



**Rodrigo dos Santos Maia Corrêa**

**Modelagem do comportamento tensão-deformação de zonas de falhas em travertinos através do método dos elementos finitos**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Raquel Quadros Velloso

Rio de Janeiro  
Julho de 2016



**Rodrigo dos Santos Maia Corrêa**

**Modelagem do comportamento  
tensão-deformação de zonas de  
falhas em travertinos através do  
método dos elementos finitos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof<sup>a</sup>. Raquel Quadros Velloso**

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Dr<sup>a</sup>. Flávia de Oliveira Lima Falcão**

PETROBRAS

**Dr<sup>a</sup>. Melissa Cristina Duque Nogueira Kiewiet**

CENPES / PETROBRAS

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de julho de 2016.

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

### **Rodrigo dos Santos Maia Corrêa**

Graduou-se em geologia na UFRJ em 2009, realizando pesquisa na área de Geologia Estrutural. Trabalhou na Perenco Petróleo e Gás do Brasil entre 2009 e 2010, na equipe de exploração e desde 2010 atua na área de reservatórios da Petrobras. Atualmente se envolve com modelagem 3D de reservatórios e com o desenvolvimento da produção de reservatórios carbonáticos na região do pré-sal da Bacia de Santos.

#### Ficha Catalográfica

Corrêa, Rodrigo dos Santos Maia

Modelagem do comportamento tensão-deformação de zonas de falhas em travertinos através do método dos elementos finitos / Rodrigo dos Santos Maia Corrêa ; orientadora: Raquel Quadros Velloso. – 2016.

93 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Travertino. 3. Falha. 4. Elementos finitos. 5. Permeabilidade. 6. Comportamento hidromecânico. I. Velloso, Raquel Quadros. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Para Sheila, Reinaldo, Júlia e Camila,  
Pelo apoio, confiança e incentivo.

## Agradecimentos

Inicialmente agradeço à minha família, à minha mãe Sheila, ao meu pai Reinaldo, à minha irmã Júlia e à minha esposa Camila, por todo apoio, suporte, incentivo, cobrança, carinho e paciência, durante todo o mestrado e pela compreensão nos momentos em que estive ausente devido ao trabalho dedicado à este mestrado. Muito obrigado!

Agradeço aos meus amigos pelas palavras de incentivo durante todo o curso de pós-graduação, tanto aos velhos amigos, quanto aos novos amigos que fiz durante o curso de mestrado na PUC. A ajuda durante os estudos em conjunto foi muito importante para dar certo.

Agradeço imensamente à Melissa e a Flávia, que me ajudaram desde o início, cedendo tempo, atenção, reunindo dados, sempre dispostas. Sem vocês não teria conseguido.

Agradeço à Prof<sup>a</sup>. Raquel, por ter sido sempre tão atenciosa e por sempre guardar um tempo para me ajudar diversas vezes com as dificuldades encontradas durante a pesquisa deste mestrado. Raquel, muito obrigado pela disponibilidade e discussões enriquecedoras!

Agradeço ao Prof<sup>o</sup>. Vargas, pela participação e ajuda nas discussões técnicas realizadas na pesquisa de mestrado.

Agradeço ao Tiago Homem e ao Thiago Pessoa por terem me apoiado no início e durante o mestrado, flexibilizando meu horário de trabalho, de modo que eu sempre pudesse assistir às aulas e cumprir os requisitos necessários na pós-graduação. Também agradeço a todos os colegas da Petrobras, que sempre me apoiaram e foram compreensíveis em minhas ausências do escritório quando necessárias.

Por fim, agradeço à PUC-Rio e à CAPES pela bolsa de estudos concedida e à Petrobras pelos dados utilizados nesta dissertação.

## Resumo

Corrêa, Rodrigo dos Santos Maia; Velloso, Raquel Quadros. **Modelagem do comportamento tensão-deformação de zonas de falhas em travertinos através do método dos elementos finitos**. Rio de Janeiro, 2016, 93 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A partir da amostragem de blocos de travertino cisalhados contendo materiais representativos de zona de dano e/ou núcleo de falhas geológicas, corpos-de-prova cilíndricos constituídos tanto por rocha intacta como por rocha de falha, foram submetidos a ensaios triaxiais multi-estágios com medição de permeabilidade na direção axial, com confinamentos efetivos variáveis de 2, 5, 11, 19 e 29 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. 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 são determinados os parâmetros de rocha de falha que melhor ajustam aos dados experimentais. Além disso, são determinados fatores 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.

