



César Augusto Torres Paitan

**Modelagem numérica de fluxo em meios
fraturados e meios porosos fraturados**

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.

Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Rio de Janeiro
Maio de 2013



César Augusto Torres Paitan

**Modelagem numérica de fluxo em meios
fraturados e meios porosos fraturados**

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

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos.

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Dra. Raquel Quadros Velloso.

EDTCT - PUC-Rio

Prof. Luís Manuel Ribeiro e Sousa.

Universidade do Porto

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial

Centro Técnico Científico PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de maio de 2013

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

César Augusto Torres Paitan

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Nacional de Engenharia – UNI de Lima, Peru, em 2006. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2010, desenvolvendo a dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Ambiental.

Ficha Catalográfica

Paitan, Torres César Augusto.

Modelagem numérica de fluxo em meio fraturados e meios porosos fraturados / César Augusto Torres Paitan; orientador: Eurípides do Amaral Vargas Junior.- 2013.

v.,107f.: il.; 29,7 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Fluxo em meio poroso. 3. Fluxo em meio fraturado. 4. Fluxo em meio poroso fraturado. 5. Geração de fraturas. 6. Método dos elementos finitos. I. Vargas Júnior, Eurípides do Amaral. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

A Deus, à minha mãe, e ao meu pai que está no céu.

Agradecimentos

Ao professor Eurípedes Vargas Jr., pela orientação, ajuda e dedicação no acompanhamento do meu trabalho. Muito obrigado professor.

À minha irmã Mercedes, à minha sobrinha Danna, meus primos Lorena e Marcial e meu cunhado Richard, que sempre foram meu apoio à distância.

À Raquel Q. Velloso pela valiosa ajuda e sugestões na última etapa da tese.

Ao Wagner N. Ribeiro pelo apoio e recomendações. Muito obrigado amigo.

À Jackeline Castañeda pela ajuda e apoio durante esse tempo de estudos.

À Isabelle A. Telles e ao João P. Castagnoli pela ajuda em resolver as dúvidas no manejo dos programas de cálculo.

A meus amigos no Peru, que compartilharam tantos momentos inesquecíveis comigo à distância.

A meus amigos da “Peña de los Sábados”

A todos meus amigos da pós-graduação PUC-Rio pelos momentos de estudo, conversa e amizade.

Às belas pessoas brasileiras e de outras nacionalidades que conheci durante esse tempo.

À CAPES, pelo apoio financeiro prestado para a realização deste trabalho.

Resumo

Paitan, César Augusto Torres; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral. **Modelagem numérica de fluxo em meios fraturados e meios porosos fraturados**. Rio de Janeiro, 2013. 107 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento/montagem de um sistema computacional para análise de fluxo em meios porosos, meios fraturados, porosos fraturados e em combinações destes meios, considerando regime permanente ou transiente, sob condições saturadas e não saturadas. O sistema consiste de quatro programas, três programas de funções específicas interligadas por rotinas de programação feitas na linguagem C++ e o quarto é um visualizador de resultados. O FracGen 3D (Telles, 2006) gera fraturas ou famílias de fraturas de forma determinística ou probabilística. O programa ICEM CFD v.14 divide o domínio de interesse em sub-dominios, através da geração de malha de elementos finitos. O programa FTFP-3D (Telles, 2006) utiliza o método de elementos finitos para discretizar as equações governantes no espaço e em diferenças finitas no tempo, e para resolver a não linearidade, utiliza o método iterativo de Picard ou o método iterativo BFGS e finalmente O Pos3D é o responsável pela visualização dos resultados. Neste trabalho foram desenvolvidos cinco exemplos, dois deles para a validação deste procedimento, e três aplicados a um talude típico do Rio de Janeiro, os quais incluem fraturas verticais e juntas de alívio. Estes casos estudados verificam a influência das fraturas nos meios porosos em termos de carga de pressão, totais e campo de velocidades, para a verificação do comportamento hidráulico dos maciços e de eventuais instabilidades.

