

Métodos de Estimación del Estado de Estrés en Roca In-Situ: Hidro-fracturamiento (HF), Ensayo Hidráulico de Fracturas Pre-Existentes (HTPF) y por Gato Plano

Esteban Salazar Pérez

1. Estimando el estado de estrés

El estado de estrés de una roca in-situ se puede estimar obteniendo las seis componentes independientes del tensor de estrés o la magnitud y orientación de los estreses principales. En la práctica es importante tener presente que en una superficie libre en una roca (i.e. en una fractura, superficie subaérea, hoyo de sondaje, etc) no existe estrés de cizalle y el estrés normal es cero, por lo que este plano corresponde a un plano principal con σ_3 igual a cero, sin embargo el tensor puede rotar y/o cambiar en magnitud rápidamente en la vecindad de estas superficies.

Se debe ser cuidadoso también en como se aplica la mecánica del continuo a un caso práctico como este. Se define el volumen elemental representativo (REV) como el volumen mínimo sobre el cual un continuo equivalente puede ser definido, en general la mecánica del continuo debe ocuparse en volúmenes al menos dos ordenes de magnitud mayores que el REV. Si la roca que se quiere investigar está muy fracturada se debe trabajar a una escala mucho mayor que la de los fragmentos constitutivos y se necesitará de métodos estadísticos para estimar los estreses con mediciones a escala de estos fragmentos. Por otro lado, si las mediciones son hechas a escalas mayores que el REV se debe poner atención en el gradiente de los estreses, cuando las medidas parecen no estar midiendo el mismo tensor se deben proponer reglas de interpolación que deberán ser validadas posteriormente.

Aparte de los ensayos que se describirán a continuación es fundamental la previa recopilación de datos geológicos de la zona a estudiar.

2. HF y HTPF

El HF y el HTPF son métodos de estimación en terreno en un hoyo de sondaje donde una sección del sondaje se sella y se le inyecta algún fluido hidráulico a tasa constante hasta iniciar una fractura en la roca(HF) o hasta que una fractura pre-existente se abre, el bombeo se detiene, la presión se relaja y se vuelve a bombear produciendo un registro de presión v/s tiempo. La orientación de las fracturas se obtiene usando un “oriented impression packer” u otros métodos geofísicos en el sondaje. La orientación de las fracturas depende los estreses principales y cuando la fractura y el sondaje son casi verticales entonces el estrés vertical se considera como principal e igual en magnitud a la presión litostática (HF). Con el HTPF se evalúa los estreses normales soportados por planos de fractura con diferentes orientaciones pudiéndose obtener las 6 componentes del tensor mediante la inversión de estos datos, independiente de la orientación del sondaje.

2.1 Supuestos y limitaciones

2.1.1 HF

- No hay una profundidad teórica que limite al método, mientras el sondaje llegue y la roca se comporta de manera frágil.
- El eje del sondaje debe ser paralelo a algún estrés principal, el que debe estar contenido en el plano de la fractura inducida. Fracturas “en echelon” indican que éstos no son paralelos.
- Se asume que la orientación de la fractura persiste al alejarse de la pared del sondaje.

- La masa de roca se asume homogénea, elástica e isotrópica y se requieren estimaciones de la presión de poros y de la resistencia de la roca a la tensión.

2.1.2 HTPF

- No hay una profundidad teórica que limite al método, mientras el sondaje llegue y la roca se comporta de manera frágil.
- Se asume que planos de debilidad están pre-existentes en la roca y que éstos no están alineados y que pueden ser abiertos mecánicamente y se debe verificar que sólo una fractura se ha abierto pues esto cambie el campo de estrés local.
- Se asume que la orientación de la fractura persiste al alejarse de la pared del sondaje.
- Se requiere un mínimo teórico de 6 ensayos para estimar las 6 componentes del tensor, pero se recomiendan más.
- Es válido para cualquier orientación del sondaje, es independiente de la presión de fluido y no requiere determinar propiedades del material
- Asume una roca homogénea en el volumen en estudio.

