

CONSIDERAÇÕES SOBRE ASPECTOS DO FLUXO EM AQUÍFEROS FRATURADOS RELEVANTES À EXPLORAÇÃO DE ÁGUA

E. Vargas Jr.¹; A.B.C. Barreto²

RESUMO

O presente trabalho faz considerações sobre aspectos básicos do fluxo de fluidos em meios fraturados. Inicialmente, fatores relevantes como gênese, propagação e descrição geométrica de sistemas de fraturas são considerados. Alguns aspectos relevantes da mecânica de rochas também são abordados. Em seguida, são discutidos aspectos que dizem respeito às características da hidráulica de meios fraturados. Aspectos da modelagem de fluxo nestes meios são também considerados e finalmente é feita uma aplicação de alguns conceitos discutidos em processos de estimulação de poços. Os aspectos discutidos tem relevância a inúmeros problemas de engenharia em meios rochosos e em particular na exploração de água em meios fraturados.

PALAVRAS-CHAVE

fluxo; meio fraturados; aquíferos fissurais

1. INTRODUÇÃO

O fluxo de fluidos em meios fraturados tem sido objeto da atenção da engenharia e geologia desde a década de 40. Na engenharia de petróleo, o interesse está relacionado à exploração de petróleo em reservatórios fraturados, que ocorrem em várias partes do mundo inclusive o Brasil. Na engenharia civil, o interesse se relaciona à obras como barragens, escavações subterrâneas, rodovias, etc. Na engenharia de minas o interesse está ligado à atividades mineiras de superfície e subterrânea. Em geologia, o interesse está ligado à hidrogeologia e aos estudos de migração de fluidos na crosta terrestre. Problemas especiais como o armazenamento de resíduos, principalmente resíduos radioativos de alta intensidade, tem sido objeto de estudos em vários países. O conjunto destas atividades levou, ao longo dos anos, à uma melhor compreensão da questão do fluxo de fluidos em meios fraturados. A exploração de água em meios fraturados pode se beneficiar destes conhecimento acumulado para otimizar os seus processos e atividades. O presente trabalho sumariza os aspectos do fluxo de fluidos em meios fraturados relevantes ao problema da exploração de água. São apresentados inicialmente aspectos relevantes da geologia estrutural e mecânica de rochas. Em seguida, são abordados conceitos básicos de fluxo em meios fraturados e o aspecto da modelagem nestes meios, suas dificuldades e perspectivas. Finalmente uma aplicação de alguns dos conceitos descritos é feita a processos de estimulação de poços.

1) Depto de Engenharia Civil PUC Rio; Depto de Geologia, UFRJ, Rio de Janeiro

2) Depto de Geologia Aplicada UERJ; CPRM, Rio de Janeiro

2. ASPECTOS RELEVANTES DA GÊNESE E DA GEOMETRIA DE SISTEMAS DE FRATURAS

A geologia distingue e define feições como fraturas, falhas, juntas diáclases, que são o resultado de ações mecânicas ou fluido mecânicas sobre os maciços rochosos em algum momento de sua história geológica. Esta feições, do ponto de vista da mecânica e da hidráulica são descontinuidades já que suas propriedades podem ser muito diferentes daquelas da rocha intacta e tem dimensões muito menores. No contexto do presente trabalho, vai ser utilizado o termo fratura para designar estas feições, independentemente de sua gênese.

Fraturas, como mencionado acima, são criadas em processos de ruptura do meio rochoso. Estas rupturas podem ocorrer sob ambientes diversos do estado de tensão. Os estados de tensão na crosta podem ser preponderantemente de tração ou de compressão. Na Figura 1 são mostrados, a partir de ensaios de laboratório, os diversos tipos de ruptura que podem ocorrer no meio rochoso sob os estados de tensão mencionados..

