

2

Comportamento hidráulico do meio poroso fraturado

Os estudos e investigações do comportamento hidráulico dos meios porosos e meios fraturados têm sido desenvolvidos durante muitos anos. Os meios porosos têm sido investigados com mais antecedência que os meios fraturados; mas nas últimas décadas os meios fraturados têm capturado o interesse e, conseqüentemente, acrescentado o conhecimento nesta área. Isso foi possível na medida das necessidades de precisar representar com maior realidade o meio segundo escalas definidas e da utilidade que se desejava dele. As novas tecnologias e o avanço no estudo permitiu uma representação mais realista da verdadeira geometria e orientação espacial das estruturas geológicas inseridas no maciço rochoso.

Telles (2006) descreve quatro aspectos que devem ser levados em conta quando se faz um estudo de fluxo em meios porosos fraturados:

- Desenvolvimento conceitual de modelos
- Desenvolvimento de soluções analíticas e numéricas
- Descrição das características hidráulicas da fratura
- Desenvolvimento de técnicas probabilísticas para descrever o fluxo em fraturas e distribuições de parâmetros hidrogeológicos.

Neste capítulo desenvolve-se brevemente os modelos conceituais, descrevendo as características hidráulicas da fratura e do fluxo em fraturas e sistemas de fraturas.

2.1. Meio poroso

Um meio poroso pode-se definir como um meio sólido que contém poros, estes poros são vazios que estão interconectados ou não entre eles e estão distribuídos aleatoriamente. Estes vazios por sua vez, com formas e tamanhos variáveis, permitem a percolação de fluidos, e quando conectados constituem

redes que podem chegar a ser muito complexas. São exemplos destes meios: a matriz rochosa e maciços de solo.

2.1.1. Fluxo em meios porosos

O estudo de fluxo em meios porosos requer o conhecimento da condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade K que se define como a capacidade de um meio para permitir o fluxo de água. Este coeficiente reflete ambas as propriedades, as do meio e do fluido e pode-se expressar como:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (2.1)$$

Na equação (2.1), K é a condutividade hidráulica, k é a permeabilidade intrínseca do meio, ρ é a densidade do fluido, g é a aceleração da gravidade, μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

A equação de Navier-Stokes é a lei fundamental que descreve a dinâmica dos fluidos viscosos mais comuns, este em conjunto com as leis de conservação da massa e da energia permitem descrever seu movimento. No entanto, esta lei não descreve imediatamente a dinâmica de fluidos que circula por um meio poroso, em virtude da sua tortuosidade e resistência oferecida pelo meio.

Em 1856, Henri Darcy propôs uma lei que descreve adequadamente a dinâmica de um fluxo incompressível num meio poroso, esta lei deu início ao entendimento do comportamento dos fluidos em um meio poroso.

Esta lei se postulou para fluidos na zona saturada e originalmente só para uma direção, cujo valor só tem validade para fluxos em regime laminar.

$$V = -K \frac{\partial h}{\partial s} \quad (2.2)$$

Na equação (2.2), V é a velocidade de descarga, K é a condutividade hidráulica, $\partial h/\partial s$ é o gradiente hidráulico na direção s .

Bear (1972) indica que para descrever o comportamento de um fluido em um domínio de meio poroso, faz-se necessário utilizar o conceito de Volume Elementar Representativo, VER (volume onde os parâmetros hidráulicos são considerados constantes). Na Figura 2.1, pode-se observar a que se refere o VER.

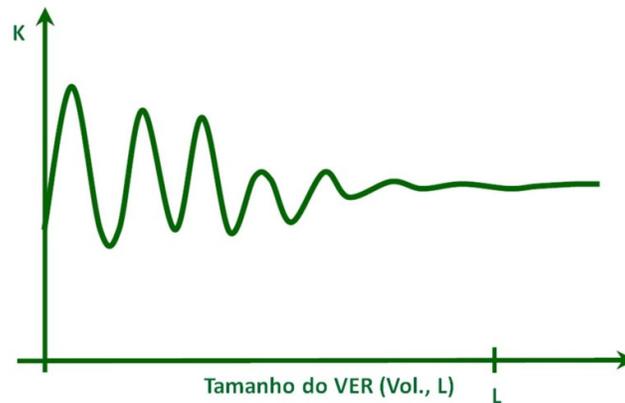


Figura 2.1: Tamanho do VER, Bear (1972).

O conceito do VER permite substituir o meio real por um modelo teórico de meio contínuo no qual pode-se atribuir valores constantes aos parâmetros como porosidade, permeabilidades, etc., descrevendo o fluxo dentro de um domínio por meio de equações diferenciais.

