

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de **P&D** em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE ALAGOAS

TÍTULO DO TRABALHO:

CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE FRATURA E A CONDUTIVIDADE EM UM FRATURAMENTO ÁCIDO

AUTORES:

Igor Rafael Ribeiro Aires, Juliana Vieira Lessa, Amir Khamali, Luciana Viana Amorim, Maysam Pournik

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Campina Grande

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE FRATURA E A CONDUTIVIDADE EM UM FRATURAMENTO ÁCIDO

Abstract

This study aims to evaluate the influence of roughness parameters of a fracture surface and conductivity in an acid fracturing. The roughness on these surfaces act as pillars to keep the fracture open and the success of an acid fracturing job depends on how well the asperities withstand the closure stress. The main issues in designing a fracturing acid treatment is the distance of acid penetration and the conductivity created (and its distribution along the fracture). A single parameter is not enough to characterize the roughness, which includes morphological characteristics such as magnitude (specific surface elevations), angulation (curvatures and angles), undularity (frequency), anisotropy, and, in a less pronounced way, bend. A code was developed with the help of the software MATLAB 2013.a, in order to calculate the secondary roughness (characterized in terms of surface roughness and angularity) of previously fractured surfaces and examining the correlation of these parameters with conductivity data provided by the professor of the University of Oklahoma Dr. Maysam Pournik. The results showed that the roughness has a direct influence on conductivity and needs to be taken into account during the process of fracturing acid. The high values of roughness parameters imply lower conductivity values, making it difficult the fluid flow in the fractured surface.

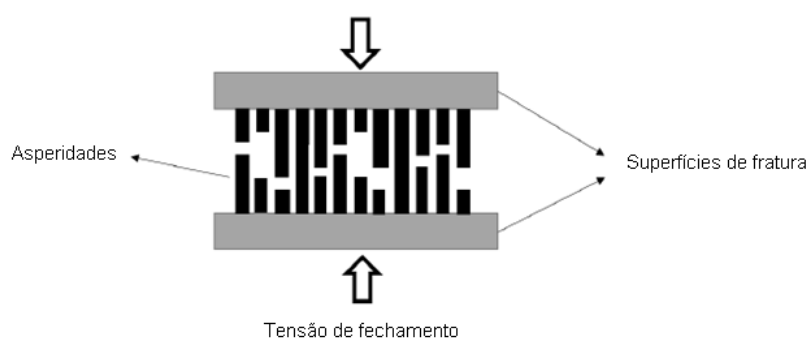
Keywords: roughness; acid fracturing; fluid flow.

Introdução

A operação de fraturamento ácido é uma técnica de estimulação na qual uma solução ácida é injetada na formação, sob pressão acima da pressão de ruptura da formação, de tal forma que uma fratura hidráulica é iniciada. Diferentemente da operação de acidificação de matriz que visa remover o dano próximo ao poço, o fraturamento ácido visa criar fraturas de grande comprimento com alta condutividade por dissolução irregular das faces da fratura e ultrapassar a zona danificada próxima ao poço (FERNANDES, 2001).

Fraturamento ácido é um processo complexo em que o ácido reage com a rocha, resultando em duas superfícies ásperas aleatórias. As asperezas sobre estas superfícies funcionam como pilares para manter a fratura aberta (Figura 1). As superfícies da fratura entram em contato após a pressão da bomba ser dissipada. O sucesso de um trabalho de fraturamento ácido depende da capacidade das asperezas de suportar a tensão de fechamento (KAMALI, 2015 a).

Figura 1: Esquema de superfície da fratura



As fraturas tendem a fechar devido às tensões que atuam in situ perpendicular ao plano de fratura. O fechamento da fratura tem efeito prejudicial sobre a condutividade e, por conseguinte, deve ser evitada. (POURNIK, 2010).

BELÉM et al (2000) propôs uma abordagem de análise dos dados de profilometria de superfície para a caracterização da rugosidade da superfície com o conceito de rugosidade primária e secundária. As rugosidades secundárias são definidas pela distribuição de alturas de superfície, enquanto as rugosidades primárias são definidas pela geometria global da superfície.

A rugosidade primária é caracterizada em termos de anisotropia estrutural real e aparente, irregularidade geométrica e ondularidade da superfície. A anisotropia estrutural real é caracterizado através da análise geoestatística (variograma e função de auto-correlação), enquanto a anisotropia estrutural aparente é caracterizada com a ajuda dos parâmetros lineares de alturas das asperidades.

A rugosidade secundária é caracterizada em termos de angularidade e rugosidade superficial (Z2s, RS e Ts).

A correlação de condutividade de fratura (Kfw), que é usada na indústria atualmente, foi desenvolvida por NIERODE E KRUK (1973) e é baseada em estudos experimentais realizados sobre diferentes amostras de formações acidificadas com ácido clorídrico (HCl). A condutividade estimada depende da quantidade de rocha dissolvida, da força de compactação da rocha e do estresse de fechamento, conforme a equação abaixo.

$$kfw = C1 * \exp(-C2 * \sigma c)$$

$$C1 = 1.47 * 10^7 wi^{2.47}$$

$$C2 * 10^3 = 13.9 - 1.3 * \ln(SRE) - 0 < SRE < 20,000 \text{ psi}$$

$$C2 * 10^3 = 3.8 - 0.28 * \ln(SRE) - 20,000 < SRE < 500,000 \text{ psi}$$

Onde σc é a tensão de fechamento (em psi), SRE é a força de compactação da rocha (em psi), kf é a permeabilidade da fratura e a condutividade calculada é dada em mD-ft. A análise da correlação revela que a condutividade é dependente da quantidade de rocha dissolvida (C1) e da força de compactação da rocha (efeito de sobrecarga de rocha não-acidificada) (C2).

A literatura está preocupada principalmente com o estresse de fechamento da fratura como parâmetro principal na influência da condutividade e apenas um número limitado de estudos investigaram a influência da superfície áspera na condutividade. Diante do proposto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência dos parâmetros de rugosidade de uma superfície de fratura e a condutividade em um fraturamento ácido.

Metodologia

Os experimentos de acidificação, o cálculo de condutividade, e a medição das alturas das rugosidades, foram realizadas em um trabalho anterior e os dados foram fornecidos pelo professor doutor da University of Oklahoma Maysam Pournik e pelo seu aluno de Doutorado Amir Khamali.

As superfícies de prova fornecidas eram calcários e folhelhos, entretanto, os dados fornecidos pelo professor Pournik não detalha a metodologia de acidificação e a caracterização de cada superfície, fornecendo apenas, a nomenclatura da superfície e a condutividade obtida no ensaio.

Os dados de amplitude das asperezas, medidos com o profilometro, foram lançados em uma matriz que nos fornece a coordenada (x e y no plano) da aspereza e seu valor de amplitude (z) em milímetros. O cálculo dos parâmetros de rugosidade foi realizado a partir dos valores de z, encontrados na matriz, para cada ponto medido.

O presente trabalho tem por objetivo utilizar os dados de condutividade e de altura das rugosidades previamente calculados e avaliar o efeito de alguns parâmetros de rugosidade na condutividade. O cálculo desses parâmetros, para cada superfície, foi realizado utilizando o software MATLAB versão 2013a, que além de plotar os gráficos de condutividade forneceu perfis da superfície fraturada a partir dos dados obtidos pelo profilometro. As superfícies ensaiadas e os seus dados de condutividade estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Condutividade para as superfícies ensaiadas

Superfícies	Condutividade (mD.ft)
RS1	5513,1
SL7B7	3795,3
FD3	2596,3
FD4	2080,2

Fonte: Dados do próprio trabalho. (2016)

Todas as superfícies, após o processo de acidificação, foram cortadas ao meio de modo a se medir, com a ajuda do profilometro, a altura das rugosidades. Portanto, para cada superfície tem-se a superfície A e a superfície B. Foram comparados os dados de condutividade com os parâmetros de rugosidade de cada superfície em estudo e com a média de ambas as superfícies (parâmetros de superfície A versus condutividade, parâmetros de superfície B versus condutividade, e média de parâmetros de superfície A e B versus Condutividade).

