

## UM CASO DE SUCESSO NA MEDIÇÃO DE TENSÕES IN SITU POR FRATURAMENTO HIDRÁULICO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM MODELOS TEÓRICOS

Rodrigo P. de FIGUEIREDO<sup>1</sup>; Bernardo R. FILIZZOLA<sup>2</sup>; Fábio S. MAGALHÃES<sup>3</sup>; Allan MAIA<sup>4</sup>; Alessandro J. GUIMARÃES<sup>5</sup>

**Resumo** – Tendo em vista a relevância do conhecimento acerca das tensões naturais em maciços rochosos e seu comportamento após intervenções de engenharia são apresentados os resultados de uma campanha de medidas de tensões *in situ* por fraturamento hidráulico, realizada em um furo em gnaisses compactos da região do Quadrilátero Ferrífero, MG. Considerações teóricas e práticas a respeito das curvas experimentais pressão x tempo são discutidas, visando embasar a correta interpretação das medidas na determinação das tensões *in situ*. Finalmente, os resultados interpretados são comparados com o proposto em modelos teóricos para variação média das tensões *in situ* com a profundidade, obtendo-se um excepcional ajuste.

**Abstract** – Given the relevance regarding the knowledge of natural stresses in rock massifs and its behavior after engineering interventions the results of *in situ* stress measurements by hydraulic fracturing are presented, carried out in a borehole in compact gneisses in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Theoretical and practical considerations regarding the experimental pressure-time curves are discussed, aiming to support the correct interpretation of the measurements in the determination of the *in situ* stresses. Finally, the interpreted results are compared with those proposed in theoretical models for the average variation of the *in situ* stresses with depth, obtaining an exceptional fit.

**Palavras-Chave** – Tensões In Situ; Fraturamento Hidráulico; Shut-in Pressure; Gnaisses; Quadrilátero Ferrífero.

---

<sup>1</sup> Prof. Eng., DSc, Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 99711-2777, [rpfigueiredo@ufop.edu.br](mailto:rpfigueiredo@ufop.edu.br)

<sup>2</sup> Geól., MSc, WALM Engenharia: Belo Horizonte - MG, (31) 99184-0756, [bernardo.filizzola@walmengenharia.com.br](mailto:bernardo.filizzola@walmengenharia.com.br)

<sup>3</sup> Geól., PhD, WALM Engenharia: Belo Horizonte - MG, (31) 99423-0710, [fabio.magalhaes@walmengenharia.com.br](mailto:fabio.magalhaes@walmengenharia.com.br)

<sup>4</sup> Eng., PhD, VALE: Belo Horizonte - MG, (31) 99301-1428, [allan.maia@vale.com](mailto:allan.maia@vale.com)

<sup>5</sup> Eng. Geól., PhD, REDE/GEOPAR: Belo Horizonte - MG, (31) 99184-0756, [alessandroguimaraes@geosol.com.br](mailto:alessandroguimaraes@geosol.com.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Escavações subterrâneas ou em superfície implicam uma alteração do estado de tensões naturais (tensões *in situ*) atuantes no maciço rochoso. Essas alterações podem ter significativas implicações em termos de estabilidade, tornando-se relevante o seu conhecimento para prever a sua redistribuição por tais obras de engenharia. Nesse sentido, há anos existem técnicas para se medir as tensões naturais. Todavia, é notório que, de forma geral, tais metodologias são extremamente sensíveis a questões operacionais (e.g. erros de execução) e têm limitações técnicas diversas, não sendo raro que seus resultados obtidos sejam considerados insatisfatórios. Dessa forma, com o objetivo de destacar um caso bem sucedido em termos de medição das tensões *in situ*, o presente trabalho aborda resultados experimentais obtidos pelo método de Fraturamento Hidráulico (FH) na região do Quadrilátero Ferrífero (MG) e faz uma comparação com a previsão fornecida por modelos teóricos para estimação dessas tensões.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E DOS MATERIAIS ENSAIADOS

A área onde foram realizados os ensaios de FH está inserida no Quadrilátero Ferrífero (QF). Localmente, destacam-se as rochas metamórficas do Complexo do Baçõ. Foram realizados 5 ensaios em gnaisses compactos, em um furo vertical de 452 m de profundidade. A Tabela 1 apresenta os trechos e litotipos ensaiados, havendo uma divisão entre ensaios realizados em um gnaiss com bandamento mais marcado, de composição quartzo feldspática clássica (Gnaiss – Figura 1A), e em um gnaiss de composição mais básica (Gnaiss Básico – Figura 1B).

Tabela 1. Trechos e litotipos dos ensaios de Fraturamento Hidráulico.

Profundidade do Ensaio (m)	Litotipo
121,4	Gnaiss Básico
210,0	Gnaiss Básico
274,0	Gnaiss Básico
352,0	Gnaiss
440,7	Gnaiss



Figura 1. (A) Litotipo caracterizado como Gnaiss. (B) Litotipo caracterizado como Gnaiss Básico.

