

## 5.

### Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros

#### 5.1.

##### Conclusões

O presente trabalho buscou demonstrar a dependência da permeabilidade de rochas produtoras de petróleo no estado de tensão atuante. Foram realizados ensaios, com uma nova célula triaxial verdadeira, em corpos de prova cúbicos dos arenitos Berea, Rio Bonito e Botucatu, com medidas de permeabilidade e sob variação de tensões hidrostáticas e triaxiais verdadeiras.

Durante a produção de um reservatório de petróleo, as variações na poro-pressão provocam variações no estado de tensão, levando a deformações irreversíveis do reservatório, que caracterizam o chamado dano mecânico e que resultam em grandes variações das propriedades físicas dos geomateriais granulares. Um dos mais severos efeitos concentra-se na permeabilidade da rocha, um parâmetro fortemente dependente da geometria do espaço dos poros e fissuras da rocha. Além destes fatores que desempenham um papel relevante na variação da permeabilidade sob tensão, ainda pode-se citar, ao se tratar de arenitos, a quantidade e a resistência da cimentação dos grãos, a mineralogia destes grãos e a geometria e o nível do estado de tensão atuante na rocha. Devido o dano em rocha sedimentar principalmente ocorrer nos contornos dos grãos, são as propriedades dos cimentos dos grãos que mais fortemente controlam a redução da permeabilidade.

Neste trabalho, a geometria do estado de tensão atuante mostrou relevância na magnitude e na variação da permeabilidade. Em todos os ensaios realizados, sob tensão hidrostática, a magnitude da permeabilidade medida foi sempre menor do que a medida sob um nível equivalente de tensão triaxial verdadeira. Com relação à sensibilidade da permeabilidade dos arenitos aos estados de tensão aplicados neste trabalho, foi observada uma maior sensibilidade da permeabilidade ao estado de tensão hidrostático, que por sua vez, provocou maior

variação (redução) da permeabilidade durante o carregamento dos corpos de prova.

Vale ainda ressaltar que durante o carregamento dos corpos de prova, tanto sob tensão hidrostática quanto sob tensão triaxial verdadeira, o arenito Rio Bonito, com menor porosidade e permeabilidade inicial, foi o que apresentou maior sensibilidade à tensão. Contudo, na opinião do autor, isto não é uma regra. Outros fatores, como já citados acima, desempenham papéis importantes no comportamento da permeabilidade de rochas, quando sob tensão.

A histerese de permeabilidade é uma indicação qualitativa da deformação plástica sofrida pelo corpo de prova durante o ciclo de carga e descarga. Neste trabalho, os arenitos ensaiados apresentaram um comportamento de histerese de permeabilidade de moderado a alto, com redução da permeabilidade inicial entre 40 e 65%, depois do descarregamento. Tanto com o arenito Rio Bonito quanto com o Botucatú, maior histerese de permeabilidade foi observada sob tensão triaxial verdadeira, indicando que este estado de tensão induz maior dano mecânico à rocha.

Com relação à evolução do comportamento anisotrópico da permeabilidade, não foi observada nenhuma tendência geral. Com o arenito Rio Bonito, tanto sob tensão hidrostática quanto sob tensão triaxial verdadeira, a anisotropia de permeabilidade horizontal aumentou com o aumento do nível de tensão atuante. Já com o arenito Botucatú, um comportamento contrário foi observado, a anisotropia de permeabilidade diminuiu com o aumento do nível de tensão atuante.

Na opinião do autor, um maior número de ensaios é necessário para estudar o comportamento anisotrópico da permeabilidade na direção horizontal. Visto que, em função de um problema de excesso de perda de carga, identificado no equipamento de ensaio, apenas dois ensaios (um com o arenito Rio Bonito e outro com o arenito Botucatú) deste trabalho apresentaram medidas de permeabilidade nas duas direções horizontais perpendiculares entre si (X e Y). Contudo, foi observada uma anisotropia de permeabilidade entre estas duas direções, o que pode ter importantes implicações práticas no campo, para avaliações petrofísicas, especialmente na perfuração de poços horizontais. Estes, por sua vez, devem ser orientados ortogonalmente à máxima permeabilidade horizontal, para atingir o potencial de influxo máximo. Uma orientação otimizada de poço horizontal aumenta a sua performance.

