

Método Detonación de Taladros, para evaluar esfuerzos *in situ*, en Marañón de Compañía minera poderosa

Drillhole Detonation Method to evaluate *in situ* stresses in Marañón of Poderosa mining company

Miguel Angel Berrocal Mallqui¹

Recibido: 19/02/2023 - Aprobado: 24/04/2023 – Publicado: 02/06/2023

RESUMEN

Para realizar cualquier excavación subterránea, se requiere conocer la magnitud y la influencia de los esfuerzos *in situ* en la excavación; existen métodos para evaluar los esfuerzos, tal como los métodos: Carga litostática, Overcoring, Fracturamiento hidráulico; cada uno con sus ventajas y limitaciones. El presente Método de Detonación de Taladros tiene el propósito de evaluar los esfuerzos *in situ* con: fácil aplicación, bajo costo, y sus resultados; son proveídos en el lugar de la operación.

El Método de Detonación de Taladros; interpreta las fracturas radiales producidas alrededor de los taladros detonados; acreditando: elipse de esfuerzos, dirección del esfuerzo mayor σ_1 , cálculo del valor del *coeficiente* K , y la estimación del valor del Factor de Corrección (FC). La formulación es adaptada del método de la Carga Litostática, para evaluar los esfuerzos σ_h y σ_v .

El Método detonación de Taladros, fue aplicado en Marañón de Compañía Minera Poderosa, evaluando y seleccionando aleatoriamente 9 estaciones, y a nivel global se calculó: dirección del esfuerzo mayor 75° , *coeficiente* $k = 0.79$, esfuerzo mayor $\sigma_1 = 25.19$ MPa, y esfuerzo menor $\sigma_3 = 15.56$ MPa.

Palabras claves: Elipse de esfuerzos, Esfuerzos *in situ*, Fisuramiento radial, Macizo rocoso, Método de detonación de taladros.

ABSTRACT

To construct any underground excavation, it is required to know the magnitude and influence of *in situ* stresses in the excavation; there are methods to evaluate the stresses, such as Lithostatic loading, Overcoring, Hydraulic fracturing; each with its advantages and limitations. The present Drillhole Detonation Method has the purpose of evaluating the *in situ* stresses with: easy application, low cost, and its results are provided on site.

The Drillhole Detonation Method; interprets the radial fractures produced around the detonated drillholes; crediting: stress ellipse, direction of the major stress σ_1 , calculation of the value of *coefficient* k , and the estimation of the Correction Factor (CF) value. The formulation is adapted from the Lithostatic load method to evaluate the stresses σ_h and σ_v .

The Drillhole Detonation Method was applied in Marañón of Poderosa mining company, evaluating and randomly selecting 9 stations, and at a global level it was calculated: direction of the major stress 75° , *coefficient* $k = 0.79$, major stress $\sigma_1 = 25.19$ MPa, and minor stress $\sigma_3 = 15.44$ MPa.

Keywords: Stress ellipse, *in situ* stresses, Radial cracking, Rock mass, Drillhole detonation method.

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado, Lima, Perú.
E-mail: geomecanicadelperu@gmail.com - ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8762-5594>

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Cualquier punto interno del macizo rocoso se encuentra soportando esfuerzos desde distintas direcciones, y en estado de equilibrio. Al realizar la excavación se redistribuyen los esfuerzos *in situ*, adquiriendo un nuevo estado de esfuerzos; (Oyanguren, Irizar, Huerta, & Obeso, 1984). El conocimiento del valor de la orientación y magnitud de los esfuerzos *in situ*, siempre ha sido y es considerado un parámetro esencial para el diseño de excavaciones subterráneas. A nivel mundial; tenemos métodos para evaluar la magnitud de los esfuerzos *in situ*, siendo: Carga litostática, Overcoring, Fracturamiento hidráulico, entre otros; de ellos el más usados es el método de la Carga litostática, por lo que los describimos a continuación

1.1.1 Métodos actuales para medir los esfuerzos *in situ*

Primeramente, analizamos el método de la Carga Litostática, que utiliza parámetros, como: la altura de recubrimiento (Z), la densidad (γ) el coeficiente k , de acuerdo a la siguiente formulación:

$$\sigma_v = \gamma * Z \quad (1)$$

$$\sigma_h = k * \gamma * Z \quad (2)$$

Donde:

σ_v = