

La ovalización en sondeos como método estimativo del estado tensional en un macizo rocoso

El estado tensional natural de un macizo rocoso puede ser estimado por varios métodos. La ovalización (*breakout*), descrita en este artículo, es uno de ellos y permite calcular, con bastante fiabilidad, no sólo la orientación de las tensiones del macizo, sino también la magnitud de las mismas, presentándose, por tanto, como un interesante análisis complementario para evaluar el estado tensional natural existente en un macizo, en el que se pretende excavar una obra subterránea.

José Miguel GALERA FERNÁNDEZ
GEOCONTROL, S.A.
Pilar MARTÍN BOLUDA, GEOCONTROL, S.A.

Palabras clave: CÁLCULO, CARGA, MACIZO, MEDICIÓN, MODELO, OVALIZACIÓN, ORIENTACIÓN, TENSION, SONDEO.

El conocimiento del estado de tensiones naturales existente en un macizo rocoso en el que se va a excavar una obra subterránea, constituye un elemento indispensable a la hora de efectuar cualquier cálculo tenso-deformacional de dicha excavación.

En efecto, para realizar un cálculo afinado es preciso conocer: la geometría del problema, las fases constructivas, la posición y movilidad del agua, el modelo constitutivo y los parámetros que representan el comportamiento mecánico del terreno, y el estado de tensiones naturales.

El conocimiento de todos estos elementos resulta imprescindible para realizar cualquier cálculo tenso-deformacional afinado, debiendo considerar que cualquiera de ellos condiciona la representatividad y fiabilidad de los resultados que se obtengan.

El estado natural de tensiones

Se admite que en un régimen elástico la carga vertical existente en cualquier punto del terreno corresponde a la presión litoestática definida por $\sigma_v = \rho g z$, siendo ρ la densidad de la roca, g la aceleración de la gravedad y z la profundidad.

De igual forma la tensión horizontal será igual a:

$$\sigma_{II} = \sigma_{III} = \sigma_v \frac{\nu}{1-\nu}$$

siendo ν el coeficiente de Poisson.

La realidad es que el terreno dista mucho de presentar este modelo elástico de distribución de tensiones, ya que dicha distribución se ve perturbada por procesos: erosivos, tectónicos, térmicos, y/o antrópicos.

Por ello, y tanto más cuanto más compleja sea la historia geológica de una región, más complicado es cuantificar, en orientación y magnitud, el estado natural de tensiones existentes.

El estudio de los elementos estructurales existentes en el macizo rocoso, permite esbozar la orientación más plausible de las tensiones horizontales existentes, siendo difícil predecir la magnitud de las mismas.

Métodos de medida del estado natural de tensiones

Las tensiones principales que actúan sobre un punto quedan definidas por su orientación y magnitud, por lo cual, únicamente se pueden determinar *in-situ*. Los métodos utilizados para determinar las tensiones naturales en un macizo rocoso se pueden clasificar según Hudson (2003), de acuerdo con el *Cuadro 1*.

En el *Cuadro II*, se resumen las ventajas y limitaciones de cada uno de estos métodos.

A continuación se desarrolla, brevemente, los cuatro métodos más empleados para estimar el estado tensional natural:

- **Sobreperforación-Doorstopper (Overcoring):** Mide las deformaciones provocadas al reperforar un sondeo, mediante las cuales, se calculan las tensiones. Se coloca la cabeza de medida en el fondo del sondeo y se reperfora con el mismo diámetro pudiendo recuperar el testigo y liberando así las tensiones. Las deformaciones unitarias quedan registradas en la cabeza de medida.

