

1 Introdução

Os problemas de engenharia e geologia relacionados ao fluxo de fluidos e transporte de soluto, muitas vezes envolvem os meios porosos e os meios rochosos, que em sua maioria apresentam-se fraturados. Tais problemas podem ser verificados, por exemplo, em reservatórios de petróleo, encostas rochosas, aquíferos subterrâneos e minas. Para o estudo desses problemas, geralmente, são realizadas modelagens de fluxo e transporte.

A modelagem é uma componente importante para compreensão do comportamento hidráulico dos meios. Através dela é possível, por exemplo, fazer uma estimativa dos danos causados pela contaminação de um aquífero, determinar a influência de um poço de extração de água ou óleo no sistema onde está inserido, escolher a melhor distribuição do posicionamento de poços de bombeamento, e auxiliar no estudo de remediação de áreas contaminadas.

Para realização de uma modelagem de fluxo e transporte em meios porosos e fraturados, algumas etapas devem ser realizadas. Estas etapas estão apresentadas na Figura 1.1.

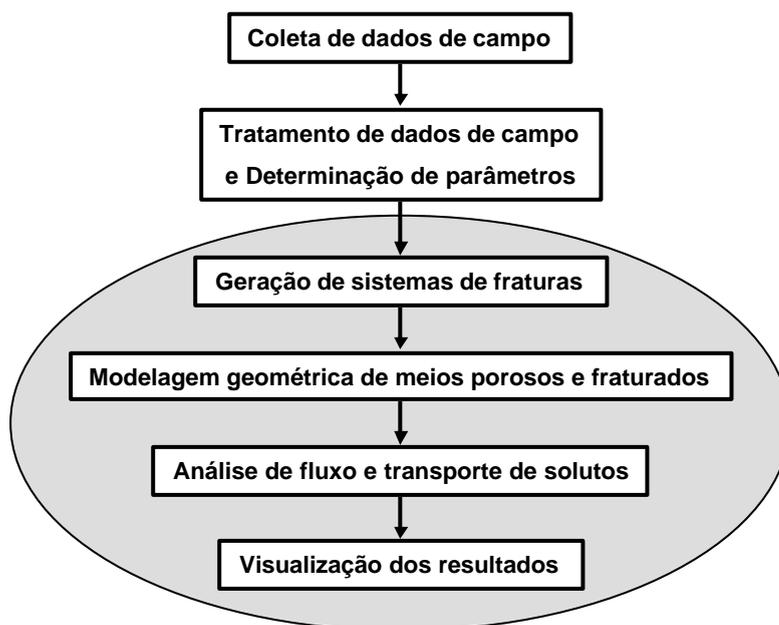


Figura 1.1: Etapas para modelagem de fluxo e transporte em meios porosos e fraturados

As etapas e alguns itens que serão citados em cada etapa, podem não ser necessários dependendo do problema que esteja sendo modelado.

A coleta de dados de campo representa o levantamento de dados geológicos, de fluxo e de contaminação da área em estudo. Pode-se citar como dados geológicos a topografia da área, a determinação das camadas geológicas e o levantamento estrutural dos maciços rochosos. Neste último são coletadas informações das características das fraturas e das famílias de fraturas presentes no maciço, como por exemplo, a orientação espacial, o tamanho, a frequência, a geometria da superfície, a forma e natureza dos preenchimentos e a abertura.

Os dados de fluxo se referem à coleta de informações de águas superficiais (rios, córregos e outros), a medição do nível d'água subterrâneo e a direção de fluxo, o estudo pluviométrico, e a determinação das condutividades hidráulicas das camadas geológicas.

Por fim, pode-se citar como dados de contaminação, a localização e concentração da fonte de contaminação, a estimativa do volume de contaminante derramado e do tempo de exposição desse contaminante. São apresentados também como dados de contaminação os tipos de contaminantes envolvidos, as medidas de concentração em pontos de monitoramento, o teor de matéria orgânica e a concentração de outros compostos (por exemplo, elétrons receptores) presentes no aquífero.

Após coleta dos dados de campo, passa-se para a etapa de tratamento dos dados e determinação e parâmetros. Dos dados geológicos pode-se gerar a superfície topográfica e as superfícies que definem as camadas geológicas. É realizado o estudo estatístico dos dados estruturais dos maciços rochosos, onde são determinados o número de famílias de fraturas e as distribuições probabilísticas que representam as características das fraturas.

Em relação aos dados de fluxo, são determinados o gradiente hidráulico e a porosidade das camadas geológicas. Para os dados de contaminação é estimado um valor para coeficiente de retardamento e são realizadas a análise e seleção dos dados obtidos no monitoramento.

