

# Modelagem do Comportamento Tensão-deformação e Análise da Variação de Permeabilidade de Zonas de Falha em Travertinos

Rodrigo dos Santos Maia Corrêa

Petrobras/PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, rodrigo.correa@petrobras.com.br

Raquel Quadros Velloso

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, raquelveloso@puc-rio.br

Melissa Cristina Duque Nogueira Kiewiet

Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil

Flávia de Oliveira Lima Falcão

Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil

**RESUMO:** Uma pesquisa realizada em conjunto entre a Petrobras e o *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO), com foco no estudo experimental e numérico do processo de reativação de falhas em reservatórios carbonáticos, teve como base uma série de ensaios mecânicos nos laboratórios do CSIRO, na Austrália. Nesta pesquisa, com o objetivo de gerar zonas de falha artificiais, blocos de travertino (11 X 15 X 24 cm), entre outros materiais, foram submetidos a ensaios de cisalhamento direto com deslocamentos de 20 mm e 120 mm, formando assim feições distintas, análogas a zonas de dano e núcleo de falhas geológicas, respectivamente. Os corpos-de-prova cilíndricos obtidos a partir da amostragem destes blocos, constituídos tanto por rocha intacta como pela zona de falha, foram submetidos a ensaios triaxiais multi-estágios com medição de permeabilidade na direção axial, com confinamentos variáveis de 3, 6, 12, 20 e 30 MPa. O presente trabalho avalia a adequação do modelo Mohr-Coulomb com endurecimento em representar o comportamento tensão-deformação de materiais de zona de falha em travertino observado nos ensaios de laboratório e determina os parâmetros que melhor representam o comportamento experimental, além de analisar a variação da permeabilidade com a deformação. Para isso, é utilizado o método de elementos finitos, através do *software* ABAQUS®, para modelar os corpos-de-prova e simular o comportamento tensão-deformação de dois dos ensaios triaxiais realizados. Ao final do estudo pode-se determinar os parâmetros de rocha de falha que melhor ajustam ao dados experimentais. Além disso, foram determinados multiplicadores de permeabilidade que representam as variações de permeabilidade esperadas a partir das deformações volumétricas nesses materiais. Esse conhecimento tem importante contribuição na previsibilidade do comportamento hidromecânico de falhas geológicas, cujo equilíbrio é alterado com a exploração de reservatórios de petróleo.

**PALAVRAS-CHAVE:** travertino, falha, elementos finitos, permeabilidade, comportamento hidromecânico.

## 1 INTRODUÇÃO

As maiores descobertas de jazidas de petróleo das últimas décadas no Brasil aconteceram em reservatórios de rochas carbonáticas, localizadas na bacia de Santos. No entanto, a atividade de exploração de tais jazidas não é trivial, pois estes

reservatórios são complexos e apresentam grande quantidade de falhas geológicas. A partir da grande demanda em se obter conhecimento a respeito da transmissibilidade e estabilidade das falhas, frente a variações de poro-pressão derivadas dos processos de produção de hidrocarbonetos e injeção de água ou gás nos

reservatórios de petróleo (Segall, 1989; Nacht *et al.*, 2010), a Petrobras e o *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) firmaram uma pesquisa com foco na investigação das falhas, utilizando para os ensaios experimentais amostras de diferentes tipos de grainstones sintéticos e também de travertinos, este último proveniente de uma região na Itália (Kiewiet, 2015).

Com o objetivo de gerar zonas de falha artificiais em travertino, blocos com dimensões 11 x 15 x 24 cm foram submetidos a ensaios de cisalhamento direto com deslocamentos de 20 mm e 120 mm, formando assim duas feições distintas, respectivamente semelhantes a zonas de dano e núcleo de falhas geológicas, considerando como base para esta comparação características apresentadas em Caine *et al.* (1996) para cada um destes entes geológicos. Os corpos-de-prova cilíndricos obtidos a partir da amostragem dos blocos são constituídos tanto por rocha intacta como por zona de falha (Figuras 1 e 2), e foram submetidos a ensaios triaxiais multi-estágios, com medição de permeabilidade na direção axial, com confinamentos totais variáveis de 3, 6, 12, 20 e 30 MPa, com pressão de poros constante e igual a 1 MPa.

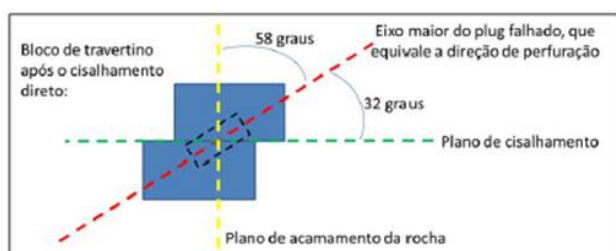


Figura 1. Esquema de perfuração do bloco cisalhado para extração do corpo de prova cilíndrico contendo parte da falha gerada. Cores: Azul=bloco de travertino cisalhado; Linha amarela=direção do acamamento do travertino; linha verde=direção do plano de cisalhamento; linha vermelha=direção do eixo maior do corpo de prova falhado (Kiewiet, 2015).