Consideraciones:

1. Se considera un material elástico e isotrópico.
 2. Determina la tensión perpendicular al eje del sondeo.
 3. Requiere el conocimiento del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.
 4. Se asume que la tensión vertical es igual al peso del recubrimiento.
- **Fracturación Hidráulica:** El ensayo se inicia aislando una sección de sondeo mediante dos obturadores de goma inflable e inyectando un líquido a presión hasta que las fracturas existentes se abren o se crean fracturas nuevas. Se mide las presiones hidráulicas requeridas para abrir, generar, propagar, man-

Métodos	Clasificación según el tipo de maniobra					Clasificación según el comportamiento de la roca	
	Realizados en Sondeos	Perforación con recuperación de testigo	Realizados en la superficie de la roca	Análisis de estructuras geológicas a gran escala	Otros	Observación del comportamiento de la roca con influencia del método de medida.	Observación del comportamiento de la roca sin influencia del método de medida.
Sobrep perforación	X	X				X	
Facturación hidráulica	X					X	
Gato plano			X			X	
Ovalización (Breakout)	X						X
Borehole slotter		X					X
Análisis retrospectivo							X
Recuperación de deformación		X					X
Acústicos		X					X
Observación Geológica							X
Mecánica focal de Terremotos							X

CUADRO I.- Métodos existentes par la determinación de tensiones (ISRM, 2003).

CUADRO II.- Ventajas y limitaciones de los métodos de estimación existentes.

Método	Ventajas	Limitaciones	Favorable
Sobrep perforación	Es la técnica más desarrollada en teoría y práctica	Dispersión debido a un volumen pequeño de roca. Requiere herramienta de perforación	Medidas desde galería
Facturación hidráulica	Baja dispersión en los testigos. Implica un volumen considerable de roca. Rápido	Solo en 2D. Requiere sondeo previo.	Permite obtener perfiles de tensiones
Gato plano	No requiere el conocimiento de la constante elástica de la roca	Se necesitan como mínimo 6 ensayos. Dispersión debido a un volumen pequeño de roca	Medidas desde galería
Ovalización (Breakout)	Información obtenida en una fase temprana. Relativamente rápida	Restringida a información sobre la orientación. La teoría necesita estar más desarrollada para inferir sobre la magnitud de las tensiones	Solo aplicable a grandes profundidades
Borehole slotter	Información existente en la fase de perforación	Estimación empírica	Estimación de las tensiones en una fase temprana
Análisis retrospectivo	Rápido y simple. Alta fiabilidad debido al gran volumen de roca	No tiene una única solución. Caro	Solo se puede utilizar durante la construcción de obras subterráneas
Recuperación de deformación	Utilizable para grandes profundidades	La medida es complicada en micro-escala	Estimación de tensiones a grandes profundidades
Acústicos	Medida simple	Fiabilidad relativamente baja	Estimaciones orientativas
Observación Geológica	Bajo costo	Estimación aproximada	Primera fase del proyecto
Mecánica focal de Terremotos	Para grandes profundidades	Información solamente de grandes profundidades	

tener y volver a abrir las fracturas, las cuales, se relacionan con la magnitud de las tensiones *in-situ*. La orientación de las tensiones se determina mediante las fracturas inducidas.

Consideraciones:

- No tienen límite teórico de profundidad.
 - Se considera que el eje del sondeo coincide con la dirección de una de las tensiones principales.
 - Se asume que la tensión vertical es igual al peso del recubrimiento y que la masa rocosa tiene un comportamiento elástico, homogéneo e isótropo.
- Gato Plano (Flat Jack):** Consiste en medir el desplazamiento entre dos puntos de referencia, después de realizar una perforación intermedia entre dichos puntos, cuando el desplazamiento se ha estabilizado se introduce el flat jack en la perforación y se aplica presión hasta que los dos puntos de referencia vuelven a la posición inicial, esta presión se considera igual a la tensión inicial de la roca. Las medidas de desplazamiento se utilizan para calcular el modulo de deformación elástico del macizo rocoso.

Consideraciones:

- Está limitado para medidas de tensiones cerca de la superficie.
- Es necesario conocer la concentración de tensión a lo largo de la pared de la apertura para poder relacionar los resultados aportados por este método.