## 3. FRATURAMENTO HIDRÁULICO – CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS E PRÁTICAS

O FH é executado preferencialmente numa sondagem vertical, sendo as tensões horizontais assumidas como principais e a tensão vertical relacionada à carga exercida pela coluna de rocha sobrejacente (Amadei & Stephansson, 1997). A rocha é fraturada pela injeção de uma vazão constante de água em seção isolada da sondagem, sendo a orientação da fratura obtida por meio

de perfilagem ótica ou utilização de *packers* de impressão (caso do presente trabalho). Para cada ensaio são geradas curvas de pressão/vazão vs. tempo, em pelo menos 3 ciclos.

A Figura 2 apresenta um padrão típico idealizado das curvas pressão/vazão vs. tempo (Kim & Franklin, 1987; Zang & Stephansson, 2010) para o primeiro ciclo do fraturamento hidráulico, e o segundo ciclo, de reabertura da fratura hidráulica gerada no anterior. É relevante notar que o desligamento das bombas, com a interrupção da vazão constante no tempo, só deve ser feito após uma razoável estabilização no decréscimo da pressão, a qual se segue à propagação da fratura hidráulica e sua conseqüente abertura. Isso fica caracterizado nas curvas pela presença de uma assíntota horizontal seguida dos "joelhos" circundados pelos círculos vermelhos, os quais representam a pressão nomeada como de *shut-in*.

Fisicamente, de acordo com Kim & Franklin (1987), essa estabilização na queda da pressão corresponde ao fato de a fratura ter se propagado suficientemente para sair da zona de influência do furo, dentro da qual as tensões atuantes variam e são ainda afetadas (induzidas) pelo furo. O tempo associado a essa propagação, rigorosamente, dependerá da vazão, mas, via de regra, gira em torno de alguns minutos. Assim sendo, para determinar efetivamente as tensões *in situ*, por meio da pressão hidráulica no interior da fratura, é necessário propagá-la até que haja uma razoável estabilização da pressão, ao cabo de alguns minutos de queda. É oportuno observar que nem sempre os "joelhos" são absolutamente perceptíveis na escala de traçado das curvas, o que dificulta a identificação do ponto exato de desligamento das bombas, se não estiverem também disponíveis, em paralelo, as curvas vazão vs. tempo, como se observa na Figura 2(a).

Ainda na Figura 2, são salientadas as pressões utilizadas nos cálculos das tensões *in situ*, bem como, a interpretação física dos estágios de propagação da fratura a elas associados (Zang & Stephansson, 2010).

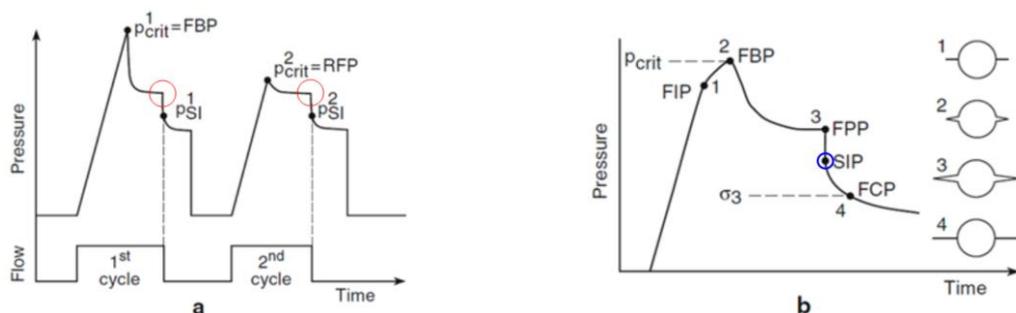


Figura 2. (a) Padrão típico idealizado de uma curva pressão/vazão vs. tempo (Kim & Franklin, 1987) mostrando as pressões utilizadas nos cálculos das tensões *in situ* e (b) a correspondente interpretação física dos estágios de propagação da fratura hidráulica a elas associados (adaptada de Zang & Stephansson, 2010).

A designação de cada uma das pressões indicadas na Figura 2, com a respectiva notação utilizada para algumas delas neste trabalho, é a seguinte:

- FIP (1 – *Fracture Initiation Pressure*), no ciclo 2, quando há uma alteração na tangente da curva pressão vs tempo, indicando abertura de uma fratura pré-existente;
- FBP (2 – *Fracture Breakdown Pressure*:  $p_b$ ), no ciclo 1, ou a RFP (2 – *Reopening Fracture Pressure*:  $p_r$ ) no ciclo 2, que são os “picos” verificados nas curvas dos respectivos ciclos, indicando surgimento de uma nova fratura ou sua reabertura;
- FPP (3 – *Fracture Propagation Pressure*);
- FCP (4 – *Fracture Closure Pressure*);
- SIP (*Shut-in Pressure*:  $p_s$ ) pressão na qual a fratura deixa de propagar (*crack arrest*).