Este artigo dá continuidade a uma sequência de trabalhos realizados por Falcão *et al.* (2014), Nogueira *et al.* (2013a, b, c, d), Kiewiet (2015) e Kiewiet *et al.* (2016) no âmbito desta pesquisa sobre falhas, cujo objetivo é obter parâmetros mecânicos correspondentes às regiões de zona de falha em rochas carbonáticas, a fim de melhorar

a representação do comportamento tensão-deformação e predição do risco de reativação de falhas no reservatório, em conjunto com avaliação da variação de permeabilidade com a deformação.

Durante o desenvolvimento do presente trabalho, foram simulados modelos tridimensionais através do método de elementos finitos (MEF) como forma de comparar a resposta do modelo Mohr-Coulomb com endurecimento e parâmetros simulados, aos dados medidos em laboratório, em conjunto com a análise da variação da permeabilidade dos corpos de prova cilíndricos ensaiados.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Escolha e metrologia dos corpos de prova cilíndricos utilizados na modelagem

Para que houvesse uma abrangência maior dos resultados, foram escolhidos 2 corpos de prova, dentre os 9 de travertino disponíveis, ambos com geometria cilíndrica, sendo um representativo de material de zona de dano gerado por deslocamento cisalhante de 20 mm, chamado corpo de prova 1 (CP1) e outro representativo de material de núcleo de falha, oriundo de deslocamento cisalhante de 120mm, chamado corpo de prova 3 (CP3) (Figura 2).



Figura 2. CP3 após ensaio triaxial.

Imagens tomográficas (Figura 3) disponíveis para as amostras em estudo, que detalham a geometria das estruturas geradas durante os ensaios de cisalhamento direto, foram utilizadas

para fornecer dimensões, ângulos e espessura das zonas de falha para cada um dos corpos de prova posteriormente modelados. As características dos corpos de prova são descritas na Tabela 1.

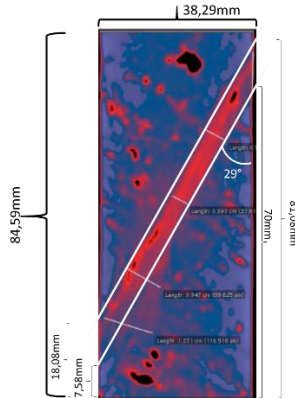


Figura 3. Imagem tomográfica do CP3.

Tabela 1. Características gerais dos corpos de prova. RI=Rocha intacta; ZD=Zona de dano; NF=Núcleo falha

| CP  | Diâmetro(mm) | Altura(mm) | Peso(g) | Material |
|-----|--------------|------------|---------|----------|
| CP1 | 37,42        | 95,71      | 255,45  | RI+ZD    |
| CP3 | 38,29        | 84,59      | 257,33  | RI+NF    |

Para modelar os dois corpos de prova (CP1 e CP3), foi utilizado o método de elementos finitos através do *software* ABAQUS®. As etapas serão descritas a seguir.

## 2.2 Modelagem dos ensaios através do MEF

### 2.2.1 Geometria

Como cada corpo de prova cilíndrico considerado apresenta dimensões diferentes (Tabela 1), foram construídas duas geometrias baseadas nas medidas de cada um deles.

Cada geometria cilíndrica foi gerada utilizando a função de revolução, onde, a partir de uma seção retangular, construiu-se por rotação desta seção um cilindro nas dimensões dos corpos de prova. Como em cada corpo de prova há regiões com propriedades bem distintas, relativas a rocha intacta e a rocha de falha, optou-se por separá-las em regiões diferentes nos modelos (Figura 4) como forma de atribuir propriedades adequadas a cada região. Sendo assim, foram realizadas partições no modelo tridimensional através das medidas da posição do plano de falha obtidas a partir da imagem tomográfica.

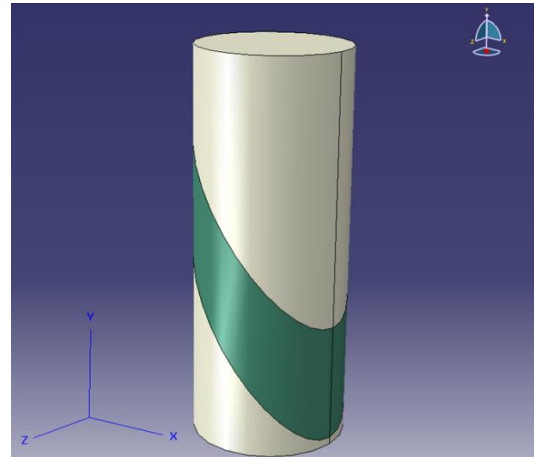


Figura 4. Geometria modelada do CP1 e regiões particionadas. Cinza=Rocha intacta; Verde=Zona de falha.