Palavras-chave

Fluxo em meios fraturados; fluxo em meios porosos fraturados; geração de fraturas; métodos dos elementos finitos; ICEM CFD.

Abstract

Paitan, César Augusto Torres; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral. **Numerical modelling of flow in fractured and fractured porous media**. Rio de Janeiro, 2013. 107 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents the development/assembly of a computational system for flow analysis in porous media, fractured and fractured porous media and in combination of both media, considering steady or transient states under saturated and unsaturated conditions. The system comprehends four computational programs, three of them of specific functions interconnected by C++ programming routines and the last program is an output viewer. FracGen 3D program (Telles, 2006) generates fractures or fracture families in a determinist or probabilistic way. ICEM CFD v.14 program divides the interest domain in sub-domains by means of the element finite mesh generation. FTFP-3D program (Telles, 2006) uses the element finite method to discretize the governing equations in the space domain and the difference finite method for the time domain and for solving the non-linearity is used the iterative Picard or BFGS method, so that, finally, Pos3D viewer program is answerable by visualization of the results. In the present dissertation five examples were developed, two of them for the validation of this procedure and the three others applied to a typical slope in Rio de Janeiro, which include vertical fractures and relief joints on their slopes. All those studied cases evaluate the influence of the fractures on porous media in terms of pressure and total heads and velocity fields for verifying of the hydraulic behavior of solid masses and eventual instabilities.

Keywords

Flow in fractured media; flow in fractured porous media; fracture generation; finite element method; ICEM CFD.

Sumário

1 Introdução	17
1.1. Contribuição da Dissertação	19
1.2. Estrutura da Dissertação	20
2 Comportamento hidráulico do meio poroso fraturado	22
2.1. Meio poroso	22
2.1.1. Fluxo em meios porosos	23
2.2. Fraturas	24
2.2.1. Características das fraturas	25
2.2.2. Sistemas de fraturas	27
2.3. Meios porosos fraturados	28
2.3.1. Fluxo em meios porosos fraturados	29
2.4. Modelos conceituais de fluxo em meios porosos fraturados	33
2.4.1. Modelo contínuo equivalente	35
2.4.2. Modelo de fraturas discretas	36
2.4.3. Modelo com dupla porosidade	37
3 Modelos matemáticos e formulação numérica	39
3.1. Equações governantes	39
3.2. Método numérico de solução	42
3.2.1. Métodos dos elementos finitos	44
3.2.2. Solução numérica	44
3.2.2.1. Discretização do espaço	44
3.2.2.2. Discretização do tempo	47
3.2.3. Estratégia de solução	47
4 Procedimento para a modelagem	49
4.1. Geração do domínio e das fraturas	50
4.1.1. Geração de fraturas - FracGen 3D	50
4.1.2. Procedimento	53
4.2. Discretização do domínio	54
4.2.1. Geração da malha—ICEM CFD v. 14	56

4.2.2. Procedimento	57
4.3. Solução numérica e visualização de resultados	61
4.3.1. Procedimento	61
5 Exemplos	63
5.1. Exemplo 1 – análise de fluxo em um meio poroso fraturado	63
5.1.1. Análise de fluxo em regime permanente – exemplo 1	66
5.1.2. Análise de fluxo em regime transiente – exemplo 1	67
5.2. Exemplo 2 – análise de fluxo em um meio poroso e um meio poroso fraturado	68
5.2.1. Análise de fluxo em regime permanente – exemplo 2	72
5.2.2. Análise de fluxo em regime transiente – exemplo 2	74
5.3. Exemplo 3 – análise de fluxo aplicado a um talude com uma fratura vertical	76
5.3.1. Análise de fluxo em regime permanente– exemplo 3	78
5.4. Exemplo 4 – análise de fluxo aplicado a um talude com fraturas verticais e uma junta de alívio	83
5.4.1. Análise de fluxo em regime permanente– exemplo 4	85
5.5. Exemplo 5 – análise de fluxo aplicado a um talude com uma fratura vertical e uma junta de alívio	87
5.5.1. Análise de fluxo em regime permanente – exemplo 5	90
6 Conclusões e Sugestões	94
6.1. Conclusões	94
6.2. Sugestões	97
Referências Bibliográficas	100

Lista de Figuras

Figura 2.1: Tamanho do VER, Bear (1972).....	24
Figura 2.2: Fractal Auto-similar vs. Fractal Autofin, Morales (2008).....	26
Figura 2.3: Quartzito que se assemelha ao modelo de duas placas paralelas. ETS. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (2011).....	30
Figura 2.4: Sequência do conceito desde fratura natural até o conceito de placas paralelas, Morales (2008).	30
Figura 2.5: Fluxo entre duas placas paralelas, Morales (2008).....	30
Figura 2.6: (a) VER para o meio poroso, (b) VER para o meio fraturado, ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (2011).....	32
Figura 2.7: (a) Meio poroso fraturado real, (b) Modelo continuo equivalente (c) Modelo continuo equivalente com zonas de alto fraturamento que representam zonas com alta condutividade hidráulica, (d) Modelo de dupla porosidade, (e) Modelo de fraturas discretas. Cook (2003).....	34
Figura 2.8: Família de fraturas de espessura b e separação s que apresentam orientação diferente aos eixos de interesse, vista 2D. ...	35
Figura 2.9: Fraturas cruzadas com alta permeabilidade, bordeada por bloques de baixa permeabilidade, Bourgeat et al. (2003).	37
Figura 3.1: (a) Zona de influencia de um poço, (b) Modelo discretizado pelo MDF, (c) Modelo discretizado pelo MEF.	43
Figura 4.1: Etapas para modelagem de fluxo e transporte em meios porosos e fraturados, Telles (2006).....	49
Figura 4.2: Fraturas geradas no FracGen 3D de forma determinística. ...	52
Figura 4.3: Famílias de fratura geradas no FracGen 3D de forma estatística.	52
Figura 4.4: Distribuição espacial com 2738 fraturas geradas aleatoriamente, Telles (2006).....	53
Figura 4.5: Fraturas geradas com FracGen 3D.....	54
Figura 4.6: Compatibilidade dos nós dos elementos representativos do meio poroso e dos elementos representativos das fraturas, Telles (2006).....	55
Figura 4.7: Entorno gráfico ICEM CFD v.14.....	56

Figura 4.8: Geração das fraturas a partir do script.	57
Figura 4.9: Geometria inicial das fraturas.....	58
Figura 4.10: Geometria após edição das fraturas.	58
Figura 4.11: Verificação da qualidade da malha gerada no ICEM	60
Figura 5.1: Geometria do exemplo 1 contendo as famílias de fraturas e a malha de elementos finitos triangulares.....	63
Figura 5.2: A malha de elementos finitos tetraédricos do meio poroso e das fraturas com elementos triangulares.	64
Figura 5.3: Condições iniciais e de contorno do exemplo 1.	65
Figura 5.4: Distribuição das cargas de pressões do exemplo 1.	66
Figura 5.5: Distribuição das cargas totais do exemplo 1.	66
Figura 5.6: Distribuição das cargas de pressões nas fraturas do Exemplo 1 para um tempo de 1 dia.	67
Figura 5.7: Distribuição das cargas de pressões nas fraturas do Exemplo 1 para um tempo de 7 dias.....	67
Figura 5.8: Distribuição das cargas de pressões nas fraturas do Exemplo 1 para um tempo de 30 dias.....	68
Figura 5.9: Distribuição das cargas de pressões nas fraturas do Exemplo 1 para um tempo de 800 dias.....	68
Figura 5.10: Geometria do exemplo 2 contendo as famílias de fraturas e a malha de elementos finitos triangulares.....	69
Figura 5.11: A malha de elementos finitos tetraédricos dos meios e das fraturas com elementos finitos triangulares.....	69
Figura 5.12: Condições iniciais do exemplo 2.	71
Figura 5.13: Condições de contorno do exemplo 2.	71
Figura 5.14: Distribuição das cargas de pressões do exemplo 2.	72
Figura 5.15: Distribuição das cargas de pressões nas fraturas do exemplo 2.	73
Figura 5.16: Distribuição das cargas totais do exemplo 2.	73
Figura 5.17: Distribuição das cargas totais das fraturas do exemplo 2.	73
Figura 5.18: Campo de velocidades das fraturas do exemplo 2.....	74
Figura 5.19 Distribuição das cargas totais nas fraturas e meio poroso do Exemplo 2 no tempo zero.	74