Parâmetros de rugosidade

A fim de medir a condutividade em diferentes tipos de amostras de rochas e sua correlação com parâmetros de rugosidade da superfície, estudou-se cada parâmetro de rugosidade da superfície e sua relação com a condutividade. Os parâmetros de superfície utilizados foram os de amplitude / altura. Os parâmetros estudados foram: média aritmética da altura (Z), rugosidade superficial (Rs), tortuosidade linear (T).

Média aritmética da altura (Z)

Para melhor entender a morfologia de uma superfície, uma descrição quantitativa da topografia da superfície deve ser realizada. Os dados topográficos da matriz devem ser tratados em cada linha do perfil (2D) ou em todos os perfis que se estendem para a análise da superfície (RAPOSO et al, 2007).

Os parâmetros de amplitude são os principais parâmetros de caracterização da topografia da superfície. A média aritmética da altura (Z) é dada por uma soma de todas as alturas dividido por uma matriz com N linhas e M colunas, que correspondem à superfície (x, y), sendo z (x, y) os elementos de altura da matriz.

$$z(N, M) = \frac{1}{N * M} * \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M z(x, y)$$

Rugosidade superficial (Rs)

O coeficiente de rugosidade da superfície é uma expansão tridimensional do coeficiente de rugosidade linear, dado por:

$$Rs = \frac{At}{An}$$

Onde, At é área efetiva da superfície da fratura e An área de projeção da superfície da fratura no seu plano médio. LANGE et al. (1993) sugeriram que o cálculo de Rs requer que o cálculo da área real seja medido diretamente. Com a triangulação da superfície de fratura, a área real da superfície de fratura pode ser estimada pela soma das áreas de elementos triangulares.

Quando Rs = 1, a superfície de fratura é perfeitamente plana e lisa, e corresponde ao plano médio. Os valores mais elevados de Rs estão associados com a superfície mais áspera. As medidas de Rs determinam de alguma forma, o grau de irregularidade da superfície de fratura em relação ao plano médio.

De acordo com EL SOUDANI (1978), o coeficiente poderia variar de 1 a 5 quando se considera o conjunto de superfícies de fratura na metalurgia. Os valores de $R_s < 2$ correspondem às superfícies de fratura frágil, e os valores de $R_s > 2$ correspondem às superfícies de fratura dúctil.

Através da realização de medições topográficas de perfis em pequenos passos constantes (por exemplo $70\mu\text{m} \leq \Delta x = \Delta y \leq 200\text{ }\mu\text{m}$) com um perfilmetro. A área real A_t da superfície de fratura também pode ser avaliada pelo método integral. Supondo-se que a superfície de fratura é contínua e derivável, e que Δx e Δy pode ser aproximada para valores pequenos, a área A_t pode ser aproximada segundo a equação discreta abaixo.

$$A_t \approx (\Delta x \Delta y) * \sum_{i=1}^{N_x-1} \sum_{j=1}^{N_y-1} \sqrt{1 + \left(\frac{z_{i+1,j} - z_{i,j}}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{z_{i,j+1} - z_{i,j}}{\Delta y}\right)^2}$$

Como um lembrete, o parâmetro R_s é formulado para uma superfície de parede única. Sabendo que as paredes inferiores e superiores estão em contato, parece melhor quantificar a rugosidade na interface da junta. A rugosidade da interface da junta é então calculada a partir da área composta (equação abaixo):

$$R_s (\text{Joint}) = \frac{A_t^c}{A_n^c} = \frac{A_t^l + A_t^u}{2 * A_n} = \frac{1}{2} (R_s^l + R_s^u)$$

Tortuosidade linear (T)

