

1 Introdução

A hidráulica dos meios fraturados tem sido investigada desde a década de 40, cujo interesse inicial foi estudar os problemas que ocasiona o escoamento de fluxo nestes meios. Louis (1974) indica que estudos referentes à hidráulica das rochas iniciaram-se em diversos países. Na universidade Karlsruhe, na Alemanha, começou um vasto programa de estudos e foi prosseguida pela Imperial College, na Inglaterra. Esse programa tinha como objetivos analisar propriedades e características hidráulicas dos maciços rochosos fraturados, estudar o fenômeno de escoamento e seus efeitos, e finalmente, explicar o comportamento dos maciços rochosos submetidos à ação da água subterrânea.

Durante décadas, as formações geológicas fraturadas têm-se mostrado um campo interessante de investigação por estarem relacionadas a aplicações em reservatórios de petróleo e de gás, aquíferos, atividades mineiras bem como em diversas obras civis. Nos últimos 30 anos, grandes progressos têm sido desenvolvidos no entendimento geral do comportamento hidráulico do meio poroso fraturado. As engenharias de petróleo, civil, minas e das águas subterrâneas, cada vez mais necessitam compreender o fenômeno de fluxo de fluidos nestes meios. Mas foi a preocupação ambiental que deu impulso às investigações neste campo, devido a que hoje em dia há uma grande demanda na avaliação do armazenamento de resíduos radioativos ou químicos em formações geológicas estáveis e de baixa permeabilidade. Este campo de estudo tem aproximado países e instituições de investigação, vinculados ao estudo desses processos.

O fluxo do fluido em maciços fraturados está intimamente relacionado às fraturas, por estas poderem representar caminhos preferenciais para o fluxo. Representar esta heterogeneidade estrutural das formações geológicas para simular o escoamento do fluido originou a definição de modelos conceituais que simplificassem o problema. Existem diversos modelos conceituais, mas basicamente estão organizados em três grupos: a) Modelo contínuo equivalente

(Jeong & Lee, 1992; Liu et al., 2001; Liu et al., 2003; Li et al., 2008 e He & Chen 2012), b) Modelo discreto de redes de fraturas (Long et al., 1982 e Pan et al., 2010) e c) Modelos mistos (Barenblatt et al., 1960; Gerke & Van Genuchten, 1993; Therrien & Sudicky, 1996; Juanes & Samper, 2000; Bourgeat et al., 2003 e Lewandowska et al., 2004). Cada uma destas famílias de modelos mostram suas próprias vantagens e limitações. De qualquer forma, não existe regra geral para a escolha do melhor modelo, cada um deles é apropriado para uma situação em particular. Uma comparação numérica destes três modelos pode ser verificada em Samardzioska & Popov (2005).

O desenvolvimento de modelos numéricos e melhoras na capacidade computacional têm permitido, atualmente, usar modelos tridimensionais para resolver problemas em hidrogeologia subterrânea. A representação das fraturas no maciço rochoso está conseguindo que os resultados de modelagens de fluxo sejam mais coerentes. Neste contexto, a modelagem tridimensional tornou-se uma ferramenta essencial no entendimento do comportamento hidráulico em meios porosos fraturados. Existem diversos trabalhos de modelagem numérica tridimensional em meios porosos fraturados, alguns deles podem ser encontrados em Taniguchi & Fillion (1996), Telles (2006), Alvarenga (2008), Blöcher et al. (2010), Pan et al. (2010) e Dreuzy et al., (2013).

Na presente dissertação apresenta-se o desenvolvimento/montagem de um sistema computacional para análise de fluxo em meios porosos, meios fraturados e porosos fraturados e em combinações destes meios. O modelo conceitual usado é um modelo de fraturas inseridas em um meio poroso, podendo ser catalogado como um modelo misto. Nesta formulação, os nós, que pertençam aos planos de fraturas, pertencem também aos elementos tetraédricos adjacentes do meio poroso, permitindo, desta forma, garantir a continuidade de cargas e também, dispensar o termo de transferência, característico em definições de modelos mistos. Este modelo resolve as equações de fluxo do meio poroso e das fraturas simultaneamente, e pode ser usado para modelar grandes fraturas com meios porosos de alta ou baixa permeabilidade. O inconveniente neste modelo está basicamente relacionado à localização das fraturas. Juanes & Samper (2000) indicam que este tipo de modelo foi implementado desde os anos setenta, e que foi adaptado por Kiraly (1987) e posteriormente generalizado por Perrochet (1995), sendo que atualmente vem apresentando um notável desenvolvimento. Trabalhos

relacionados a este modelo podem ser encontrados em Kiraly (1987), Telles (2006), Alvarenga (2008).

