

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DAS FRATURAS NA CONECTIVIDADE DOS AQUÍFEROS FISSURAIS

Luana Acário Braga Gaspar¹; José Sérgio dos Santos²; Ernesto da Silva Pitombeira³

RESUMO – A geologia do Nordeste brasileiro é marcada pelo embasamento cristalino. Os aquíferos presentes neste tipo de formação caracterizam-se pela forma descontínua de armazenamento. Neles, a água é armazenada e escoada através das fraturas presentes na rocha. Contudo, para que haja escoamento é preciso que existam ligações físicas entre as fraturas. Existindo as conexões, as fraturas atuam como condutos que transportam a água dos reservatórios até os poços perfurados na formação. Neste trabalho utilizou-se um modelo de escoamento de água subterrânea em meio fraturado para se analisar quais os fatores mais importantes a provocarem a existência destas conexões e na transmissividade. Os resultados indicaram que a frequência, o comprimento e a orientação das fraturas, influenciam na conectividade do meio. Sistemas com grande frequência de fraturas exibem melhor conectividade que sistemas com poucas fraturas. Sistemas com fraturas longas estão melhor conectados que sistemas com fraturas curtas e sistemas com grande desvio padrão na orientação das fraturas possuem melhor conectividade que sistemas de fraturas paralelas. Constatou-se que os sistemas com maior abertura possuem melhor transmissividade.

ABSTRACT – The geology of the Brazilian Northeast Region is marked by crystalline bedrock. Aquifers found in this kind of formation are characterized by discontinuous forms of storativity. In them, water is stored and flows through fractures present in the rock. However, in order to exist flow it must exist physical joints among fractures. If those connections exist, fractures act as conduits which transport water from reservoir to wells drilled in the formation. In this paper it was used a fractured media groundwater flow model to find out which factors mainly influence the existence of the connections and of the transmissivity. Results indicated that fracture's frequency, length, and orientation do influence the medium connectivity. Systems holding great frequency exhibit better connectivity than those with few fractures. Systems that have long fractures are better connected than those that have short fractures and systems that have a great standard deviation in their orientation show better connectivity than those that have parallel fractures. It was found that systems with greater openness have better transmissivity.

Palavras-Chave: Aquífero Fissural; Transmissividade; Conectividade.

¹ Aluna do curso de Tecnologia em Saneamento Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Departamento de Construção Civil. Av. Treze de Maio, 2081, Fortaleza/CE, CEP: 60040-531, E-mail: luacario@yahoo.com.br

² Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Departamento de Construção Civil. Av. Treze de Maio, 2081, Fortaleza/CE, CEP: 60040-531, E-mail: sergio@ifce.edu.br

³ Professor Associado da Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici - Bloco 713, Fortaleza/CE, CEP: 60451-970, E-mail: glauber@ufc.br

1 – INTRODUÇÃO

Em termos geológicos, o Nordeste é constituído por dois tipos estruturais: o embasamento cristalino, representado por 70% da região semi-árida, e as bacias sedimentares (Figura 1). Os aquíferos dessa área caracterizam-se pela forma descontínua de armazenamento. A água é armazenada em fendas/fraturas na rocha (aquífero fissural) e, em regiões de solos aluviais (aluvião) forma pequenos reservatórios [1]. Para os Estados da Região Nordeste, é importante conhecer o potencial hídrico de seus aquíferos fissurais, visto que predominam em quantidade e estão distribuídos pelo território. Embora não sejam aquíferos por excelência, a sua capacidade como reserva de água não pode ser desprezada, pois constituem uma importante reserva complementar aos armazenamentos superficiais [2]. Além disso, após exaurirem-se os sítios para se construir grandes reservatórios superficiais, estes aquíferos podem tornar-se o meio mais econômico e eficaz para abastecer pequenas comunidades isoladas, difusamente distribuídas por toda a Região.

Nos aquíferos fissurais do embasamento cristalino a água escoar somente através das fraturas presentes na formação. Para que haja escoamento é preciso que existam ligações físicas entre estas fraturas. Existindo as conexões, as fraturas atuam como condutos que transportam a água dos reservatórios até os poços perfurados na formação. O objetivo deste trabalho é analisar, à luz de um modelo de escoamento de águas subterrâneas em meio fraturado quais os fatores mais importantes a provocarem a existência destas conexões.

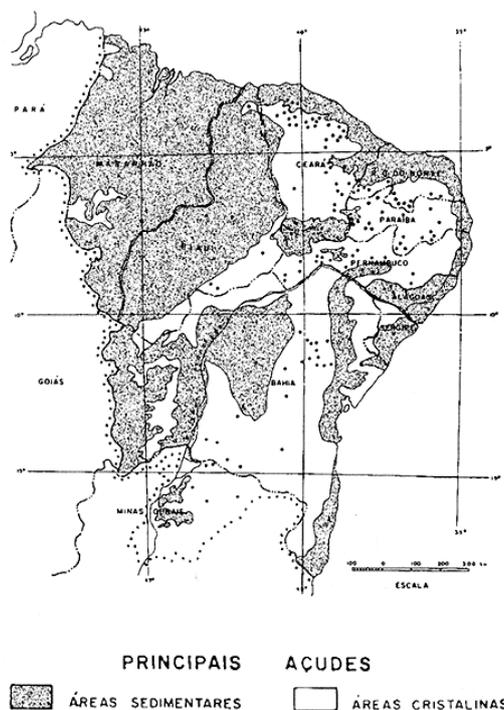


Figura 1 – Vocações hídricas do Nordeste brasileiro. Fonte: desconhecida.

2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 O Escoamento em Aquíferos Fissurais

O escoamento em aquíferos fissurais é fortemente dependente da geometria das fraturas. Em outras palavras, isto significa que quanto maior o entendimento a respeito da natureza das fraturas maior será a capacidade de analisar os processos hidráulicos que ocorrem neste tipo de formação. Infelizmente, devido à sua constituição muito complexa, os aquíferos fissurais não podem ser caracterizados deterministicamente. Apesar de algumas informações poderem ser obtidas a partir de afloramentos e de sondagens geofísicas de poços, a resolução e a continuidade espacial destes dados não são suficientes para descrever completamente o sistema de fraturas. Assim, métodos de caracterização estocástica precisam ser aplicados à geometria das fraturas para prever o comportamento do sistema [3].

Pesquisas teóricas e experimentais demonstram que o escoamento em meio fraturado é proporcional à abertura ao cubo [4]. Isto significa que pequenas mudanças na abertura produzem grandes mudanças na transmissividade da fratura. Esta relação entre a vazão e a abertura é conhecida como “Lei Cúbica” (Ver equação 1) e foi obtida pela aplicação das equações de Navier-Stokes e da Lei de Darcy a um sistema de placas paralelas [5].

$$Q = -b^3 \frac{\rho g}{12\mu} \nabla h \quad (1)$$

Onde $b[L]$ é abertura hidráulica da fratura; $\mu[ML^{-1}T^{-1}]$ é a viscosidade dinâmica do fluido; $\rho[ML^{-3}]$ é a massa específica do fluido; ∇h é o gradiente hidráulico na direção do escoamento; e $g[LT^{-2}]$ é a aceleração da gravidade.

2.2 Abordagens Existentes

A modelagem dos aquíferos fissurais pode seguir três abordagens distintas. A primeira baseia-se na idéia de que o conceito de *escoamento em placas paralelas* pode ser aplicado para se desenvolver modelos de escoamento de fluidos em uma fratura simples ou em um sistema de fraturas. Neste caso, as fraturas podem ser geradas estocasticamente, uma a uma, a partir do levantamento em campo de certas propriedades métricas de seus conjuntos tais como frequência de ocorrência, densidade, orientação, comprimento e abertura [6].

