

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Influência dos Modelos Constitutivos Mecânicos na Análise Acoplada Hidro-mecânica de Reativação de Falha.

AUTORES:

Julliana de P. Valadares Fernandes¹, Leonardo José do N. Guimarães¹, Igor Fernandes Gomes¹,
Leonardo Cabral Pereira²

INSTITUIÇÃO:

¹ Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, ² CENPES/PDR/GR

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

Influência dos Modelos Constitutivos Mecânicos na Análise Acoplada Hidro-mecânica de Reativação de Falha.

Abstract

Injection and production of fluids cause changes of pressure, temperature and saturation that affect the state of stress in oil reservoirs, resulting in porosity and permeability variations. It is therefore a coupled hydro-geomechanical problem. The fault reactivation problem considers that shear (with dilatancy), tension or compression of filling material may cause changes in hydraulic properties. Reservoir simulation with geomechanical coupling allows realistic modeling of fault reactivation, that can influence in the production of oil due to pressure and fluid loss in the reservoir. A finite element procedure is presented that models fluid flow in a deformable reservoir crossed by a geological fault in a coupled and totally implicit manner. Whether the fault is activated or not is governed by the hydro-mechanical boundary conditions of the problem and by the modeling of the constitutive behavior of involved materials. Two alternative mechanical constitutive models were adopted to represent the behavior of the filling material of the fault: elastoplastic Mohr-Coulomb (dilatancy considered) and continuum isotropic damage model (micro-cracking considered), that lead to different responses of the reservoir-fault system. It was observed that when the continuum damage model is used reactivation chiefly tends to occur inside reservoir. On the other hand, when the Mohr-Coulomb model is used activation propagates through reservoir and adjacent rocks. Simulation of constitutive behavior of sealing faults is essential to the prediction of the possibility of reactivation especially during waterflooding with reservoir pressurization, which may cause economic as well as environmental damages. In oil reservoirs with fault reactivation possibility, definition of maximum bottom hole pressure of the injectors during waterflooding can only be safely conducted based on a coupled hydro-geomechanical analysis tool with realist modeling of the constitutive behavior of the materials.

Introdução

Define-se falha como sendo uma superfície de fratura, ao longo da qual ocorreu um movimento relativo entre os dois blocos, e pode ser proveniente de uma extensão, distensão ou torção. Em geral apresenta uma superfície de ruptura plana (ou praticamente plana) semelhante à obtida em ensaios laboratoriais de amostras submetidas a tensões compressivas.

As falhas correspondem, tipicamente, a uma deformação em regime frágil e podem ocorrer de dimensões em escala microscópica até a proporção de grandes falhas regionais, com extensões na escala de centenas ou de milhares de quilômetros (Gomes, 2009).

Logo, o movimento de falhas no interior e na vizinhança do reservatório é induzido, num processo de produção de petróleo, pela redução da poro-pressão e seu efeito sobre a tensão efetiva normal e ruptura por cisalhamento, e também é função direta do estado tensional atuante no campo e nos planos de falha. Quando ocorre a reativação, a permeabilidade da falha é aumentada permitindo o fluxo de fluido através dela, comprometendo a integridade hidráulica das rochas capeadoras que selam o reservatório. Outro aspecto decorrente da reativação de falha e abertura de fraturas é o surgimento de novas zonas de fluxo através de formações capeadoras de alta capilaridade e baixa permeabilidade.

Portanto, a reativação da falha selante pode resultar em problemas como a redução da vazão de produção de hidrocarbonetos (Bentley & Barry, 1992; Knai & Knipe, 1998; Al-Busafi *et al*, 2005), em função da perda de pressão e até de fluido pela falha, danos às instalações de produção e até problemas de exsudação de petróleo na superfície do fundo do mar, problemas de subsidência da superfície acima do campo, etc. Isto releva a necessidade de uma previsão precisa do efeito de injeção/produção de fluidos sobre o comportamento mecânico das rochas e da falha, bem como a influência da falha

reativada no regime de fluxo de hidrocarboneto no interior do reservatório (impacto na produção). Neste trabalho, a simulação do comportamento constitutivo da falha selante foi essencial para a predição da possibilidade de reativação, especialmente durante o escoamento de água (com alta pressurização do reservatório), onde para isso consideraram-se duas alternativas de modelos constitutivos mecânicos para representar o comportamento do material de preenchimento da falha: o modelo de Mohr-Coulomb (considerando a dilatância) e o modelo de dano isotrópico (considerando micro-fissuras), que conduz a respostas diferentes do sistema reservatório-falha. Estes modelos foram implementados no código de elementos finitos CODE_BRIGHT, adotando um esquema de acoplamento seqüencial implícito.