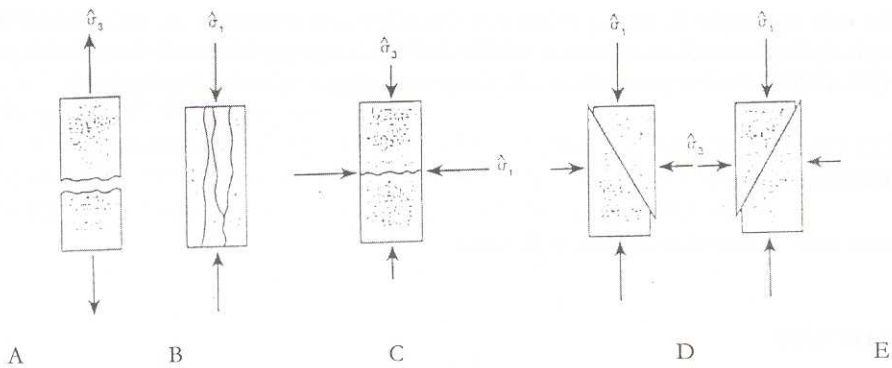


Figura 1 - Tipos de ruptura observados em ensaios de laboratório em rochas

Características geométricas das fraturas relevantes ao fluxo de fluidos dependem dos processos de formação das mesmas. Fraturas criadas em ambientes de tensões de tração, em geral tem sua superfície mais rugosa. É o caso, por exemplo, de fraturas criadas por resfriamento como o que ocorre em massas basálticas (caso A da Figura 1). Fraturas criadas em ambientes de compressão podem ser rugosas ou lisas dependendo das tensões de confinamento existentes na época que as rupturas ocorreram. Se as tensões de confinamento são relativamente baixas, a ruptura típica, como mostrado na Figura 1, caso B, aparece como fraturas paralelas à tensão principal maior. Estas fraturas são semelhantes às fraturas geradas em ambientes de tração. Um exemplo típico são as chamadas juntas de alívio. Se as tensões de confinamento são mais altas, as rupturas são tipicamente de cisalhamento (casos D e E). É o que ocorre nos casos de falhamentos de vários tipos comumente descritos pela Geologia Estrutural. Muitas vezes, o processo de gênese de fraturas está relacionado à propagação de fraturas já existentes. Isto pode ocorrer em diversos tipos de solicitações, como mostrado na Figura 2.

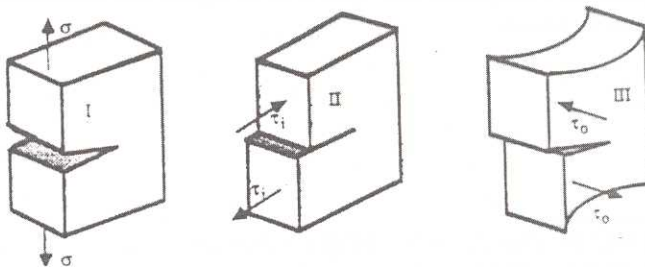


Figura 2 - Modos de propagação de fraturas em rochas quando submetidas a diferentes estados de tensão

2.1 GEOMETRIA DE SISTEMAS DE FRATURAS

Os sistemas de fraturas gerados pelos processos descritos acima podem ser bastante diversificados no que diz respeito à sua disposição geométrica espacial. Em geral, como mostrado na Figura 3, as fraturas se dispõem aproximadamente em famílias nas quais a orientação espacial é aproximadamente a mesma. O conhecimento atual da Mecânica das Rochas não é capaz ainda de explicar com precisão os motivos para isto.

De qualquer maneira, o conhecimento da geometria das famílias de fraturas é muito importante para poder prever o comportamento do ponto de vista de fluxo, de meios fraturados. A quantificação de algumas grandezas é necessária para isto. Estas grandezas são: atitude, espaçamento, persistência e abertura (ver Figura 4)

A atitude representa a orientação espacial das fraturas. O espaçamento quantifica a distância entre os planos das fraturas. A persistência estabelece a extensão das fraturas em seu plano e é em geral quantificada pelo comprimento do traço, que vem a ser o segmento interseção entre o plano da fratura e o plano de um afloramento, por exemplo. Dentre as grandezas definidas, incluindo a abertura, a persistência é sem dúvida a mais difícil de ser quantificada. Muitos estudos são realizados tomando-se valores médios para as grandezas mencionadas. No entanto, é possível quantificar estas grandezas de forma estocástica, já que se sabe que elas obedecem a determinados tipos de distribuições probabilísticas (Priest, 1993) Sabe-se, por exemplo, que o espaçamento parece obedecer a uma distribuição exponencial negativa, assim como o traço. A atitude, medida pela orientação dos pólos das fraturas parece obedecer uma distribuição normal modificada para a esfera. A abertura por sua vez parece obedecer a uma distribuição log-normal.

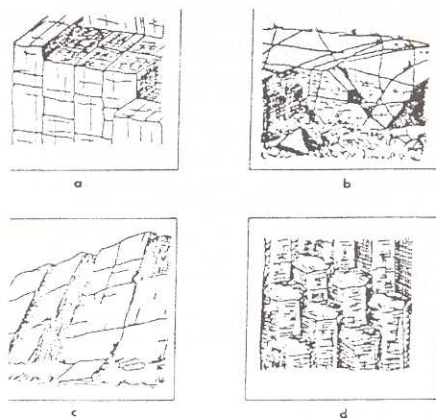


Figura 3 - Geometrias típicas de famílias de fraturas (ISRM, 1981)