Os modelos discretos são especialmente projetados para modelagem em rochas duras com pouca porosidade ou permeabilidade intrínsecas, mas podem incluir micro-fissuras que possam

existir ao longo das fraturas principais para se simular efeitos de dupla porosidade. A maior vantagem destes modelos é que a explícita representação das propriedades geométricas e físicas das fraturas da formação fissurada permite o cálculo dos gradientes hidráulicos ao longo de cada fratura e as trocas de fluxos entre as descontinuidades. Também, redes de fraturas de várias escalas podem ser tratadas por estes modelos. Suas maiores desvantagens são: (1) a difícil obtenção de dados geométricos das fraturas, especialmente em grandes profundidades; (2) quando os sítios de amostragem não são bem distribuídos, são necessárias extrapolações e (3) o modelo pode ser complexo e o esforço computacional intenso para densidades de fraturas realísticas [7].

A segunda abordagem é denominada de *dupla porosidade*. Os fundamentos dos sistemas de dupla porosidade foram originalmente desenvolvidos por Barenblatt, Zheltov; Kochina [8]. Nela, o aquífero é considerado com sendo composto de fraturas e de blocos da matriz rochosa. As fraturas são admitidas como possuindo alta permeabilidade, mas baixa (secundária) porosidade e capacidade de armazenamento. Os blocos da matriz da rocha, por outro lado, são tidos com possuindo baixa permeabilidade e alta (primária) porosidade e capacidade de armazenamento. Somente as fraturas produzem escoamento diretamente para o poço e a matriz atua com a fonte que fornece água para dentro das fraturas [9].

A terceira abordagem, considerada a mais simples, é a do *meio poroso equivalente*. Dito em termos simples, esta abordagem consiste em tratar o sistema de rochas fraturadas como se fosse um meio poroso não consolidado. Nele as complexidades dos sistemas matriz/fratura são representadas por valores de armazenamento e por parâmetros de transporte. Este tipo de modelo é considerado como sendo apropriado para estudos regionais de águas subterrâneas [10]. Corroborando, Bear, Tsang; Marsily [11] declaram que “o escoamento em rochas porosas fraturadas difere daquele em um meio poroso comum somente durante os estágios iniciais de escoamento transiente, e somente na vizinhança do poço de bombeamento. Depois de um período de tempo relativamente curto, o regime de escoamento é idêntico ao de um contínuo simples”. Long *et al.* [12] diz que, “o meio fraturado tende a se comportar como meio poroso quando as aberturas das fraturas são constantes, as orientações das fraturas são aleatoriamente distribuídas e o espaçamento das fraturas é pequeno em relação à escala de investigação do sistema”.

Versões mais sofisticadas de modelos matemáticos de meio poroso equivalente foram desenvolvidas especialmente para a situação de aquíferos hidraulicamente fraturados. São modelos que prevêm a existência de uma fratura única vertical ou horizontal.

De qualquer modo, nenhuma das três abordagens pode ser considerada “melhor” em termos absolutos. Em vez disso, cada uma pode ser apropriada para uma situação específica. Modelos que são conceitualmente simples têm a vantagem de serem facilmente implementados, mas ao mesmo

tempo podem simplificar em demasia a realidade do problema e não contabilizar importantes fenômenos que se desenvolvem nos processos como, por exemplo, a formação de canais de escoamento dentro do plano das fraturas (*channeling*). Modelos mais complexos, por outro lado, têm o potencial de prover uma descrição mais detalhada do que acontece no sítio que está sendo modelado, mas eles são mais difíceis de implementar e podem requerer dados que não podem ser coletados com as atuais técnicas disponíveis [10].

2.3 Modelos Discretos

Medições de campo revelam que as fraturas presentes nas formações são de dimensões finitas. O fato de as fraturas serem finitas significa que uma dada fratura só contribui para a permeabilidade total da rocha na medida em que ela intercepta outras fraturas condutoras. Se uma fratura é isolada, ou seja, não se comunica com nenhuma outra, então ela não contribui para a permeabilidade total da formação. Isto também implica que o escoamento em certa fratura não é independente do escoamento em outras fraturas [12]. Assim, nos modelos discretos as fraturas são geradas uma a uma com base nas propriedades apresentadas pelas formações. Contudo a complexidade da realidade não permite uma completa descrição do que é encontrado no campo visto que os parâmetros descritivos não são únicos, mas distribuídos. Assim, torna-se necessário o uso de modelos estocásticos.

Neste caso, o primeiro procedimento é o estudo geo-estatístico da população de fraturas, ou seja, a identificação dos conjuntos e de suas respectivas propriedades métricas tais como: distribuição da orientação, do comprimento, e da abertura. O segundo procedimento envolve a escolha do modelo do sistema, se tridimensional composto de discos aleatórios (Figura 2) ou bidimensional (Figura 4) composto por planos verticais ou horizontais aleatórios. O terceiro passo relaciona-se com o estudo propriamente dito da geometria da fratura, que envolve a forma das paredes das fraturas, sua rugosidade e tortuosidade. O quarto passo é a derivação de equações que descrevam o escoamento do fluido na malha gerada [11].

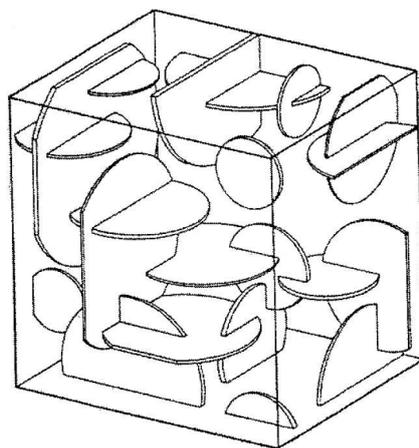


Figura 2 – Rede ortogonal tridimensional de fraturas circulares. Fonte: Long *et al.*, 1985 *apud* Santos [6].

Para se gerar um padrão de fratura projetado para reproduzir a geometria de um sistema real, os modelos discretos têm assumido as seguintes condições:

1. *Um sistema bidimensional tem os centros das fraturas localizados aleatoriamente no plano:* Verificou-se que o número de fraturas interceptadas por poços de igual comprimento aleatoriamente posicionados em determinada área de estudo diferia de lugar para lugar, e que os números seguiam a distribuição Poisson. O mesmo foi constatado em amostragens bidimensionais feitas em afloramentos e em paredes de túneis. Seguir este tipo de distribuição indica que as fraturas não têm a tendência de se congregarem [13] [14].

2. *As orientações dos conjuntos de fraturas seguem a distribuição normal:* A orientação das fraturas, apesar de não ser regular, não é puramente aleatória. Usualmente, fraturas observadas em afloramentos são aproximadamente paralelas a um ou a vários planos. Estas fraturas, que têm aproximadamente a mesma orientação constituem um conjunto ou grupo de fraturas. A existência destes conjuntos é devido ao fato de que a orientação das fraturas está relacionada à história tectônica da região. Convencionou-se identificar os vários grupos separadamente (geralmente dois), visto que se espera que os grupos sejam mais homogêneos que todos os conjuntos combinados. De qualquer modo, as estatísticas relativas às orientações das fraturas são possivelmente as mais bem compreendidas de todas as suas propriedades geométricas, haja em vista que são de fácil medição [11] [12].

3. *Os comprimentos das fraturas são log-normal ou exponencialmente distribuídos:* A determinação do padrão de distribuição seguido pelo comprimento das fraturas é crucial, pois este é um dos mais importantes parâmetros a influenciar a conectividade da rede de fraturas, a frequência na qual as fraturas se interceptam umas com as outras e até mesmo as características da rede fluxo como um todo. Por exemplo, poucas fraturas longas podem criar um melhor caminho para o escoamento que muitas fraturas curtas [15] [12] [7]. Lim [7] resume alguns valores de média (μ) e

desvio padrão (σ) encontrados por pesquisadores para o traço das fraturas em algumas partes do mundo. A Tabela 1 reproduz os dados sintetizados por ele.

Tabela 1 – Média (μ_λ) e desvio padrão (σ_λ) de traços de fraturas encontrados em embasamentos cristalinos em profundidades abaixo de 150 m. Baseado em: Lim [7]

Trabalho	Sítio	μ_λ (m)	σ_λ (m)
Cacas <i>et al.</i> (1990a)	França	0,74	2,34
Cacas <i>et al.</i> (1990a)	França	1,16	2,72
Kulatilake <i>et al.</i> (1993)	Suécia	1,01	0,31
Kulatilake <i>et al.</i> (1993)	Suécia	1,64	1,47
Long <i>et al.</i> (1987)	França	1,44	1,33
Long <i>et al.</i> (1987)	França	0,53	0,50
Niemi <i>et al.</i> (2000)	Finlândia	0,65	0,70
Niemi <i>et al.</i> (2000)	Finlândia	1,50	0,45

4. *As aberturas são log-normalmente distribuídas*: Esta asserção foi confirmada por inúmeras pesquisas experimentais tais como as realizadas por Beacher, Lanney; Einstein [14], Keller [16], Lanaro [17], Alfred [18] e Price; Indraratna [19]. Para as fraturas dois tipos de abertura são definidos: A abertura mecânica e a abertura hidráulica (ou efetiva). A abertura mecânica é definida como a distância média entre as paredes da fratura ao passo que a abertura hidráulica é calculada através da transmissividade e da lei cúbica. Observou-se que as aberturas hidráulicas são aproximadamente umas ordens de magnitude menores que as aberturas mecânicas [20] [7] [21].

Todas estas distribuições de probabilidade têm sido objeto de estudo de várias pesquisas e verificou-se a sua validade independente da localização geológica. A Tabela 2 sintetiza alguns valores de abertura hidráulica encontrados por alguns pesquisadores em sítios espalhados ao redor do globo que seguem este tipo de distribuição de probabilidades. Obviamente anomalias locais podem não ser preditas por estas representações estatísticas.

Tabela 2 – Média (μ_b) e desvio padrão (σ_b) de abertura hidráulica encontrados em embasamentos cristalinos. Baseado em: Lim [7]

Trabalho	μ_b (mm)	σ_b (mm)
Keller <i>et al.</i> (1999)	0,586	0,864
Keller <i>et al.</i> (1999)	0,825	0,683
Long <i>et al.</i> (1987)	0,312	0,402
Long <i>et al.</i> (1987)	0,294	0,146
Tsang <i>et al.</i> (1998)	0,080	0,019
Tsang <i>et al.</i> (1998)	0,080	0,133

Tanto a abertura mecânica, w [L], quanto abertura hidráulica, b [L], são parâmetros cruciais na determinação da permeabilidade do sistema. A vazão volumétrica Q através de uma fratura simples é dada por: $Q \sim b^3$, o que implica em o escoamento ser extremamente sensível à mudanças na abertura. Contudo, a determinação de valores efetivos para a abertura mecânica é de difícil obtenção, pois ela não é constante ao longo da fratura. Ademais, as tensões confinantes do

embasamento tornam as aberturas medidas em profundidades menores que na superfície [15] [22]. Obviamente anomalias locais podem não ser preditas por estas representações estatísticas.

Todas estas distribuições de probabilidade têm sido objeto de estudo de várias pesquisas e verificou-se a sua validade independente da localização geológica. Todavia, além das propriedades ditas métricas (porque podem ser medidas) o sistema de fraturas apresenta propriedades que não podem ser medidas em unidades. Estas propriedades são ditas topológicas [23].

Uma importante propriedade topológica de um sistema de fraturas é a conectividade. Knudby; Carrera [24] declaram que “em hidrogeologia, o termo conectividade é utilizado em referência à presença física de zonas de alta ou de baixa condutividade hidráulica”. Em outras palavras, se um sistema possui um caminho de alta condutividade hidráulica que aumenta o escoamento, este sistema é admitido como possuindo boa conectividade.

Constatou-se que a conectividade da rede de fraturas cresce com o aumento do comprimento e da frequência de ocorrência das fraturas, pois a probabilidade de intersecção aumenta [21]. Uma rede com grande conectividade pode fornecer uma grande vazão. Para rede de fraturas com a mesma conectividade, mas com comprimentos de fraturas diferentes, a descarga total será maior para a rede com comprimentos maiores [7].

Outro aspecto importante que trata da conectividade é salientado por Martinez-Landa; Carrera [25] por destacarem que “A permeabilidade de larga escala de uma rocha é geralmente controlada por poucas fraturas que provêm alta conectividade ao sistema. De fato, a grande parcela do escoamento ocorre em um número limitado de fraturas ou em planos equitativamente espaçados. A identificação destas importantes características e de sua conectividade é essencial na determinação do comportamento hidrológico do meio”. Isto é confirmado por Dreuzy, Davy; Bour [26] que destacam que “na rede de fraturas o caminho do fluxo se dá numa pequena parcela da rede de total de fraturas e que este efeito expressa a importância da conectividade para se definir o modelo de transporte”.

É importante destacar a diferença entre conectividade e a pura existência de intersecção entre fraturas. De fato, pode-se dizer que a primeira é função da segunda e de mais outras variáveis tais como densidade de fratura, comprimento, abertura, rugosidade, e escala [26], [27].

Intersecção é uma relação geométrica entre duas (ou várias) fraturas, enquanto a conectividade é uma propriedade topológica, i.e., não quantitativa do inteiro sistema de fraturas. Assim, um sistema com alto grau de intersecção entre fraturas não necessariamente apresenta alta conectividade, conforme é exemplificado na Figura 2 [23].

Nota-se na Figura 3.a que embora haja um grande número intersecções entre fraturas, caso a rocha matriz seja impermeável a permeabilidade da formação é nula. Assim, para efeito de

escoamento, o sistema não é muito diferente do apresentado na Figura 3.b, que não apresenta cruzamentos entre fraturas. De qualquer modo, estes são exemplos extremos e sistemas com grande número de interseções (cruzamentos) tendem a apresentar maior condutividade que sistemas com baixo número de cruzamentos.

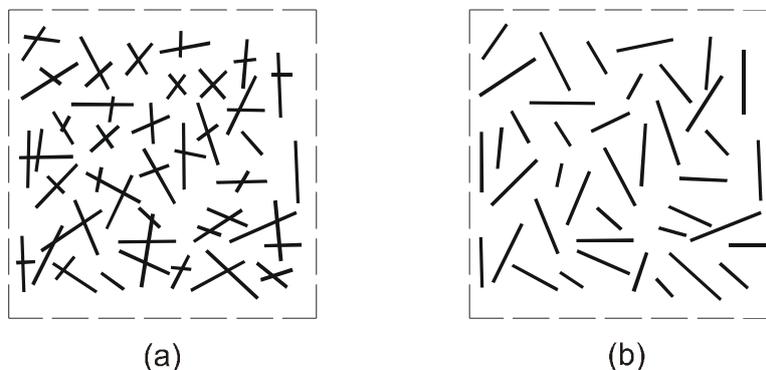


Figura 3 – Formações impermeáveis em situações nas quais o fluido não consegue escoar através das fraturas: (a) Sistema de fraturas isoladamente conectadas; (b) Sistema de fraturas completamente desconectado. Vista em planta. Baseado em: Jing; Stephansson [23].

3 – METODOLOGIA

Neste trabalho procurou-se verificar em que grau a frequência, a orientação e o comprimento das fraturas influenciam na conectividade do meio fraturado. Para tanto, simulou-se a geração de várias regiões fraturadas com o auxílio do *software MeioFr.exe* escrito por José Sérgio dos Santos, com base no modelo desenvolvido por Pitombeira [28]. Os dados de entrada do programa são: (1) tamanho da região de geração, (2) frequência de fraturas, (3) média e desvio padrão da orientação, (4) do comprimento e (5) da abertura, sendo a frequência de fraturas definida como o número de fraturas por unidade de área.

As fraturas são então geradas segundo as seguintes distribuições de probabilidade:

- Centro das fraturas » distribuição Poisson;
- Orientação » distribuição normal;
- Comprimento e abertura » distribuição lognormal;
- Transmissividade » distribuição lognormal.

Os comprimentos de fraturas que se estendam para além da região de geração são truncados. A Figura 4 é um exemplo explicativo que mostra o que é gerado pelo programa.

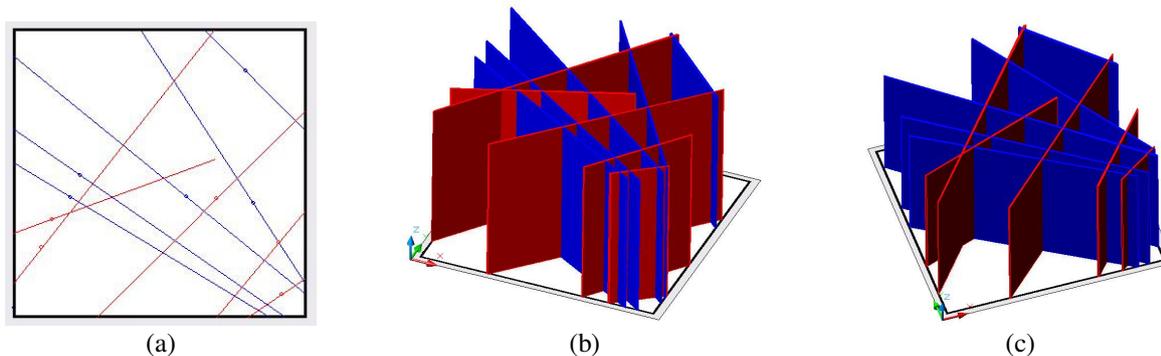


Figura 4 – Meio fraturado gerado pelo programa MeioFr.exe. (a) Vista em planta, (b) e (c) Perspectivas.

Para a verificação da influência das variáveis no número de cruzamentos entre fraturas, definiu-se uma região de geração de 10,0 m x 10,0 m (Figuras 5 e 6), e num primeiro momento gerou-se regiões fissuradas mantendo-se constante a média dos comprimentos das fraturas (μ_λ) igual a 1,0 m, o desvio padrão dos comprimentos (σ_λ) igual a 0,0 m. Com isto, gerou-se todas as fraturas com o mesmo tamanho. Quanto à orientação, adotou-se a média dos ângulos (μ_θ) dos grupos 1 e 2 como iguais a 135° e 45°, respectivamente (Figura 6), contudo variou-se o desvio padrão dos ângulos (σ_θ) dos grupos nos valores 0°, 11,25°, 22,5° e 45° para as seguintes frequências de fraturas (N): 2 m⁻², 4 m⁻², 6 m⁻², 8 m⁻², e 10 m⁻². A esta primeira série de gerações deu-se o nome **G1**.

Na segunda simulação, utilizaram-se as mesmas frequências de fraturas e manteve-se constantes a média e o desvio padrão dos ângulos dos grupos de fraturas. Para o grupo 1: $\mu_{\theta_1}=135^\circ$ e $\sigma_{\theta_1}=0^\circ$ e para o grupo 2: $\mu_{\theta_2}=45^\circ$ e $\sigma_{\theta_2}=0^\circ$. Com isto, isto fez com que todas as fraturas do mesmo grupo fossem paralelas e ao mesmo tempo fossem ortogonais em relação às do outro grupo. Então variou-se a média dos comprimentos nos valores 0,50 m, 1,0m, e 2,0 m com desvios padrões constantes igual a 0,0 m. Para esta segunda série de gerações deu-se o nome **G2**.

Gerou-se dez regiões para cada situação, computou-se o número de cruzamentos em cada uma delas e no final calculou-se a média do número de cruzamentos (N_{cr}).

Para criar simulações de transmissividade (T) utilizou-se para fins comparativos a média de abertura (μ_b) e as aberturas (σ_b). Para isso foi empregado o uso do software *MeioFr.exe* que ao colocar os dados necessários para a simulação ele gera um relatório com a soma das aberturas (ver Figura 7).

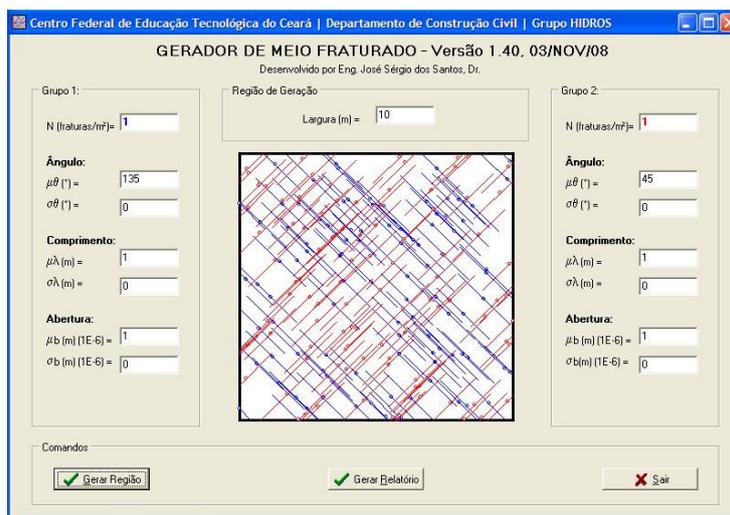


Figura 5 – Tela principal do *software* MeioFr.exe. O desenho é a vista em planta da região gerada.

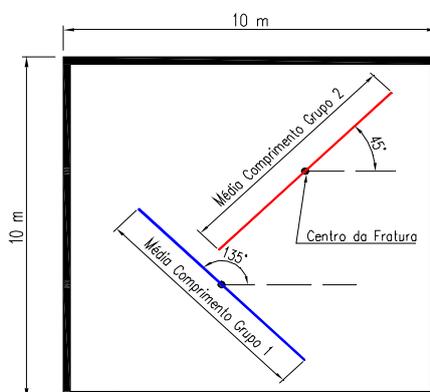


Figura 6 – Esquema de geração de região dos grupos. Vista em planta.

A partir dos valores da soma de aberturas (b^3), foi feito uma média aritmética e depois calculado o valor da transmissividade, que logo depois é usada para criar um gráfico.