### 2.2.2 Materiais

As propriedades mecânicas atribuídas aos materiais de rocha intacta foram as definidas em Kiewiet (2015) para amostras de travertino intacto com acamamento inclinado. No que diz respeito às propriedades das zonas de falha, foram inicialmente consideradas as propriedades de falha calculadas por Kiewiet (2015) para estes materiais e, posteriormente, seguiu-se com um processo iterativo de ajuste destes valores, de forma que o resultado da simulação numérica de cada corpo de prova modelado, considerando as deformações e tensões para rocha intacta e rocha de falha conjuntamente, se aproximasse ao máximo do comportamento tensão-deformação observado em laboratório para os respectivos ensaios. O modelo constitutivo utilizado na modelagem foi o elástico linear associado ao de plasticidade de Mohr-Coulomb com endurecimento. O endurecimento adotado foi o aumento do intercepto coesivo proporcionalmente linear à deformação plástica. Os comandos utilizados no ABAQUS® para tais modelos constitutivos foram \*ELASTIC, \*MOHR COULOMB, \*MOHR COULOMB HARDENING.

### 2.2.3 Malha de elementos finitos

Utilizando elementos tetraédricos com aproximadamente 5 mm de aresta e a geometria previamente modelada para cada corpo de prova, foram geradas malhas para os dois corpos de prova (Figura 5). Os elementos utilizados foram

do tipo tetraédrico quadrático de 10 nós (elemento C3D10 da biblioteca do ABAQUS®). Um resumo das características das malhas pode ser observado na Tabela 2.

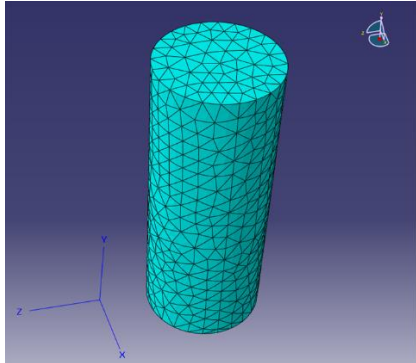


Figura 5. Malha construída para o modelo do CP1.

Tabela 2. Características gerais das malhas construídas.

| Malha | Nro. Elem | Nós   | Tipo      | Aresta (mm) |
|-------|-----------|-------|-----------|-------------|
| CP1   | 7042      | 10579 | Tetraedro | 5           |
| CP3   | 5744      | 9330  | Tetraedro | 4           |

#### 2.2.4 Condições de contorno e iniciais e etapas da modelagem

As etapas da simulação se dividiram na imposição de condições de contorno e iniciais, além de etapas posteriores relacionadas ao carregamento e descarregamento das amostras.

##### 2.2.4.1 Condições de contorno e iniciais

Foram adotadas as seguintes condições de contorno (Figura 6a):

- A) Base do modelo com movimento na direção Y (vertical) e rotações iguais a zero;
- B) Nó no centro da base do CP com restrição de movimento e rotação em todas as direções;
- C) Ponto na borda da base do CP com restrição de movimento nas direções Y(vertical) e X(horizantal), além de restrição à rotação em todas as direções.

Quanto à condição inicial de poropressão, foi adotado 1 MPa. A modelagem realizada foi puramente mecânica, e não considerou outros efeitos como fluxo no meio poroso ou temperatura.

##### 2.2.4.2 Etapas de carregamento e descarregamento

Para que os ensaios multi-estágio fossem corretamente modelados, optou-se por representar na modelagem cada etapa dos experimentos separadamente. Resumidamente, a Tabela 3 demonstra as 6 etapas utilizadas.

Tabela 3. Etapas da simulação dos modelos.

| Etapa | Ação                                 |
|-------|--------------------------------------|
| 1     | Confinamento efetivo de 2MPa         |
| 2     | Aplicação de tensão desviadora       |
| 3     | Descarregamento da tensão desviadora |
| 4     | Confinamento efetivo de 19MPa        |
| 5     | Aplicação de tensão desviadora       |
| 6     | Descarregamento da tensão desviadora |

As cargas confinantes foram aplicadas em todas as superfícies do modelo, enquanto as cargas desviadoras foram aplicadas somente no topo. Optou-se por modelar somente os estágios com confinamento total de 3MPa e 20MPa, por necessidade de simplificação da modelagem.

#### 2.2.5 Tratamento dos dados e exportação

Foram criados dois conjuntos de elementos, um no centro (Figura 6b) e outro no topo do modelo (Figura 6c), nos quais foram calculadas as deformações radiais e tensões axiais, respectivamente. Utilizou-se também um conjunto de nós no topo do modelo (Figura 6d), no qual calculou-se a deformação axial, com base no deslocamento destes. A deformação volumétrica foi calculada a partir da eq.1.

$$\varepsilon_{vol} = 2\varepsilon_{radial} + \varepsilon_{axial} \quad (1)$$

Para exportar dados resultantes da simulação, utilizou-se um *script* na linguagem Python.

