

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DESENVOLVIMENTO DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DE ESCALA PELO ESCOAMENTO RADIAL NA REINJEÇÃO DE ÁGUA EM FORMAÇÕES NÃO CONSOLIDADAS

AUTORES:

Ramos, V.S.*¹, Brandão, E.M.¹, Siqueira, G.H.³, Devloo, P.R.B.³, Mendes, J.R.P.², Fernandes, P.D.¹

²Centro de Estudos de Energia e Petróleo, Universidade Estadual de Campinas

²Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas

³Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas

INSTITUIÇÃO:

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

DESENVOLVIMENTO DE APARATO EXPERIMENTAL PARA INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DE ESCALA PELO ESCOAMENTO RADIAL NA REINJEÇÃO DE ÁGUA EM FORMAÇÕES NÃO CONSOLIDADAS

Resumo

Na indústria de petróleo utiliza-se a reinjeção de água produzida (PWRI) para duas principais finalidades, direcionar o fluxo de óleo em direção aos poços produtores e para manter a pressão do reservatório em valores superiores à saturação. A injeção de água ainda é utilizada também como fluido frio em reservatórios geotérmicos, e para eliminação de resíduos presentes em formações subterrâneas. No entanto, a água produzida possui diversas impurezas em sua composição, como gotículas de óleo e partículas sólidas. A presença destas impurezas traz como consequência o desgaste prematuro dos equipamentos encontrados na superfície e o entupimento dos poros da formação. Este declínio da permeabilidade do reservatório observado no decorrer do tempo na exploração de poços de petróleo é conhecido na engenharia do petróleo como dano de formação. Uma variedade de trabalhos experimentais pode ser encontrado na literatura visando entender e quantificar os parâmetros e mecanismos envolvidos durante a reinjeção de água produzida, no entanto, poucos trabalhos são encontrados na literatura quando o reservatório é do tipo não consolidado. Na maior parte dos trabalhos encontrados o foco de estudo consiste ainda na utilização de *plugues* representativos de formações consolidadas em escala reduzida (*sample core*), onde o fluxo de escoamento de água pela rocha ocorre geralmente de maneira linear. Assim, este trabalho procura mostrar o projeto de desenvolvimento de um aparato experimental (nomeado de módulo) representativo de um reservatório não consolidado, onde o valor do diâmetro do poço é similar ao encontrado no campo, e o fluxo de escoamento de água é do tipo radial. Dois efeitos principais podem ser imediatamente estudados em um módulo em maior escala, o primeiro seria a heterogeneidade do reservatório, o segundo seria a extrapolação do erro encontrado no módulo desenvolvido, minimizado em relação à utilização de amostras em pequena escala. O módulo desenvolvido pode trazer ganhos reais na compreensão dos fenômenos envolvidos na exploração dos campos de petróleo, ajudando no projeto e operação de poços injetores, assim como na tomada de decisões.

Palavras-chave: injeção de água, dano de formação, célula de injeção radial, reservatórios não consolidados.

Abstract

In the oil industry, produced water reinjection (PWRI) is used for two main purposes, directing the flow of oil towards producing wells and maintaining reservoir pressure at values above saturation. Water injection is also used as a cold fluid in geothermal reservoirs, for storing fresh water in aquifers and for eliminating waste present in underground formations. However, the water produced has several impurities in its composition, such as oil droplets and solid particles. The presence of these impurities results in premature wear of equipment found on the surface and clogging of the formation pores. This decline in reservoir permeability observed over time in oil well exploration is known in petroleum engineering as formation damage. A variety of experimental works can be found in the literature aiming to understand and quantify the parameters and mechanisms involved during the reinjection of produced water, however, few works are found in the literature when the reservoir is of the unconsolidated type. In most of the works found, the focus of study still consists of the use of representative plugs of

consolidated formation on a reduced scale (sample core), where the flow of water through the rock occurs linearly. Thus, this work's main objective is to show the development project of a module representative of an unconsolidated reservoir, where the diameter of the well is similar to that found in the field, and the water flow is radial. Two main effects can be immediately studied in a larger-scale module, the first would be the heterogeneity of the reservoir, and the second would be the extrapolation of the error found in the developed simulator, which is minimized in relation to the use of small-scale samples. The developed module can bring real gains in understanding the phenomena involved in the exploration of oil fields, helping in the design and operation of injection wells, as well as in decision-making.

Keywords: water flooding, formation damage, radial injection cell, unconsolidated sand reservoirs.

Introdução

Atualmente uma grande parcela da produção mundial de petróleo é devida a presença de poços injetores nos campos produtores. A injeção de água nos reservatórios além de direcionar o fluxo de petróleo na direção dos poços produtores também é responsável por manter a pressão no reservatório (KALANTARIASL, 2015).

