by spacer and washer fluids, and on how well the cement slurry displace the last ones. Failure in cementing can compromise the hydraulic sealing of the well causing serious environmental damages and production losses. Therefore, it is important to study the displacement process of fluids in annular spaces and determine the conditions that guarantee displacement efficiency. In this work fluids displacement in laminar flows were investigated in an annular space formed by concentric cylinders. The displacement efficiency was related to the interface shape between the fluids. Visualization tests were performed in the experimental apparatus existent in the laboratory and a new experimental apparatus was built in a smaller scale. On the new experimental apparatus, the possibility creating a visualization plane by adding tracer particles that reflect the light coming from laser beams to the displacing fluid was verified. The greater difficulty for using this technique is to find fluids with similar refraction indices. The cases of a more viscous Newtonian fluid displacing a less viscous one and vice versa were studied for three different flow rates. Was observed that for lower flowrates, the interface shape is flatter and that indicates a better displacement efficiency.

Keywords

Annular Space. Displacement of Liquids. Primary Cementing.

Sumário

| | | |
|-----|----------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | Motivação | 13 |
| 1.2 | Revisão Bibliográfica | 18 |
| 2 | FORMULAÇÃO DO PROBLEMA | 25 |
| 2.1 | Revisão Teórica | 25 |
| 2.2 | Formulação Matemática | 27 |
| 2.3 | Análise Dimensional | 33 |
| 3 | MÉTODOS EXPERIMENTAIS | 35 |
| 3.1 | Montagem Experimental | 35 |
| 3.2 | Procedimento Experimental | 43 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 45 |
| 4.1 | Planta Experimental Antiga | 45 |
| 4.2 | Planta Experimental Nova | 49 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 65 |
| | Referências Bibliográficas | 68 |

Lista de figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Configuração de um poço típico no mar. | 14 |
| 1.2 | Esquema do processo de cimentação primária. | 15 |
| 1.3 | Esquema em corte de um poço direcional cimentado. | 17 |
| 2.1 | Desenho esquemático de um viscosímetro Cannon-Fenske. | 26 |
| 2.2 | Esquema de uma geometria anular. | 28 |
| 2.3 | Volume de controle arbitrário. | 29 |
| 2.4 | Função viscosidade para líquidos viscoplásticos. | 32 |
| 3.1 | Foto da planta experimental de Dutra(18) com adaptações. | 35 |
| 3.2 | Foto da nova planta experimental. | 36 |
| 3.3 | Desenho esquemático da nova planta experimental. | 37 |
| 3.4 | Foto da base de sustentação. | 38 |
| 3.5 | Foto de cima (a), foto lateral (b) e desenho esquemático (c) do sistema tampão. | 39 |
| 3.6 | Foto da peça com conectores. | 40 |
| 3.7 | Foto da caixa de visualização. | 40 |
| 3.8 | Desenho esquemático do posicionamento dos lasers. | 42 |
| 3.9 | Foto dos lasers inclinados iluminando a seção de testes. | 42 |
| 4.1 | Gráfico dos testes reológicos das soluções de carbopol. | 46 |
| 4.2 | Fotos da solução de carbopol 0,10% com corante azul deslocando a solução 0,08% pelo espaço anular com os tubos concêntricos na vertical. | 47 |
| 4.3 | Fotos da solução de carbopol 0,10% com corante azul deslocando a solução 0,08% pelo espaço anular com os tubos concêntricos inclinados 45°. | 48 |
| 4.4 | Fotos da solução de carbopol 0,10% com corante azul deslocando a solução 0,08% pelo espaço anular com os tubos concêntricos na horizontal. | 49 |
| 4.5 | Fotos da interface entre glicerina e solução de carbopol. | 50 |
| 4.6 | Fotos da compensação da sombra na interface com lasers inclinados. | 51 |
| 4.7 | Fotos do deslocamento de óleo vegetal por glicerina. | 53 |
| 4.8 | Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 90% com vazão de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$. | 56 |
| 4.9 | Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 90% com vazão de $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$. | 57 |
| 4.10 | Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 90% com vazão de $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$. | 58 |
| 4.11 | Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 75% com vazão de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$. | 60 |
| 4.12 | Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 75% com vazão de $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$. | 61 |
| 4.13 | Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 75% com vazão de $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$. | 62 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.14 | Comparação do deslocamento de óleo por soluções de glicerina 75%(esquerda) e 90%(direita) com vazão de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$. | 63 |
| 4.15 | Comparação do deslocamento de óleo por soluções de glicerina 75%(esquerda) e 90%(direita) com vazão de $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$. | 63 |
| 4.16 | Comparação do deslocamento de óleo por soluções de glicerina 75%(esquerda) e 90%(direita) com vazão de $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$. | 64 |

Lista de tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Propriedades do fluido de perfuração, do fluido espaador e das soluções de carbopol. | 45 |
| 4.2 | Densidade e viscosidade do óleo e da solução de glicerina 90%. | 55 |
| 4.3 | Densidade e viscosidade do óleo e da solução de glicerina 75%. | 59 |

Nós somos aquilo que fazemos repetidas vezes, repetidamente. A excelência portanto não é um feito, mas um hábito.

Aristóteles.