## Abstract

Corrêa, Rodrigo dos Santos Maia; Velloso, Raquel Quadros (Advisor). **Modelling the stress-strain behaviour of fault zones in travertines using finite element method**. Rio de Janeiro, 2016, 93 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

From sheared travertine blocks, containing both damage zone and/or gouge representative materials, cylindrical plugs were obtained containing both intact rock and fault materials, and were submitted to triaxial tests with axial permeability measurements in effective confinement pressures of 2, 5, 11, 19 e 29 MPa. This work assess the suitability of Mohr-Coulomb hardening model to represent stress-strain behaviour of travertine fault zone materials observed in laboratory measurements and determines the parameters that best fit the experimental behavior. Furthermore, a permeability variation analysis is conducted. For this, finite element method is used through ABAQUS® software, to model the plugs and to simulate the stress-strain behaviour of three triaxial tests. It is possible after all, to determine rock parameters that adjust to experimental results. Besides that, permeability multipliers are determined to adjust permeability changes due to volumetric deformations in these materials. This knowledge is an important contribution to forecast hidromechanical behavior of geological faults that may have stability altered by hydrocarbon exploitation in petroleum reservoirs.

## Keywords

Travertines; faults; finite elements; permeability; hidromechanical behavior.

## Sumário

1.Introdução	19
1.1 Objetivo	20
1.2 Organização do trabalho	20
2. Revisão Bibliográfica	22
2.1 Zonas de falha	22
2.2 Reativação de falhas	27
2.3 Modelos constitutivos	29
2.3.1 Elasticidade	29
2.3.2 Plasticidade	32
2.3.2.1 Superfície de escoamento	33
2.3.2.2 Fluxo Plástico	37
2.3.2.3 Endurecimento	39
2.4 Método de Elementos finitos (MEF)	42
2.5 Estudos experimentais	46
3. Material e método	50
3.1 Material	50
3.2 Método	51
3.2.1 Interpretação e medição das imagens tomográficas	51
3.2.2 Modelagem numérica dos ensaios através do MEF	53
3.2.2.1 Geometria	53
3.2.2.2 Propriedades	54
3.2.2.3 Malha de elementos finitos	56
3.2.2.4 Condições de contorno e etapas de simulação	57
3.2.2.4.1 Condição inicial	57
3.2.2.4.2 Etapas de carregamento e descarregamento	58
3.2.2.5 Tratamento dos dados e exportação	58
4.Resultados	61
4.1 Interpretação e medição das imagens de tomografia	61
4.2 Modelagem numérica dos ensaios através do MEF	65

4.2.1 Resultados da modelagem do corpo de prova 1	65
4.2.1.1 Resultados da modelagem do corpo de prova 1 com malha fina	69
4.2.2 Resultados da modelagem do corpo de prova 2	70
4.2.3 Resultados da modelagem do corpo de prova 3	74
4.3 Comentários sobre o resultado dos ajustes dos modelos e ensaios analisados	77
4.4 Observações acerca da permeabilidade através da falha	79
5. Conclusões	86
6. Referências bibliográficas	88
Apêndice A. <i>Script</i> em Python utilizado para exportar os dados do ABAQUS®	

## Lista de Figuras

- Figura 1** - Bloco diagrama das regiões da zona de falha de Punchbowl, California – EUA (modificado de Chester & Logan, 1986). 23
- Figura 2** - Foto e interpretação de uma zona de falha formada em rocha carbonática. Toscana, Itália. Molli et al., (2010). 24
- Figura 3** - Bloco diagrama ilustrando os regimes tectônicos de formação de falhas, propostos em 1951 por Anderson.  $S_v$ =Tensão Vertical;  $S_{Hmax}$ =Tensão horizontal máxima;  $S_{Hmin}$ =Tensão horizontal mínima (modificado de Zoback, 2007). 25
- Figura 4** - Esquema do experimento realizado por Riedel no início do Sec.XX. (Fossen, 2010). a) Configuração do experimento antes do cisalhamento. b) Configuração do experimento após o cisalhamento, mostrando as fraturas-R. 26
- Figura 5** - Conjunto de estruturas subsidiárias geradas a partir do cisalhamento realizado no experimento de Riedel (modificado de Davis & Reynolds, 1996). 26
- Figura 6** – Diagramas Mohr-Coulomb para: a) falha reativada durante depleção; b) falha reativada durante injeção; c) uma falha aberta durante injeção. (modificado de Nacht et al., 2010). 28
- Figura 7** - Curva tensão deformação de um arenito cimentado (Modificado de Zoback, 2007). 32
- Figura 8** - Representação do critério de Coulomb no espaço  $\tau \times \sigma$  (Davis & Selvadurai, 2002). 34