No passado a fonte da água de injeção utilizada era proveniente em sua maior parte do mar, no entanto, à medida que as regulamentações ambientais para a rejeição da água produzida nos mares, rios e águas profundas se tornaram mais restritivas, e também, pelo elevado custo necessário para o tratamento na superfície, vem que a reinjeção da água produzida nos poços produtores tornou-se cada vez mais atraente no setor (OCHI et al., 1999).

A operação de reinjeção de água produzida (PWRI) é um grande desafio tecnológico devido ao rápido declínio da injetividade do poço. Os principais mecanismos responsáveis pelo rápido declínio da injetividade são a captura de partículas sólidas presentes na água injetada pela rocha porosa e a formação de uma torta externa (*filter cake*) pouco permeável na parede do poço. Além disso, a reinjeção de água produzida é uma opção econômica e amigável ao meio ambiente devido à conversão de resíduos em valor na operação dos poços injetores (KALANTARIASL, 2015; NGUYEN et al., 2023).

Existem na literatura modelos analíticos confiáveis para a previsão do comportamento da injetividade de poço, como o encontrado no trabalho de KALANTARIASL (2015). No entanto, a utilização desse modelo pela indústria do petróleo esbarra na dificuldade da obtenção de determinados parâmetros físicos. Além disso, a extrapolação do comportamento de um campo para outro não é tão eficiente devido às diferentes composições da água produzida (teor de óleos, teor de sólidos, tipos e composições salinas), propriedades permoporosas e regimes de injeção (fraturamento radial, térmico ou forçado).

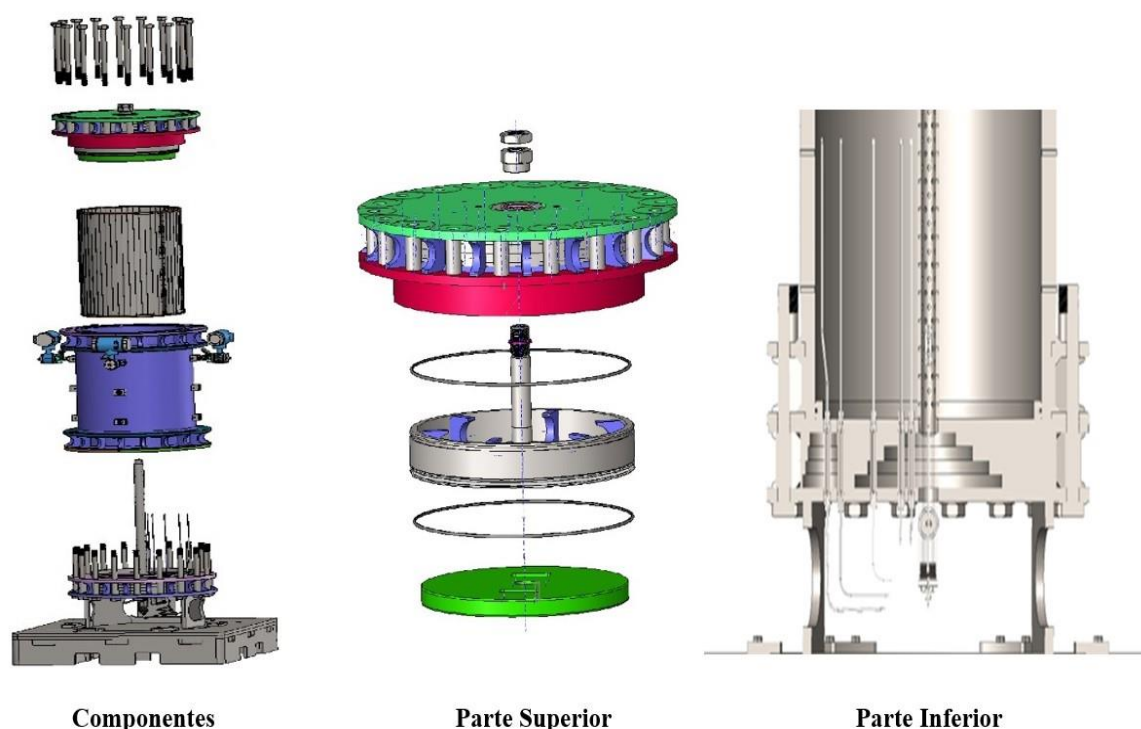
Neste contexto, está sendo desenvolvido um aparato experimental (o módulo radial) em parceria com a *Total Energies*. Este aparato deve permitir a realização de estudos para se obter modelos mais realísticos e práticos para a previsão da queda de injetividade, numa escala geométrica mais próxima do encontrado no campo. Este módulo permite o estudo de fenômenos envolvidos em reservatórios geotérmicos, e ainda técnicas de estimulação de reservatórios, como acidificação e injeção acima da pressão de fratura da formação.