2.2 Procedimiento

Primero se sella el intervalo a testear por medio de “packers” de goma inflables (fig 1), luego se bombea un fluido hidráulico (normalmente agua) en el intervalo a un flujo constante hasta inducir una fractura (HF), el flujo se detiene y se registra la evolución de la presión mientras el fluido va percolando por la roca (fig 2), aquí se registra la presión de ruptura (P_b) y como luego la presión desciende, primero rápidamente y luego más lentamente, ésta equivale a la presión de cierre de la fractura (P_s). Se vuelve a bombear con el mismo flujo 3 o 4 veces más para estudiar la re-apertura de las fracturas (HTPF), pero en estas veces el peak de presión equivaldrá a la presión de re-apertura (P_r).

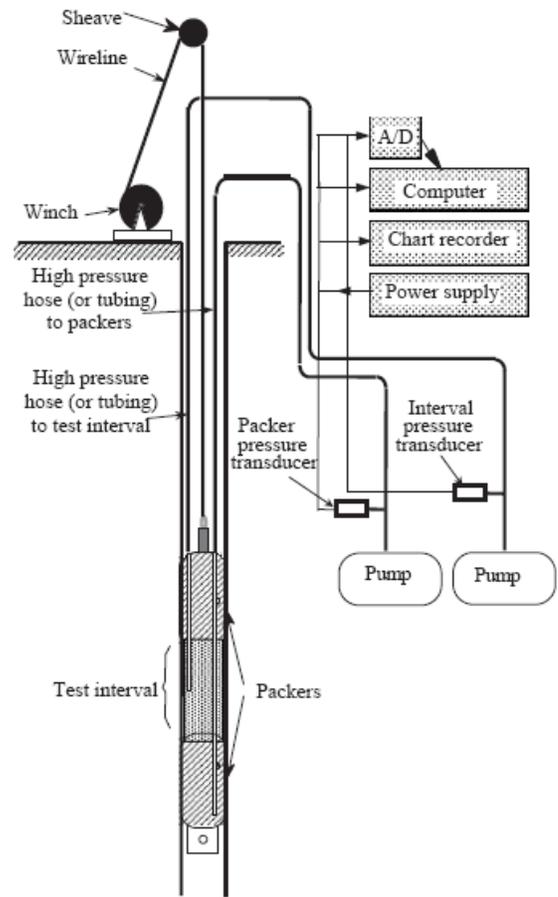


Fig 1. Configuración típica del equipo para ensayo HF. Haimson *et al.* 2003.

Luego se procede a medir la orientación de las fracturas, ya sea por medio de un “impression Packer” o por métodos de registro geofísicos (imágenes por electricidad, dispositivos sínicos, etc.). El impression packer es para obtener una impronta de goma de la fractura, que luego con una cámara y una brújula incorporada permite obtener la orientación de las fracturas (fig 3 y 4). El impression Packer de inflarse a una presión ligeramente mayor que P_s .

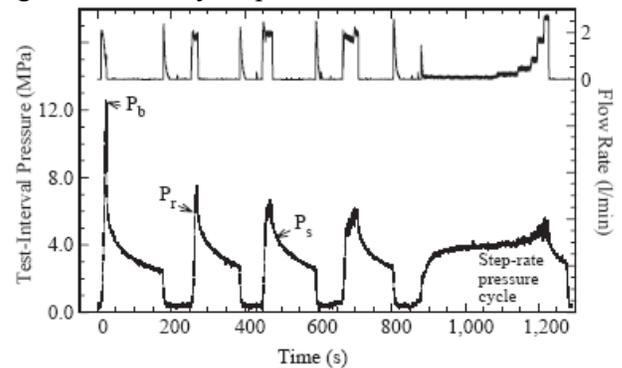


Fig 2. Resultado de ensayo plotado en P y flujo v/s tiempo Haimson *et al.* 2003.