Permeabilidade dependente de tensão tem um efeito significativo na performance tanto de um poço individual quanto de um reservatório. Estimativas de reservas de hidrocarbonetos podem ser significativamente alteradas, quando a dependência da permeabilidade em relação à tensão é usada no estudo da performance do reservatório. Isto pôde ser comprovado, através dos resultados dos ensaios deste trabalho, que apresentaram grandes variações de permeabilidade dos arenitos, em função da variação do estado de tensão atuante.

Como uma solução prática para rochas-reservatório sensíveis à tensão, ou seja, onde o dano mecânico pode ocorrer, a poro-pressão no reservatório deve ser mantida tão próxima quanto possível à pressão inicial, através de um projeto de injeção de fluido. Desta forma, previne-se o aumento da tensão efetiva e as conseqüências que este aumento pode provocar.

A contribuição que a Mecânica das Rochas pode dar à engenharia de recursos naturais depende, em parte, da confiabilidade das medidas das propriedades de rochas, obtidas no laboratório, que por sua vez, consiste no quanto os ensaios de laboratório reproduzem as condições *in situ*. A nova célula triaxial verdadeira, utilizada no presente trabalho, apresenta a oportunidade de gerar mais realismo nos resultados dos ensaios, que mostraram significativa influência da tensão na permeabilidade das rochas ensaiadas.

A quantidade de fatores que podem ter relevância na variação da permeabilidade de rochas-reservatório de petróleo (por exemplo, geometria do espaço dos poros e fissuras da rocha, quantidade e resistência da cimentação dos grãos, a mineralogia destes grãos, nível de tensão atuante, etc.), além de resultados contraditórios de alguns trabalhos já realizados, suportam a conclusão do autor de que não existe um único relacionamento entre permeabilidade e tensão. Desta forma, o que pode ser concluído é que os estudos de dependência da permeabilidade de rochas sobre o estado de tensão atuante ainda se encontram em um estágio inicial, havendo um campo de estudo muito vasto para ser explorado, com necessidades de desenvolvimentos tanto na parte experimental quanto na computacional.

## 5.2.

### Sugestões

Como já mencionado anteriormente, a célula triaxial cúbica, utilizada neste trabalho, ainda não se encontra em sua versão final. Estão planejadas, portanto, algumas melhorias, dentre elas: o aumento da capacidade máxima de carga de 41 MPa para 100 MPa e a instalação de mecanismos para medidas da deformação volumétrica e da permeabilidade vertical das rochas ensaiadas. Pretende-se, com estas melhorias na célula triaxial, a determinação de um modelo constitutivo tensão-deformação-permeabilidade de rochas-reservatório.

Desta maneira, fica aqui a sugestão para a execução de ensaios similares ao executados no presente trabalho, contudo, com o monitoramento da deformação volumétrica e da evolução da permeabilidade dos corpos de prova, durante variação do estado de tensão atuante, até níveis mais elevados de tensão. Além disso, sugere-se executar tais ensaios, tanto em arenitos de alta porosidade quanto em arenitos de baixa permeabilidade, para que possa ser observada a diferença de comportamento.

No atual trabalho, apenas um ensaio foi realizado com medida da permeabilidade sob variação de  $J_{2D}$ , mantendo um mesmo valor de  $I_1$ . Seria interessante a realização de mais ensaios deste tipo, pois assim, pode ser verificada a influência isolada das tensões desviadoras na variação da permeabilidade das rochas.

Por fim, ensaios para o estudo da sensibilidade da permeabilidade vertical à tensão poderiam ser realizados. Para estes, e até mesmo para os outros tipos de ensaios sugeridos, fica a observação da relevância de serem utilizados corpos de prova com informação a respeito da orientação de campo. Desta maneira, os resultados apresentam ainda mais confiabilidade e realismo.