- La dirección de la tensión calculada es perpendicular al eje del flat jack.
- Se necesitan como mínimo seis ensayos, en seis direcciones diferentes, para poder determinar completamente el estado tensional.
- No requiere el conocimiento de la constante elástica de la roca.
- Se asume que la tensión vertical es igual al peso del recubrimiento

- Ovalización (Breakout):** Es un fenómeno que ocurre cuando la roca no puede sostener la concentración de tensiones compresivas alrededor de la perforación, el resultado son dos zonas de deformación diametralmente opuesta, llamadas *breakouts*. Los *breakouts* se utilizan para determinar la orientación de las tensiones, dado que la tensión mínima horizontal coincide con la dirección del *breakout*.

Consideraciones:

- Se asume que la tensión vertical es igual al peso del recubrimiento y que la masa rocosa tiene un comportamiento elástico, homogéneo e isótropo.

La ovalización como técnica de medición del estado natural de tensiones

El *breakout* es una deformación de la pared del sondeo debida a una concentración de tensiones, dando lugar a secciones transversales no circulares. Si las tensiones ex-

ceden el esfuerzo compresivo de la roca se producen este tipo de deformaciones, perpendiculares a la tensión máxima horizontal, pero si por el contrario, exceden los esfuerzos de tracción se originan unas deformaciones perpendiculares a las anteriores en la misma dirección que la tensión máxima horizontal. (Figs. 1A y 1B)

Todos los estudios desarrollados sobre este fenómeno concluyen en la fiabilidad del mismo para el cálculo de la orientación de las tensiones, no obstante, estudios más recientes proponen este método para la estimación de la magnitud de las tensiones principales, ya que influyen directamente en la forma de la rotura.

Las principales observaciones *in-situ* son:

- El grado de facturación a lo largo del sondeo da una valoración cuantitativa de las tensiones en profundidad, y los *breakouts* son perpendiculares a la tensión máxima horizontal en un plano perpendicular al eje del sondeo. (Leeman, 1964).
- Las elongaciones de los sondeos son simétricas y alineadas con la tensión mínima horizontal, y no están asociadas a fracturas naturales presentes en el sondeo. (Plumb y Hickman, 1985).
- Los *breakouts* tienen secciones elípticas a lo largo de un eje paralelo a la tensión mínima horizontal, se encuentran en todo tipo de rocas y ambientes tectónicos, y la orientación de las tensiones estimadas por este método son coherentes con las determinadas por otros. (Dart y Zoback, 1987).

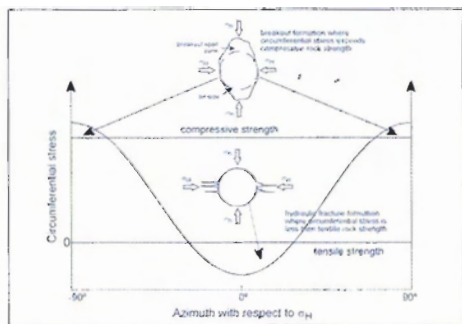


Fig. 1B.- Variación de concentración de tensiones que actúan en un sondeo vertical. (Ref: Stress Investigation. Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe, TH1.

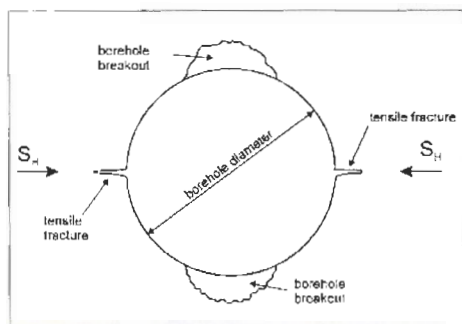


Fig. 1A.- Sección de sondeo donde se muestra la deformación a compresión (Ovalización) y a tracción (fractura hidráulica). (Ref: New in situ stress data. Australia stress map).