Outro parâmetro importante é a tortuosidade que descreve a sinuosidade na superfície. T_s é definido como a razão da área real da superfície de fratura e a área A_p da superfície formada pelos quatro pontos extremos, que delimita a zona de medição. Por razões estéticas, esta superfície é designada como π -superfície. A tortuosidade (T) quantifica variação do perfil comparado a uma linha de referência média (SAUSSE, 2001). A magnitude do efeito de tortuosidade na taxa de fluxo de fluido varia com a forma da abertura de distribuição. A influência é maior quando há uma grande fracção de pequenas aberturas e quanto menor as aberturas, maior é o efeito da tortuosidade no fluxo do fluido (TSANG, 1984).

$$T = \frac{\sum_{i=0}^n \sqrt{(Z_{i+1} - Z_i)^2 + (\Delta x)^2}}{L}$$

Resultados e Discussão

Os parâmetros de rugosidade calculados para cada superfície (A e B) e para os seus valores médios são mostrados nas tabelas 2, 3 e 4

Tabela 2. Parâmetros de rugosidade para superfície A

Superfícies	Z	R_s	T
RS1A	0.3259439	0.4167825	1.3500650
SL7B7A	0.1049506	0.5356971	1.4062073
FD3A	0.707786168	0.853952057	1.38828818
FD4A	0.814740663	1.025558767	1.3606267

Fonte: Dados do próprio trabalho. (2016)

Tabela 3. Parâmetros de rugosidade para superfície B

Superfícies	Z	Rs	T
RS1B	0.2064898	0.4003739	1.3832290
SL7B7B	0.1736524	0.4428646	1.3810870
FD3B	0.518911753	0.687822128	1.390584696
FD4B	0.734979434	1.071561459	1.445791267

Fonte: Dados do próprio trabalho. (2016)

Tabela 4. Parâmetros de rugosidade para a média das superfícies A e B

Superfícies	Z	Rs	T
RS1m	0.2662169	0.4085782	1.3666470
SL7Bm	0.1393015	0.4892809	1.3936472
FD3m	0.613348961	0.770887093	1.389436438
FD4m	0.774860049	1.048560113	1.403208984

Fonte: Dados do próprio trabalho. (2016)

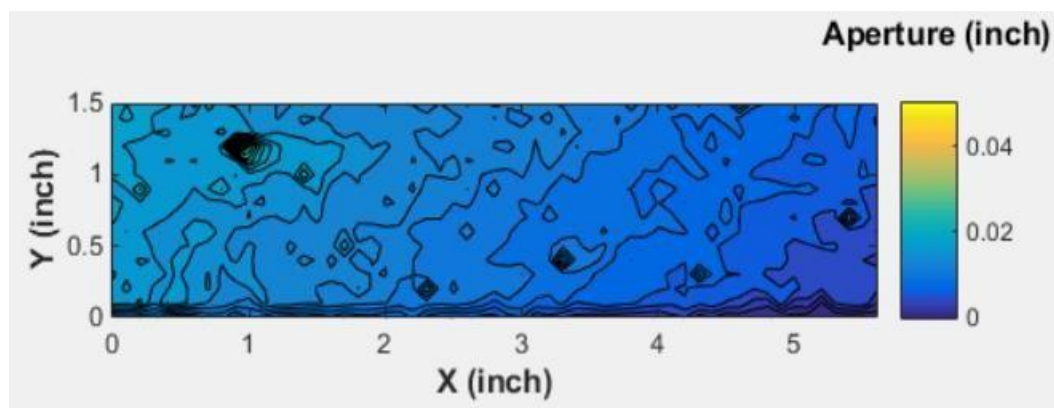
A análise abaixo mostra a maior e menor condutividade de superfície, os respectivos parâmetros obtidos e a superfície gerada no MATLAB.