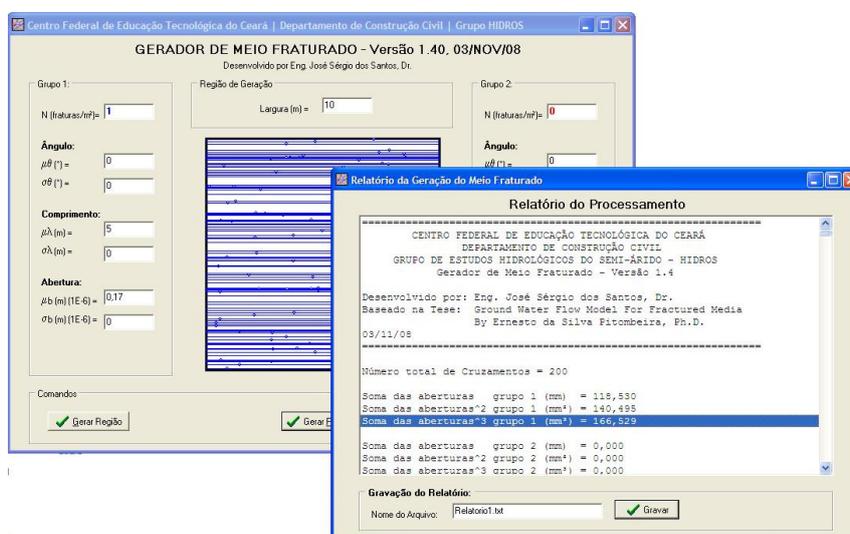


Figura 7 - Aplicação do software e relatório gerado.

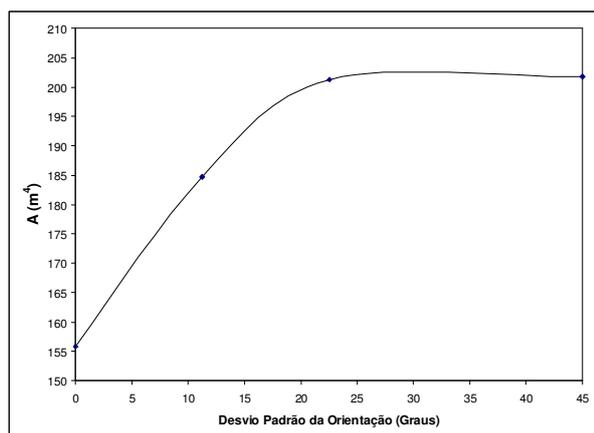
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Simulação G1

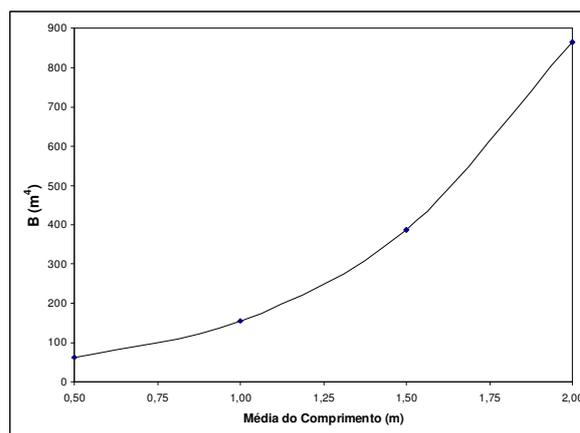
No campo, a separação das fraturas em dois grupos é feita com base na tendência natural que os conjuntos de fraturas têm de se dispor em determinada orientação. Nas regiões geradas do tipo **G1** (Figura 10) observa-se que para um dado desvio padrão de orientação o número de cruzamentos de fraturas, N_{cr} , cresce com o quadrado da frequência de fraturas. Foi encontrada a seguinte relação:

$$N_{cr} = AN^2 \quad (2)$$

onde N [m^{-2}] é a frequência de fraturas e A [m^4] um parâmetro que depende do desvio padrão do ângulo e tende a um valor constante quando σ_θ cresce (Figura 8.a).



(a) Parâmetro A versus σ_θ



(a) Parâmetro B versus μ_λ

Figura 8 – Variação dos Parâmetros A e B

Um outro aspecto indicado nas Figuras 9 e 10 é que ao passo que o desvio padrão das orientações aumenta, os conjuntos vão sendo descaracterizados por perderem sua direção preferencial. Também indicam que para uma dada frequência de fraturas o número de cruzamentos tende para um determinado valor constante ao passo que o desvio padrão dos ângulos aumenta. Isto é indicado pela evolução do parâmetro A . Mesmo assim, grandes variações no desvio padrão das orientações não repercute em grandes variações no número de cruzamentos. De um sistema com grupos de fraturas paralelas para um grupo com orientação completamente errática, o número de cruzamentos aumenta apenas em 30%.

Assim, o número de cruzamentos computados nas regiões demonstra o que já se esperava intuitivamente: sistemas densamente fraturados têm uma melhor rede de escoamento que sistemas

com baixa frequência de fraturas. Relevante também é o fato de que a orientação, apesar de influir no número de cruzamentos, não altera tão significativamente as conexões do sistema quanto a frequência de fraturas.

4.2 – Simulação G2

Na segunda série de regiões geradas, denominada **G2**, tomou-se grupos de fraturas ortogonais e variou-se a média do comprimento das fraturas em função da frequência de fraturas (Figuras 11 e 12). Assim como observado nas regiões tipo **G1**, para o intervalo pesquisado, as regiões tipo **G2** apresentaram um número de cruzamentos variando com o quadrado da frequência, conforme a relação:

$$N_{cr} = BN^2 \quad (3)$$

onde N [m^{-2}] é a frequência de fraturas e B [m^4] um parâmetro que mantém uma relação exponencial com a média do comprimento das fraturas (Figura 8.b). As Figuras 11 e 12 também indicaram que, dentro do intervalo pesquisado, variações percentuais de igual valor na frequência de fraturas e no comprimento médio das fraturas produzem alterações aproximadamente iguais no número de cruzamentos. Isto é indicativo de que alterações no comprimento das fraturas tendem a provocar mudanças substanciais no comportamento deste tipo de sistema.

Outra verificação foi efetuada no intuito de se quantificar a partir de que ponto o comprimento das fraturas deixaria de influenciar no número de cruzamentos das fraturas. Obviamente, para uma dada frequência de fraturas, o número de cruzamentos tende a um número constante ao passo que se aumenta o tamanho das fraturas rumo ao infinito, pois neste caso as extremidades de todas as fraturas alcançam as fronteiras do sistema. A simulação foi feita para uma região de geração de 10 m x 10 m, com grupos de fraturas ortogonais. Em todas as frequências verificadas, quando a média dos comprimentos atinge algo em torno de 3 metros, praticamente o número de cruzamentos se estabiliza. A Figura 13 mostra isso graficamente.