Las principales observaciones realizadas en laboratorio son:

- La profundidad y el espesor del breakout es proporcional a la magnitud de la tensión mínima horizontal. (Haimson y Herrick, 1985-1986).
- El proceso de deformación empieza con un proceso plástico, seguido por un desarrollo de micro-fisuración (Ewy y Cook, 1990) (Fig. 2).
- En rocas cristalinas, los breakouts están alineados con la tensión mínima horizontal, con secciones transversal en forma de V, el valor de la tensión horizontal máxima inicia la rotura, y esta se incrementa linealmente con la magnitud de la tensión mínima horizontal. (Lee y Haimson, 1993).
- La forma en V de los breakouts en rocas graníticas es menor que en rocas sedimentarias, y la profundidad y el espesor de los breakouts podrían ser usados para determinar la orientación y magnitud de las tensiones in-situ, ya que ambos dependen del estado tensional (Haimson y Lee, 1995).

Durante la última década, el análisis de los breakout en las paredes de la perforación se

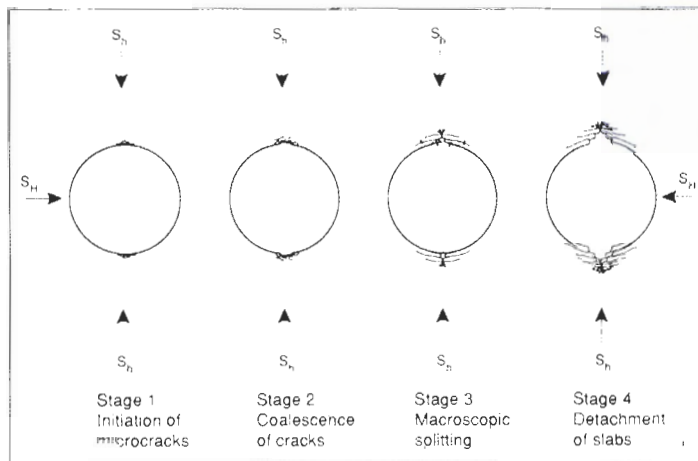


Fig. 2.- Desarrollo progresivo de la ovalización del sondeo (Ewy y Cook, 1990).

ha convertido en una técnica prometedora para estimar la orientación in-situ de la tensión, a todas las profundidades y en todas las condiciones geológicas, y particularmente a grandes profundidades donde es tan difícil las medidas directas para obtener el estado tensional. El análisis del breakout se realiza junto con otros métodos de medida de tensiones, tales como la facturación hidráulica.

En la mayoría de los estudios realizados sobre los breakout, se ha encontrado que su origen y orientación están atribuidos solamente a los campos tectónicos. La influencia de las estructuras geológicas locales en la orientación y de la magnitud de los breakout ha sido discutida por varios autores.

Finalmente, el breakout es un método exacto para la estimación de la orientación de las tensiones principales. Con respecto al cálculo de las magnitudes de las tensiones principales hay una experiencia relativamente corta y los factores a considerar no se han especificado todavía. El estudio más genérico es el realizado por Zoback, 1985.

Fundamentos teóricos

Para un sondeo cilíndrico realizado en una masa homogénea, isotrópica, y linealmente elástica, sujeta a tensiones horizontales, máxima y mínima, se aplican las siguientes ecuaciones (Kirsch, 1898; Jaeger, 1961):

$$\sigma_r = \frac{(S_{H1} + S_{H2})}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{(S_{H1} - S_{H2})}{2}$$

$$\left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} - 4 \frac{R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta + \Delta P \frac{R^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{(S_{H1} + S_{H2})}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{(S_{H1} - S_{H2})}{2}$$

$$\left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - \Delta P \frac{R^2}{r^2}$$

$$\tau_{r,\theta} = -\frac{(S_{H1} + S_{H2})}{2} \left(1 - 3 \frac{R^4}{r^4} - 2 \frac{R^2}{r^2} \right) \sin 2\theta$$

La magnitud del esfuerzo y la tensión normal a lo largo de la superficie, varía en función del radio r y del ángulo θ .