A teoria do comportamento dinâmico dos fluidos em meios porosos é amplamente descrito em Bear (1972).

2.2. Fraturas

De acordo com Telles (2006), as rochas podem apresentar algumas feições geológicas como planos de acamamento, falhas, fissuras, fraturas, juntas e outros. Tais feições são caracterizadas pelo termo descontinuidade. Esse termo foi primeiramente adotado anos atrás por vários autores (Fookes e Parrish 1969; Attewell e Woodman 1969; Priest 1975; Goodman 1976) para cobrir uma gama de imperfeições mecânicas encontradas em formações rochosas.

Vargas e Barreto (2003) explicam como a geologia distingue e define feições como fraturas, falhas, juntas, diaclases, que são resultados de ações mecânicas sobre os maciços rochosos em algum momento da sua história geológica.

No caso de fraturas, Telles (2006) aponta algumas características comuns destas formações como, de baixa resistência cisalhante, resistência à tração praticamente nula e alta condutividade hidráulica comparado com a massa rochosa. As descontinuidades podem ser falhas, juntas, fissuras ou fraturas.

Uma fratura é um plano de ruptura da rocha. Em geral, uma fratura se forma devido a tensões concentradas ao redor de defeitos, heterogeneidades e descontinuidades físicas. Estas se formam em resposta a tensões tectônicas, térmicas e pressões altas dos fluxos. Hidraulicamente, cada fratura se comporta como um canal na qual o fluxo passa, e quase sempre estão conectadas a outras, e assim, estas formam um sistema de condutividade preferencial dentro do meio. Neste trabalho a palavra “fratura” é usada como um termo geral.

2.2.1. Características das fraturas

Blöcher et al. (2010) indicam que as fraturas podem representar caminhos preferenciais para os fluxos, ou podem atuar como barreiras geológicas. Estas duas opções dependerão essencialmente da origem e da orientação das fraturas em relação a seu recente campo de esforços (Barton et al., 1995; Gudmundsson, 2001; Moeck et al., 2008; Sheck-Wenderoth et al., 2008; Magri et al., 2010).

A caracterização da geometria de uma família de fraturas dependerá da caracterização das fraturas que conformam esta família. Esta caracterização geral para as famílias envolve definições de:

- Orientação
- Frequência
- Espaçamento
- Forma
- Tamanho
- Abertura
- Material de preenchimento.

Telles (2006) apresenta detalhes dessa caracterização.

Os materiais de preenchimento que se encontram dentro das fraturas podem ter origem de soluções pneumatolíticas, soluções hidrotermais etc. Quando a fratura apresenta material de preenchimento, a condutividade hidráulica da fratura poderia chegar a ter o valor da condutividade hidráulica deste material. Contudo, isso não seria tão real ou padrão devido a que às vezes este material de

preenchimento atua como um material quase-impermeável, tornando a condutividade hidráulica da fratura menor do que seria se considerar a fratura sem preenchimento.

Com relação à forma e dimensão das fraturas naturais, estas não são bem conhecidas, devido à complexidade que apresentam em três dimensões. Esta é uma das maiores incertezas ao se fazerem medições in-situ das fraturas no maciço rochoso. Mesmo assim, a geometria é o fator principal para caracterizar e compreender os processos e fenômenos que ocorrem nele. Conseqüentemente, as medidas destas características devem seguir procedimentos adequados para um maior aprimoramento.

Morales (2008) aponta que as formas geométricas na natureza não têm formas regulares; sua análise apropriada está condicionada a representar do jeito mais confiável estas irregularidades. Os fractais têm a particular propriedade de ter a mesma ou estatisticamente a mesma forma em toda escala.

A influência da rugosidade das paredes das fraturas no escoamento e transporte vem sendo estudada, mostrando que as paredes são geralmente irregulares, possuindo propriedades e natureza fractal com auto-afinidade Berkowitz (2002 apud Marin, 2011). Na Figura 2.2 pode-se observar as características do fractal auto-similar e o fractal auto-afim.