Metodologia

Este trabalho consiste em apresentar o desenvolvimento de um módulo de injeção radial, especialmente projetado e construído para estudar os fenômenos e mecanismos envolvidos em poços injetores de água, aplicados em reservatórios de petróleo do tipo não consolidado.

Na Figura 1 a seguir podemos ver em corte o projeto do módulo, a esquerda podemos visualizar todas as partes que compõem o módulo, de cima para baixo podemos visualizar a tampa superior, o difusor de fluxo, o corpo do módulo e a parte inferior, contendo a base e a *sand screen* fixada na tampa inferior. Na parte central da Figura 1 podemos visualizar com mais detalhes a tampa superior, seguida do êmbolo que será preenchido com água de modo a realizar a compactação do pacote de areia.

Figura 1: Projeto do módulo radial.



Finalizando, à direita na Figura 1 podemos visualizar com mais detalhes a parte inferior do módulo, com destaque para os dutos internos que serão utilizados para as tomadas de pressão intermediária. É importante destacar que um dos requisitos do projeto é a possibilidade de localizar as tomadas de pressão em qualquer altura do módulo. Para tanto, os dutos para tomadas de pressão são encaixados ao invés de soldados na base do módulo, com isso basta trocar os dutos para se obter medidas de pressão na altura de interesse.

Em relação às dimensões consideradas no projeto vem que o módulo é confeccionado em aço inox e possui um diâmetro interno de 70 cm, com o pacote de areia podendo ser preenchido com uma altura total de 90 cm. Já a *sand screen* possui um diâmetro externo de 64,8 mm e comprimento total de 100 cm, cujo elemento filtrante possui 90 cm de comprimento, com um tubo base de 2 3/8" (60,3 mm) confeccionado em aço inox 304, possuindo este 108 furos de 3/8" distribuídos helicoidalmente. Ainda em relação ao elemento filtrante, a *sand screen* possui uma malha com camada de poros de 175 microns,

sendo esta camada de filtração ligada por difusão, tecnologia aplicada pelo Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM).

A medida das pressões intermediárias possibilita a reprodução de métodos para obtenção da modelagem da queda de injetividade, como apresentado nos trabalhos de BEDRIKOVETSKY et al. (2003) e GOMES (2010), permite o desenvolvimento de novos modelos ou estudos originados a partir destes dados experimentais, permite a aplicação de técnicas baseadas em inteligência artificial conforme FROTA et al. (2022), e outros. O módulo ainda será utilizado para o desenvolvimento de um modelo numérico para a estimativa dos modos de vibração e frequências do módulo como uma estrutura elástica. Isto permitirá compreender melhor a resposta da célula experimental, e associar no futuro a sua vibração aos impactos práticos (ou falta de impacto) sobre fricção, tensão, densidade e distribuição granulométrica.

As amostras de areias que serão inicialmente utilizadas no módulo contém permeabilidade inicial de 500 mD e 2000 mD, cujos grãos possuem tamanho médio D_{50} de 130 μm e 135 μm respectivamente. Para provocação de danos ao meio poroso será preparada uma suspensão contendo partículas sólidas e gotículas de óleo, simulando uma água de injeção. Assim, para esta finalidade será utilizada uma microssilica comercial, providenciada junto a Sigma-Aldrich, cuja densidade é 2,6 g/cm^3 e com um diâmetro médio D_{50} de 1,524 μm , e uma microemulsão de óleo em água, preparada através da utilização de óleo de silicone e o surfactante Tween 20 (Polissorbato 20), cujo diâmetro médio corresponde a 1,42 μm .

As principais inovações nesta configuração experimental em relação ao trabalho publicado por NGUYEN et al. (2022) são a presença de dutos na região interna da célula radial para medidas de queda de pressão em diferentes regiões, e não apenas as medidas usuais de pressão nos fluxos de entrada e saída da célula, uma maior escala de dimensionamento, mais próxima do encontrado nos campos de petróleo, e ainda, uma melhoria no projeto do difusor de fluxo. Além disso, a célula projetada possui na tampa superior um êmbolo para promover a compactação do pacote de areia de maneira uniforme, e uma tomada de pressão localizada no interior da tela de areia (*sand screen*).

Resultados e Discussão

A construção do módulo radial foi concluída em abril de 2024. Na Figura 2 a seguir podemos conferir o módulo montado no LMFRAT (Laboratório de Mecânica de Fratura), pertencente a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), nesta figura pode-se ter uma ideia das dimensões e do peso da célula radial ($\approx 3000 \text{ kg}$).