Se asume:

- En cada punto (r, θ) la tensión máxima y mínima horizontal y el plano de fractura son paralelos al eje vertical del sondeo (Fig. 3).
- La roca tiene un coeficiente interno de fricción $\mu = \tan \phi$ y una cohesión C .
- $S_{H1} \leq 3S_{H2}$ y $\Delta P = 0$

Acorde con el criterio de Mohr-Coulomb:

$$|\tau| = C + \mu \sigma$$

El valor máximo de la cohesión del material, viene dado por:

$$C = \left((1 + \mu^2)^F \left(\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau_{r,\theta}^2 \right)^{1/2} - \mu \left(\frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right) \right)^{1/F}$$

Teniendo en cuenta la tercera y la cuarta suposición, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$C(R, \theta_b) = 0,5 (a \cdot S_{H1} + b \cdot S_{H2})$$

$$a = [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] [1 - 2 \cos 2\theta_b]$$

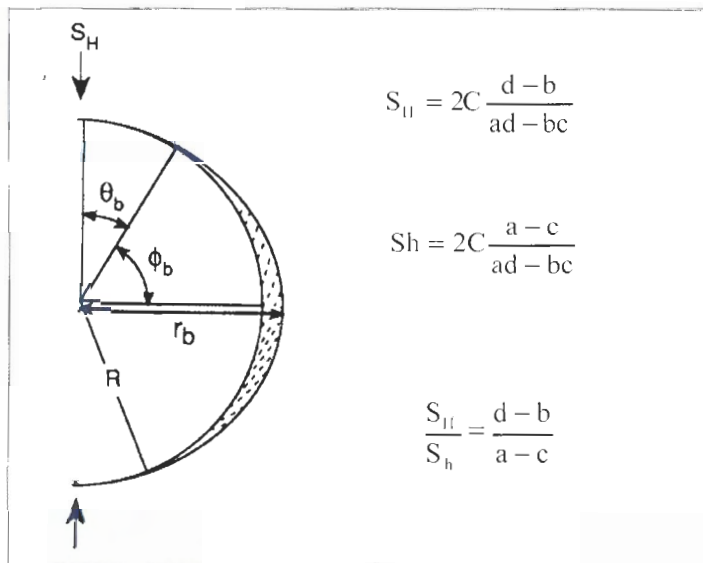
$$b = [(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu] [1 - 2 \cos 2\theta_b]$$

$$C(r_b, \pi/2) = 0,5 (c \cdot S_{H1} + d \cdot S_{H2})$$

$$c = -\mu + (1 + \mu^2)^{1/2} - \frac{R^2}{r_b^2} [(1 + \mu^2)^{1/2} + 2\mu] + 3 \frac{R^4}{r_b^4} (1 + \mu^2)^{1/2}$$

$$d = -\mu - (1 + \mu^2)^{1/2} - \frac{R^2}{r_b^2} [3(1 + \mu^2)^{1/2} + 2\mu] + 3 \frac{R^4}{r_b^4} (1 - \mu^2)^{1/2}$$

Fig 3.- Ovalización genérica del sondeo (Zoback et al., 1985).



Por último, se considera un breakout, definido según los siguientes valores de C, tales que $C(R, \theta_b) = C(r_b, \pi/2) = C$ (Fig. 3).

Ventajas y limitaciones

El método sólo es válido a partir de una cierta profundidad que depende de la naturaleza del terreno, y teniendo en cuenta la dificultad de la determinación del estado tensional, los factores de los que depende el cálculo de la magnitud y S_H/S_h limitan claramente el método.

Se ha estudiado la aplicación de este método en la determinación de la orientación y magnitud de las tensiones naturales y a S_H/S_h :

- Orientación de las tensiones naturales: los resultados aportados son fiables, siempre y cuando, se tengan varias medidas de deformación en el mismo sondeo, ya que las medidas varían, dentro de un rango, a lo largo del sondeo.
- Magnitud de las tensiones naturales: el valor depende fundamentalmente del valor de la cohesión del material.
- S_H/S_h : el valor depende principalmente del valor del ángulo de rotura y en menor medida del ángulo de fricción del material.