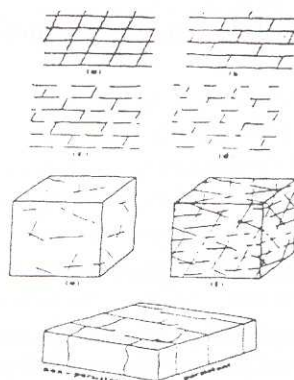


Figura 4 - Geometrias de famílias de fraturas ilustrando conceitos de espaçamento, persistência (ISRM, 1981)

3. CONCEITOS BÁSICOS DE FLUXO EM MEIOS FRATURADOS

3.1 FLUXO EM UMA ÚNICA FRATURA

Para a compreensão da questão do fluxo como um todo, é fundamental o entendimento da hidráulica do fluxo em uma única fratura. Historicamente, este assunto foi objeto de inúmeros trabalhos ao longo dos anos e neles a preocupação maior esteve no sentido de obter um modelo para a representação de fluxo, semelhante à lei de Darcy, normalmente utilizada para descrever o fluxo em meios porosos. O modelo mais simples que se dispõe é o modelo de placas paralelas. Nesta concepção, a fratura é idealizada pelo espaço existente entre duas placas paralelas de abertura constante como mostrado na Figura 5.

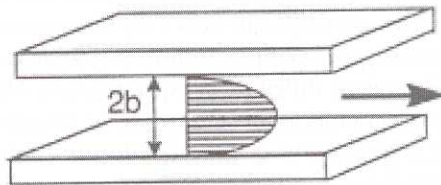


Figura 5 - Perfil de velocidade durante o fluxo entre duas placas paralelas

A integração das equações Navier-Stokes da fluidodinâmica para a geometria de duas placas paralelas saturadas, com abertura constante, fluxo viscoso e incompressível e desprezando as forças de inércia, chega-se (Potter & Wiggert, 1997 por exemplo) à :

$$v = -\frac{\gamma e^2}{12\mu} \frac{\partial h}{\partial s} \quad (1)$$

onde

v = velocidade

γ = peso específico do fluido

μ = viscosidade dinâmica do fluido

e = abertura da fratura

$\frac{\partial h}{\partial s}$ = gradiente hidráulico a direção s

A partir da equação 1 pode-se estabelecer a vazão (q_f) através da fratura como:

$$q_f = -\frac{\gamma e^3}{12\mu} \frac{\partial h}{\partial s} \quad (2)$$

onde

q_f = vazão na fratura (por unidade de comprimento no plano da fratura)

Ao longo dos anos, muitos pesquisadores se preocuparam em demonstrar a validade das equações 1 e 2 para representar o fluxo em fraturas. Em especial a equação 2 estabelece que a vazão é proporcional ao cubo da abertura, criando assim o que se convencionou chamar da lei cúbica. A

Figura 6 mostra um diagrama, extraído do trabalho clássico de Louis (1969), relacionando o fator de atrito λ normalmente usado na Mecânica dos Fluidos (Potter & Wiggert, 1997 por exemplo) com o número de Reynolds para fluxo em fraturas. Sinteticamente, a Figura mostra que o fluxo em fraturas passa do regime laminar para turbulento para um valor crítico do número de Reynolds, sendo que este valor crítico é dependente da relação k/D_h onde k é uma medida da rugosidade das paredes da fraturas e D_h é o diâmetro hidráulico que é basicamente função de e , a abertura da fratura.

Nota-se no entanto que enquanto o regime de fluxo é laminar, os resultados experimentais mostram que a lei cúbica é adequada. Ainda que em grande parte dos problemas o regime de fluxo possa ser considerado como laminar, em certas situações, o regime pode passar de laminar a turbulento. Um exemplo desta situação ocorre na execução de ensaios de bombeamento para determinação de propriedades hidráulicas de meios fraturados. Dependendo das vazões injetadas, o regime nas fraturas pode passar a turbulento, dificultando assim a interpretação dos ensaios.