Tabela 5. Comparação entre as superfícies RS1B e FD4

	RS1B	FD4B
Condutividade (md-ft)	5513,1	2080,2
Z	0,2064898	0,734979434
RS	0,4003739	1,071561459
Z2	0,7357789	1,090226326
T	1,3832290	1,445791267
So	0,0560161	0,124420488

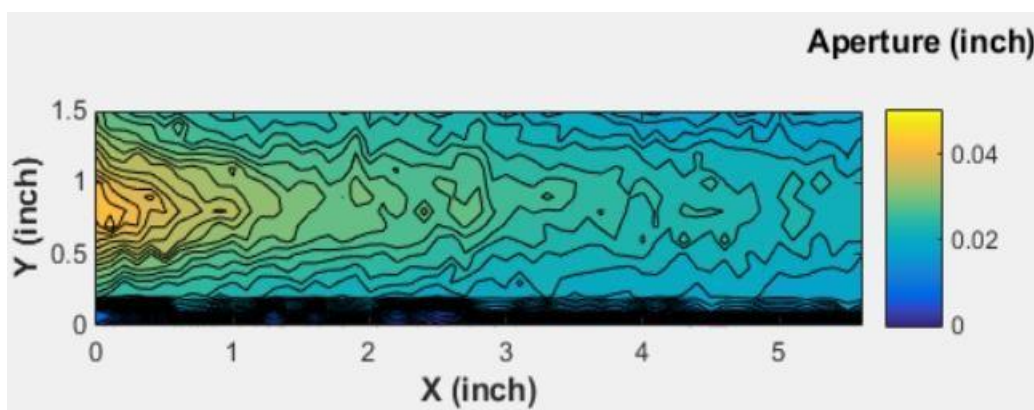
Fonte: Dados do próprio trabalho. (2016)

Figura 2. Superfície RS1B



Fonte: Dados do próprio trabalho. (2016)

Figura 3. Superfície FD4B



Fonte: Dados do próprio trabalho. (2016)

Como a tabela 5 mostra, os menores valores de condutividade são obtidos para superfícies em que os parâmetros de altura são os maiores. Quando analisamos as cores das figuras podemos observar que a menor condutividade (FD4B) apresenta cores que estão perto de amarelo, o que significa maiores valores de altura. A superfície de maior condutividade (RS1B) apresenta cores que estão perto de azul, o que significa valores mais baixos de altura.

No entanto, KAMALI (2015 b) afirma que uma parcela significativa do fechamento da fratura ocorre em níveis de estresse baixos, onde há menos asperezas em contato. A medida que se aumenta o estresse de fechamento, tem-se mais asperezas em contato, atuando como pilares que mantêm a superfície de fratura aberta. Deste modo, se faz necessário um equilíbrio adequado das alturas das asperezas pois, valores baixos de altura não fornecem uma boa condutividade, entretanto, se esses valores forem muito pequenos não será possível manter a fratura aberta. Por outro lado, altos valores de altura das rugosidades permitem sustentar o estresse de fechamento evitando que a fratura se feche, mas, como mostrado no presente trabalho, se tem uma redução da condutividade dificultando o fluxo do fluido.

Nos casos em que o efeito da tortuosidade e conectividade no fluxo do fluido é pequeno, a determinação do fluxo de fluido através da fratura áspera requer apenas o cálculo de medições de tensão-deformação de fratura. Quando o efeito da tortuosidade e conectividade é significativo, então é necessário o conhecimento do arranjo espacial efetivo das asperezas (TSANG, 1982).

Ao analisarmos os parâmetros de tortuosidade e angularidade superficial, é possível observar que os maiores valores desses parâmetros são obtidos para a menor condutividade, o que comprova o fato de que altas inclinações na superfície e um caminho tortuoso dificultam o fluxo do fluido diminuindo assim, a condutividade, sendo, portanto, necessário o conhecimento da geometria das asperezas de modo a determinar com precisão o perfil de fluxo do fluido.

Cálculos realizados por TSANG (1984) mostraram que o efeito da tortuosidade na redução da taxa de fluxo do fluido através de uma fratura áspera, varia com as características de rugosidade da fratura. Quanto menor as aberturas existentes na distribuição da superfície, maior é o efeito da tortuosidade.

Dessa forma, o padrão de declínio de condutividade, tensão máxima de fechamento e geometria/amplitude da rugosidade devem ser considerados no projeto de fraturamento ácido.

Conclusões

Os altos valores de parâmetros de rugosidade implicam em menores valores de condutividade. Os resultados sugerem que as asperezas da superfície atuam de forma significativa para a criação de vias de fluxo e, portanto, tem uma influência essencial na condutividade.