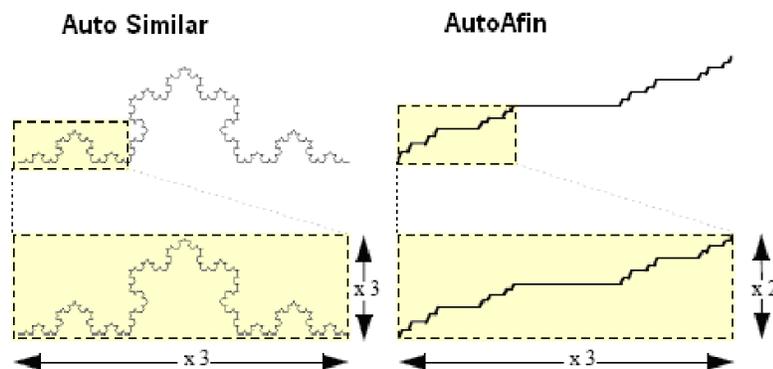


Figura 2.2: Fractal Auto-similar vs. Fractal Autofin, Morales (2008).

A fractalidade da rugosidade parece não depender da mineralogia, direção da fratura ou mecanismo de formação da mesma. O entendimento do motivo da

fractalidade com auto-afinidade e as diversas escalas de rugosidade são ainda um problema aberto, apesar dos avanços recentes (Davy et al., 2010; Bae et al., 2011).

Para descrever características similares das fraturas que podem aparecer a diferentes escalas, a análise fractal poderia ser uma alternativa para caracterizá-las. O uso dos fractais também tem sido usado para modelar fluxo em fraturas (Morales, 2008).

Para descrever aleatoriamente as características geométricas das fraturas se usam diversas distribuições estatísticas, entre elas, a distribuição normal, lognormal etc. Bonnet et al. (2001 apud Marin, 2011) explicam como estudos recentes de propriedades de escala têm mostrado um ajuste melhor usando descrições baseadas em leis de potência e características fractais. Bear et al. (1993 apud Marin, 2011) indicam que um dado interessante sobre os sistemas que mostram comportamento fractal é a ausência de uma escala de homogeneização, o que previne o uso da definição do volume elementar representativo VER. Porém, o uso dos métodos fractais para descrever características das fraturas ainda continua em discussão. Para maior detalhe revisar Sahimi (1995), Giménez et. al. (1997), Morales (2008), Monachesi & Guarracino (2010).

Em resumo, devido a que as fraturas têm uma variedade de tamanhos, formas e espaçamentos dentro de um mesmo maciço rochoso, o maior desafio, portanto, seria compreender o comportamento do fluido em meios fraturados que permita gerar uma melhor representação espacial das condições geométricas que as fraturas apresentam.

2.2.2. Sistemas de fraturas

Existem dois caminhos para esquematizar as famílias de fraturas de um maciço rochoso, a maneira determinística e a probabilística. No modo determinístico as fraturas apresentam características conhecidas, e no modo probabilístico, as fraturas são geradas de maneira aleatória, na qual suas características seguem distribuições probabilísticas. Para maiores detalhes revisar Telles (2006).

Entre os métodos mais comuns para caracterizar um maciço rochoso deterministicamente, podem-se citar os seguintes:

- Levantamentos geológicos
- Técnicas geofísicas
- Exploração geotécnica por meio de sondagens (à percussão, rotativas, etc.).

Marin (2011) indica que medidas diretas das características das fraturas não são possíveis de serem obtidas com os métodos mencionados acima, porque geralmente são medidas as respostas devido à presença de fraturas. Então para o estudo de fraturas, as descrições probabilísticas e de interpolação são complementares e comumente usadas.

Os maciços rochosos contêm famílias de fraturas que estão entrecortadas entre elas, cada família com suas próprias características geométricas. Porém não necessariamente o alto grau de fraturamento indica uma boa condutividade hidráulica. Um maciço rochoso pode apresentar famílias de fraturas, mas elas não necessariamente estão conectadas, e como resposta este maciço apresenta uma permeabilidade menor da esperada. Para estimar a conectividade das fraturas em uma região, o conceito de percolação é uma ferramenta válida, esta poderia ser verificada, por exemplo, em testes em poços, entre outros.

Como a rugosidade na fratura, a percolação poderia ser tratada sob a teoria fractal. Idealizando desta forma a conectividade das famílias dentro de um maciço rochoso. Trabalhos sobre este tema podem ser revisados em Berkowitz (2002); Neuman (2005) e Hunt (2005).

2.3. Meios porosos fraturados

O estudo das formações geológicas fraturadas é de interesse considerável devido à aplicação que pode ser feita em diversos campos como em petróleo, exploração de reservatórios, fundações de barragens, depósitos de resíduos e fontes de água.

O meio poroso fraturado pode ser descrito como uma rede de fraturas interligadas dentro de um meio contínuo ou em um meio contínuo equivalente.

Esta descrição vai depender da intensidade de fraturamento, da escala do problema e da disponibilidade de dados. Para entender e quantificar o fluxo nestas formações fraturadas é importante ter em conta a compreensão das propriedades hidráulicas deste meio e a interação entre meio poroso e rede de fraturas.