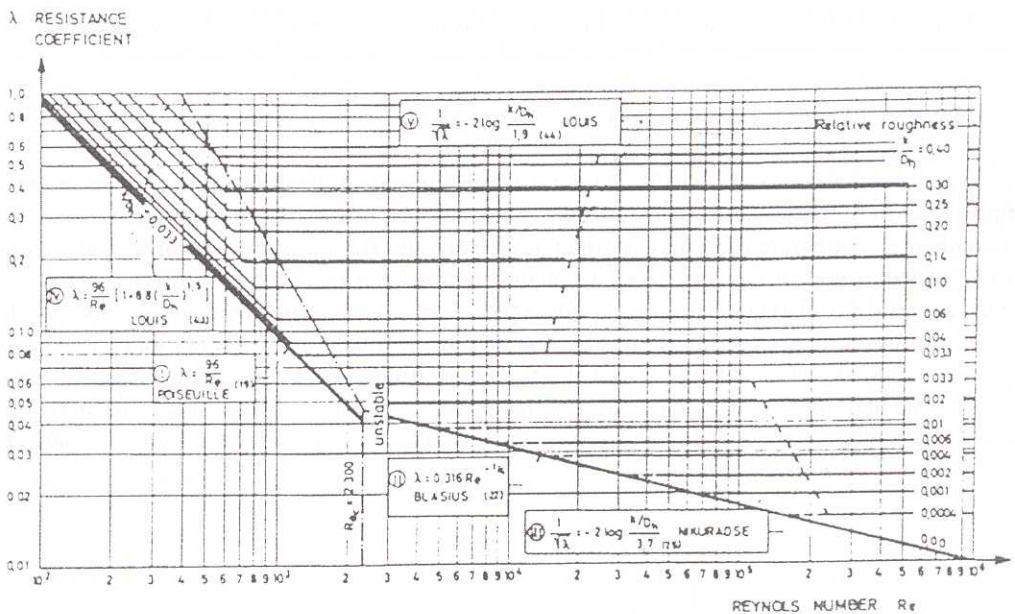


Figura 6 - Relações obtidas experimentalmente entre o número de Reynolds (Re) e o fator de atrito λ para fluxo em fraturas (Louis, 1969)

De acordo com o modelo de placas paralelas descrito acima, considera-se uma abertura constante para a fratura. Sabe-se no entanto que a abertura no plano da fratura é variável. Assim sendo, o modelo descrito não tem a capacidade de representar efeitos locais e variações do fluxo ao longo do plano da fratura. Este aspecto tem importância principalmente quando se trata de problemas de transporte de contaminantes em meios fraturados. Outra questão importante para alguns problemas, está relacionada à validade da lei cúbica para quaisquer valores de abertura. Relacionado a este aspecto, distinguem-se duas definições de abertura. Uma, a abertura real da fratura e outra a abertura hidráulica, aquela que obedece a lei cúbica. 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 (Figura 7).

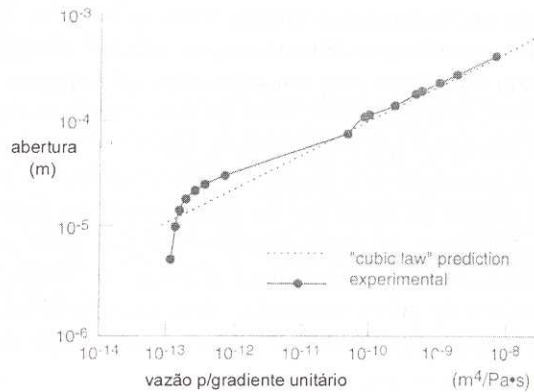


Figura 7 Validade da lei cúbica para uma fratura em siltito (National Research Council, 1996)

3.2 INFLUENCIA DO ESTADO DE TENSÕES

Variações no estado de tensões atuantes sobre fraturas podem ter muita relevância em seu comportamento hidráulico. As tensões relevantes são tensões normais ao plano das fraturas e tensões cisalhantes. Ambas, tem influência direta na abertura das fraturas. Como mostrado na Figura 8, variações nas tensões normais provocam variações significativas na abertura das fraturas. Estas por sua vez, de acordo com as equações 1 e 2, podem provocar variações consideráveis na condutividade das fraturas que é por sua vez função da abertura elevada ao quadrado. Tensões cisalhantes por sua vez podem também provocar variações na abertura das fraturas. Isto ocorre em geral pelo chamado efeito de dilatância para o qual, dependendo das tensões cisalhantes, rugosidade da parede das fraturas e do nível de tensões normais, a abertura aumenta com o aumento de tensões cisalhantes no plano da fratura (Goodman, 1989).

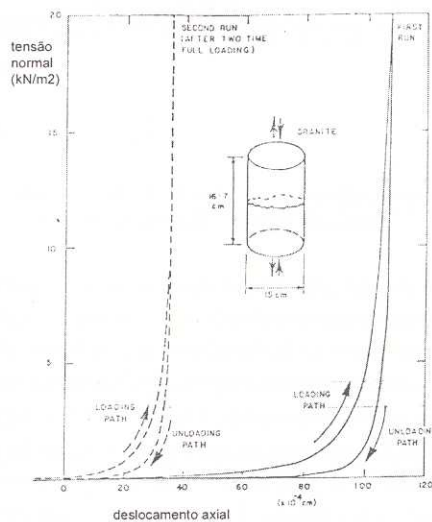


Figura 8 Comportamento de uma fratura sob tensões normais (Gale, 1990)

Os aspectos mencionados acima são relevantes em problemas práticos já que ao longo da vida útil de um reservatório de algum fluido em um meio fraturado, o estado de tensões (normais e cisalhantes) se modifica consideravelmente. Em geral, as tensões normais aumentam progressivamente, levando ao decréscimo das aberturas e conseqüentemente da sua condutividade.