Metodologia

Na formulação adotada, o problema geomecânico tem o comportamento tensão-deformação da rocha dependente das tensões atuantes e dos campos de pressões e saturações dos fluidos. Já no problema de fluxo, as permeabilidades e porosidades da rocha são atualizadas em cada intervalo de tempo. Trata-se aqui de resolver, considerando pequenas deformações e temperatura constante, equações de balanço de massa e de momento para cada fase, onde o problema mecânico é definido pela equação de equilíbrio de tensões (Equação 1), considerando leis constitutivas e equações complementares, e o problema hidráulico é caracterizado pela equação de balanço de massa da fase fluida adotando a lei de Darcy.

$$\nabla \sigma + \mathbf{b} = 0 \quad (1)$$

Onde σ é o tensor de tensões totais e $\mathbf{b}$ é o vetor volumétrico de forças de corpo. O balanço de massa da fase ϕ é representado por:

$$\frac{D^s(\rho^\alpha \phi S_v^\alpha)}{Dt} + \nabla \cdot (\rho^\alpha \mathbf{q}_v^\alpha) + \rho^\alpha \phi S^\alpha \nabla \cdot \mathbf{u} + f^\alpha = 0 \quad (2)$$

Onde D^s/Dt é a derivada do tempo com relação a fase sólida, ρ^α é a densidade da fase, ϕ é a porosidade, ϕ^α o volume da fase α sobre o volume de todas as fases fluidas (aqui seu valor é igual a 1 tendo em vista que o fluxo é monofásico), $\mathbf{q}_v^\alpha$ é o fluxo de Darcy da fase α , e f^α um termo de massa de fonte/sumidouro da fase α .

As invariantes do problema são o vetor de deslocamento nodal $\mathbf{u}$, a pressão de líquido nodal PL (neste artigo, apenas a água é considerada dentro dos poros). Todas as outras variáveis ϕ , ρ^α , S_v^α e $\mathbf{q}_v^\alpha$ são relacionadas como incógnitas por meio das relações constitutivas. O propósito deste artigo é empregar uma atenção particular as equações constitutivas mecânicas e hidráulicas, que serão discutidas nos parágrafos seguintes.

Equações Hidráulicas Constitutivas. A equação constitutiva principal para o problema hidráulico é a lei de Darcy generalizada:

$$\mathbf{q}_v^\alpha = \frac{\mathbf{K}_i k_r^\alpha}{\mu^\alpha} (\nabla p^\alpha + \rho^\alpha \mathbf{g}) \quad (3)$$

Onde $\mathbf{K}_i$ é o tensor de permeabilidade, k_r^α é a permeabilidade relativa da fase, que é uma função do grau de saturação da fase, e μ^α é a viscosidade da fase.

Modelos Constitutivos Geomecânicos. O primeiro modelo adotado foi o modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb. Neste tipo de modelo, os incrementos de tensão e deformação são relacionados por:

$$d\sigma = \mathbf{D}^{ep} d\epsilon \quad (4)$$

Onde $d\sigma$ é o incremento de tensão efetiva, $\mathbf{D}^{ep}$ é a matriz constitutiva elastoplástica e $d\epsilon$ é o incremento de deformação. O Tensor de tensões é determinado pelo princípio das tensões efetivas:

$$d\sigma = d\sigma + m dP_\alpha \quad (5)$$

Onde $d\sigma$ é o increment de tensão total e m é um tensor auxiliar, na qual os valores das componentes normais é 1 e das cisalhantes é zero.