Na Figura 2(a) fica muito bem caracterizada a correspondência do ponto associado à interrupção da vazão - desligamento das bombas - com o "joelho" da curva pressão vs. tempo (*shut-in*), após já ter ocorrida uma nítida estabilização na queda de pressão, que vai tendendo, assintoticamente, a tangenciar uma reta horizontal. Nesse exato momento tem-se a pressão FPP (que caracteriza uma propagação da fratura em regime permanente) à qual, logo em seguida ao

desligamento, sucede a pressão SIP (correspondente à parada da propagação). A SIP ( $p_s$ ) é interpretada como estando equilibrada com a componente de tensão normal ao plano da fratura e serve com uma medida do seu valor. Vale notar, que  $FPP \leq SIP \leq FCP$ , isto é, SIP tem como limites superior e inferior, respectivamente, FPP e FCP, podendo as duas últimas praticamente coincidir ou serem bastante diferentes a depender do comportamento de decaimento da curva após o desligamento. No caso de uma fratura vertical, a tensão normal ao plano corresponde à componente principal mínima no plano horizontal ( $\sigma_h$  - Amadei & Stephansson, 1997) que, portanto, é medida diretamente no ensaio. Conforme Rutqvist et al. (2000) o erro na sua determinação, idealmente, estaria na casa de  $\pm 5\%$ .

No presente trabalho foi adotado para interpretação dos resultados dos ensaios de FH o modelo de cálculo clássico (Hubert & Willis, 1957; Fairhurst, 1965), baseado nas hipóteses de que a rocha é impermeável e linear-elástica-isotrópica, o qual pode ser expresso conforme as equações 1 e 2 (Haimson & Cornet, 2003), onde  $\sigma_H$  é a componente principal máxima no plano horizontal.

$$\sigma_h = p_s \quad (1)$$

$$\sigma_H = 3\sigma_h - p_r \quad (2)$$

Em função de ser assim calculado (Equação 2), o valor de  $\sigma_H$  tem, de acordo com Rutqvist et al. (2000), um erro estimado entre  $\pm 10\%$  e  $\pm 20\%$ , sendo tanto mais incerto quanto maior for a diferença entre  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ . Rutqvist et al. (2000) concluíram ainda, com base nas suas simulações computacionais do processo de fraturamento hidráulico, que para  $\sigma_H \geq 3\sigma_h$ , o valor de  $\sigma_H$  seria subestimado. Serdyukov et al. (2016) ratificaram essa última conclusão por meio de simulações experimentais em laboratório. A razão para isso pode ser observada na Figura 3, e está no fato de que, para  $\sigma_H \geq 3\sigma_h$ , a parede do furo, no ponto com concentração mínima de tensões (a partir do qual emana a fratura), encontra-se tracionada. Por conseguinte, a fratura já estaria aberta antes mesmo do início da pressurização dos ciclos de reabertura. E, dessa forma, o fluido inevitavelmente a penetraria em certa extensão além da parede do furo (Figura 3b), onde seria estritamente válida a Equação 2 usada na interpretação do ensaio. Uma solução para esse problema seria utilizar o ciclo de fraturamento, enquanto a fratura ainda não teria sido gerada. Nesse caso, vale a Equação 3 (Haimson & Cornet, 2003), onde  $\sigma_t$  é a Resistência à Tração.

$$\sigma_H = \sigma_t + 3\sigma_h - p_b \quad (3)$$

Reforça-se, a respeito do modelo acima, que a tensão vertical ( $\sigma_V$ ) está sendo tacitamente assumida como principal e que seu valor é calculado (não é medido) a partir do peso estimado da coluna de rochas sobrejacente (Fairhurst, 1965).

É válido ainda mencionar que nem sempre o padrão idealizado das curvas pressão/vazão vs. tempo, mostrado na Figura 2, é observado experimentalmente. Isso se deve, basicamente, à maior ou menor diferença existente entre os valores de  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ . Hickman & Zoback (1983) classificaram os padrões possíveis para as curvas em três (03) tipos distintos, conforme se pode observar na Figura 4. O padrão idealizado da Figura 2 corresponde ao TYPE 1 de Hickman & Zoback (op. cit.), no qual  $p_b > p_r \geq \sigma_h$ , se associa a uma diferença reduzida entre  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ . Para os outros dois tipos (TYPE 2 e TYPE 3) verifica-se que  $\sigma_h \geq p_r$ .

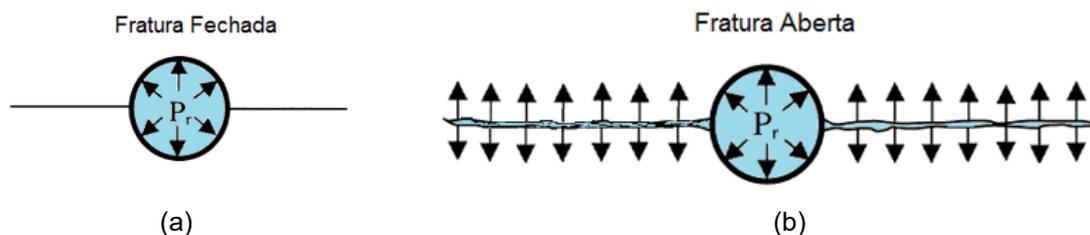


Figura 3. Ilustração da condição da fratura hidráulica (abertura/fechamento) para estados de tensão com: (a)  $\sigma_H \approx \sigma_h$  e (b)  $\sigma_H \approx 3\sigma_h$ .