Modelar uma rede de fratura inserida em um meio poroso precisa de uma investigação detalhada dos condicionantes geológicos que regem a circulação da água nestes meios. Estas investigações deverão ser os adequados para que permitam inferir caminhos preferenciais de fluxo, e que possibilitem a eleição do modelo conceitual que represente melhor a realidade física do problema. Apesar de que em rochas fraturadas os aspectos quantitativos são poucos conhecidos, como por exemplo, a porosidade, permeabilidade entre outras que apresentam maior incerteza, estas serão estimadas a partir de testes de campo, ensaios de laboratório, analiticamente ou inferidos estatisticamente que permitam modelar o fluxo para o modelo conceitual eleito.

2.3.1. Fluxo em meios porosos fraturados

Compreender o que acontece com o comportamento do fluxo em uma rede de fraturas inserida um meio poroso não é uma tarefa fácil, ao contrário, apresenta complexidade para análise do fenômeno de percolação por ser um meio essencialmente heterogêneo e anisotrópico, no qual as fraturas oferecem ao fluxo caminhos preferenciais dentro do meio.

Para conseguir entender a questão do fluxo nas redes de fraturas dentro do meio poroso, o tratamento fundamental é saber o que acontece em uma única fratura. Louis (1969) sugere que a primeira etapa seja o estudo das leis de percolação em uma fratura elementar em regimes laminar e turbulento, levando-se em consideração todos os parâmetros que possam intervir, dentre desses, a rugosidade, a forma geométrica da fratura e a presença de materiais de preenchimento. Para maiores alcances desta parte, revisar Louis (1969).

Similarmente aos meios porosos, os meios fraturados também precisam da determinação da condutividade hidráulica. O modelo mais simples para uma fratura é o modelo de placas paralelas, na qual a fratura tem uma abertura constante, não apresenta material de preenchimento nem rugosidade. Na Figura

2.3 pode-se observar um quartzito que se assemelha ao modelo de duas placas paralelas. Na Figura 2.4 se indica a sequência a partir de uma fratura natural até o conceito de placas paralelas.

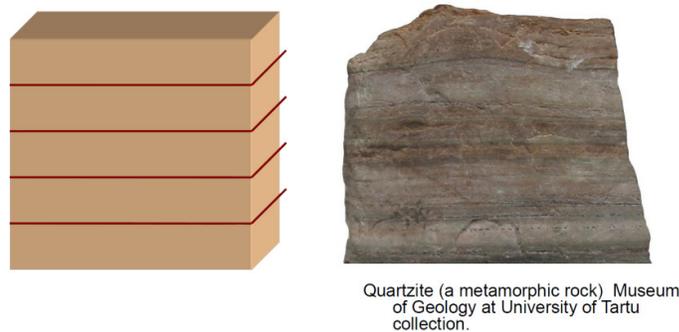


Figura 2.3: Quartzito que se assemelha ao modelo de duas placas paralelas. ETS. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (2011).

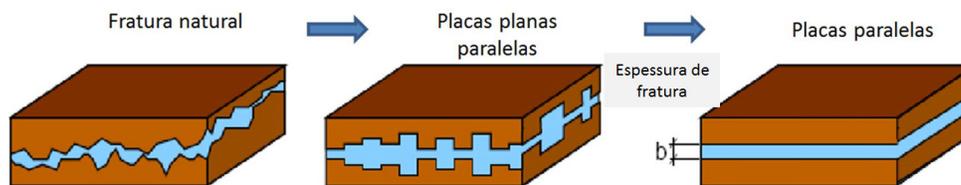


Figura 2.4: Sequência do conceito desde fratura natural até o conceito de placas paralelas, Morales (2008).

Nesta analogia, o fluxo é considerado laminar e com uma distribuição de velocidades parabólicas na seção transversal da fratura, como representado na Figura 2.5.

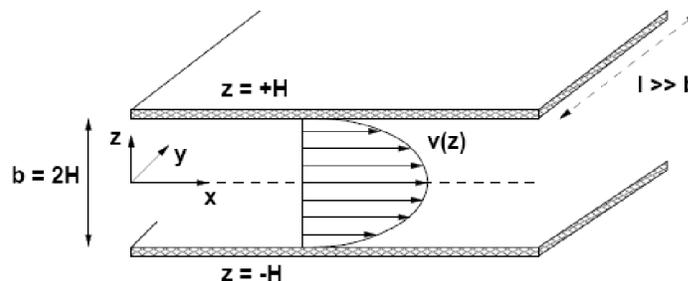


Figura 2.5: Fluxo entre duas placas paralelas, Morales (2008).