O conjunto de equações para a função de fluência e de Mohr-Coulomb são apresentados asseguir:

$$F(\sigma, h) = J - \left(\frac{c'}{\tan \varphi'} + p' \right) G(\theta) = 0 \quad \rightarrow \quad G(\theta) = \frac{\sin \varphi'}{\cos \theta + \sin \theta \sin \varphi'} \quad (6)$$

Onde $F(\sigma, h)$ é a função que caracteriza o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. J é a tensão desviadora, p' é a tensão efetiva média, c' é a coesão efetiva, φ' é o ângulo de atrito efetivo e θ é o ângulo de Lode.

O segundo modelo constitutivo geomecânico é o modelo de dano isotrópico, onde a degradação do material é dada pela evolução das micro-fissuras (Alvorado, Oliver e Huespe, 2003). O modelo de dano relaciona o estado variável do comportamento mecânico (ε, σ) para o material degradado com estado variável $(\tilde{\varepsilon}, \tilde{\sigma})$ para um material virgem (não fissurado). A tensão efetiva de dano pode ser definida como:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-d} \quad (7)$$

Onde a variável de dano d reduz a rigidez do material, estabelecendo a relação entre o módulo de Young do material virgem (E^0) e o do meio degradado (E^d):

$$d = 1 - \frac{E^d}{E^0} \quad (8)$$

A equação constitutiva do modelo de dano isotrópico é dada por:

$$\sigma = (1-d)C^0 : \varepsilon = C^0 : \varepsilon - d \times C^0 : \varepsilon = \sigma^0 - \sigma^d \quad (9)$$

Onde o tensor constitutivo secante do dano isotropico $C^d = (1-d)C^0$ reduz em $(1-d)$ a rigidez elástica do material.

A variável de dano é uma função das variáveis internas q e r (Alvorado, Oliver e Huespe, 2003 e Oliver, 2000):

$$d(r) = 1 - \frac{q(r)}{r} \quad \Rightarrow \quad q = (1-d)r \quad (10)$$

E uma lei linear para a evolução do dano foi adotada dando a evolução de q como função de r :

$$Q = \begin{cases} r_0 & r \leq r_0 \\ r_0 + H(r-r_0) & r > r_0 \end{cases} \quad \text{onde } r_0 = \frac{\sigma_y}{\sqrt{E^0}} \quad (11)$$

Na equação (11) σ_y é a tensão inicial para o dano num ensaio de compressão uniaxial e H o parâmetro de carregamento do material ($H = \partial q / \partial r$).

Acoplamento Hidro-Geomecânico. Uma característica importante da formulação usada é a ligação entre a variação da porosidade e mudanças na permeabilidade intrínseca. A variação na porosidade é computada usando a equação de balanço do sólido, dada por:

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{(1-\phi)}{\rho^s} \frac{D\rho^s}{Dt} + (1-\phi)\dot{\varepsilon}_v \quad (12)$$

Onde ε_v é a deformação volumétrica (Bear, 1988).

A determinação da permeabilidade como uma função da deformação da rocha é uma função complexa que depende do regime elástico ou inelástico no qual o material é sujeito, onde duas leis simplificadas de permeabilidade foram adotadas associadas ao modelo elastoplástico de Mohr-

Coulomb e o modelo de dano. Para o modelo de dano isotrópico uma lei exponencial foi adotada como uma função da porosidade (ϕ) e a variável de dano (d):

$$k^d = k_0 \exp[b(\phi - \phi_0)] \exp[cd] \quad (17)$$

Onde k_0 é o tensor de permeabilidade inicial, ϕ_0 a porosidade inicial b e c parâmetros dos materiais.

Para o modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb uma lei linear, limitando o valor da permeabilidade é adotada como uma função da deformação plástica cisalhante, que é diretamente relacionada a deformação plástica volumétrica para um dado ângulo de dilatação.

Resultados e Discussão

Um exemplo de aplicação é apresentado aqui através de uma análise hidro-geomecânica de um reservatório de óleo cortado por uma falha. Considerou-se apenas um poço injetor operando a uma pressão de fundo de poço (BHP) variando de 3 a 6 MPa. Estes valores de BHP foram adotados para duas análises, usando o modelo de Mohr-Coulomb e de dano isotrópico para o material de preenchimento da falha. O domínio do problema e a malha de elementos finitos são mostrados na **Fig. 1**.