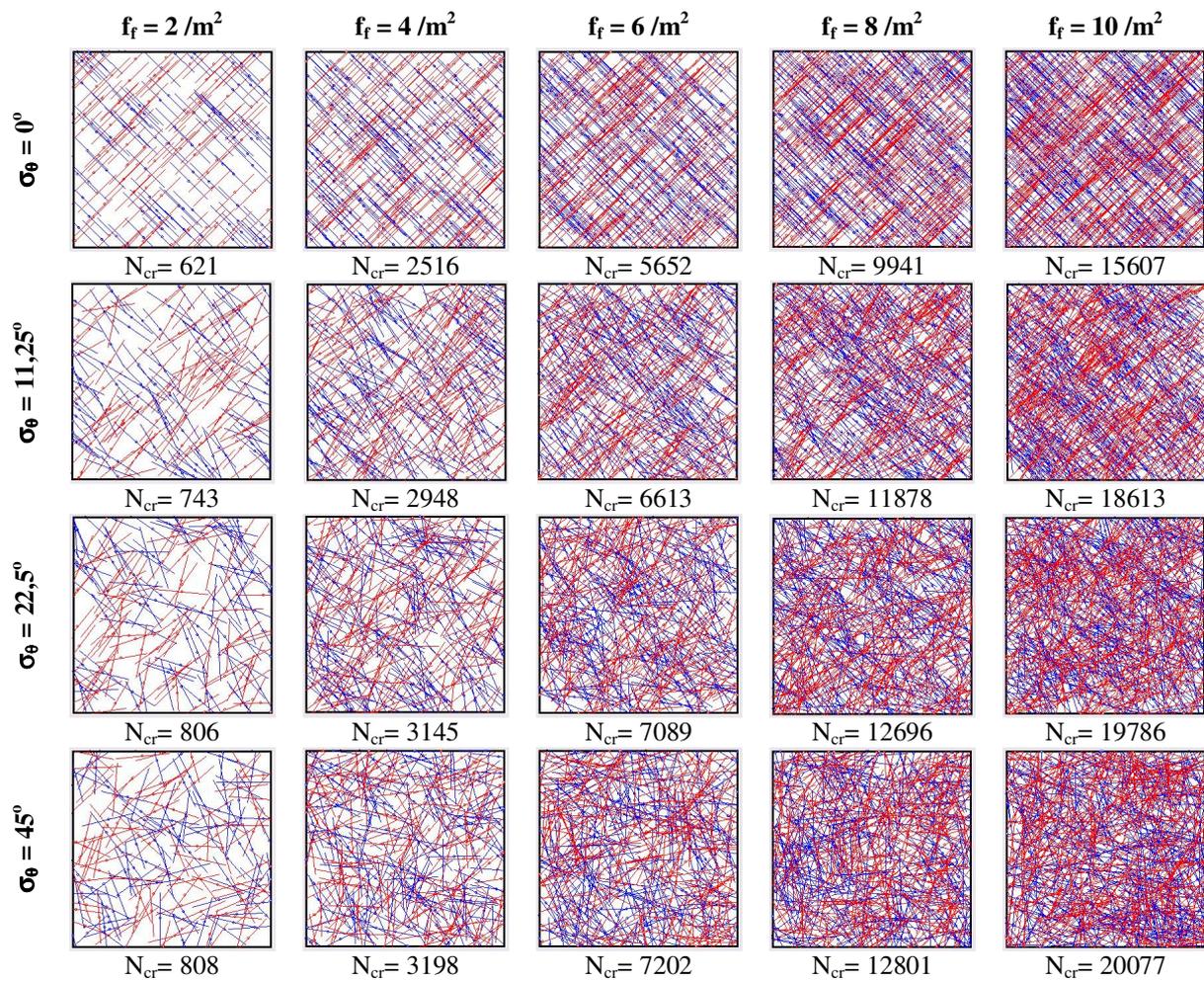


Figura 9 – Geração Tipo G1, Número de cruzamentos de fraturas em função de frequência e ângulo. Parâmetros: Ângulos: $\mu_{\theta 1}=45^\circ$, $\mu_{\theta 2}=135^\circ$, Comprim.: $\mu_{\lambda 1}=1$ m, $\sigma_{\lambda 1}=0$ m; $\mu_{\lambda 2}=1$ m, $\sigma_{\lambda 2}=0$ m.

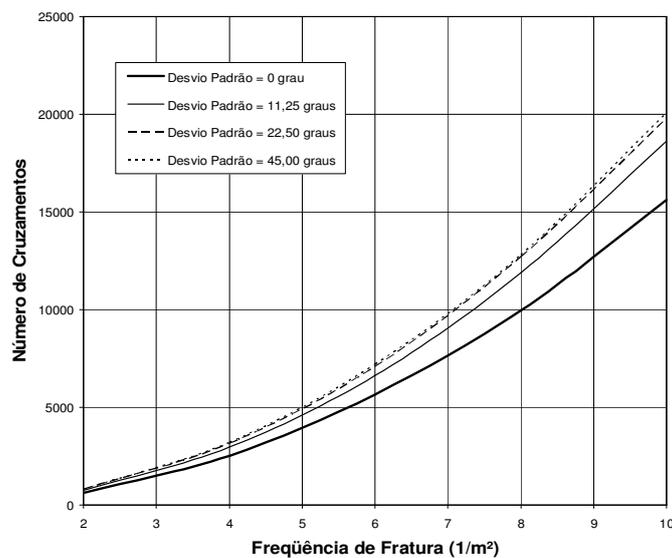


Figura 10 – Geração Tipo G1, Frequência de Fraturas x Número de Cruzamentos. Parâmetros: Ângulos: $\mu_{\theta 1}=135^\circ$, $\mu_{\theta 2}=45^\circ$, Comprimentos: $\mu_{\lambda 1}=1$ m, $\sigma_{\lambda 1}=0$ m; $\mu_{\lambda 2}=1$ m, $\sigma_{\lambda 2}=0$ m.

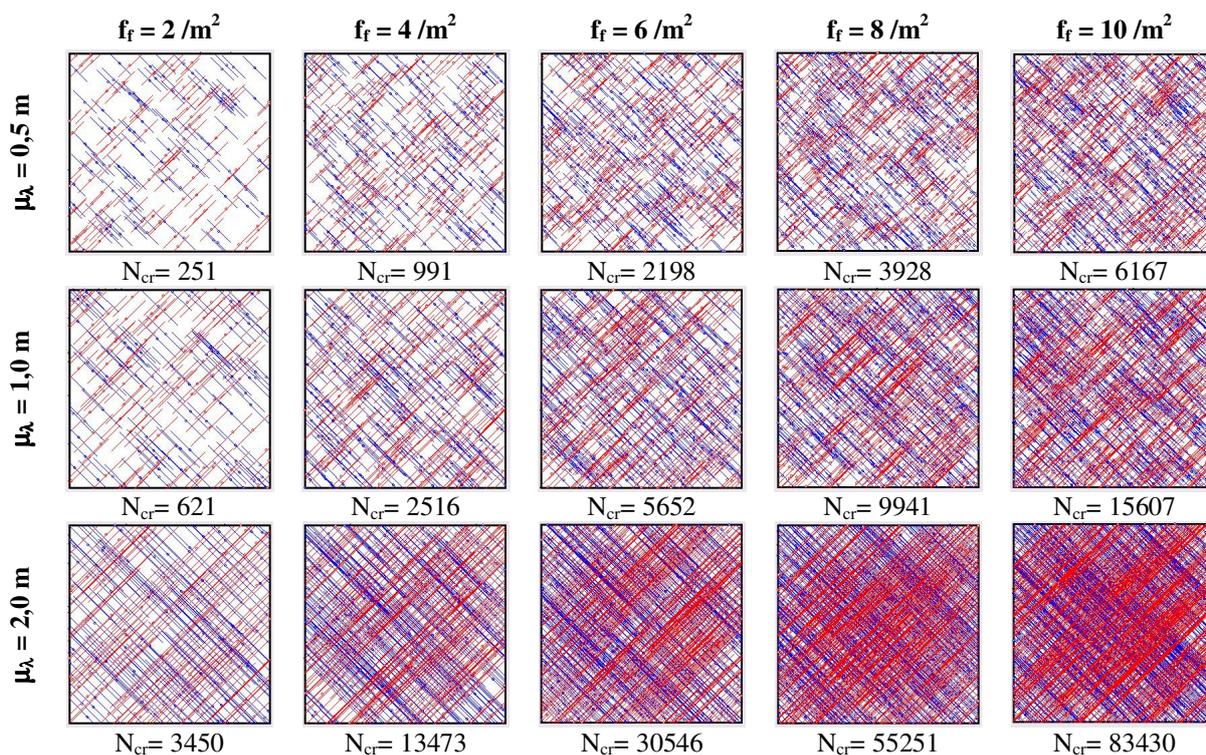


Figura 11 – Número de cruzamentos de fraturas em função de frequência e comprimento. Parâmetros: Área de geração = (10 m x 10 m); Ângulos: $\mu_{\theta 1}=45^\circ, \sigma_{\theta 1}=0^\circ; \mu_{\theta 2}=135^\circ, \sigma_{\theta 2}=0^\circ$; Comprimentos: $\sigma_{\lambda 1}=0 \text{ m}, \sigma_{\lambda 2}=0 \text{ m}$.