3.3 FLUXO EM SISTEMAS DE FRATURAS

Conhecidas as características básicas do fluxo em uma única fratura, pode-se estabelecer dois diferentes enfoques para caracterizar o fluxo em sistemas famílias de fraturas. No enfoque mais usual, procura-se estabelecer um meio hidraulicamente 'equivalente' ao meio fraturado. Fica implícito com isto que o meio 'equivalente' seja um meio contínuo cujas características hidráulicas são descritas por um tensor de permeabilidade. Vários procedimentos podem ser utilizados para determinar o tensor de permeabilidade 'equivalente' ao meio fraturado (Rocha & Francis, 1977 por exemplo).

Encontradas as propriedades hidráulicas do meio 'equivalente', a análise do problema de fluxo pode ser feita pelas técnicas usuais utilizadas para meios porosos. O enfoque descrito tem sido utilizado com freqüência em problemas de fluxo em meios fraturados, mas tem limitações quanto a sua aplicabilidade. Estas limitações dizem respeito a algumas hipóteses, implícitas do enfoque do contínuo equivalente. Uma destas hipóteses considera que as fraturas sejam persistentes no domínio de análise, o que em muitos casos não é observado. Outra hipótese é que o espaçamento das fraturas de uma mesma família seja pequeno em relação às dimensões do problema sendo analisado. Esta última hipótese é também muitas vezes não observada em problemas práticos. As deficiências do enfoque do contínuo 'equivalente' justificaram o desenvolvimento do enfoque do descontínuo, conhecido também como enfoque discreto. Neste enfoque, o meio fraturado é considerado como um meio discreto formado por uma rede de fraturas interconectadas e para que a análise seja realizada é necessário conhecer a geometria desta rede. Este enfoque é em princípio mais preciso do que o anterior mas em geral muito mais difícil de ser utilizado na prática. O motivo principal disto é que em grande parte dos problemas, as informações quanto à geometria das fraturas é escassa e imprecisa. Assim sendo, nestas situações é muitas vezes necessário se idealizar e simular diferentes cenários.

4. ASPECTOS DA MODELAGEM DE MEIOS FRATURADOS

Modelagem é uma componente importante para a compreensão do comportamento hidráulico de meios fraturados. A partir dos conhecimentos descritos nas seções anteriores, é possível estabelecer procedimentos de modelagem e simulação de processos em meios fraturados. Ambos os enfoques descritos, o enfoque do contínuo 'equivalente' e o enfoque discreto podem ser utilizados. O processo de modelagem é composto de várias etapas. A primeira consiste na coleta das informações disponíveis para a área sendo modelada. As informações mais importantes dizem respeito à geometria do problema, características geométricas e hidráulicas das famílias de fraturas ou fraturas isoladas, regiões de recarga e descarga. As informações relativas às fraturas podem ser determinísticas ou probabilísticas. A segunda etapa consiste na elaboração de um modelo geométrico da área em estudo. Este modelo em geral é feito em 2 ou 3D. Diferentes cenários podem ser idealizados que incorporem possíveis variabilidades nas propriedades e características geométricas. Diversos tipos de modelos foram estabelecidos ao longo do tempo e programas de computador foram desenvolvidos para a análise de problemas de fluxo e transporte. As Figuras 9, 10 e 11 mostram exemplos de geometrias de sistemas de fraturas geradas dentro do enfoque discreto.

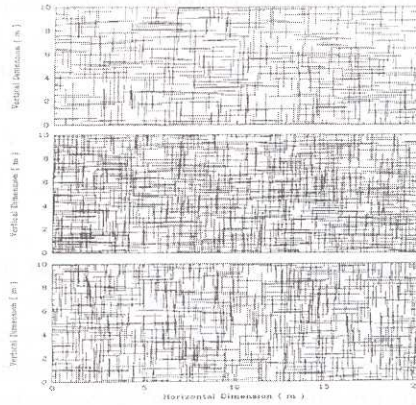


Figura 9 - Simulações numéricas a 2D de sistemas de fraturas dentro do enfoque discreto (National Research Council, 1996)

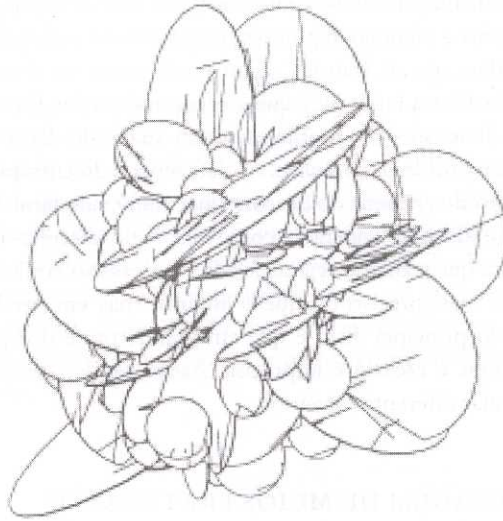


Figura 10 - Simulações numéricas a 3D de sistemas de fraturas dentro do enfoque discreto (National Research Council, 1996)