O poço injetor está à 278m da falha (lado esquerdo), com uma profundidade de -2160m. O *overburden* e *underburden* são rochas impermeáveis e a falha está inicialmente selante, com uma permeabilidade muito baixa. O estado de tensão e pressão inicial de fluido foram obtidos aplicando o estado geoestático, considerando a tensão efetiva nula na superfície do fundo do mar. A malha de elementos finitos é composta por 1161 nós e 1092 elementos. A compressibilidade do fluido e a densidade são $1,0 \times 10^{-4} \text{ 1/MPa}$ e $1001,7 \text{ Kg/m}^3$. As propriedades do material adotados na análise são mostrados na **Tabela 1**. Na **Fig. 2** os elementos de análise são detalhados.



Fig. 1 – Descrição do Caso sintético e a Malha de elementos finitos.

Tabela 1 – Propriedades da Rocha

Propriedades da Rocha	Overburden	Underburden	Reservatório	Falha
Módulo de Young (MPa)	6780	10800	15860	8000
Coesão (MPa)	2,15	3,63	6,00	0,80
Ângulo de Atrito	26°	29°	31°	23,5°
Permeabilidade (m ²)	1×10^{-25}	1×10^{-25}	5×10^{-12}	5×10^{-18}
Porosidade	0,27	0,25	0,32	0,30

Na **Fig. 3** observam-se as deformações plásticas cisalhantes em diferentes elementos da falha como uma função da pressão de injeção, considerando que o comportamento da falha é governado pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Pode ser visto que para pressões de injeção acima de

3,5MPa, o elemento 1056 (reservatório em profundidade) é plastificado, aumentando a permeabilidade e permitindo fluxo de fluido através deste. Por outro lado, os elementos do fundo do mar (1041 e 1067) são plastificados apenas para pressões de injeção acima de 5MPa.

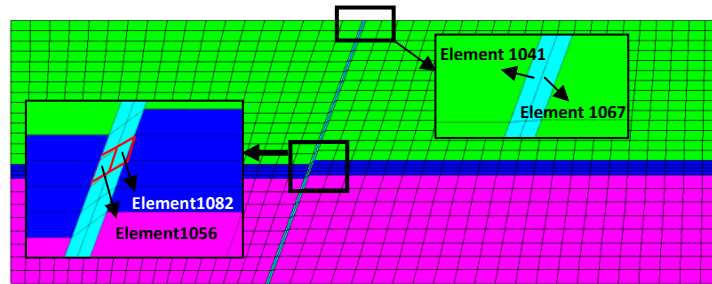


Fig. 2 – Seleção dos elementos para análise.

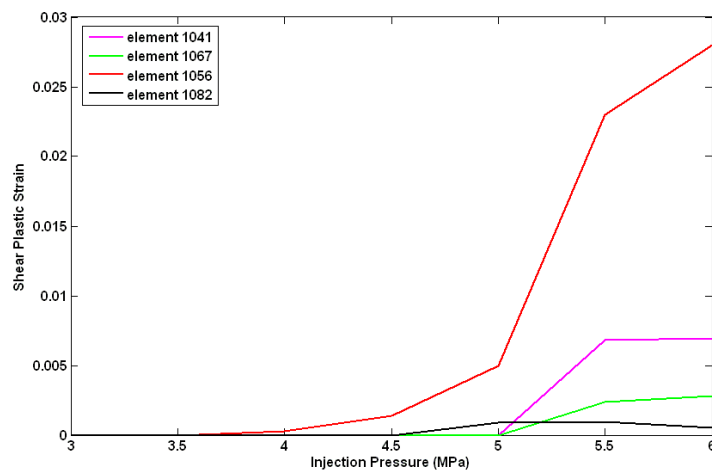


Fig. 3 – Análise de Sensibilidade: plastificação como função dos níveis da pressão de injeção.

A distribuição das deformações plásticas cisalhantes (Figs. 4a e 4c) e as permeabilidades finais (Figs. 4b e 4d) para níveis diferentes de pressão mostram apenas a reativação parcial da falha para o caso onde BHP = 5MPa, e para BHP = 6MPa, as falhas foram completamente reativadas (todos os elementos plastificaram).