Ejemplo de aplicación

Se ha elegido un caso real en el que se conocía el estado de tensiones naturales al haberse efectuado medidas de hidrofracturación, y además, de un modo indirecto, se disponía información a cerca de la ovalización de los sondeos.

En este caso se trata de un sondeo realizado para investigar un túnel, donde se han realizado:

- Hidrofracturación.
- Dilatometría.

El ensayo de dilatometría proporciona las dimensiones del sondeo a lo largo de tres diámetros separados entre sí 120°, y cuyo brazo principal está orientado, por lo que se conoce el acimut de los pares de brazos de medida.

El tratamiento de los datos aportados se ha llevado a cabo teniendo en cuenta una serie de criterios que se desarrollan a continuación:

- Se ha tomado como valor de desplazamiento, el valor que marca cada brazo, a partir del cual la expansión se estabiliza (Fig. 4).
- Se ha establecido como orientación de la tensión horizontal máxima, el acimut del brazo que registre mayor desplazamiento radial (Fig. 5).
- Para poder fijar el ángulo de rotura, se han tenido en cuenta varios razonamientos (Ver Fig. 5):
 - a. descalibramiento del sondeo igual

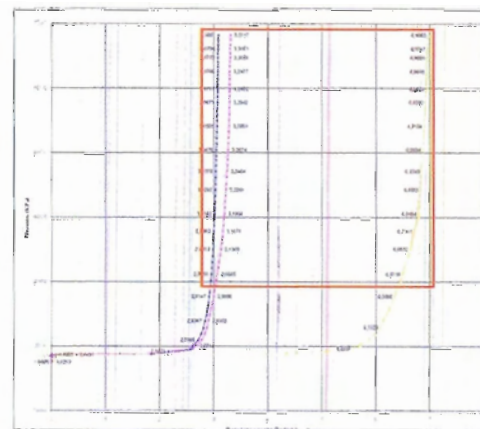


Fig. 4.- Determinación de la geometría del sondeo.

al menor dato de desplazamiento registrado

b. se ha trazado una elipse, ya que la ovalización se asemeja dicha figura geométrica, cuyo eje menor es el radio del sondeo y su eje mayor queda definido por la deformación máxima del sondeo.

c. La intersección de las dos figuras geométricas descritas con anterioridad definen el ángulo de rotura.

- Dependiendo del ángulo de rotura se podrán formar una serie de elongaciones, que se determinan por K_θ , por lo que se deduce que algunas de ellas no se podrán dar para ciertos valores de ángulo de rotura y K_θ . El valor dado por la relación entre el radio inicial del sondeo y el desplazamiento radial máximo será el límite gráfico por debajo del cual no se podrá dar dicha relación (Fig. 6).

Los valores obtenidos muestran en **Cuadro III**, y se han contrastado con los aportados por el ensayo de fracturación hidráulica (**Cuadro IV**).