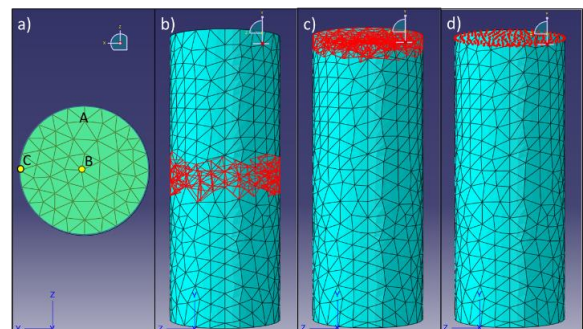


Figura 6. a) Regiões com condições de contorno aplicadas. b) Elementos utilizados no cálculo da deformação radial. c) Elementos utilizados no cálculo da tensão axial. d) Nós utilizados no cálculo da deformação axial.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Resultados da modelagem do CP1

A partir de diversas simulações do modelo do CP1, composto por rocha intacta e rocha de falha representativa de zona de dano, foram obtidos valores ajustados para as propriedades de zona de dano que, em conjunto com as de rocha intacta, resultam em um comportamento tensão-deformação simulado que melhor se ajusta aos dados experimentais.

As curvas tensão-deformação numéricas construídas para o confinamento total de 3 MPa considerando as propriedades de rocha intacta e o melhor ajuste de propriedades de zona de dano são apresentadas nas Figuras 7 e 8.

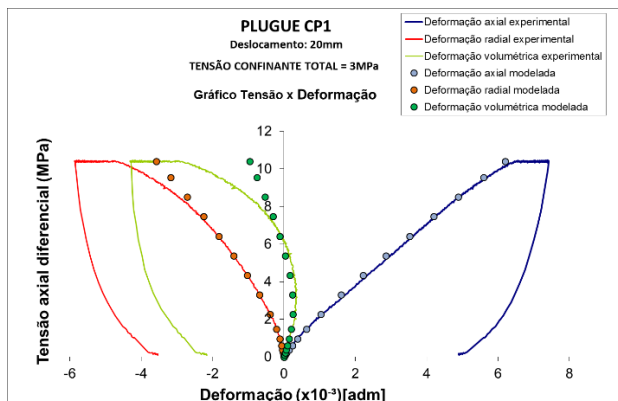


Figura 7. Gráfico tensão-deformação comparativo entre modelo e experimento do CP1. Confinamento total = 3 MPa.

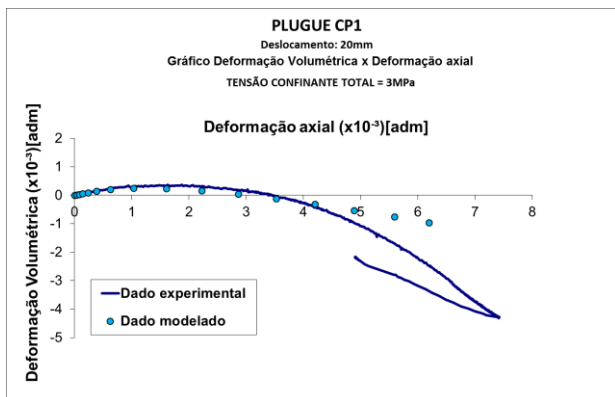


Figura 8. Gráfico deformação volumétrica – deformação axial, comparativo entre modelo e experimento do CP1. Confinamento total = 3 MPa.

Também foram realizados ajustes para as propriedades de zona de dano no confinamento

total de 20 MPa. As curvas tensão-deformação numéricas resultantes, considerando o conjunto rocha intacta e rocha de falha ajustada, são demonstrados a seguir nas Figuras 9 e 10, juntamente com as curvas experimentais.

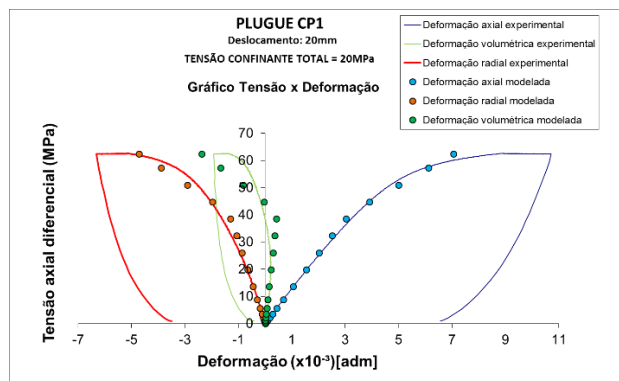


Figura 9. Gráfico tensão-deformação comparativo entre modelo e experimento do CP1. Confinamento total = 20 MPa.

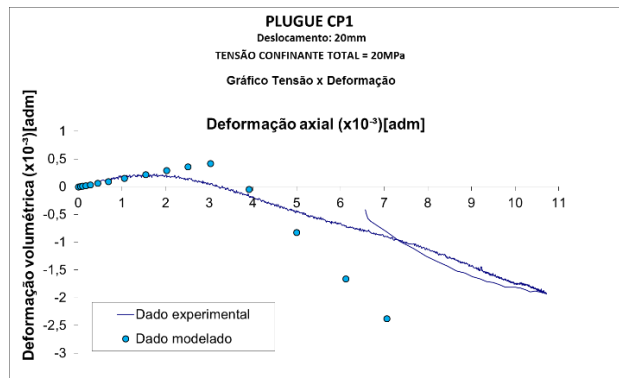


Figura 10. Gráfico deformação volumétrica – deformação axial comparativo entre modelo e experimento do CP1. Confinamento total = 20 MPa.