Considerando agora o modelo de dano isotrópico para o material da falha, observa-se que quando há o acréscimo de pressão e a redução da tensão efetiva em alguns elementos dentro da falha, as propriedades elásticas (rigidez) são degradadas e, devido à evolução das microfissuras, a permeabilidade do material é aumentada. Pela análise realizada para alguns níveis de pressurização como as de Mohr-Coulomb, foi observado que (Fig. 5) apenas para níveis de BHP acima de 4,5MPa, o elemento 1056 sofreu dano, aumentando a sua permeabilidade e, finalmente, permitindo o fluxo de fluido através da falha. Pelo o modelo de Mohr-Coulomb este nível de pressurização foi de 3,5MPa. Por outro lado, para os elementos do topo da falha, o nível de pressão necessária para a reativação nesta zona foi o mesmo que o no modelo de Mohr-Coulomb. Logo, verifica-se que no modelo de dano a reativação tende a ocorrer dentro do reservatório se propaga rapidamente pelo meio da falha.

Pela comparação do modelo de Mohr-Coulomb, Fig. 6 mostra as distribuições da variável de dano (zona da falha danificada) e a permeabilidade (como resultado da degradação do material) pelas análises feita com o modelo de dano isotrópico, para pressão de injeção de 5 e 6MPa.