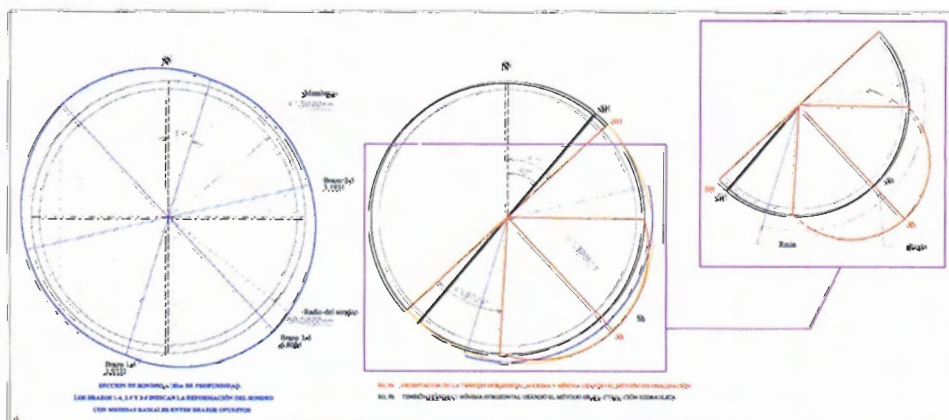
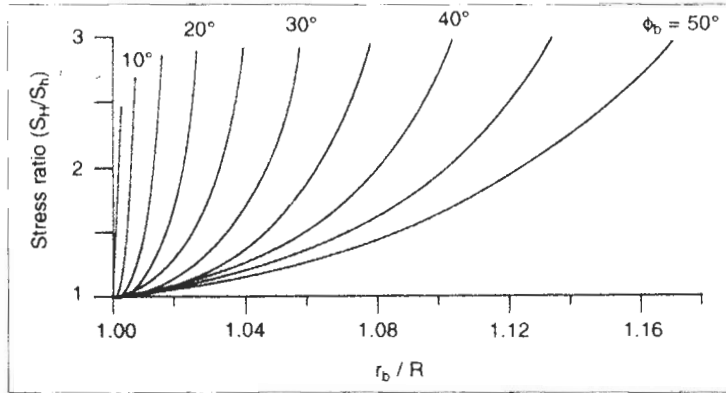


Fig. 5.- Análisis e interpretación de resultados.

Figura 6.- Variación de SH/Sh con diferentes valores de ángulos de rotura, para $\mu=0,6$ (Zoback et al., 1985).



Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción (ϕ)	R _{sondeo} (mm)	Brazos			R _b máxima (mm)	R _b max/R _b (mm)
			1-4 (mm)	2-5(mm)	3-6(mm)		
5	20	50,5	2,9445	3,1931	6,8084	57,3084	1,1348
Ángulo (θ)	SH(MPa)	Sh(MPa)	Sv(MPa)	SH/Sh	K ₀ = SH/Sv		
43.8	9.41	5.22	4.8	1.8	1.96		

CUADRO III.- Resultados obtenidos.

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)	SV (MPa)	OVALIZACIÓN			HIDROFRACTURACIÓN				
			ORIENTACIÓN DE SH	SH (MPa)	Sh (MPa)	SH/Sh	ORIENTACIÓN DE SH	SH (MPa)	Sh (MPa)	SH/Sh
S 74	196	4.8	N 47°	9.41	5.22	1.8	N 40° ± 4°	10.72	5.96	1.8

CUADRO IV.- Contraste de resultados obtenidos por ovalización e hidrofracturación.

Conclusiones

Como puede apreciarse en este cuadro el análisis de la ovalización del sondeo reproduce razonablemente los resultados obtenidos en el ensayo de hidrofracturación; reproduciéndose fielmente el ratio entre las tensiones horizontales máxima y mínima que es 1.8. En lo que se refiere a las magnitudes la ovalización minorará un 12% dichas tensiones.

El método de la ovalización se presenta como un interesante análisis complementario para evaluar el estado tensional natural existente en un macizo rocoso.

Sin embargo este método debe estar precedido de un análisis tectónico (geológico) del emplazamiento investigado.

Además las primeras experiencias demuestran que es necesario:

- Que las medidas de ovalización estén situadas a una profundidad importante que varía según la calidad geotécnica del terreno.
- Que se disponga de suficientes secciones ovalizadas, a diferentes profundidades, para realizar un análisis de la orientación de la tensión horizontal máxima, desechando las geometrías que por razones locales, se apartan de la tendencia general.

Agradecimientos

Los resultados que aquí se presentan forman parte del proyecto de I+D ECSC 7220-PR/135, financiado por la Unión Europea.

Bibliografía

- KIRSCH, G., *Die Theorie der Elastizität und die Beanspruchung der Festigkeitslehre*, V D I Z. 1857 1968, 42 707 1898.

- JAEGER, J., *Elasticity, Fracture and Flow*, 212 pp., Methuen, London, 1961.

- LEE, E.R. (1964). *The measurement of stress in rock-Part I*. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 65, 45-114.