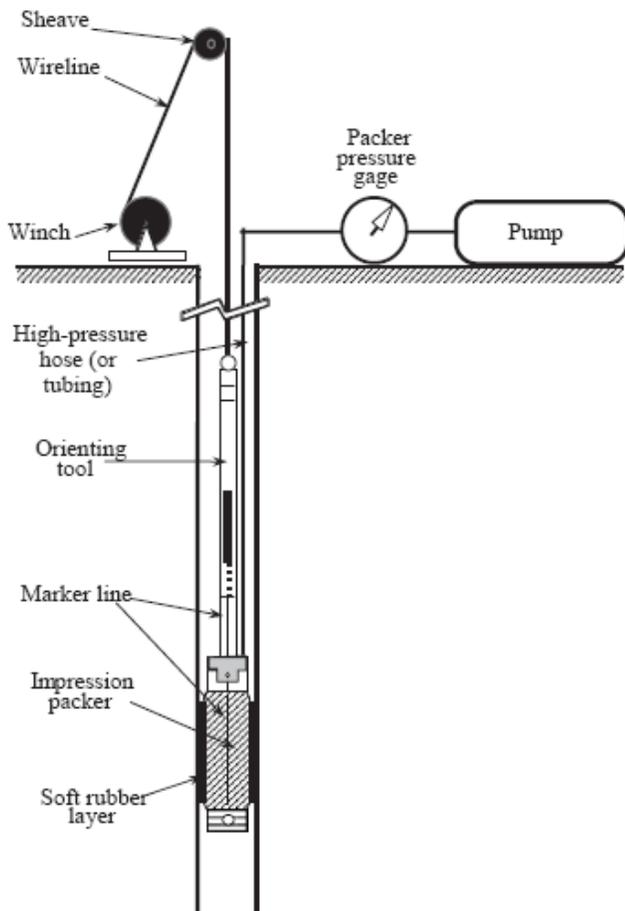


Fig 3. Configuración del Equipo Impression Packer Haimson *et al.* 2003.

Luego para obtener otras estimaciones de la presión de cierre P_s , que es muy importante para el HTPF y complicada de estimar, se tienen pasos adicionales opcionales. Primero se aumenta nuevamente la presión pero con un flujo bajo. La presión se estabiliza en un plateau (fig 2, step-rate pressure cycle) para luego aumentar el flujo hasta llegar nuevamente al siguiente plateau y así sucesivamente hasta la re-apertura.

2.3 Calculo de Estreses

2.3.1 HF

Estas estimaciones son validas mientras el sondaje y la fractura no se alejen más de 15 grado de la vertical, es decir, cuando un estres principal es vertical e igual a la carga litoestática.

De los dos estreses principales horizontales, el menor estará orientado de ma-

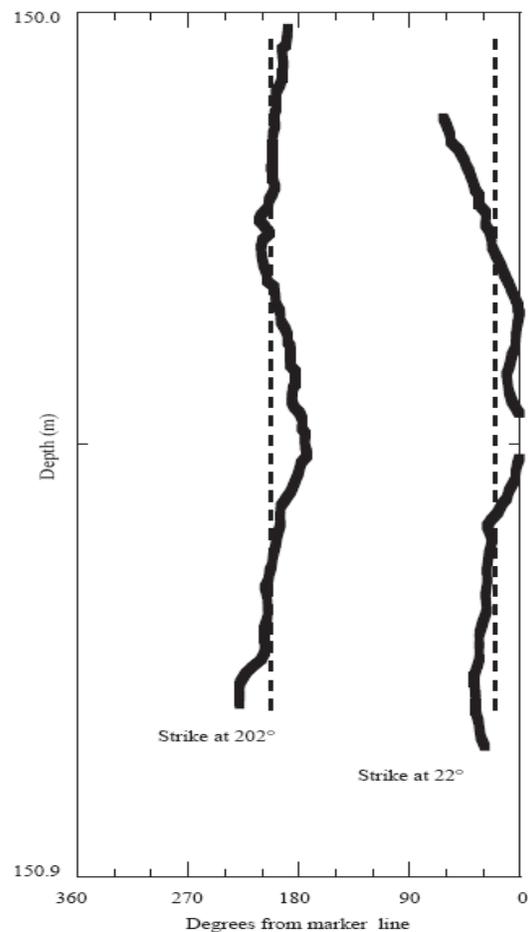


Fig 4. Ejemplo de resultado de orientacion de fractura por Impression Packing. Haimson *et al.* 2003.