A relação entre estresse de fechamento, condutividade, e alturas das asperezas deve ser levada em conta, de tal forma que seja possível sustentar a superfície da fratura aberta (valores maiores de asperezas) ao passo que seja possível obter melhores valores de condutividade (menores valores de asperezas). Os resultados

evidenciaram que o efeito da tortuosidade e da angularidade superficial na redução da taxa de fluxo do fluido através de uma fratura áspera, varia com as características de rugosidade da fratura. Quanto menor as aberturas existentes na distribuição da superfície, maior é o efeito da tortuosidade e menor a condutividade.

Por fim, se faz necessário um dimensionamento adequado durante o processo de fraturamento ácido, levando em consideração não somente o estresse de fechamento e o padrão de condutividade, mas também a geometria e perfil das rugosidades de modo que se procure obter uma fratura que seja capaz de se manter aberta e que apresente uma boa condutividade.

Agradecimentos

Agradeço a Professora Dr. Luciana Viana Amorim, não somente pela orientação para a realização do meu TCC, que desempenhou esta atividade com muita paciência e dedicação, mas como também, por tudo que me foi proporcionando durante os dois anos e meios de bolsista de inovação tecnológica de muito aprendizado e amadurecimento profissional e acadêmico.

Agradeço ao CNPQ e a CAPES, pelo auxílio financeiro tanto nas pesquisas realizadas no País, quanto pelo auxílio fornecido durante o intercâmbio realizado pelo Ciências sem Fronteiras nos Estados Unidos. Agradeço por cada pessoa que tive a oportunidade de conhecer no meu intercâmbio. A sua amizade, o seu companheirismo e força nos momentos difíceis foram essências para resistir um ano e meio longe da família.

Agradeço a University of Oklahoma por ter proporcionado uma estrutura física incrível para que a pesquisa no meu Intercâmbio pudesse ser desempenhada com sucesso. Agradeço ao professor doutor da University of Oklahoma Maysam Pournik e ao seu aluno de doutorado Amir Khamali, pelo suporte durante a pesquisa e paciência para que pudéssemos atingir o objetivo final. Agradeço também, ao meu amigo e colega de curso Lucas Mota, que esteve comigo na University of Oklahoma e teve papel fundamental no desempenho do presente trabalho.

Referências Bibliográficas

Belem, T.; Etienne, H. F.; Souley, M. Quantitative Parameters for Rock Joint Surface Roughness.

Rock Mechanics and Rock Engineering: Springer-Verlag, 2000, Austria.

Fernandes, P. D. Técnicas de Estimulação: Aumentando a Produtividade de Poços de Petróleo, Boletim BVEP, ano I, Nº 17, 2001.

Kamali, A. An Investigation of Rough Surface Closure with Application to Fracturing. The 49th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, USA, 28 Junho 1, 2015: ARMA-15-420.(a)

Nierode, D.E.; Kruk, K.F. An Evaluation of Acid Fluid Loss Additives, Retarded Acids, and Acidized Fracture Conductivity, Fall Meeting of the Society of petroleum Engineers of AIME, 30 Setembro-3, 1973, Las Vegas, Nevada. SPE 4549-MS.

Pournik, M. Effect of Acid Spending on Etching and Acid Fracture Conductivity. SPE Russian Oil and Gas Conference and Exhibition, 26-28 Outubro 2010, Moscow, Russia. SPE-136217-MS

Raposo, M.; Ferreira, Q.; Ribeiro, P. A. A guide for atomic force microscopy analysis of soft condensed matter. Modern Research and Educational Topics in Microscopy, 2007.

Sausse, J. Hydromechanical properties and alteration of natural fracture surfaces in the Soultz granite (Bas-Rhin, France). UMR 7566, Géologie et Gestion des Ressources Minières et Énergétiques, Faculté des Sciences, Université Henri-Poincaré 2001. Vandoeuvre Cedex, France.

Tsang, Y. W.; The effect of tortuosity on fluid flow through a single fracture. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 20, NO. 9, PAGES 1209-1215, Setembro, 1984.