A tabela 4 apresenta os valores utilizados para ajustar o modelo do CP1.

Tabela 4. Valores de propriedades utilizados no ajuste do experimento do CP1. E=Mod Elasticidade;  $\nu$ =Razão de Poisson;  $\Psi$ =Âng. dilatância; c=coesão;  $\phi$ =Âng. atrito.

| Região          | E (GPa) | $\nu$ | $\Psi$ (°) | c (MPa) | $\phi$ (°) |
|-----------------|---------|-------|------------|---------|------------|
| Intacta         | 48,55   | 0,33  | 8,9        | 11,08   | 15,08      |
| Z. Dano (3MPa)  | 0,68    | 0,02  | 3          | 0,1     | 20         |
| Z. Dano (20MPa) | 3,95    | 0,16  | 3          | 0,1     | 20         |

### 3.2 Resultados da modelagem do CP3

A rocha de falha do CP3, gerada a partir de um deslocamento cisalhante de 120 mm, corresponde ao núcleo da falha. O melhor ajuste obtido para as curvas de tensão-deformação numéricas construídas para o confinamento de 3 MPa considerando as propriedades de núcleo de falha ajustadas, e também as de rocha intacta, são apresentadas nas Figuras 11 e 12, juntamente com as curvas experimentais.

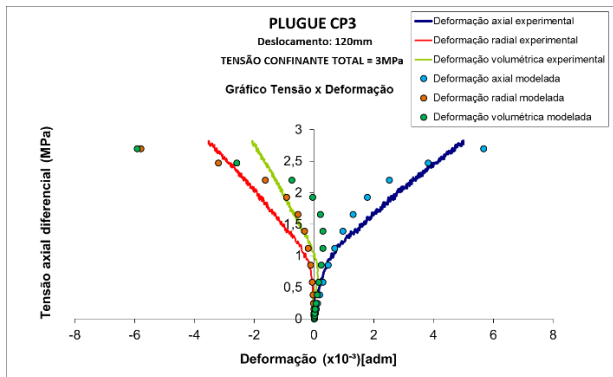


Figura 11. Gráfico tensão-deformação comparativo entre modelo e experimento do CP3. Confinamento total = 3 MPa.

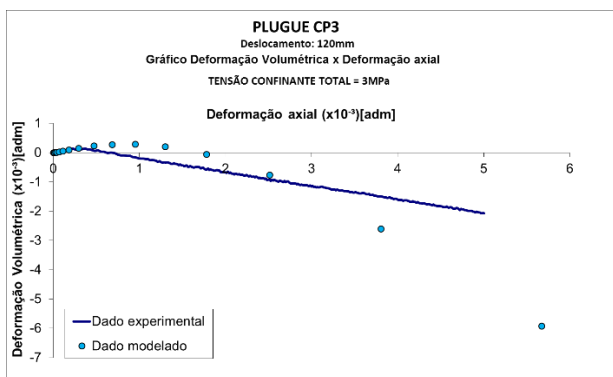


Figura 12. Gráfico deformação volumétrica – deformação axial comparativo entre modelo e experimento do CP3. Confinamento total = 3 MPa.

As curvas de tensão-deformação numéricas construídas considerando as propriedades de rocha intacta e de rocha de falha (estas últimas ajustadas) para o confinamento de 20 MPa são apresentados nas Figuras 13 e 14.

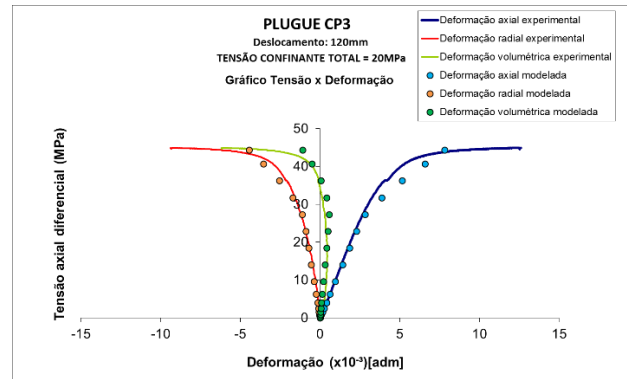


Figura 13. Gráfico tensão-deformação comparativo entre modelo e experimento do CP3. Confinamento total = 20 MPa.

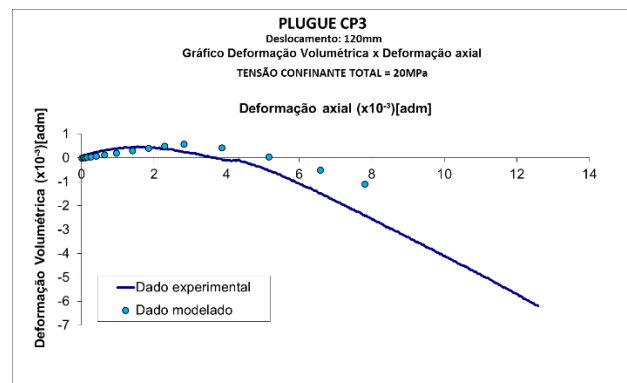


Figura 14. Gráfico deformação volumétrica – deformação axial comparativo entre modelo e experimento do CP3. Confinamento total = 20 MPa.