No caso onde são modelados meios fraturados, faz-se necessária a geração de sistemas de fraturas. Existem dois tipos de fraturas: as fraturas determinísticas e as fraturas estatísticas. As fraturas determinísticas são aquelas que apresentam

características explícitas. Sua geração é muito simples, pois todos os dados necessários são conhecidos. As fraturas estatísticas são aquelas cujas características são apresentadas através de dados estatísticos. Sua geração se dá por processos estocásticos, seguindo distribuições probabilísticas que representam as características das famílias de fraturas em que estão inseridas.

Após a geração do sistema de fraturas, é realizada a modelagem geométrica de meios porosos e fraturados. Esta etapa é responsável pela definição da geometria do domínio do modelo, das condições iniciais e de contorno, dos dados de tempo, e do tipo de análise a ser realizada (transiente ou permanente). É responsável também, pela geração da malha de elementos finitos e pela aplicação nos nós e elementos da malha de seus respectivos atributos (material, condições de contorno e iniciais).

Em seguida, passa-se para a etapa de análise de fluxo e transporte de solutos. Aqui, pode-se utilizar soluções numéricas ou analíticas das equações que regem o problema físico, podendo ser em uma, duas ou três dimensões. A análise de fluxo pode ser realizada em regime permanente ou transiente, em condições saturada ou não saturada, considerando um ou mais fluidos. Na análise de transporte pode-se considerar os mecanismos de advecção, dispersão, difusão, sorção, decaimento e reação. Quando a modelagem envolve o meio poroso fraturado, a análise é realizada seguindo modelos conceituais que descrevem o fluxo e transporte em meios porosos e fraturados. Os tipos de modelos existentes são o modelo de meio poroso equivalente ou modelo do contínuo único (MPE), o modelo de dupla porosidade (MDP) e o modelo de fraturas discretas (MFD). Esses modelos também podem ser combinados entre si.

A última etapa do processo de modelagem refere-se ao pós-processamento dos resultados fornecidos pela análise do problema. Esses resultados (carga total, carga de pressão, campo velocidade e concentração) são visualizados graficamente, permitindo a sua interpretação de forma mais fácil.

As duas primeiras etapas da modelagem (Coleta de dados de campo, e Tratamento de dados de campo e Determinação de parâmetros) não são tratadas neste trabalho, pois não fazem parte do escopo do estudo realizado. Desta forma, ao se falar em etapas envolvidas na modelagem, estar-se-á referindo somente às etapas de geração de sistemas de fraturas, modelagem geométrica de meios

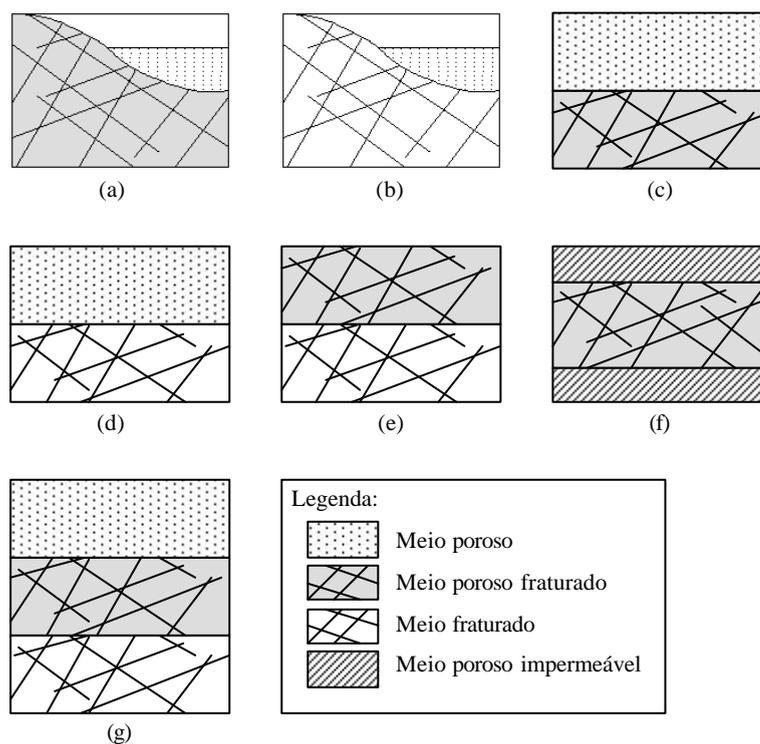
porosos e fraturados, análise de fluxo e transporte de solutos e visualização dos resultados.