- Figura 9** – Imagem em perspectiva da superfície de escoamento, definida pelo critério de Coulomb, no espaço das tensões principais e eixo diagonal do estado de tensões hidrostático. (Modificado de Davis & Selvadurai, 2002) 35
- Figura 10** – Seção no plano octaédrico da superfície de escoamento, definida pelo critério de Coulomb, no espaço das tensões principais. (Davis & Selvadurai, 2002) 35
- Figura 11** – “End cap” no espaço das tensões principais. (modificado de Davis & Selvadurai, 2002) 36
- Figura 12** – Superfície de escoamento completa. Nesta superfície as rupturas por cisalhamento, compactação e tração estão definidas. (modificado de Fjaer et al., 2008). 37
- Figura 13** – Gráfico ilustrando a regra da normalidade. 38
- Figura 14** - Diferença entre os comportamentos perfeitamente elástico (a) e com endurecimento (b) (Modificado de Davis & Selvadurai, 2002). 40
- Figura 15** - Diferença entre endurecimento isotrópico e endurecimento cinemático (modificado de Davis & Selvadurai, 2002) 41
- Figura 16** - Gráfico com as envoltórias de escoamento e envoltória de ruptura plotadas. 42
- Figura 17** - Elementos tridimensionais simples e quadráticos mais comuns (Logan, 2007). 44
- Figura 18** – Foto da pedreira de onde as amostras de travertino foram retiradas. A estrela destaca a posição aproximada onde os blocos foram retirados. (Kiewiet, 2015) 47

- Figura 19** – Imagem de microtomografia da rocha de falha gerada no laboratório através do ensaio de cisalhamento direto. (Falcão et al., 2014) 48
- Figura 20** – Esquema de perfuração do bloco cisalhado para extração do corpo de prova 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. (Kiewiet, 2015) 48
- Figura 21** – Fluxograma com as etapas da pesquisa realizada por Kiewiet, 2015. 49
- Figura 22** – Foto do CP1, após ensaios. Notar fraturas no corpo de prova. 51
- Figura 23** – Foto do CP2, antes do ensaio. Notar o núcleo de falha (cor mais clara) cruzando a amostra (Falcão et al., 2014). 51
- Figura 24** – Foto do CP3, após ensaios. Notar extremidade quebrada (Falcão et al., 2014). 51
- Figura 25** – Imagem de tomografia computadorizada de raio-x do CP1 antes do ensaio triaxial. Notar fraturas cruzando a zona de falha. 52
- Figura 26** – Imagem de tomografia computadorizada de raio-x do CP3 antes do ensaio triaxial. 52
- Figura 27** – Modelo 3D do CP1. Escuro=Zona de falha; Claro=Rocha intacta 54
- Figura 28** - Modelo 3D do CP1, indicando as regiões onde as propriedades de rocha intacta e rocha de falha foram utilizadas. 55

- Figura 29** – Malha de elementos finitos gerada para o CP1. 56
- Figura 30** – Malha refinada de elementos finitos gerada para o CP1. 57
- Figura 31** – 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. 60
- Figura 32** – Medições feitas sobre imagem de tomografia computadorizada de raio-x do CP1 antes do ensaio triaxial. Notar fraturas cruzando a zona de falha. 61
- Figura 33** – Medições feitas sobre imagem de tomografia computadorizada de raio-x do CP2 antes do ensaio triaxial. Notar na cor vermelha o núcleo da falha contido no corpo de prova. 62
- Figura 34** – Medições feitas sobre imagem de tomografia computadorizada de raio-x do CP3 antes do ensaio triaxial. 62
- Figura 35** – Interpretação da imagem de tomografia, pré ensaio de reativação, do corpo de prova 2. Cores preta: Maior gradiente. Cores Brancas: Menores gradientes. 64
- Figura 36** – Interpretação da imagem de tomografia, pré ensaio de reativação, do corpo de prova 1. Cores preta: Maior gradiente. Cores Brancas: Menores gradientes. 65
- Figura 37** – Curvas tensão-deformação experimentais do CP1 e de amostras similares resultantes de ensaios triaxiais com confinamentos de 3 MPa (A) e 20 MPa (B). 66

- Figura 38** – Gráfico tensão-deformação comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP1 (Zona de dano + Rocha intacta), para o confinamento de 3 MPa. 67
- Figura 39** – Gráfico deformação volumétrica-deformação axial comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP1 (Zona de dano + Rocha intacta), para o confinamento de 3 MPa. 67
- Figura 40** – Gráfico tensão-deformação comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP1 (Zona de dano + Rocha intacta), para o confinamento de 20 MPa. 68
- Figura 41** - Gráfico deformação volumétrica-deformação axial comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP1 (Zona de dano + Rocha intacta), para o confinamento de 20 MPa. 68
- Figura 42** – Gráfico tensão-deformação comparativo do resultado da simulação do modelo com malha grossa e com malha fina. 70
- Figura 43** – Curvas tensão-deformação do CP2 (Núcleo de falha + Rocha intacta) e de amostras similares para confinamentos de 3 MPa (A) e 20 MPa (B). 71
- Figura 44** – Imagem tomográfica do CP2, após o ensaio triaxial de reativação, com detalhe na região onde provavelmente ocorreu colapso de fraturas. 72
- Figura 45** – Imagem do CP2 indicando as regiões de rocha intacta e de falha. 73
- Figura 46** – Imagem do resultado da tensão axial (MPa) advinda da simulação realizada no CP2. 73