A Tabela 5 mostra os parâmetros utilizados para se obter o ajuste em ambos confinamentos.

Tabela 5. Valores de propriedades utilizados no ajuste do experimento do CP3

| Região           | E (GPa) | $\nu$ | $\Psi$ (°) | c (MPa) | $\phi$ (°) |
|------------------|---------|-------|------------|---------|------------|
| Intacta          | 48,55   | 0,33  | 8,9        | 11,08   | 15,08      |
| N. falha (3MPa)  | 0,175   | 0,05  | 17         | 0,1     | 20         |
| N. falha (20MPa) | 0,8     | 0,03  | 11         | 0,1     | 20         |

### 3.3 VARIAÇÕES DE PERMEABILIDADE

Os ensaios triaxiais realizados nos corpos de prova modelados foram feitos com aplicação de fluxo de fluidos ascendente e medição de permeabilidade em condições hidrostáticas e de tensão diferencial máxima. Tais ensaios são importantes para avaliar se a reativação da falha pode modificar a permeabilidade medida através desta.

Os resultados dos ensaios laboratoriais de permeabilidade realizados nos corpos de prova modelados são ilustrados na Figura 15. Pode-se observar que, com o aumento da tensão confinante, a permeabilidade axial da amostra diminui, possivelmente devido à compactação do espaço poroso, e consequente diminuição das gargantas de poros, impactando assim fortemente a permeabilidade.

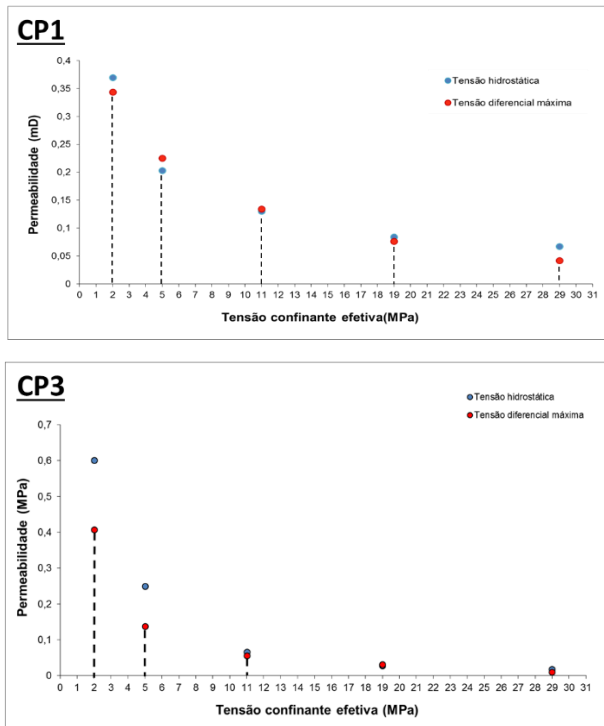


Figura 15. Resultado das medições laboratoriais de permeabilidade nos corpos de prova modelados.

Observa-se também que há uma dependência da permeabilidade com o estado de tensões aplicado. Nos corpos de prova estudados, a permeabilidade é diminuída ainda mais, na maior parte das vezes, ao se aplicar uma tensão diferencial e, consequentemente, tensão cisalhante sobre o plano de falha. Tal observação também pode ser explicada pelo efeito da compactação do espaço poroso, que impacta a permeabilidade uma vez que o cisalhamento imposto no plano de falha diminui a facilidade que os fluidos têm para percolarem entre os poros e atravessarem o plano de falha. No entanto, é importante observar que este experimento avaliou a permeabilidade numa combinação de direções paralela e transversal ao

plano de falha( $K_i$ ) (Figura 16). Apesar de o experimento ter sido realizado com fluxo axial à amostra, não se pode afirmar, que em casos reais de reativação de falha, a permeabilidade ao longo da falha( $K_y$ ) seja reduzida, como o resultado experimental sugere. Existe a possibilidade de, com o aumento da tensão cisalhante, se observar incremento de permeabilidade na direção  $K_y$ , decorrente de fraturamento e dilatância do material, efeito este não captado neste experimento.