Nesses dois últimos tipos, não são observados "picos" acentuados nas curvas pressão vs. tempo dos ciclos de reabertura. Não ocorre, como sucede no TYPE 1, uma nítida queda na pressão. Ao contrário, ela cresce monótona e assintoticamente até se estabilizar num valor máximo. A diferença entre o TYPE 2 e o TYPE 3 está no fato de que para o primeiro  $p_b > \sigma_h \geq p_r$ , o que se materializa por haver um pico no primeiro ciclo de fraturamento. Enquanto para o segundo  $\sigma_h \geq p_b > p_r$ , onde não há picos em quaisquer dos ciclos, sejam de fraturamento ou reabertura. De todo modo, tanto o TYPE 2, quanto o TYPE 3, malgrado as suas ligeiras diferenças, associam-se a diferenças elevadas entre  $\sigma_H$  e  $\sigma_h$ .

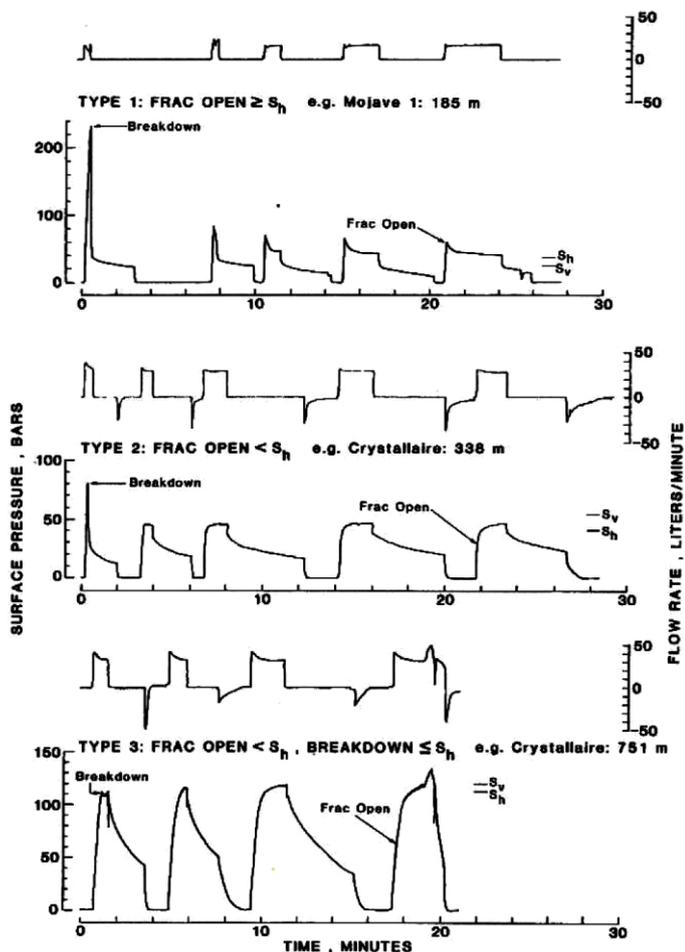


Figura 4. Tipos de curvas pressão/vazão vs. tempo em ensaios de Fraturamento Hidráulico (Hickman & Zoback, 1983).

Cumpram ainda ressaltar, a possibilidade de serem abertas fraturas sub-horizontais durante os ensaios (Figura 5). Essa possibilidade tem sido sugerida desde os primeiros estudos sobre o Fraturamento Hidráulico (e.g. Hubert & Willis, 1957; Fairhurst, 1965). Para tanto, a tensão vertical deverá ser a mínima dentre as tensões principais, de modo que a fratura hidráulica se propague contra ela (Figura 5). Nesse caso, que logicamente é mais comum a baixas profundidades, não seria correto considerar a Equação 1. Em seu lugar valeria a Equação 4.

$$\sigma_V = p_s \quad (4)$$

Ademais, o modelo implicado pelas equações 2 e 3, que representam uma condição entre as tensões horizontais, respectivamente, para a reabertura e abertura de uma fratura vertical, também deixa de ser válido. As relações entre tais tensões, para a reabertura e abertura de uma fratura horizontal, passam a ser dadas, respectivamente, pelas equações 5 e 6 (Figueiredo, 2016), onde  $\nu$  é o Coeficiente de Poisson.

$$p_s - p_r = 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (5)$$

$$p_s - p_b = 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) - \sigma_t \quad (6)$$

Na Equação 5 o membro direito deverá ser positivo ou igual a 0, donde se conclui que  $p_s \geq p_r$ , ou seja,  $\sigma_v \geq p_r$ , levando-se em conta a Equação 4. Diante disso, pode-se adicionalmente concluir (Figueiredo, 2016) que o padrão das curvas pressão vs. tempo associado à reabertura de fraturas horizontais deverá ser assemelhado ao TYPE 3 de Hickman & Zoback (1983), não devendo apresentar picos seguidos de queda. De maneira análoga, na Equação 6, o primeiro termo do membro direito também deverá ser positivo ou igual a 0. Se  $\sigma_H$  for aproximadamente igual a  $\sigma_h$  então  $\sigma_t > 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$  e  $p_s > p_b$ , dando origem a curvas pressão vs. tempo do TYPE 3. Por outro lado, se  $\sigma_H \gg \sigma_h$ , ter-se-á  $\sigma_t < 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)$  e  $p_s < p_b$ , resultando um comportamento TYPE 2. Ademais, ocorrendo fraturas horizontais, observa-se que não é possível determinar os valores das tensões horizontais, mas, tão somente o valor da diferença entre elas.