A modelagem é realizada utilizando-se programas computacionais específicos capazes de atender as etapas descritas acima. A combinação desses programas forma um sistema computacional integrado de modelagem, de fluxo e transporte em meios porosos e fraturados. Na literatura pode-se encontrar inúmeros programas que modelam os meios porosos. Na análise tridimensional de fluxo e transporte de solutos, por exemplo, pode-se citar os programas MODFLOW (McDonald e Harbaugh, 1988), MT3D (Zheng, 1990), RT3D (Clement, 1997), FemPol (Campos, 1999), SWMS3D (Simunek *et al.*, 1995), e Nammu (Nammu, 2005). Também é possível encontrar na literatura sistemas computacionais que reúnem as três etapas da modelagem de meios porosos. Exemplos desses sistemas são o GMS (GMS, 2005), o Visual MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic, 2005) e o CMA (Cavicchia *et al.*, 2005).

No entanto, quando se trata de meios porosos fraturados o número de programas e sistemas computacionais encontrados para modelagem, é bastante reduzido. A Tabela 3.2 e a Tabela 3.3 apresentam alguns programas de análise tridimensionais, de fluxo e transporte encontrados na literatura, apresentando também algumas de suas principais características. Como sistemas computacionais pode-se citar o Napsac (Hartley *et al.*, 2002), o FracMan (FracMan, 2005) e o Connectflow (Hartley e Holton, 2003). Esses três sistemas apresentam a vantagem de reunirem as quatro etapas da modelagem. Entretanto, somente o Connectflow é capaz de desenvolver modelos considerando o meio poroso e fraturado. Os outros dois sistemas somente modelam o meio fraturado. Esses sistemas apresentam como desvantagem o fato de serem comerciais com custo de licenças relativamente alto, além de serem considerados do tipo “caixas pretas”, onde seus códigos fontes não são disponibilizados para os seus usuários. Programas e sistemas deste tipo não permitem que os usuários realizem modificações e novas implementações no momento em que for conveniente, impedindo a criação de novos módulos que possam ser necessários ao longo do desenvolvimento de uma modelagem específica.

1.1. Contribuição da tese

A contribuição principal deste trabalho é a elaboração de um sistema integrado para modelagem de fluxo e transporte (soluto e partículas) em meios porosos e fraturados, com características que o tornam único entre os presentes na literatura e os disponíveis comercialmente. Esse sistema é capaz de realizar análises em meios porosos, fraturados, porosos fraturados, e em uma combinação entre os meios, como apresentado na Figura 1.2. É capaz ainda de representar as fraturas e definir as regiões por superfícies genéricas, tratando a geometria da malha corretamente e não de forma aproximada, como é feito na maioria dos sistemas comerciais disponíveis. Nenhum dos outros sistemas estudados contém estas características. Uma outra contribuição consiste no desenvolvimento de ferramentas que serão utilizadas por outras pessoas do grupo de pesquisa para continuar os estudos nesta área.



- (a) Meio poroso e meio poroso fraturado representativo de uma encosta rochosa
 (b) Meio poroso e meio fraturado representativo de uma encosta rochosa
 (c) Meio poroso e meio poroso fraturado
 (d) Meio poroso e meio fraturado
 (e) Meio poroso fraturado e meio fraturado
 (f) Meio poroso fraturado e meios impermeáveis
 (g) Meio poroso, meio poroso fraturado e meio fraturado

Figura 1.2: Algumas combinações dos meios porosos e meios porosos fraturados.

O sistema desenvolvido é composto de cinco programas computacionais e um módulo desenvolvido no Matlab (Matlab, 2005). Dos programas, dois foram desenvolvidos neste trabalho e três foram integrados ao sistema, conforme pode ser visto na Figura 1.3.