O estudo de fluxo no plano de fratura é baseado nas equações de Navier-Stokes. De acordo com Vargas e Barreto (2003) a partir da integração das

equações de Navier-Stokes para a geometria de duas placas paralelas saturadas, com abertura constante, fluxo viscoso e incompressível e desprezando as forças de inércia, chega-se á:

$$V = -\frac{\gamma e^2}{12\mu} \frac{\partial h}{\partial s} \quad (2.3)$$

Na equação (2.3), V é a velocidade de escoamento, γ é o peso específico do fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, e é a abertura da fratura e $\partial h/\partial s$ é o gradiente hidráulico na direção s .

A vazão (q_f) através da fratura também pode ser obtida a partir da equação (2.4):

$$q_f = -\frac{\gamma e^3}{12\mu} \frac{\partial h}{\partial s} \quad (2.4)$$

Da equação (2.4) pode-se notar que a vazão é proporcional ao cubo da abertura, sendo chamada, portanto, de lei cúbica.

Vargas e Barreto (2003) indicam que o fluxo em fraturas passa do regime laminar para turbulento de acordo com um valor crítico do número Reynolds, sendo este valor crítico dependente da relação k/D_h onde k é uma medida da rugosidade das paredes das fraturas e D_h é o diâmetro hidráulico que é basicamente função de e e da abertura da fratura. Para mais detalhes revisar Louis (1969).

O modelo de placas paralelas não representa um comportamento do fluxo na fratura tão real, este modelo apresenta muitas simplificações, como por exemplo, assume que as fraturas são planas, que a rugosidade é desprezível, não existindo perda de carga; que as fraturas não contêm material de preenchimento, fraturas com abertura constante. No entanto, sabe-se que a abertura real de uma fratura vai depender do campo de tensões, dos deslocamentos tangenciais produzindo aumento ou diminuição da abertura, e da profundidade onde se encontram as fraturas, na qual as fraturas horizontais poderiam estar mais fechadas, entre outras.

Outra questão importante levantada por Vargas e Barreto (2003) está relacionada à validade da lei cúbica para quaisquer valores de abertura. Relacionado a este aspecto, distinguem-se duas definições de abertura. Uma abertura real da fratura e outra abertura hidráulica, sendo que esta última obedece à lei cúbica. De acordo com os autores, experimentos demonstram que a abertura real da fratura coincide com a abertura hidráulica até valores pequenos da abertura

real a partir do qual o modelo da lei cúbica perde rapidamente a validade. Portanto, considerar a lei cúbica válida para análises de fluxo subterrâneo em hidrogeologia é aceite com certas restrições.

Na análise do fluxo subterrâneo, massas de rochas que se encontrem a pouca profundidade podem apresentar várias famílias de fraturas com diferentes aberturas e material de preenchimento; porém, este maciço rochoso pode ser considerado como um conjunto de blocos de rochas intactas separadas por descontinuidades, que para o presente trabalho denominamos fraturas; assim estes “blocos” de massa rochosa podem ser considerados como meios porosos contínuos que estão separados das outras pelas fraturas e que tem comportamento hidráulico diferente. Assim o fluxo através deste meio complexo dependerá da magnitude de condutividade hidráulica destes dois regimes (Pan et al., 2010). Todavia, a condutividade hidráulica da rocha intacta poderia ser muito menor que da fratura, portanto, a permeabilidade do maciço rochoso dependerá quase totalmente das fraturas, de suas famílias e de sua interligação delas dentro do meio.

Para os meios fraturados, que são essencialmente meios altamente heterogêneos o VER poderia não existir ou ser muito maior que a escala de observação do problema. A Figura 2.6 permite observar a diferença do VER para um meio poroso e para um meio fraturado.

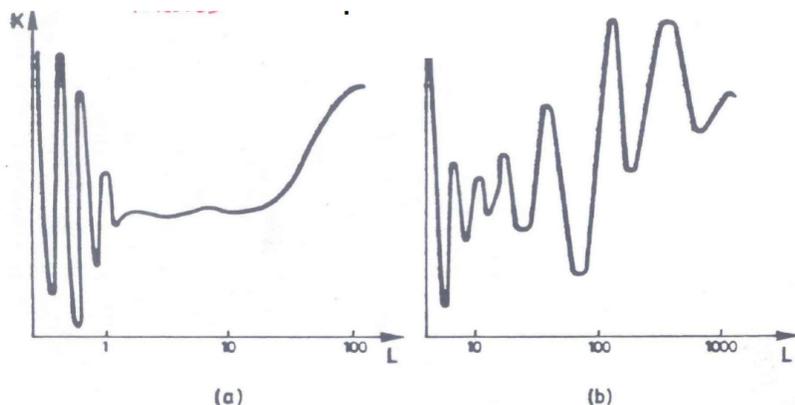


Figura 2.6: (a) VER para o meio poroso, (b) VER para o meio fraturado, ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (2011).