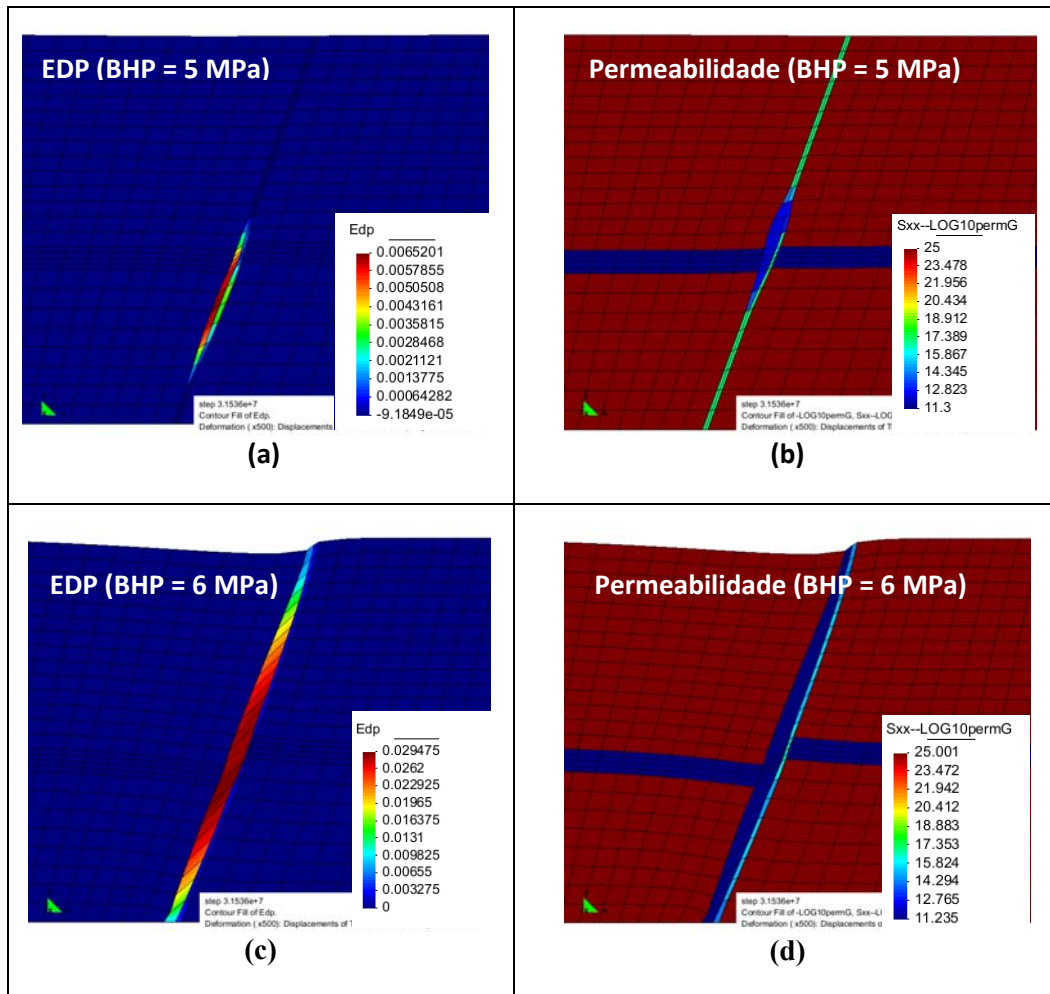


Fig. 4 – Reativação da falha adotando modelo de Mohr-Coulomb: (a) deformação plástica cisalhante (EDP) para BHP=5 MPa; (b) permeabilidade para BHP=5 MPa; (c) deformações plásticas cisalhantes (EDP) para BHP=6 MPa; (d) permeabilidade para BHP=6 MPa.

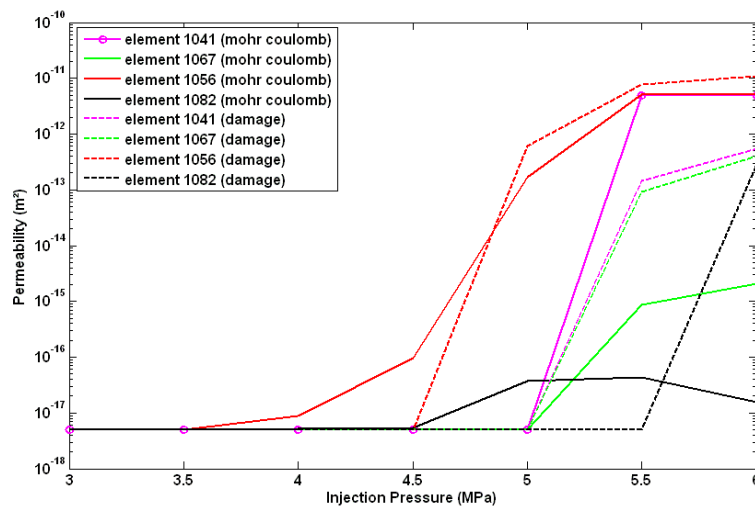


Fig. 5 – Comparação da variação da permeabilidade com a pressão de injeção para os modelos de Mohr Coulomb e Dano Isotrópico.