- Figura 47** – Gráfico tensão-deformação comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP3 (Núcleo de falha + Rocha intacta), para o confinamento de 3 MPa 74
- Figura 48** – Gráfico deformação volumétrica-deformação axial comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP3 (Núcleo de falha + Rocha intacta), para o confinamento de 3 MPa. 75
- Figura 49** – Gráfico tensão-deformação comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP3 (Núcleo de falha + Rocha intacta), para o confinamento de 20 MPa. 75
- Figura 50** – Gráfico deformação volumétrica-deformação axial comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP3 (Núcleo de falha + Rocha intacta), para o confinamento de 20 MPa. 76
- Figura 51** - Envoltórias de ruptura dos materiais de falha dos corpos de prova CP1 e CP3 calculadas com base na tensão de ruptura. 78
- Figura 52** – Resultado das medições de permeabilidade nos corpos de prova, nos estados de tensão hidrostático e desviadora máxima (modificado de Kiewiet et al. 2016) 80
- Figura 53** – Detalhamento hipotético do fluxo na zona de falha pós-reativação. 82
- Figura 54** – Gráfico comparativo de permeabilidade durante estados de tensão hidrostático e desviadora máxima. ZD=Zona de dano; NF=Núcleo de falha. 83
- Figura 55** – Gráfico comparativo de permeabilidade x deformação volumétrica na tensão desviadora máxima. 85

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> – Características gerais dos corpos de prova escolhidos. RI=rocha intacta; ZD=zona de dano; NF=núcleo da falha	50
<b>Tabela 2</b> – Características das malhas de elementos finitos geradas.	57
<b>Tabela 3</b> – Etapas utilizadas na simulação dos modelos.	58
<b>Tabela 4</b> – Regra de endurecimento utilizada no ajuste do modelo do CP1	69
<b>Tabela 5</b> – Valores utilizados no ajuste do modelo do CP1.	69
<b>Tabela 6</b> – Regra de endurecimento utilizada no ajuste do modelo do CP3	76
<b>Tabela 7</b> – Valores utilizados no ajuste do modelo do CP3.	77
<b>Tabela 8</b> – Tabela comparativa entre os parâmetros ajustados nos modelos do CP1 e CP3.	77
<b>Tabela 9</b> – Tabela com dados da envoltória de ruptura dos materiais e de tensões na zona de falha no momento da ruptura.	78

## Lista de Símbolos

$c$	Coesão
$C_0$	Resistência a compressão simples
$d\varepsilon^p$	Taxa de deformação plástica
$dl$	Deslocamento do topo
$E$	Módulo de elasticidade
$G$	Módulo de deformação cisalhante
$J_1$	Primeiro invariante do tensor de tensões totais
$J_2D$	Segundo invariante do tensor de tensões desviadoras
$K$	Módulo de compressão volumétrica
$k$	Permeabilidade
$k_i$	Permeabilidade axial
$l_0$	comprimento inicial
$p$	Poropressão
$q$	Tensão desviadora
$T_0$	Resistência a tração
$V$	Volume do elemento
$\sigma_1$	Tensão principal máxima
$\sigma_3$	Tensão principal mínima
$\sigma$	Tensão normal
$\sigma'$	Tensão efetiva
$\sigma_{axial}$	Tensão axial
$\sigma'_{falha}$	Tensão normal à falha
$\sigma_m$	Tensão média
$\tau$	Tensão cisalhante
$\tau_{falha}$	Tensão cisalhante na falha
$\tau_f$	Resistência ao cisalhamento
$\varepsilon$	Deformação
$\varepsilon_{vol}$	Deformação volumétrica
$\varepsilon^p$	Deformação plástica
$\varepsilon_{axial}$	Deformação axial
$\varepsilon_{radial}$	Deformação radial

$\gamma$	Deformação cisalhante
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\phi$	Ângulo de atrito
$\psi$	Ângulo de dilatação
$\lambda$	Parâmetro de Lamé
$\alpha$	Inclinação do critério de escoamento no plano $\sigma'1 \times \sigma'3$
$\delta$	Multiplicador de Lagrange