O meio fraturado tem um caráter heterogêneo maior do que o meio poroso, sendo desnecessário pensar na média de parâmetros como permeabilidade ou porosidade para análises rigorosas por não representar o comportamento hidráulico do meio mais próximo ao comportamento real; mas como foi mencionado anteriormente, este vai depender do grau de faturamento, da escala e do problema físico a analisar.

A avaliação do comportamento do fluxo em um meio poroso fraturado pode ser enfocada, essencialmente, de três formas. A primeira considerando um meio hidraulicamente equivalente, na qual a condutividade hidráulica do sistema de fraturas será concebida por um tensor de permeabilidade resultante. A segunda forma considerando um meio discreto, na qual as fraturas mantenham sua orientação espacial e geometria natural, e estas serão mantidas assim na resolução do problema. E a terceira forma, a partir do conceito de dupla porosidade que é, fundamentalmente, uma combinação das duas formas anteriores.

2.4.

Modelos conceituais de fluxo em meios porosos fraturados

Alvarenga (2008) explica que a modelagem dos sistemas naturais têm duas componentes básicas: o modelo conceitual e o modelo matemático. O modelo conceitual é a representação simbólica qualitativa do sistema através de ideias, palavras, figuras, esquemas, etc. O modelo matemático é a representação do modelo conceitual através de equações.

Os modelos simplificados, segundo a abordagem da heterogeneidade associada às fraturas, têm três enfoques gerais. O primeiro deles é o meio contínuo equivalente, na qual as propriedades hidráulicas do meio são estimadas usando coeficientes equivalentes, tais como a permeabilidade e porosidade, e que represente o comportamento das fraturas dentro do volume do maciço rochoso. O segundo modelo conceitual é um meio com enfoque discreto, na qual o meio é heterogêneo, apresentando propriedades diferenciadas dentro de seu domínio, as características singulares das fraturas são levadas em consideração na modelagem. E um terceiro com uma abordagem mista deles, na qual as propriedades do meio equivalente são diferenciadas das propriedades das fraturas, e se define um termo de transferência entre estes meios.

Na análise do fluxo em meios porosos fraturados, a escolha do modelo conceitual adequado não tem regra geral, e será feita essencialmente segundo a escala do problema e também do grau de fraturamento do maciço rochoso. Na Figura 2.7 podem-se observar para um mesmo problema hidráulico os diferentes modelos conceituais que poderiam ser abordados.

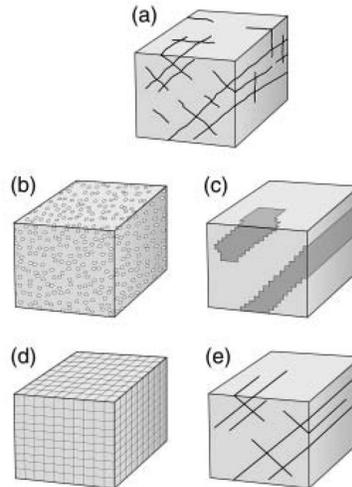


Figura 2.7: (a) Meio poroso fraturado real, (b) Modelo contínuo equivalente (c) Modelo contínuo equivalente com zonas de alto fraturamento que representam zonas com alta condutividade hidráulica, (d) Modelo de dupla porosidade, (e) Modelo de fraturas discretas. Cook (2003).

Geralmente uma rocha fraturada é considerada heterogênea e anisotrópica, e não é uma boa aproximação considerá-la como um meio homogêneo, porém, quando a rocha apresenta um forte fissuramento, e dependendo da escala do problema, poderia ser tratada dessa forma. Esta simplificação é feita para quando os cálculos não necessitam muito detalhe nem precisão como se fosse para uma análise de transporte de solutos por exemplo.

Estes modelos podem ser usados para os casos de análise de fluxo em condições saturadas e não saturadas. Para o caso de fluxo não saturado em meios porosos, a análise parte da teoria do fluxo capilar. Para o caso de fluxo não saturado em fraturas, a análise é baseada na teoria do fluxo capilar e também na teoria do fluxo tipo película. Para mais detalhes revisar Alvarenga (2008).