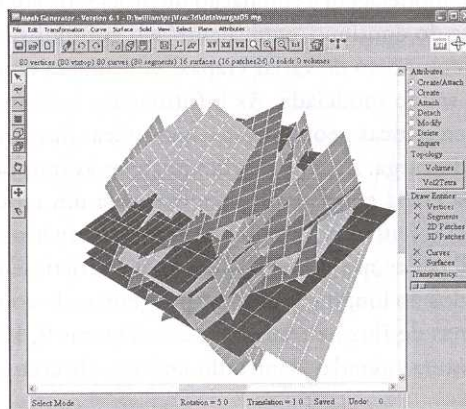


Figura 11 - Simulações numéricas a 3D de sistemas de fraturas dentro do enfoque discreto (Tecgraf, 2003)

A partir das geometrias 2 ou 3D geradas, podem ser utilizados programas análise que quantificam grandezas como cargas hidráulicas, pressões, vazões e concentrações de contaminantes. A presença de elementos drenantes como poços por exemplo pode ser levada em conta também.

5. UMA APLICAÇÃO A PROCESSOS DE ESTIMULAÇÃO DE POÇOS

O método do fraturamento hidráulico foi desenvolvido na década de 40 na indústria do petróleo, para aumentar a produção de reservatórios fraturados, tendo se afirmado como um método de estimulação de poços eficiente e relativamente seguro (Smith, 1989). As primeiras aplicações na estimulação de poços para água subterrânea consistiram na transposição direta, para essa indústria, da tecnologia e processos operacionais desenvolvidos para o petróleo (Gale, 1995).

Na indústria do petróleo, a técnica consiste na aplicação de pressão através da injeção de um fluido viscoso a um segmento isolado do poço ou sondagem, até que uma nova fratura se forme, sendo o fluido viscoso utilizado para forçar a propagação da fratura através do maciço. Na estimulação de poços para água subterrânea, por sua vez, a técnica consiste em se injetar água a uma pressão crescente em uma seção isolada de um poço, de forma a aumentar a pressão hidráulica no interior do furo, acima da pressão ambiente, causando as fraturas existentes no maciço a se abrirem e propagarem através de um certo raio de influência. O nível de pressão necessário para estimular e propagar uma fratura deve ser o suficiente para ultrapassar a tensão efetiva correspondente à profundidade a ser estimulada, dilatar a fratura e induzir a ruptura de qualquer pequena porção de rocha que possa existir entre fraturas ou ao longo delas, que se comporte como um obstáculo à sua propagação. (Gale, 1995).

Smith (1989) revendo os dados de diversas campanhas de fraturamento hidráulico realizadas em diferentes países, observou que o nível de pressão necessário para se estimular um poço de água subterrânea é bem menor do que o aplicado nas primeiras experiências, que utilizaram equipamentos da indústria petrolífera (Gale, 1995). Segundo o autor 90% dos poços foram hidráulicamente estimulados a pressões menores que 7 MPa e apenas 1% necessitou de pressões acima de 14 MPa.

Existem dois tipos de comportamento da pressão de fluido dentro do poço no decorrer do fraturamento hidráulico, observados em experimentos de laboratório e em dados de poços (Hubbert and Willis, 1972 in Smith, 1989) que são mostrados na Figura 12. Esses comportamentos revelam como a rocha está reagindo à injeção do fluido.

No primeiro, ocorre um pico de pressão distinto, conhecido como pressão de ruptura, no qual uma fratura fechada, pré existente na parede do poço é aberta. Após o pico há um decréscimo da pressão aos níveis aplicados na injeção. No segundo tipo, não ocorre um pico distinto, indicando que a pressão necessária para a abertura da fratura é menor ou igual à pressão que está sendo injetada. Os autores atribuíram esse comportamento a fraturas se iniciando a partir de fraturas abertas pré existentes.