O desenvolvimento/montagem proposta nesta dissertação usa programas específicos para cada etapa. Estes programas em conjunto compõem um sistema que será usado neste trabalho para modelar e analisar fluxo em domínios porosos fraturados. Uma sucinta descrição da metodologia é feita a seguir: o procedimento inicia-se com a etapa de geração de fraturas de modo probabilístico ou determinístico, usando o programa FracGen (Telles, 2006), que gera a localização espacial das fraturas sob características particulares. Posteriormente, determina-se a geometria do domínio do modelo e discretiza-se pelo método de elementos finitos, tanto as fraturas quanto os meios porosos, sendo o tempo discretizado pelo método das diferenças finitas. Para a geração da malha de elementos finitos usou-se o programa Icem CFD v.14. Seguidamente, passa-se à etapa de análise de fluxo na qual se poderão considerar análises de fluxo em condições permanente ou transiente, saturado ou não saturado. Para esta etapa usou-se o programa FTFP-3D (Telles, 2006) e para a visualização de resultados utilizou-se o programa Pos3D.

Programas integrados para análises de fluxo em meios porosos fraturados e meios fraturados existem na literatura. Diodato (1994) elaborou um resumo de alguns deles, indicando suas vantagens e limitações. Um resumo mais atual dos programas envolvidos em análises de fluxos em meios porosos fraturados é descrito em Telles (2006).

Programas que realizam estes tipos de análises estão disponíveis, porém sob um custo relativamente alto, apresentando códigos de programação e rotinas fechadas que os tornam um tanto limitados de implementar e diversificar suas aplicações, sendo esta uma clara vantagem para o desenvolvimento/montagem que se apresenta neste trabalho.

1.1. Contribuição da Dissertação

A contribuição principal desta dissertação é o desenvolvimento/montagem de um sistema de modelagem tridimensional de fluxo em meios fraturados e meios porosos fraturados capaz de permitir implementações e modificações para

melhorar e diversificar as aplicações de análises segundo o problema a ser abordado. Este sistema de análise proposto relaciona e interage programas de cálculo e rotinas de programação que criam fraturas, geram malhas de elementos finitos e desenvolvem análises numéricas de fluxo.

Neste contexto, este trabalho detalha um procedimento sequencial para implementar um modelo físico e sua posterior análise numérica. Esta metodologia proposta contém passos e sugestões para o uso de programas como o FracGen (Telles, 2006) encarregado de gerar as fraturas de forma determinística ou probabilística, para posteriormente usar o programa ICEM, um programa versátil, com ferramentas de qualidade e edição de malhas, entre outras características. Este programa discretiza o domínio do problema criando malhas de elementos finitos. A partir desses resultados o programa FTPF-3D (Telles, 2006) é responsável pela análise numérica, baseado no método de elementos finitos para resolver as equações governantes de fluxo. Como passo final, a visualização dos resultados é feito no programa POS3D.

1.2. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, inicia-se com o capítulo 1 no qual é feita uma introdução referente a estudos de fluxo em meios porosos fraturados e ao procedimento seguido para a modelagem de análise de fluxo, bem como uma rápida descrição da importância deste estudo. É apresentado também o objetivo principal deste trabalho, indicando os alcances e vantagens deste sistema montado de análise proposto. E finalmente apresenta-se a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 descreve-se os conceitos básicos e definições importantes relacionadas ao comportamento do fluxo em meios porosos fraturados e das fraturas, assim como os modelos conceituais gerais usados em análises de fluxo nestes meios.

No capítulo 3 apresenta-se o modelo matemático empregado neste trabalho, sua formulação numérica para o desenvolvimento da análise de fluxo e a estratégia de solução das equações governantes.

No capítulo 4 apresenta-se a metodologia usada para gerar e modelar o fluxo em meios porosos fraturados. Indicam-se sugestões para gerar as fraturas usando o programa FracGen3D, e também para a geração da malha de elementos finitos com o programa ICEM CFD v.14. Algumas sugestões são indicadas para a criação e edição das malhas tridimensionais. Finalmente, é descrito o uso do programa numérico de análise de fluxo FTPF-3D e sua visualização gráfica no programa POSD 3D.

No capítulo 5 apresentam-se cinco exemplos em meios porosos fraturados, os dois primeiros analisados em condições de fluxo permanente e transiente e em condições não saturadas. Os três restantes tratam de taludes típicos nas formações geológicas do Rio de Janeiro. Estes taludes foram analisados em regime permanente e em condições não saturadas. Os resultados das análises para as variáveis quantitativas estão expressas em termos de cargas de pressões, cargas totais e campo de velocidades, sendo necessárias para o entendimento do comportamento hidráulico destes meios.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para futuros trabalhos, seguidas das referências bibliográficas.