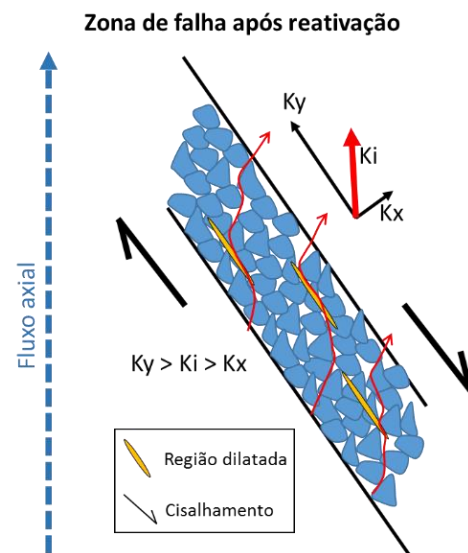


Figura 16. Detalhamento do fluxo na zona de falha pós-reativação

No projeto conduzido em parceria entre Petrobras e CSIRO, foram obtidas uma série de medidas de permeabilidade (Kiewiet *et al.*, 2016), e considerando os 9 corpos de prova cilíndricos de travertino disponíveis para os deslocamentos de 20 e 120 mm, além do estado de tensão em que foi feita a medida, se hidrostático ou desviador, um total 38 medidas de permeabilidade foram analisadas neste presente estudo. O gráfico comparativo entre as permeabilidades obtidas em cada ensaio pode ser observado na Figura 17. Pode-se dizer que a maioria das amostras se situa na região de redução de permeabilidade durante o carregamento da amostra.

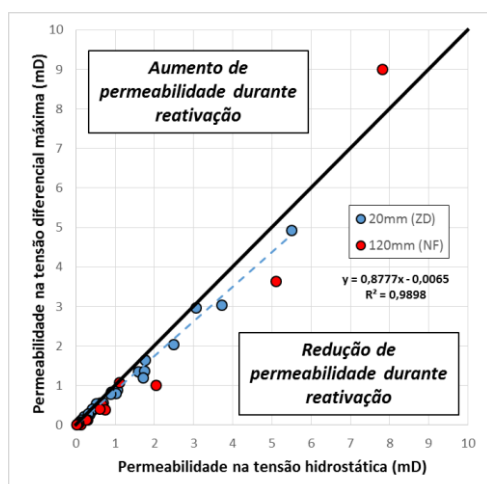


Figura 17. Gráfico comparativo de permeabilidade durante estados de tensão hidrostática e diferencial máxima. ZD=Zona de dano; NF=Núcleo de falha

Por conta da relação teórica entre permeabilidade e deformação volumétrica, análises de correlação entre estas duas variáveis foram realizadas. Apesar da deformação volumétrica utilizada aqui ser a deformação média do corpo de prova, representado pelo conjunto rocha intacta + rocha de falha, entende-se que o material da rocha intacta afetou pouco os resultados de medição de deformação volumétrica devido a sua alta rigidez e, portanto, pode-se assumir que os valores de deformação volumétrica obtidos no ensaio do corpo de prova, contendo estes dois materiais, são em maior parte devidos à deformação da rocha de falha. Na Figura 18 são apresentados os resultados de variação da permeabilidade com a deformação volumétrica para (a) amostras representativas de núcleo de falha, i.e. 120 mm de cisalhamento e (b) amostras representativas de zona de dano, i.e. 20 mm de cisalhamento. Considerando as amostras representativas do núcleo de falha (Figura 18a), pode-se observar uma relação mais forte entre a deformação volumétrica e a variação de permeabilidade. A eq. 2 foi obtida a partir da equação da reta melhor ajustada ao gráfico na Figura 18a, e calcula o multiplicador de permeabilidade apropriado para correção da permeabilidade da falha resultante da deformação da rocha de falha devido ao carregamento axial.

$$\text{mult. permeabilidade} = 0.0458\varepsilon_{vol} + 0,8255 \quad (2)$$

Os resultados relativos às amostras representativas de zona de dano indicam baixa relação entre a deformação volumétrica e a variação da permeabilidade, diferentemente do observado nas amostras de núcleo de falha. No entanto, a partir do gráfico da Figura 18b, podemos observar que a redução da permeabilidade na maioria das amostras de zona de dano se limita a 80% da permeabilidade original, de modo que este valor pode ser utilizado como uma referência de variação máxima de permeabilidade na zona de dano.

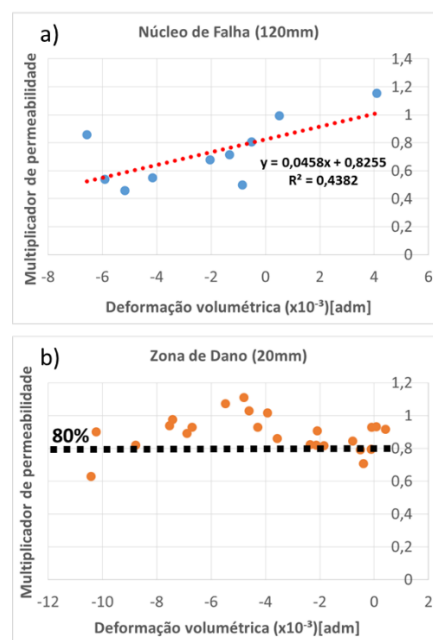


Figura 18. Gráficos de multiplicador de permeabilidade x deformação volumétrica. a) amostras representativas de núcleo de falha; b) amostras representativas de zona de dano.