nera perpendicular al plano de la fractura y será igual a la presión de cierre:

$$\sigma_h = P_s$$

Considerando la presión de poros y a partir de la teoría de elasticidad, el estres principal horizontal mayor sera:

$$\sigma_H - P_o = T + 3(\sigma_h - P_o) - (P_b - P_o)$$

Donde T es la resistencia a la tracción. La orientación de σ_H será la misma que el rumbo de la fractura. Cuando no se pueden hacer ensayos para estimar T, se puede utilizar la siguiente relación :

$$\sigma_H - P_o = 3(\sigma_h - P_o) - (P_r - P_o)$$

Así pues.

2.3.2 HTPF

Este método resuelve el tensor completo, es decir sus 6 componentes independientes, por lo que requiere de un mínimo de 6 medidas en planos de fractura de distinta orientación que servirán para ajustar un modelo de tensor con el menor error para resolver el siguiente problema:

$$\sigma_n^m = \sigma(X_m) n_m n_m$$

Donde X_m es la posición del m-ésimo ensayo, σ_n^m es el estrés normal medido en la fractura con normal n_m y $\sigma(X_m)$ es el tensor de estrés en X_m , m va de 1 a N donde N es el numero de medidas de HTPF (orientación del plano y estrés normal)

Se recomienda tener un mínimo de 8 medidas y en el caso que no se pueda se pueden hacer algunos supuestos para disminuir el número de incógnitas.

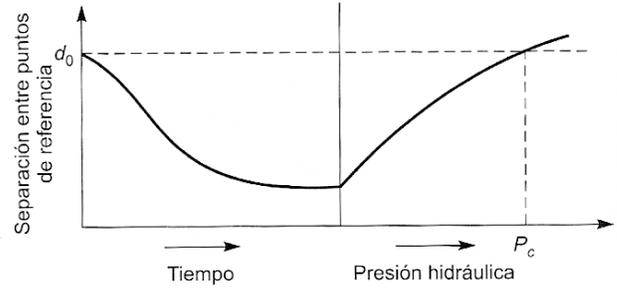
Al trabajar con HF y HTPF simultáneamente las incógnitas disminuyen y se necesitan sólo 3 medidas.

3. Gato Plano

Este método se aplica en las paredes de excavaciones, galerías o túneles y permite, además de estimar el estado de estrés, estimar el módulo de Young y la razón de Poisson del macizo.

3.1 Procedimiento

Primero se fijan en la paredes clavos o puntos de referencia y se mide su separación, luego se perfora una ranura entre los dos puntos perpendicular a la línea que los une (Fig 6). La ranura tenderá a cerrarse en respuesta al campo de estreses presente en el macizo, se mide la deformación inmediatamente despues de realizar la perforación y un tiempo después también (2 a 3 días). Luego se introduce un gato plano en la hendidura para comenzar la restauración hasta lograr el estado inicial de los puntos de



CURVA DEFORMACIONES-TIEMPO/PRESIÓN

Fig 5. Ejemplo de medición del método flat-jack. (Gonzales de Vallejo 2004).

referencia, construyendo una curva como la que se muestra en la figura 5.

La presión medida en el punto de restauración se interpreta como el estrés normal presente en el macizo en un plano paralelo al de la ranura, asumiendo que el material se comporta elásticamente, que es homogéneo e isótropo y sin considerar los efectos de borde de la superficie del gato.