A seguir, descrevem-se de maneira resumida os modelos que têm sido desenvolvidos na literatura para conceituar o comportamento hidráulico do meio poroso fraturado.

2.4.1. Modelo contínuo equivalente

Este modelo geralmente representa um meio na qual se pode estimar um VER (Volume elementar representativo). Este é aplicável em meios porosos e em meios fraturados que apresentem fraturamento intenso para a escala do problema. Neste modelo o meio fraturado com alto grau de fissuramento é tratado como um meio poroso equivalente, mas esta abordagem pode apresentar algumas limitações devido a sua escala e as características geológicas do maciço rochoso. Em alguns casos o VER pode resultar muito maior ao tamanho físico do problema e não ser mais representativo.

Dentro de um meio poroso fraturado se sabe que existem várias famílias de fraturas entrecruzadas, cada uma delas com suas próprias características geométricas, assim assume-se que estas famílias estão conformadas por fraturas planas com aberturas constantes, um espaçamento uniforme e uma orientação dominante. Na Figura 2.8 apresenta-se uma família de fraturas em 2D.

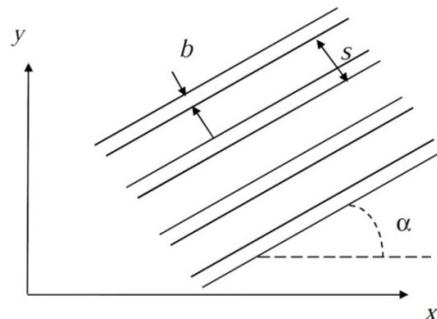


Figura 2.8: Família de fraturas de espessura b e separação s que apresentam orientação diferente aos eixos de interesse, vista 2D.

Uma solução analítica simples para uma rede de fraturas dentro de um maciço rochoso pode ser abordada mediante o cálculo de um tensor de permeabilidade equivalente.

He & Chen (2012) indicam que o tensor de permeabilidade equivalente é essencial para a aplicação do modelo do meio poroso equivalente que é comumente usado na simulação numérica de percolação para maciços rochosos fraturados.

O tensor de permeabilidade equivalente fica definido na equação (2.5).

$$[K] = \sum_{i=1}^n \frac{ge_i^3}{12s_i\nu} \begin{bmatrix} 1 - (n_x^i)^2 & -n_y^i n_x^i & -n_z^i n_x^i \\ -n_y^i n_x^i & 1 - (n_y^i)^2 & -n_y^i n_z^i \\ -n_z^i n_x^i & -n_y^i n_z^i & 1 - (n_z^i)^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_m & & \\ & k_m & \\ & & k_m \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Na equação (2.5), $[K]$ é o tensor de permeabilidade equivalente, n é o número total de fraturas da família, i é o número de fratura da família, e_i é a abertura da fratura i , s_i é o espaçamento entre fraturas, n_x^i, n_y^i, n_z^i são os cossenos diretores do vetor unitário normal à fratura, k_m é o coeficiente de permeabilidade da matriz rochosa, ν é o coeficiente de viscosidade cinemática e g é a aceleração da gravidade.

Para maiores alcances desta parte recomenda-se revisar Li et al. (2008) e He & Chen (2012).

2.4.2. Modelo de fraturas discretas

O modelo de redes de fraturas discretas é um modelo mais realista para modelar fraturas em comparação com os modelos anteriores, em virtude à localização espacial das fraturas, e é utilizado para redes de fraturas inseridas em matriz rochosa com permeabilidade intrínseca muito baixa, porém, podem encontrar-se fissuras pequenas e tênues que poderiam dar um caráter de efeito de dupla porosidade ao meio; mas como foi explicado nos itens anteriores, a depender da escala do problema.

Neste modelo a localização espacial das fraturas tem um papel determinante na modelagem do meio fraturado, mas como uma grande desvantagem deste modelo apropriado para os meios fraturados é a obtenção dos dados de campo.

Na análise de fluxo em meio poroso fraturado, o meio mesmo às vezes pode ser simplificado considerando somente as redes de fraturas, em virtude à baixa permeabilidade que pode ter a matriz em comparação à permeabilidade da rede de fraturas. Porém, às vezes a matriz rochosa deverá ser considerada quando o problema compreende a análise de transporte de solutos. Neste caso, a fraturas seriam canais preferencias de fluxo e apresentariam coeficiente de armazenamento

baixo, na matriz rochosa pelo contrário, o meio apresenta uma permeabilidade baixa e um coeficiente de armazenamento considerável.