Gale (1995), realizou um estudo na Província de Newfoundland and Labrador, CA, para avaliar a eficiência do método de fraturamento hidráulico na estimulação de poços de água subterrânea, comparando poços locados em seis diferentes litologias. Em Newfoundland 90% dos poços captam água de rochas fraturadas, com matrizes de baixa permeabilidade. O programa envolveu para cada poço antes da estimulação: um teste de produção escalonado, um teste de aquífero de 24 horas de duração e o monitoramento da recuperação. Foi também realizada uma campanha de vídeo logger em cada furo, para identificação e caracterização das fraturas existentes e escolha dos intervalos a serem estimulados. Em cada poço foram testados três a quatro intervalos, de 7 a 10 m de comprimento, utilizando-se um sistema de packers duplo para isolar as profundidades selecionadas. As pressões de injeção utilizadas variaram de 2 a 10 MPa acima da pressão hidrostática no local. Após a campanha de fraturamento hidráulico os poços foram ensaiados novamente, repetindo-se os testes de produção escalonados, de aquífero e o monitoramento da recuperação do nível d'água. Repetiu-se também a perfilagem dos

poços com vídeo logger para detectar a ocorrência de alguma evidência visível de mudança nas fraturas existentes ou de um novo fraturamento.

O resultado da campanha foi muito positivo, tendo os poços apresentado um aumento na produção que variou de 30% a 910%, quando normalizados para um rebaixamento assumido de 30 m.

Todos os testes de estimulação realizados no programa mostraram um padrão de comportamento típico quanto à pressão e vazão da água de injeção. O comportamento se caracterizou por um aumento inicial da pressão com pouco ou nenhum aumento da vazão, seguido pelo alcance de um valor crítico de pressão, correspondente ao fraturamento, e então por um aumento dramático da vazão seguido por um decréscimo acentuado da pressão até a estabilização de ambas.

Na Figura 13 são apresentadas as curvas de rebaixamento com o tempo relativas aos testes de produção e de aquífero realizados em um dos poços antes e depois do fraturamento hidráulico. Na Figura 14 são apresentadas as curvas de recuperação para o mesmo poço. Os resultados para esse poço foram muito positivos, tendo a transmissividade subido uma ordem de grandeza de $2,71 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para $3,81 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, representando uma aumento na vazão do poço de 1400%. A capacidade específica computada ao final de cada teste de aquífero subiu de 0,37 L/min/m para 3,86 L/min/m.

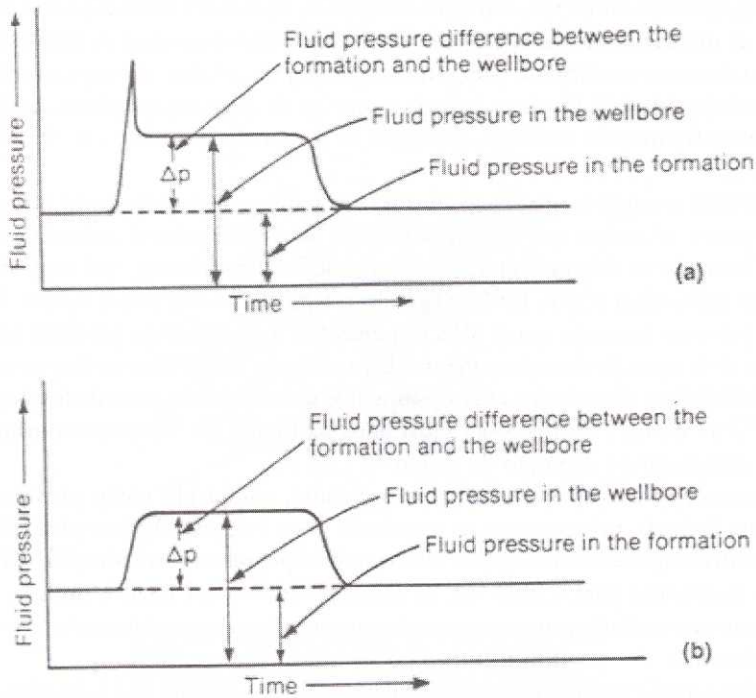


Figura 12 – Dois tipos de comportamento da pressão de fluido no poço. (Williamson and Wooly, 1980 – extraída de Smith, 1989).