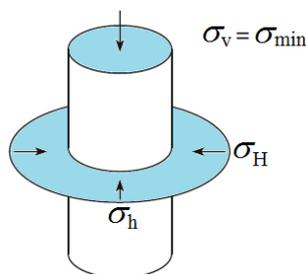


Figura 5. Ilustração esquemática de uma fratura sub-horizontal (subortogonal ao eixo do furo).

Finalmente, cabe mencionar que existem variados métodos para determinação gráfica e/ou analítica do ponto SIP ( $p_s$ ) destacado na Figura 2(b). Guo et al. (1993) apresentam oito possibilidades diferentes, que em última análise, variam pela maneira na qual contemplam o decaimento da pressão com o tempo, logo após o desligamento das bombas (*shut-in*). Na campanha de FH foco do presente trabalho, foi admitido que a propagação das fraturas hidráulicas se estendeu bastante além das zonas de influência dos furos. Isso, devido ao razoável tempo em que as bombas permaneceram abertas após suceder o fraturamento ou a reabertura. Nessas circunstâncias, e considerando-se verossímil a hipótese de rocha impermeável, vale interpretar que a pressão de propagação (FPP – Figura 2) é praticamente coincidente com a pressão de fechamento da fratura (FCP – Figura 2). Isso se manifesta graficamente quando, após o desligamento das bombas (*shut-in*), as curvas pressão vs. tempo apresentam um decaimento praticamente vertical (como o do TYPE 1 da Figura 4), diferentemente do que sucede noutras circunstâncias, nas quais o decaimento tende a ser exponencial (como, por exemplo, em TYPE 2 e TYPE 3 da Figura 4).

#### 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir das questões teóricas e práticas apresentadas, são aqui discutidos os principais aspectos dos resultados obtidos nos ensaios de FH, sendo avaliado o padrão típico de evolução da pressão no tempo e apresentados os cálculos para estimativa das magnitudes das tensões. Para os 5 ensaios realizados foi considerado que todas as curvas pressão vs. tempo obtidas podem ser enquadradas no TYPE 1 de Hickman & Zoback (1983). A título de exemplo, a Figura 6 reproduz a curva do ensaio realizado à profundidade de 274,0 m, em Gnaisse Básico (Tabela 1). Ali se observa, que tanto após o fraturamento, quanto às reaberturas, foram observados tempos suficientes para uma boa estabilização da pressão, significando que as fraturas foram propagadas para além da zona de influência do furo, o que permite uma boa acurácia na determinação da *Shut-in Pressure* ( $p_s = \text{SIP}$ , Figura 3) e, por conseguinte, de  $\sigma_h$ , conforme indica a Equação 1. Mais além, como discutido, o formato das curvas (associado ao tempo suficiente de propagação e a uma razoável impermeabilidade admitida para as rochas compactas em questão), torna possível adotar a hipótese clássica de Hubert & Willis (1957) para a determinação do *Shut-in Pressure*, qual seja, a de que o seu valor praticamente coincide com a pressão de fechamento da fratura (FCP, Figura 2), que equivalerá à pressão estabilizada no instante de desligamento das bombas.

Dessa forma, foram tomados os dados de  $p_s$  e  $p_r$  nas curvas dos cinco ensaios disponíveis e efetuadas as determinações constantes na Tabela 2. Vale observar, que em todos os ensaios foram considerados, para efeito de cálculo, apenas os ciclos de reabertura, ou seja, em nenhum

dos casos obteve-se  $\sigma_H \geq 3\sigma_h$ , o que tornaria recomendável utilizar o ciclo de fraturamento (conforme discutido no Item 3 – Haimson & Cornet (2003) – e ilustrado na Figura 3(b)). Cumpre ainda ressaltar que as tensões verticais foram calculadas ( $\sigma_V =$  peso específico médio x profundidade) considerando-se os seguintes dados de densidade obtidos em ensaios laboratoriais: média de 3.1 g/cm<sup>3</sup> para o Gnaisse Básico e de 2.7 g/cm<sup>3</sup> para o Gnaisse.