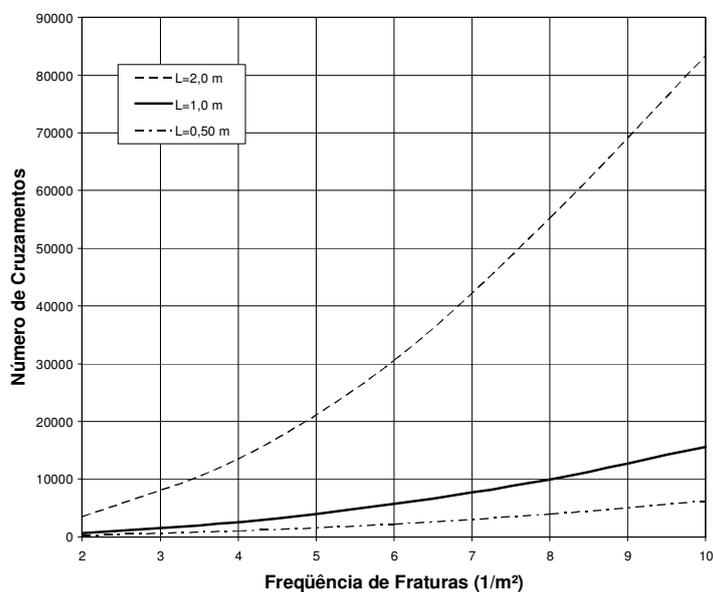


Figura 12 – Frequência de Fraturas x Número de Cruzamentos. Parâmetros: Ângulos: $\mu_{\theta 1}=45^\circ, \sigma_{\theta 1}=0^\circ; \mu_{\theta 2}=135^\circ, \sigma_{\theta 2}=0^\circ$; Comprimentos: $\sigma_{\lambda 1}=0 \text{ m}; \sigma_{\lambda 2}=0 \text{ m}$.

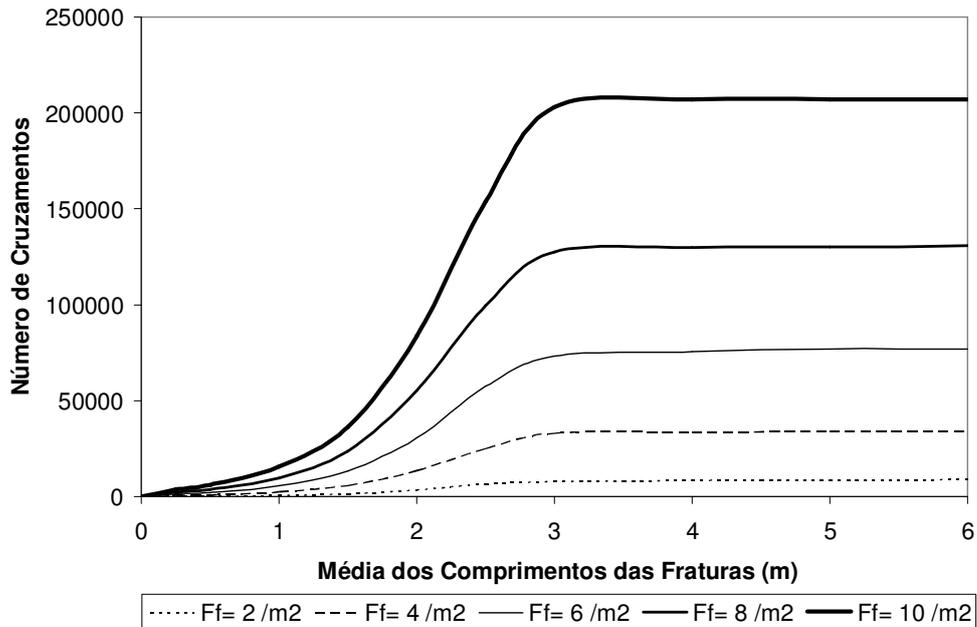


Figura 13 – Número de Cruzamentos x Média dos Comprimentos das Fraturas. Parâmetros: Área de geração = (10 m x 10 m); Ângulos: $\mu_{\theta 1}=45^\circ$, $\sigma_{\theta 1}=0^\circ$; $\mu_{\theta 2}=135^\circ$, $\sigma_{\theta 2}=0^\circ$.

4.3 – Simulações da Transmissividade

A transmissividade de um aquífero é o parâmetro hidrogeológico que corresponde à capacidade de um meio para transmitir água. A transmissividade é a medida da quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por unidade de largura de uma camada saturada de um aquífero. A transmissividade está fortemente relacionada às aberturas das fraturas.

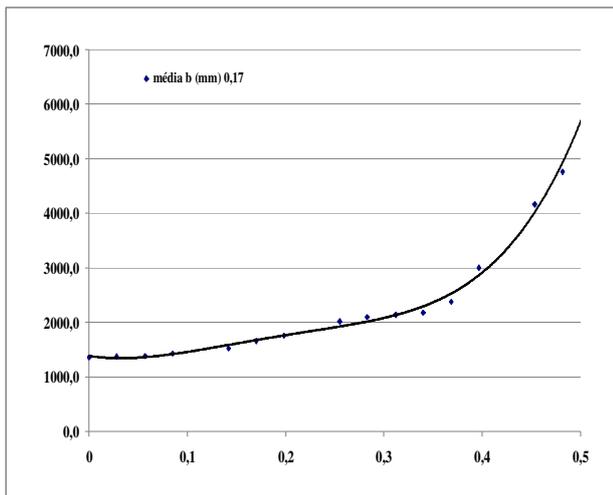
Para calcular o valor da transmissividade foi utilizada a seguinte equação:

$$T = Kb = b^3 \frac{\rho g}{12\mu} \quad (4)$$

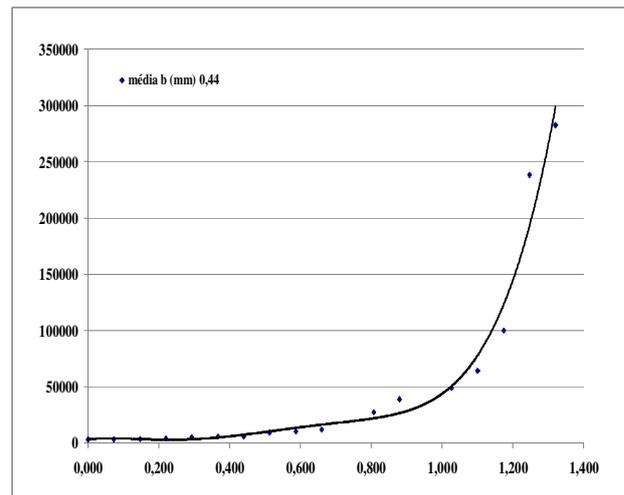
onde $T [L^2T^{-1}]$ é a transmissividade expressa em mm, $K [LT^{-1}]$ é a condutividade hidráulica da fratura e b^3 é a média das aberturas geradas pelo software.