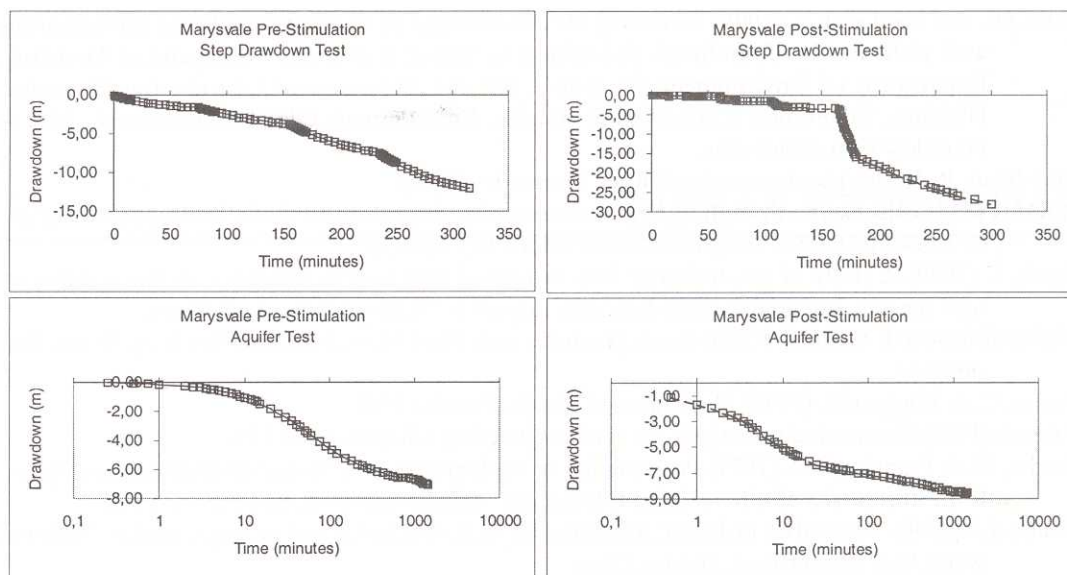


Figura 13 – Curvas de rebaixamento com tempo pré e pós estimulação, relativas aos testes realizados em um poço na localidade de Marysvale, Newfoundland (extraído de Gale, 1995)

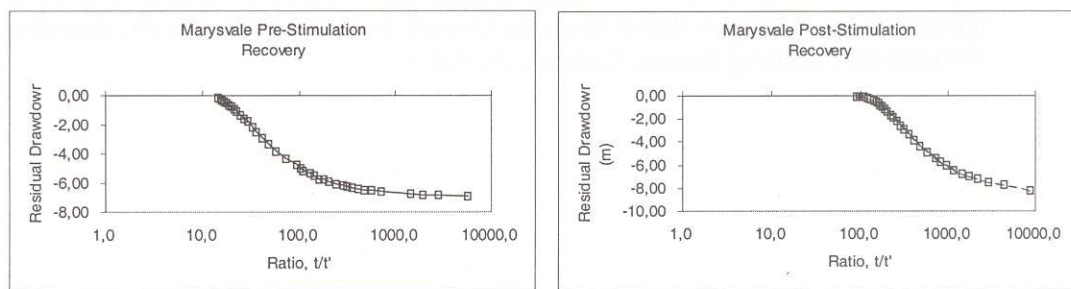


Figura 14 – Curvas de recuperação pré e pós estimulação de um poço testado na localidade de Marysvale, Newfoundland (extraído de Gale, 1995).

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta as propriedades básicas de meios fraturados relevantes ao fluxo de fluidos. Procurou-se mostrar que entre outros, fatores como características geométricas dos sistemas de fraturas, tem relevância direta no comportamento dos aquíferos fraturados. Assim sendo, o conhecimento destes fatores pode contribuir significativamente para otimizar processos de exploração de água nestes meios.

7. REFERÊNCIAS

Gale, J. (1990) Hydraulic behaviour of rock joints. Em International Symposium in Rock Joints, Loen, Noruega. Editado por Barton, N. & Stephansson, O. Balkema.

- Gale, J.E. and MacLeod, R. (1995) Assessing the effectiveness of fracture stimulation for increasing well yield in Newfoundland. Submitted to Water Resources Management Division, Department of Environment, St. John's, NF and Environment Conservation Strategies Division, Economics Conservation Branch, Environment Canada, Dartmouth, N.S. – Fractflow Consultants Inc.
- Goodman, R. (1990) Fundamentals of Rock Mechanics. Wiley.
- ISRM (1981) Rock characterization testing and monitoring. Suggested methods, International Society of Rock Mechanics. Pergamon Press. Editor E.T Brown.
- Louis, C (1969) A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses. Imperial College Research Report n. 10. Royal School of Mines.
- National Research Council (1996) Rock Fractures and Fluid Flow. National Academy Press, Washington.
- Potter, C. & Wiggert, D. (1997) Mechanics of Fluids. Prentice Hall
- Priest, S. (1993) Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman and Hall
- Rocha, M. & Franciss, F.O. (1977) Permeability of rock masses determined from integral samples. Em 'Structural and Geotechnical Mechanics' editado por Hall, W. Prentice Hall.
- Smith, S.A., 1989. Manual of hydraulic fracturing for well stimulation and geologic studies. National Water Well Association, Dublin, Ohio.
- Tecgraf (2003) Desenvolvimento de processos de simulação de fluxo e transporte em meios fraturados. Projeto de desenvolvimento dentro do programa CT Petro-Finep. Programa de computação gráfica PUC-Rio.
- Williamson, W.H. and Wooly D.R., 1980. Hydraulic fracturing to improve the yield of bores in fractures rock. Australian Water Resources Council, Technical Paper No. 55, Australian Government Publishing Service, Canberra, Australia.