Luego como los estreses normal y de cizalle en la pared son cero, sólo quedan tres incógnitas por resolver (σ_{x_0} , σ_{y_0} , τ_{xy}) en el tensor, por lo que se necesitan al menos tres medidas.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\theta_1} \\ \sigma_{\theta_2} \\ \sigma_{\theta_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{x_0} \\ \sigma_{y_0} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

donde f depende de la configuración espacial de las ranuras, así, para una configuración genérica como se muestra en la fig 7, se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\theta_1} \\ \sigma_{\theta_2} \\ \sigma_{\theta_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \cos 2\theta_1 & 1 + \cos 2\theta_1 & -4 \operatorname{sen} 2\theta_1 \\ 1 - \cos 2\theta_2 & 1 + \cos 2\theta_2 & -4 \operatorname{sen} 2\theta_2 \\ 1 - \cos 2\theta_3 & 1 + \cos 2\theta_3 & -4 \operatorname{sen} 2\theta_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{x_0} \\ \sigma_{y_0} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Donde θ_i es el ángulo entre el i-ésimo ensayo de gato plano con el eje x (fig7). Este método se prefiere por lo simple y robusto, sin embargo hay una serie de correcciones que deben hacerse dependiendo de las condiciones en las que se hagan las medidas.

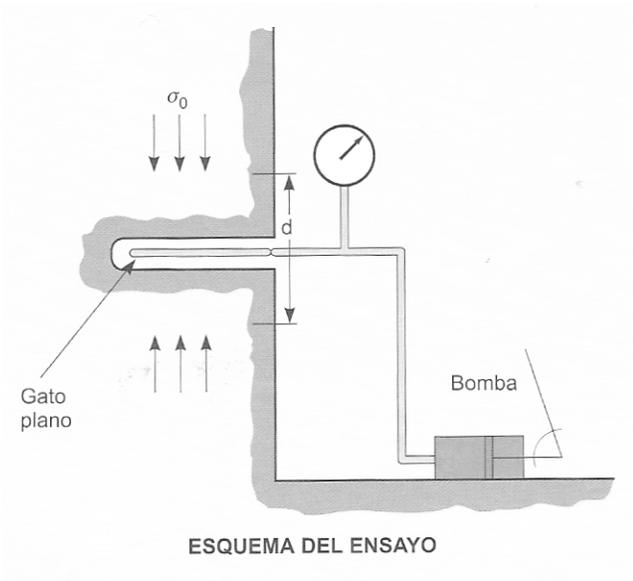


Fig 6. Esqueme de ensayo de Gato Plano (Gonzales de Vallejo 2004).

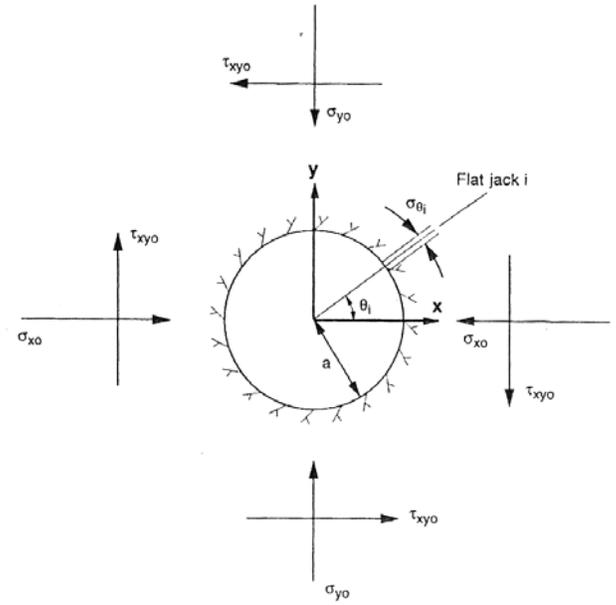


Fig 7. Diagrama de orientación de medidas de gato plano en una pared de un macizo en torno a una apertura circular (Amadei y Stephanson 1992)