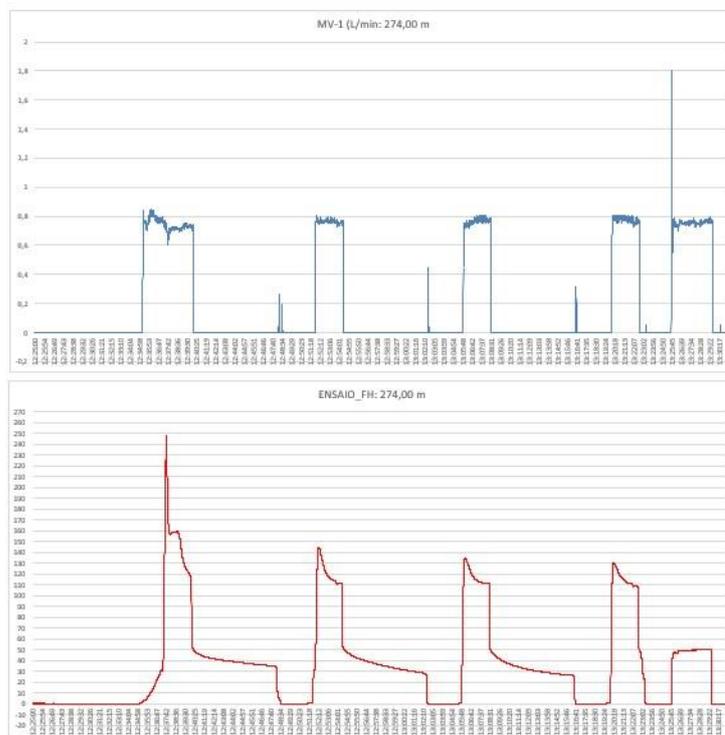


Figura 6. Curvas de vazão e pressão vs. tempo apresentadas para o ensaio de Fraturamento Hidráulico na profundidade de 274,0 m.

Tabela 2. Resultados calculados a partir dos dados tomados nos ensaios de Fraturamento Hidráulico.

Prof. Ensaio (m)	Sv (MPa)	Valores médios entre ciclos			1° Ciclo de Reabertura			2° Ciclo de Reabertura			3° Ciclo de Reabertura		
		SH (MPa)	Sh (MPa)	Pr (MPa)	SH (MPa)	Sh (MPa)	Pr (MPa)	SH (MPa)	Sh (MPa)	Pr (MPa)	SH (MPa)	Sh (MPa)	Pr (MPa)
121	3,8	22,6	11,6	12,3	22,3	11,8	13,1	23,5	11,8	11,9	22,1	11,3	11,8
210	6,5	20,8	10,7	11,3	21,1	11	11,9	21,4	10,9	11,3	19,8	10,2	10,8
274	8,5	24,1	12,4	13,0	24,2	12,6	13,6	24,2	12,4	13	23,9	12,1	12,4
352	9,5	18,0	9,0	9,0	18	9	9	17,9	9	9,1	18	9	9
440,7	11,9	17,9	10,0	12,0	17,8	10,2	12,8	17,8	9,9	11,9	18,1	9,8	11,3

Por sua vez, a Tabela 3 consolida os valores das várias razões entre as componentes de tensões *in situ* medidas e calculadas. Observe-se, na quarta coluna, que em nenhuma das profundidades ensaiadas obteve-se  $\sigma_H \geq 3\sigma_h$ , validando, assim, o uso apenas dos ciclos de reabertura em todos os cálculos de tensões apresentados na Tabela 2. Por conseguinte, na presente campanha não foi “necessária”, para efeito de interpretação dos resultados, a utilização dos ensaios laboratoriais realizados para definição dos parâmetros de resistência. Na Figura 7 está graficamente ilustrada a variação do K\_médio em função da profundidade.

Tabela 3. Consolidação dos valores das razões entre as componentes de tensões *in situ* determinadas na campanha de ensaios de Fraturamento Hidráulico.

Prof. (m)	KH( $\sigma_H/\sigma_V$ )	kh( $\sigma_h/\sigma_V$ )	K( $\sigma_H/\sigma_h$ )	K_médio = (KH + kh)/2
121	6.03	3.10	1.95	4.57
210	3.19	1.64	1.94	2.42
274	2.84	1.46	1.95	2.15
352	1.89	0.95	2.00	1.42
440.7	1.50	0.84	1.80	1.17

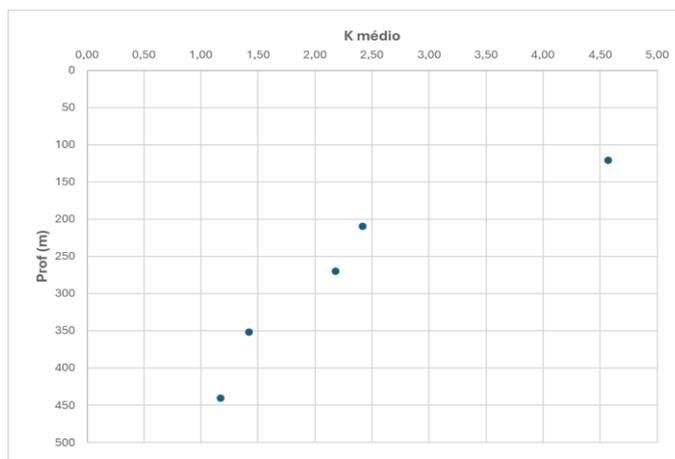


Figura 7. Variação do K\_médio em função da profundidade para os ensaios de Fraturamento Hidráulico.