2.4.3. Modelo com dupla porosidade

O modelo de dupla porosidade consiste de dois subdomínios que interatuam com propriedades hidráulicas diferenciadas, uma delas consiste em uma matriz porosa e outra em um conjunto de macroporos, fissuras, ou fraturas que são altamente condutoras em comparação com a matriz (Lewandowska et al., 2004).

O modelo foi introduzido por Barenblatt et al. (1960), o qual considera dois tipos de meios porosos com diferente condutividade hidráulica, uma delas com blocos de poros de baixa permeabilidade, denominada comumente de matriz, que abraça outro meio poroso conectado com maior permeabilidade, denominado, comumente de rede de fraturas. Na Figura 2.9, mostra-se um exemplo de modelo de dupla porosidade.

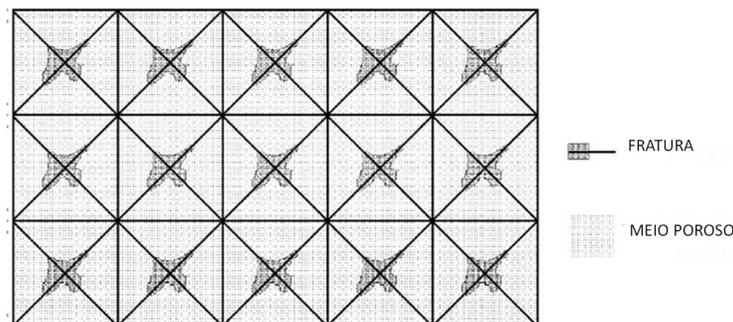


Figura 2.9: Fraturas cruzadas com alta permeabilidade, bordada por blocos de baixa permeabilidade, Bourgeat et al. (2003).

Neste modelo que contém duas regiões uma de alta e outra de baixa permeabilidade são tratadas como dois meios que se sobrepõem, com duas equações, um para cada subdomínio. Estas equações estão acopladas por um termo de transferência que descreve a troca de água entre as duas regiões. Este termo de transferência é o componente mais crítico a ser estimado.

Desses três enfoques para descrever o comportamento do fluxo em um meio poroso fraturado, cada uma delas têm suas vantagens e desvantagens. Na Tabela 2-1, foi elaborado um resumo das vantagens e desvantagens destes modelos, originalmente descrito por Cook (2003).

Tabela 2-1: Vantagens e desvantagens dos modelos conceituais Cook (2003)

Modelo	Vantagens	Desvantagens
Modelo contínuo equivalente	<ul style="list-style-type: none"> -Um enfoque mais simples com uma menor quantidade de dados necessários. -As zonas altamente fraturadas podem ser simuladas como zonas com alta porosidade e condutividade hidráulica. -Mais conveniente para aplicações à escala regionais de fluxo permanente, mas não representa as fraturas a grandes escalas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Aplicação limitada para problemas de fluxo transiente. -Aplicação limitada para problemas de transporte de solutos. -Supõe-se que o VER pode ser definido, previsões confiáveis somente podem ser feitas apenas em escalas maiores ou igual à escala que foi definida o VER. -A determinação dos parâmetros a estas escalas podem ser difícil.
Modelo de fraturas discretas	<ul style="list-style-type: none"> -Uma representação explícita de fraturas isoladas e redes de fraturas. -Pode permitir o intercâmbio de água e soluto entre a matriz e a fratura. -Bom para entender o processo conceptual dentro de um marco simplificado. -Útil para a determinação de parâmetros contínuos equivalentes baseados em caracterização explícita. 	<ul style="list-style-type: none"> -Requer o conhecimento mais detalhado do campo, isto é raramente disponível. -Dificuldade para extrapolar parâmetros de pequenas escalas para escalas maiores de interesse. -Requer uma capacidade computacional alta para simular redes complexas.
Modelo de dupla porosidade	<ul style="list-style-type: none"> -Adequada para sistemas na qual a matriz tem alta porosidade e permeabilidade. -Um enfoque simples, faz deste um modelo atrativo. -Permite o intercâmbio de água e soluto entre a matriz e a fratura. -Pode-se registrar as demoras das respostas de intercâmbio de água e soluto entre a matriz e fraturas devido à armazenagem da matriz. 	<ul style="list-style-type: none"> -Este modelo tende a sobre regularizar e simplificar a geometria do problema. -Apresenta dificuldade para quantificar os parâmetros necessários de entrada para este modelo. -Assume que o VER pode ser definido. -Previsões confiáveis podem ser feitas apenas em escalas maior que ou igual à dimensão que foi definida o VER.