Figura 5.20:Distribuição das cargas totais nas fraturas e meio poroso do Exemplo 2 para um tempo de 10 dias.....	75
Figura 5.21: Distribuição das cargas totais nas fraturas e meio poroso do Exemplo 2 para um tempo de 100 dias.....	75
Figura 5.22:Distribuição das cargas totais nas fraturas e meio poroso do Exemplo 2 para um tempo de 1000 dias.....	75
Figura 5.23:Geometria do exemplo 3 contendo a fratura isolada e a malha de elementos finitos triangulares.....	76
Figura 5.24:A malha de elementos finitos tetraédricos dos meios e da fratura isolada com elementos finitos triangulares.	76
Figura 5.25: Condições de contorno do exemplo 3.	78
Figura 5.26: Distribuição das cargas de pressões no talude sem fratura do Exemplo 3.	79
Figura 5.27: Distribuição das cargas de pressões no talude com fratura do Exemplo 3.	79
Figura 5.28: Distribuição das cargas totais no talude sem fratura do Exemplo 3.	80
Figura 5.29: Distribuição das cargas totais no talude com fratura do Exemplo 3.	80
Figura 5.30: Campo de velocidades no talude sem fratura do Exemplo 3.	81
Figura 5.31: Campo de velocidades no talude com fratura do Exemplo 3.	81
Figura 5.32: Campo de velocidades na fratura e em no meio poroso do exemplo 3.....	82
Figura 5.33: Campo de velocidades do talude no ponto B da Figura 5.32.	82
Figura 5.34: Campo de velocidades do talude no ponto A da Figura 5.32.	82
Figura 5.35:Geometria do exemplo 4 contendo a família de fraturas, junta do alívio e a malha de elementos finitos triangulares.	83
Figura 5.36: A malha de elementos finitos tetraédricos dos meios, fraturas e a junta do alívio com elementos finitos triangulares.	83
Figura 5.37: Condições de contorno do exemplo 4.	85

Figura 5.38: Distribuição das cargas de pressões nas fraturas e na junta de alivio do exemplo 4.....	86
Figura 5.39: Distribuição das cargas totais nas fraturas e na junta de alivio do exemplo 4.....	86
Figura 5.40: Campo de velocidades no talude do exemplo 4.....	87
Figura 5.41: Campo de velocidades das fraturas e da junta de alivio do exemplo 4.....	87
Figura 5.42: Geometria do exemplo 5 contendo a fratura isolada vertical, a junta do alivio e a malha de elementos finitos.....	88
Figura 5.43: A malha de elementos finitos tetraédricos dos meios porosos, a fratura e junta de alivio com elementos triangulares.	88
Figura 5.44: Condições de contorno do exemplo 5.	90
Figura 5.45: Distribuição das cargas de pressões no talude do exemplo 5.	91
Figura 5.46: Distribuição das cargas totais no talude do exemplo 5.	91
Figura 5.47: Distribuição das cargas totais da fratura e junta de alivio do exemplo 5.....	92
Figura 5.48: Campo de velocidades do talude do exemplo 5.....	92
Figura 5.49: Campo de velocidades da fratura e junta de alivio do exemplo 5.	93

Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Vantagens e desvantagens dos modelos conceituais Cook (2003).....	38
Tabela 5-1: Características geométricas das famílias de fraturas para o exemplo 1.....	64
Tabela 5-2: Parâmetros hidráulicos dos meios físicos do exemplo 1 para a função analítica de Van Genuchten (1980).	65
Tabela 5-3: Resumo dos elementos da malha do exemplo 1.....	65
Tabela 5-4: Características geométricas das famílias de fraturas para o exemplo 2.....	70
Tabela 5-5: Parâmetros hidráulicos dos meios físicos do exemplo 2 para a função analítica de Van Genuchten (1980).	70
Tabela 5-6: Resumo dos elementos da malha do exemplo 2.....	71
Tabela 5-7: Características geométricas da fratura do exemplo 3.	77
Tabela 5-8: Parâmetros hidráulicos dos meios físicos do exemplo 3.....	77
Tabela 5-9: Resumo dos elementos da malha do exemplo 3.....	77
Tabela 5-10: Características geométricas da fratura do exemplo 4.	84
Tabela 5-11: Parâmetros hidráulicos dos meios físicos do exemplo 4.	84
Tabela 5-12: Resumo dos elementos da malha do exemplo 4.....	85
Tabela 5-13: Características geométricas da fratura do exemplo 5.	89
Tabela 5-14: Parâmetros hidráulicos dos meios físicos do exemplo 5.	89
Tabela 5-15: Resumo dos elementos da malha do exemplo 5.....	89

Lista de Símbolos

$2b$	— abertura da fratura
D_h	— diâmetro hidráulico
$e = 2b$	— abertura da fratura
e_i	— abertura da fratura i
g	— aceleração da gravidade
$\frac{\partial h}{\partial s}$	— gradiente hidráulica na direção s .
h_p	— carga de pressão
h_T	— carga total
i	— número de fratura da família
I^- e I^+	— superfícies da fratura
k	— permeabilidade intrínseca
k_f	— condutividade hidráulica saturada da fratura
k_S	— condutividade hidráulica saturada
k_m	— coeficiente de permeabilidade da rocha intacta
k_{ij}	— tensor de condutividade hidráulica
k_{rw}	— permeabilidade relativa do meio
k_{rwf}	— permeabilidade relativa da fratura
k	— medida de rugosidades das paredes das fraturas
K	— condutividade hidráulica
$[K]$	— tensor de permeabilidade equivalente
m	— parâmetro da relação analítica de Van Genuchten
M	— número total de nós
n	— número total de fraturas da família
n_x^i, n_x^i, n_x^i	— cossenos diretores da fratura normal
$P_c = -\psi$	— pressão de capilaridade
q_f	— vazão através da fratura
$-q_{I^-}^n$	— termo de transferência de fluido entre o meio poroso e a superfície da fratura I^-
$q_{I^+}^n$	— termo de transferência de fluido entre o meio poroso e a superfície da fratura I^+
Q	— fonte ou um sumidouro.

Q_f	— fonte ou um sumidouro
s_i	— espaçamento entre fraturas
S_s	— coeficiente específico de armazenamento
S_w	— grau de saturação de água
S_{wf}	— grau de saturação da fratura
S_{wr}	— saturação residual
V	— velocidade de descarga
z	— carga de elevação
z_f	— carga de elevação da fratura
α	— parâmetro da relação analítica de Van Genuchten
Γ	— contorno do modelo
Γ_e	— contorno no elemento
Δt	— variação do tempo
γ	— peso específico do fluido
θ_s	— teor de umidade volumétrica de saturação
θ	— teor de umidade volumétrica
θ_r	— teor de umidade volumétrica residual
μ	— viscosidade dinâmica do fluido
ν	— viscosidade cinemática do fluido
ρ	— densidade do fluido
ϕ_n	— funções de interpolação linear
$\psi(x_i, t)$	— carga de pressão
$\psi_f(t)$	— cargas de pressões da fratura
ψ_n	— carga de pressão nodal
Ω	— domínio do modelo
Ω_e	— domínio no elemento