Finalmente, a direção das tensões foi obtida por meio da impressão de três (03) das fraturas hidráulicas produzidas, via obturadores impressores. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 4. Como se sabe (Hubert & Willis, 1957), a direção das fraturas coincide com a direção da tensão horizontal principal máxima ( $\sigma_H$ ), que se situou sempre no quadrante NW. Dois dos resultados (às profundidades de 121 e 352 m) foram bem próximos entre si, com uma média de N56W, e o terceiro (a 274 m) indicou uma direção mais próxima ao eixo NS (N10W). A impressão dessa última fratura está mostrada na Figura 8.

Tabela 4. Direção das fraturas hidráulicas impressas nos ensaios de FH realizados.

Profundidade do Ensaio (m)	Direção obtida
121,4	N060°W
210,0	Não considerada, por erro
274,0	N010°W
352,0	N052°W
440,7	Não executada a impressão

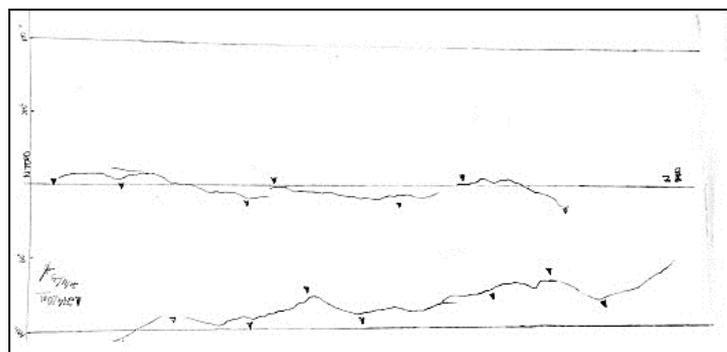


Figura 8. Impressão da fratura hidráulica produzida no ensaio à profundidade de 274 m.

## 5. MODELO PROPOSTO PARA AS TENSÕES *IN SITU* E COMPARAÇÃO COM MODELOS TEÓRICOS

Considerando-se os cinco (05) resultados obtidos, foi estabelecido, por ajuste via mínimos quadrados, um modelo de variação do K\_médio com a profundidade (Tabela 3 e Figura 7) para a região dos ensaios de FH. Tal modelo tem uma expressão hiperbólica, como deveria ser a tendência esperada (Brown & Hoek, 1978; McCutchen, 1982), com um coeficiente de determinação ( $r^2$ ), igual a 0,991. O referido modelo é apresentado na Equação 7, onde  $z$  (m) representa a profundidade em metros.

$$K_{MÉDIO} = 0.329 + \frac{481.77}{z(m)} \quad (7)$$

A Figura 9 mostra graficamente o modelo supracitado, superposto aos limites inferior e superior para o  $K_{médio}$ , apresentados por Brown & Hoek (1978) a partir de uma compilação de resultados de medidas de tensões *in situ*, bem como, ao modelo teórico obtido por McCutchen (1982) para a variação média das tensões na crosta terrestre. Como se pode perceber, o modelo aqui estabelecido se enquadra perfeitamente dentro dos limites das medidas experimentais e se aproxima muito do modelo teórico.

Alternativamente, é possível propor dois modelos distintos, para cada um dos litotipos ensaiados, nas profundidades de ocorrência de cada um deles: a Equação 8 para o Gnaisse Básico, até aproximadamente 317 m, e a Equação 9 para o Gnaisse, daí em diante, como está ilustrado graficamente na Figura 10. A exemplo do modelo único da Equação 7, os dois modelos distintos para cada litotipo, nas respectivas faixas de profundidades, se enquadram dentro dos limites esperados e se aproximam bastante do modelo teórico proposto por McCutchen (1982).

$$K_{MÉDIO}^{(1)} = 0.275 + \frac{503.48}{z(m)}, \quad (r^2=0.997) \text{ para } z \leq 317 \text{ m} \quad (8)$$

$$K_{MÉDIO}^{(2)} = 0.410 + \frac{347.37}{z(m)}, \quad (r^2=0.999) \text{ para } z > 317 \text{ m} \quad (9)$$

## 6. CONCLUSÕES

A avaliação dos ensaios de FH realizados no Quadrilátero Ferrífero levou a um excelente ajuste de modelos hiperbólicos aos dados obtidos (figuras 9 e 10), permitindo concluir que as medidas feitas estão dentro do esperado, ou seja, são bastante verossímeis e consistentes com as tendências crustais médias em termos quantitativos (com os valores de  $K_{médio}$  variando entre 1.17 e 4.57), bem como estabelecer um razoável instrumento preditivo das tensões para as faixas de profundidades e litotipos ensaiados. Com relação à direção das tensões horizontais principais máximas, ela só foi obtida em três dos cinco ensaios e apresentou alguma consistência entre si, ficando sempre no quadrante NW. Dessa forma, os resultados experimentais obtidos reforçam a eficácia do método de fraturamento hidráulico para estimativas de tensões *in situ*.

Não obstante, é muito importante mencionar, que embora bem sucedidos, os ensaios ora realizados foram em número reduzido. Assim sendo, esse pequeno conjunto de ensaios não é totalmente satisfatório para um conhecimento bem fundamentado do estado de tensões *in situ* em uma condição geológica tão complexa como as observadas no Quadrilátero Ferrífero. Desse modo, é recomendável que mais determinações experimentais sejam realizadas na área (em gnaisses compactos do Complexo do Baçã), a fim de confirmar, ou não, os resultados apresentados.