Para a realização destas simulações, foi adotado valores de abertura média das fraturas de 0,17 mm e 0,44 mm, que foi baseado em um estudo de Manoel Filho [29] no qual, através de testes de bombeamento, estabeleceu estes valores citados para o conjunto de poços analisados para o Estado do Ceará.

É perceptível que variações sutis na média das aberturas das fraturas implicam em mudanças significativas na transmissividade das mesmas (ver Figuras 14.a e 14.b). Um aumento na média de abertura de uma fratura significa um aumento na transmissividade.



(a) Média de abertura b (mm) = 0,17



(b) Média de abertura b (mm) = 0,44

Figura 14 – Transmissividade x Abertura

5 – CONCLUSÕES

Esta verificação constatou, tomando por base o número de cruzamento de fraturas presentes em um sistema fraturado, que a frequência, a orientação, e o comprimento das fraturas de fato influenciam a conectividade deste sistema. Num grau maior de influência encontram-se o comprimento e a frequência das fraturas, sendo que o efeito combinado de ambos altera grandemente a conectividade. Verificou-se também que quando a média dos comprimentos atingiu 30% da largura da região de geração, o efeito se estabilizou. Num menor grau encontra-se a orientação das fraturas. Em relação à transmissividade no sistema, como mencionado anteriormente, mudanças na abertura, mesmo que sutis, produzem mudanças na transmissividade, o aumento na abertura demonstra que a transmissividade aumenta, o que pode acarretar em uma melhor conectividade para o sistema.

Assim, caso se deseje melhorar os parâmetros hidrodinâmicos de aquíferos fissurais presentes no embasamento cristalino do Nordeste brasileiro uma solução eficaz seria a introduzir novas fraturas no sistema e/ou aumentar o comprimento das fraturas existentes. Estas mudanças aumentariam tanto a frequência de fraturas quanto a média dos comprimentos das fraturas do sistema, com repercussões na conectividade. Na prática, isto pode se conseguido com a utilização de uma técnica de estimulação de poços denominada fraturamento hidráulico.

6 – AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]SUASSUNA, J. **Semi-Árido: Proposta de Convivência com a Seca**, Fundação Joaquim Nabuco, Recife, 2002.

[2]SANTIAGO, M.M.F. Salinidade das Águas Subterrâneas no Semi-árido, **Anais da 4ª. Reunião Especial da SBPC**, p. 232-236, Novembro, 1996.

[3]RENSHAW, C.E. Influence of Subcritical Fracture Growth on the Connectivity of Fracture Networks, **Water Resources Research**, vol. 32, issue 6, p. 1519-1530, 1996.

[4]WITHERSPOON, P. A.; WANG, J. S. Y.; IWAI, K.; GALE, J. E., Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture. **Water Resources Research**. vol. 16, nº 6, p. 1016-1024, 1980.

[5]SNOW, D. T. A Parallel Plate Model of Fractured Permeable Media. Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 331 p., 1965.

[6]SANTOS, J. S. **Efeitos do Fraturamento Hidráulico em Aquíferos Fissurais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, 2008.

[7]LIM, D.H. **Mass Transport Analysis in the Near Field of Geologic Repository**, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 2002.

[8]BARENBLATT G.I.; ZHELTOV I.P.; KOCHINA I.N. Basic Concepts in the Theory of Seepage of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks [Strata], **J. Applied Mathematics and Mechanics**, vol. 24, no. 5, p. 1286-1303, 1960.

[9]BÄUMLE, R., **Geohydraulic Characterisation of Fractured Rock Flow Regimes: Regional Studies in Granite and Dolomite**, Doctoral Thesis, Universität Karlsruhe (TH), 2003.

[10]SCHMELLING, S.G.; ROSS R.R. **Contaminant Transport in Fractured Media: Models for Decision Makers**, Superfund Ground Water Issue, EPA/540/4-89/004, 1989.

[11]BEAR J.; TSANG, C.F.; MARSILY, G. **Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock**, Academic Press, Inc., California, 1993, ISBN 0-12-083980-6.

[12]LONG, J.C.S.; REMER, J.S.; WILSON, C.R.; WITHERSPOON, P.A. Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, **Water Resources Research**, vol.18, issue 3, p. 645-658, 1982.

- [13]SNOW, D.T. Rock Fracture Spacings, Openings and Porosities, **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, p.73-91, 1968.
- [14]BEACHER, G.B.; LANNEY, N.A.; EINSTEIN, H.H. Statistical Description of Rock Properties and Sampling, **18th US Symposium on Rock Mechanics**, 1977.
- [15]SAHIMI, M. **Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock: From Classical Methods to Modern Approaches**, Weinheim, New York, Basel, Tokyo: VCH, 1995.
- [16]KELLER, A. A. High resolution CAT imaging of fractures in consolidated materials, **Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.**, 34, paper 155, 1997.
- [17]LANARO, F. **Geometry, Mechanics and Transmissivity of Rock Fractures**, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.
- [18]ALFRED, D. **Modeling Fluid Flow through a Single Fracture using Experimental, Stochastic, and Simulation Approaches**, M.Sc. Thesis, Texas A&M University, 2003.
- [19]PRICE, J.; INDRARATNA, B. Development of an Equivalent Homogenous Fluid Model for Pseudo-Two-Phase (Air+Water) Flow through Fractured Rock, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, July, p. 857-866, 2005.
- [20]LONG, J.C.S.; BILLAUX, D.M. From Field Data to Fracture Network Modeling: An Example Incorporating Spatial Structure, **Water Resources Research**, vol. 23, issue 7, p. 1201-1216, 1987.
- [21]COOK, P.G. **A Guide to Regional Groundwater Flow in Fractured Rock Aquifers**, CSIRO Land and Water, Glen Osmond, SA, Australia, 108 p., 2003.
- [22]UHL, V.W.; SHARMA, G.K. Results of Pumping Tests in Crystalline-Rock Aquifers, **Ground Water**, vol. 16, no. 3., 1978.
- [23]JING, L.; STEPHANSSON, O. Network Topology and Homogenization of Fractured Rocks. In: **Fluid Flow and Transport in Rocks: Mechanisms and Effects**, edited by Jamtveit B. and Yardley, B.W., London: Chapman & Hall, 319 p., 1997.
- [24]KNUDBY, C.; CARRERA, J. On the use of Apparent Hydraulic Diffusivity as an indicator of Connectivity, **Journal of Hydrology**, vol. 329, issue. 3-4, p. 377-389, 2006.
- [25]MARTINEZ-LANDA, L.; CARRERA, J. An Analysis of Hydraulic Conductivity Scale Effects in Granite (Full-Scale Engineered Barrier Experiment (Febex), Grimsel, Switzerland), **Water Resources Research**, vol. 41, issue 3, CiteID W03006, p. 1-13, 2005.
- [26]DREUZY, R.J.; DAVY, P.; BOUR, O. Hydraulic Properties of Two-Dimensional Random Fracture Networks Following a Power Law Length Distribution. 1. Effective Connectivity, **Water Resources Research**, vol. 37, no. 8, p. 2065-2078, 2001.
- [27]RENSHAW, C.E. Connectivity of Joint Networks with Power Law Length Distributions, **Water Resources Research**, vol. 35, issue 9, p. 2661-2670, 1999.

[28]PITOMBEIRA, E.S. **Ground Water Flow Model for Fractured Media**. Ph.D. Dissertation, University of New Hampshire, 1994.

[29]MANOEL FILHO, J. 1996. Cálculo de Propriedades Hidráulicas em Domínio Fissural e Cárstico pelo Método da Capacidade Específica Fractal. Anais IX Congresso de Águas Subterrâneas. ABAS. Salvador-Ba.