## 4 CONCLUSÕES

Foi apresentada metodologia para modelagem do comportamento tensão-deformação de zonas de falha em travertino. Com o resultado do estudo, entende-se ter-se obtido um ajuste razoável dos dados simulados aos dados experimentais, comprovando assim a aplicabilidade do MEF e do modelo Mohr-Coulomb com endurecimento na previsão do comportamento de zonas de falha em travertinos. Pode-se afirmar, também, que foi possível calcular, através da modelagem dos corpos de prova, os parâmetros mecânicos mais

apropriados para cada tipo de rocha de falha em confinamento distintos, e que a necessidade de utilizar parâmetros diferentes para tensões de confinamento diferentes, demonstra o comportamento não-linear que estes materiais podem ter, tópico que será abordado em futuras publicações.

Quanto aos ensaios de permeabilidade estudados, observa-se que demonstraram, consistentemente, uma resposta de diminuição da permeabilidade através da falha com o aumento das tensões desviadora e hidrostática. Isso é uma observação importante, tendo em vista a preocupação com que a reativação de falhas nos reservatórios de petróleo, e consequente variação na permeabilidade, traz com relação à vazamentos de petróleo no fundo do mar, além de variações na transmissibilidade da falha entre compartimentos da mesma jazida. Ressalta-se, no entanto, que a mudança de permeabilidade ao longo da falha, não foi medida separadamente nos experimentos realizados, e, portanto, sugere-se realizar experimentos que meçam exclusivamente a permeabilidade ao longo da falha à medida que se modifica o estado de tensões no corpo de prova, visando a complementação do entendimento acerca das variações na permeabilidade das falhas durante a alteração do estado de tensões atuante.

## AGRADECIMENTOS

À PUC-Rio pela bolsa de estudos concedida, à Petrobras pelos dados disponibilizados para a pesquisa, e a todos os profissionais que direta ou indiretamente colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Caine, J. S.; Evans, J. P.; Forster, C. B. (1996) Fault zone architecture and permeability structure, *Geology*, v. 24, n. 11, p. 1025-1028.
- Dassault Systèmes Simulia. Abaqus 6.9-2 (2009) *Abaqus. Analysis User's Guide*.
- Falcao, F. O. L.; Nogueira, M. C. D.; Lima, C. C.; Meurer, G. B.; Clennell, B.; Delle Piane, C.; Giwelli, A.; Raimon, J.; Richetti, M.; Esteban, L.; Kiewiet, L. & Kager, S. (2014) Sumário das Entregas associadas ao Marco Crítico de outubro de 2014 do projeto "Reativação de Falhas", Relatório, *Petrobras/Cenpes*.
- Kiewiet, M. C. D. N. (2015) *Comportamento Hidromecânico de zona de Falha em Travertino: Estudo experimental e Numérico sobre o impacto da Reativação estrutural na produção de reservatórios*, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 652p.
- Kiewiet, M. C. D. N.; Soares, A. C.; Falcao, F. O. L.; Junior, L. P. B.; Leal, R. A. F.; Lima, C. C.; Meurer, G. B. (2016) Sumário de propriedades hidromecânicas para rochas intactas e rochas de falha em travertinos *Petrobras/Cenpes*.
- Nacht, P. K.; Oliveira, M. F. F.; Roehl, D. M.; Costa, A. M. (2010) Investigation of geological fault reactivation and opening. *Mecânica computacional*, v. XXIX, p. 8687-8697.
- Nogueira, M. C. D.; Falcao, F. O. L.; Lima, C. C.; Meurer, G. B.; Giwelli, A.; Raimon, J.; Richetti, M.; Esteban, L.; Kiewiet, L. & Kager, S. (2013) Ensaios de Cisalhamento Direto em Amostras de travertino, Relatório, *Petrobras/Cenpes*.
- Nogueira, M. C. D.; Falcao, F. O. L.; Lima, C. C.; Clennell, B.; Giwelli, A.; Ahmed, S.; Zhang, Y.; Cleary, P.; Lemiale, V.; Pereira, G.; Raimon, J.; Richetti, M.; Sarout, J.; Esteban, L.; Maney, B.; Kiewiet, L. & Kager, S. (2013) Sumário das entregas associadas ao marco crítico de junho de 2013 do projeto "Reativação de falhas", Relatório, *Petrobras/Cenpes*.
- Nogueira, M. C. D.; Falcao, F. O. L.; Lima, C. C.; Kiewiet, L.; Kager, S.; Firms, S.; Giwelli, A.; Raimon, J.; Esteban, L.; Dillinger, A.; Maney, B.; Clennell, B.; Soares, A. C. & Barroso, E. V. (2013) Caracterização mecânica básica de Amostras de travertino, Relatório, *Petrobras/Cenpes*.
- Nogueira, M. C. D.; Kiewiet, L. H.; Kager, S.; Firms, S.; Giwelli, A.; Raimon, J.; Esteban, L.; Dillinger, A.; Maney, B.; Clennell, B.; Soares, A. C. & Barroso, E. V. (2013) Rock mechanics test campaign for the mechanical characterization of travertine rocks from the region of Central Apennines, Italy, Relatório, *Petrobras/Csiro*.
- Segall, P. (1989) Earthquakes triggered by fluid extraction. *Geology*, v. 17, p. 942-946.