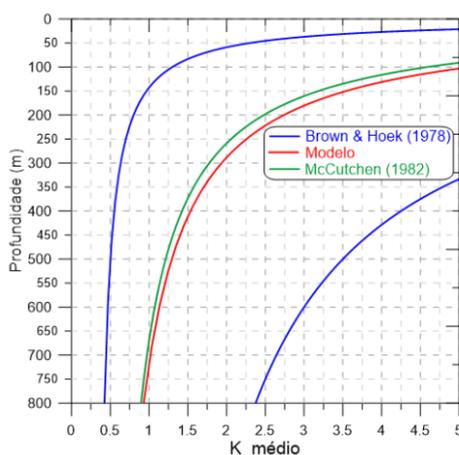


Figura 9. Modelo de variação do  $K_{médio}$  com a profundidade em metros para a região dos ensaios de Fraturamento Hidráulico (Equação 7, em vermelho). Em azul estão apresentados os limites inferior e superior para a variação do  $K_{médio}$ , apresentados por Brown & Hoek (1978) e, em verde, o modelo teórico proposto por McCutchen (1982).

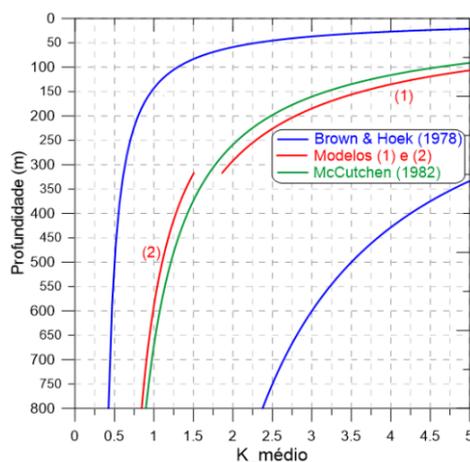


Figura 10. Modelos de variação do  $K_{\text{médio}}$  com a profundidade em metros para a região dos ensaios de Fraturamento Hidráulico (em vermelho, eqs. (8) e (9), respectivamente, para Gnaiss Básico (1) e Gnaiss (2)). Em azul estão apresentados os limites inferior e superior para a variação do  $K_{\text{médio}}$ , apresentados por Brown & Hoek (1978), e, em verde, o modelo teórico proposto por McCutchen (1982).

## REFERÊNCIAS

- AMADEI, B. & STEPHANSSON, O. (1997). *Rock Stress and its Measurement*. London: Chapman & Hall, 490p.
- BROWN, E.T. & E. HOEK (1978). *Trends in Relationships between In-Situ Stresses and Depth* in Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15(4): 211-215.
- FAIRHURST, C (1965). *Measurement of In Situ Rock Stresses with Particular Reference to Hydraulic Fracturing* in Felsmechanik, v II (3-4), pp. 129-147.
- FIGUEIREDO, R.P. (2016). *Tensões Horizontais Associadas à Formação de Fratura Horizontal em Ensaios de Fraturamento Hidráulico* in Notas de Aula, Ouro Preto: POSGEO/UFOP, 2p.
- GUO, F., MORGENSTERN, N.R. & SCOTT, J.D. (1993). *Interpretation of Hydraulic Fracturing Pressure: a Comparison of Eight Methods Used to Identify Shut-in Pressure* in Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30(6): 627-631.
- HAIMSON, B.C. & CORNET, F.H. (2003). *ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation, Part 3: Hydraulic Fracturing (HF) and/or Hydraulic Testing of Pre-Existing Fractures (HTPF)* in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 1011-1020.
- HICKMAN, S.H. & ZOBACK, M.D. (1983). *The Interpretation of Hydraulic Fracturing Pressure-Time Data for In-Situ Stress Determination* in Hydraulic Fracturing Measurements, M. D. Zoback and B. C. Haimson (eds.), National Academy Press, Washington, D.C., 44-54.
- HUBBERT, M.K. & WILLIS, D.G. (1957). *Mechanics of Hydraulic Fracturing*. Petroleum Transactions, AIME, 210(1): 153-168.
- KIM, K. & FRANKLIN, J.A. (1987). *ISRM Suggested Method for Rock Stress Determination Using the Hydraulic Fracturing Technique* in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 24(1): 59-63.
- MCCUTCHEN, W. R. (1982). *Some Elements of a Theory for In-Situ Stress* in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 19(4): 201-203.
- RUTQVIST, J., TSANG, C.-F., & STEPHANSSON, O. (2000). *Uncertainty in the Maximum Principal Stress Estimated from Hydraulic Fracturing Measurements Due to the Presence of the Induced Fracture* in Int. J. Rock Mech. Min. Sci, v. 37(1-2), pp. 107-120;
- SERDYUKOV, S.V., KURLENYA, M.V. & PATUTIN, A.V. (2016). *Hydraulic Fracturing for In Situ Stress Measurement* in Journal of Mining Science, 52(6): 1031-1038.
- ZANG, A. & STEPHANSSON, O. (2010). *Stress Field of the Earth's Crust*. Berlin. Springer, 322p.