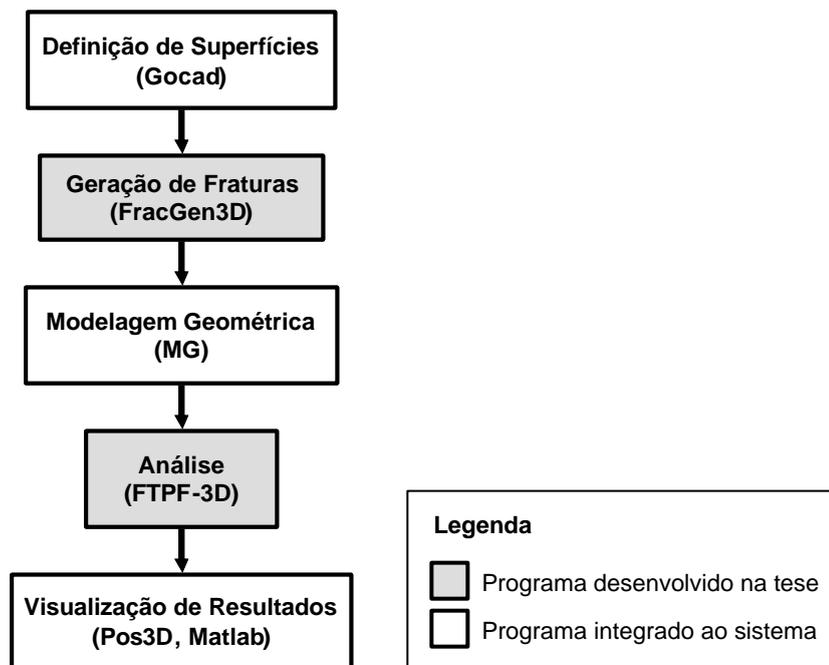


Figura 1.3: Programas que compõe o sistema computacional desenvolvido.

O Gocad (Gocad, 2005) é responsável pela geração de superfícies que representam estruturas geológicas, como por exemplo, as camadas geológicas que definem as regiões e as fraturas.

O FracGen3D, desenvolvido neste trabalho, é responsável pela geração dos sistemas de fraturas, podendo gerar fraturas determinísticas e famílias de fraturas estatísticas. Além disso, o programa apresenta as seguintes funcionalidades: geração de regiões, geração de poços, importação da geometria de poços, importação de dados de campo relacionados a poços, importação superfícies, aplicação de condições de contorno de fluxo e transporte de soluto, aplicação de condições iniciais de fluxo e transporte de soluto, definição das propriedades do fluido, e definição dos dados para análise numérica.

O modelador geométrico MG (Coelho *et al.*, 2000; Lira, 2002) é responsável pela representação geométrica das fraturas e de seus atributos, bem

como pela geração das malhas de elementos finitos associadas às fraturas e ao meio poroso.

O FTPF-3D, também desenvolvido neste trabalho, é responsável pela análise numérica, tridimensional, de fluxo e transporte (soluto/partículas) em meios porosos, meios fraturados, meios porosos fraturados (meio poroso e meio fraturado interpostos), e combinação entre os meios. O programa utiliza o Método dos Elementos Finitos para resolver as equações governantes, realiza a análise em regime permanente e transiente, e em condições saturadas e não saturadas. A não linearidade da equação de fluxo é resolvida pelos métodos de Picard ou BFGS. Os mecanismos considerados no transporte de solutos são a advecção, a dispersão, a difusão, a sorção e o decaimento.

O Pos3D (Pos3D, 2005) é responsável pela visualização dos resultados de carga total, carga de pressão, campo velocidade e concentração.

O Matlab (Matlab, 2005) foi utilizado para desenvolvimento de um módulo específico para visualização dos resultados de trajetória de partículas.

O sistema desenvolvido pode ser utilizado, por exemplo, em estudos hidrogeológicos e estudos de fluxo em reservatórios de petróleo.

1.2. Organização da tese

Esta tese foi dividida em cinco capítulos e um apêndice. Nesta seção, apresenta-se uma visão geral do trabalho, descrevendo resumidamente o conteúdo de cada capítulo.

No capítulo 2, descreve-se a geração e modelagem de sistemas porosos e fraturados, apresentando algumas definições e características importantes relacionadas aos meios porosos e meios porosos fraturados. Também é apresentado o sistema computacional utilizado na geração de sistemas de fraturas, desenvolvido neste trabalho, e as etapas envolvidas na modelagem geométrica de sistemas porosos e fraturados.

O capítulo 3 trata da análise de fluxo e transporte em meios porosos fraturados, apresentando os modelos conceituais e as equações governantes que descrevem o fluxo e transporte em meios porosos e fraturados. Também são apresentados alguns programas computacionais disponíveis na literatura que

implementam as equações governantes. Descreve-se ainda o programa computacional de análise desenvolvido neste trabalho, o método numérico utilizado para solução das equações governantes e o método de trajetória de partículas implementado.

No capítulo 4 são apresentados exemplos numéricos utilizados na validação das implementações computacionais realizadas neste trabalho. Além disso, são apresentados também exemplos relacionados ao gerador de fraturas e a resultados de análises numéricas de fluxo e transporte (soluto e partículas), realizadas em condições saturadas e não saturadas, e em meios porosos, fraturados e porosos fraturados.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, no apêndice A são apresentadas as distribuições probabilísticas utilizadas no processo de geração de sistemas de fraturas, no apêndice B são apresentadas algumas características do Gocad (Gocad, 2005), assim como as áreas de aplicação do programa, e no apêndice C são apresentadas algumas funcionalidades do programa Pos3D (Pos3D, 2005).