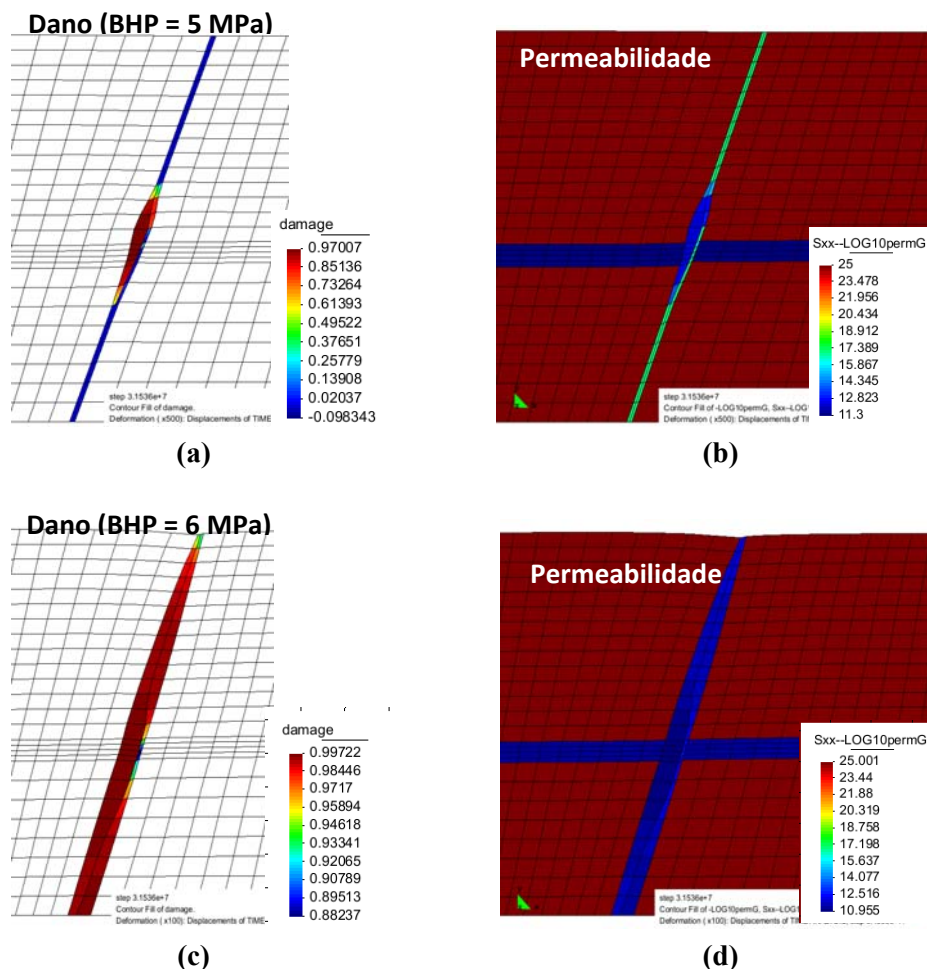


Fig. 9 – Reativação da falha pelas análises do modelo de dano isotrópico: (a) dano para BHP=5 MPa; (b) permeabilidade para BHP=5 MPa; (c) dano para BHP=6 MPa; (d) permeabilidade para BHP=6 MPa.

Conclusões

Neste artigo, dois modelos constitutivos mecânicos foram usados para representar o comportamento do material de preenchimento da falha: Mohr-Coulomb elastoplástico (considerada a dilatância) e o modelo de dano isotrópico (considerando micro-fissura), que levam as diferentes respostas do sistema falha-reservatório. Foi observado que quando o modelo de dano isotrópico é usado a reativação tende a ocorrer na falha, na faixa interna no reservatório. Por outro lado, quando o modelo de Mohr-Coulomb é usado a ativação ocorre no reservatório e das rochas adjacentes.

Finalmente, a simulação do comportamento constitutivo da falha selante é essencial para a predição da reativação especialmente durante o escoamento de água com a pressurização do reservatório, na qual pode causar danos econômicos e ambientais.

Agradecimentos

Aos autores agradecem ao apoio financeiro para esta pesquisa dada pelo CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) e Petrobrás.

Referências Bibliográficas

- ALVARADO, E. S.; OLIVER, X.; HUESPE, A. *Contributions to the continuum modelling of strong discontinuities in two-dimensional solids*. March, 2003. 172 p. Monograph CIMNE, nº 72. UPC, Barcelona, 2003.
- OLIVER, J. *On the discrete constitutive models induced by strong discontinuity kinematics and continuum constitutive equations*. International Journal of Solids and Structures, v. 37, p.7207-7229, 2000.
- BEAR, J. *Dynamics of fluids in porous media*. New York : Dover Publications, INC., 1988. 784p.
- BENTLEY, M.R., BARRY, J.J. *Representation of fault sealing in a reservoir simulation: Cormorant block IV*, UK North Sea. SPE 22667. 1992.
- AL-BUSAFI, B., FISHER, Q. J. & HARRIS, S. D. *The importance of incorporating the multiphase flow properties of fault rocks into production simulation models*. Marine and Petroleum Geology, 22. pp. 365-374. 2005.
- KNAI, T.A., KNIPE, R.J. *The impact of faults on fluid flow in the Heidrun Field*, in: Jones, G., Fisher, Q.J., Knipe, R.J. (Eds.), *Faulting, Fault Sealing and Fluid Flow in Hydrocarbon Reservoirs* Geological Society, London, Special Publications 147, pp. 269–282. 1998.
- GOMES, I. F., *Implementação em Elementos Finitos das Equações de Pressão e Saturação para Simulação de Fluxo Bifásico em Reservatórios de Petróleo Deformáveis*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2009.