- HAIMSON, B. C. AND C. HERRICK (1985). *In-situ stress evaluation from borehole breakouts: experimental studies*. in Proc. 26th US Symp. Rock Mech., Rapid City, Balkema, Rotterdam, 1207-18.

- PAILLET, F.L., and KIM, K., (1985). *The character and distribution of borehole breakouts and their relationship to in situ stress in deep Columbia River basalts*, in Journal of Geophysical research, v.92, no. B7, p. 6223-6234, 1987.

- PLUM, R.A. and HICKMAN, S.H., (1985). *Stress induced borehole elongation-a comparison between four-arm dipmeter tool and the borehole televiewer*. in the Auburn geothermal well, Journal Geophysical Research, v.90, No.B7, p.5513-5521.

- ZOBACK, M.D., D. MOOS, L. MASTIN, and R.N.

ANDERSON (1985). *Wellbore breakouts and in situ stress*, in *Journal of Geophysical Research*, v.90, no. B7, p.5523-5530. Discussion and reply, *Journal of Geophysical Research*, v.91, no. B14, p. 14, 161-14, 164.

- HAIMSON, B. C. and C. HERRICK (1986). *Borehole breakouts-a new tool for estimating in situ stress?*, in rock stress, Ed. O. Stephansson, CENTEK Publishers, Lulea, Sweden, p.271-280, 1986.

- DART, R.L. and ZOBACK, M.L. (1987). *Wellbore breakout-stress analysis within the continental United States*, in Proc. 2nd Int. Symp. on Borehole Geophysics for Minerals, Geotechnical, and Groundwater Applications, Golden, Soc. Of Prof. Well Log Analysts Publ., pp.1-11.

- FWEY, R.T. and COOK, NGW. (1990) *Deformation and fracture, around cylindrical openings in rock-I. Observations and analysis of deformation, II. Initiation, growth and interaction of fractures*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 27, 1, 387-407, II,409-27.

- MOOS, D., and ZOBACK, M.D., (1990). *Utilization of observations of well bore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses - Application to continental, Deep Sea Drilling Project, and Ocean Drilling Program boreholes*. in Journal of Geophysical Research, v.95, no. B6, June 10, p.9305-9325.

- PRENSKY, S.E., (1992). *Borehole breakout and in situ stress*, in *The Log Analyst*, v.33, no.3, p.304-312.

- LEE, M.Y. and HAIMSON, B.C. (1993) *Borehole breakouts in Lac du Bonnet granite: a case of extensile failure mechanism*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 30, 1039-45.

- HAIMSON, B.C. and LEE, M.Y. (1995). *Estimating in situ stress conditions from borehole breakouts and core diskings- experimental results in granite*, in Proc. Int. Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth, Tokyo, Japan, 8th ISRM Congress, pp. 19-24.

- BARTON, C.A., MOOS, D., PESKA, P., and ZOBACK, M.D., (1997). *Utilizing wellbore image data to determine the complete stress tensor-application to permeability anisotropy and wellbore stability*, in *The Log Analyst*, v. 38, no.6, p.21-33.

- B. SHEN, X. TAN & C. LI and O. STEPHANSSON. (1997). *Simulation of borehole breakout using fracture mechanics models*, in *Rock stress*, Ed. K. Sugawara & Y. Obara, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Brookfield, p.289-298.

- AMADEI, B., and STEPHANSSON, O., (1998). *Borehole breakout methods, chapter 8, in Rock stress and its measurement*. Chapman and Hall, London, p.303-326.

- AMADEI, B., and STEPHANSSON, O., (1998). *Hydraulic methods, chapter 4, in Rock stress and its measurement*. Chapman and Hall, London, p.121-199.

- HUDSON, J.A., (2003). *Special Issue on Rock Stress Estimation*, in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 40, issues 7/8, p.955-1276.

- K. SUGAWARA, Y. OBARA & A. SATO, Editors (2003). *Proceedings of the Third International Symposium on Rock Stress*, November 2003, Kumamoto, Japan.