Na Figura 3 a seguir podemos ver com mais detalhes os componentes do módulo de maneira separada, a esquerda podemos ver o corpo do módulo, na parte central da Figura 3 temos a tampa do módulo, e por fim, a direita podemos ver a base do módulo. Ainda na direita da Figura 3 pode-se visualizar a região de encaixe da *sand screen* e os furos onde ficarão as sondas para as tomadas de pressão, que será importante para medições de pressão em regiões intermediárias do módulo, somando-se às habituais medições de pressão na linha de entrada e saída de água de injeção do equipamento.

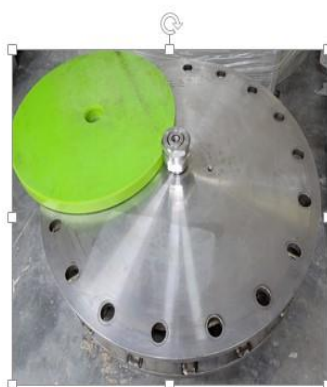
Figura 2: Célula radial montada.



Figura 3: Partes integrantes da célula radial.



Corpo



Tampa Superior



Tampa Inferior

Na Figura 4 podemos ver os componentes da tela de areia (*sand screen*) que será encaixada na base do módulo, cuja finalidade é impedir a passagem de areia para o interior do poço. Na parte superior da Figura 4 pode-se visualizar o elemento filtrante, já na parte inferior pode-se visualizar com mais detalhes o tubo base, com os orifícios que permitem a passagem da água de injeção para o interior da célula radial. Todos os trabalhos de soldagem necessários foram realizados pelo CNPEM (Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais). Finalizando, pode-se verificar na Figura 5 a seguir as conexões preparadas na base do módulo para o encaixe de sensores de pressão, válvulas ou outros periféricos.

Figura 4: Tela de areia fabricada pelo CNPEM.



Figura 5: Base da célula radial com as conexões para encaixe das sondas dos transdutores de pressão.



A célula radial encontra-se no atual momento quase finalizada para realização dos primeiros ensaios para o estudo da queda de injetividade, para tal finalidade está sendo desenvolvido suportes para apoio dos transdutores de pressão e sensores de vazão, e também um pórtico elétrico para realização das etapas de montagem do pacote de areia e manutenção da célula radial. Os sensores de vazão serão posicionados lateralmente no corpo do módulo, de modo a obter a medida da vazão do efluente proveniente da célula em 4 pontos distintos, separados por um ângulo de 90°. Alguns dos resultados esperados para o comportamento da queda de injetividade da célula radial podem ser encontrados no trabalho publicado por NGUYEN et al. (2022).

Conclusões

Neste trabalho foi apresentado o projeto e desenvolvimento de uma nova configuração experimental que permite simular o comportamento de poços injetores de água com configuração de injeção radial, de

modo a estudar primeiramente a queda de injetividade. O meio poroso que será utilizado no equipamento será uma areia de sílica, representando assim reservatórios do tipo não-consolidado, que possuem ainda poucos trabalhos abordados na literatura, e que possuem características diferentes das encontradas em reservatórios do tipo consolidado, amplamente discutido na literatura. Esse dispositivo possui dimensões mais próximas do encontrado no campo, tornando-se assim uma ótima ferramenta para o auxílio de tomada de decisões e estudo dos fenômenos envolvidos nesse tipo de processo.

Agradecimentos

Agradecimentos a Total Energies pelo suporte a este projeto.

Referências Bibliográficas

Bedrikovetsky, P., Tran, T. K., Van den Broek, W. M. G. T., Marchesin, D., Rezende, E., Siqueira, A., Souza, A. L., & Shecaira, F. (2003). Damage characterization of deep bed filtration from pressure measurements. *SPE Production & Facilities*, 18(02), 119–128. <https://doi.org/10.2118/83673-pa>

Frota, R. A., Tanscheit, R., & Vellasco, M. (2022). Fuzzy logic for control of injector wells flow rates under produced water reinjection. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 215(110574), 110574. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110574>

Gomes, V. L. A. (2010). Modelagem e previsão da perda de injetividade em poços canhoneados. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Kalantariasl, A. (2015). Advanced Analytical Models for Well Injectivity Decline. Tese de Doutorado. Australian School of Petroleum. The University of Adelaide, Australia.

Nguyen, T. T., Sulem, J., Muhammed, R. D., Dupla, J.-C., Canou, J., Boero-Rollo, J.-G., & Ochi, J. (2022). An experimental setup with radial injection cell for investigation of fracturing in unconsolidated sand reservoirs under fluid injection. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 213(110362), 110362. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110362>

Ochi, J., J-L, D., Rivet, P., & Lacourie, Y. (1999). External filter cake properties during injection of produced waters. *Proceedings of SPE European Formation Damage Conference*.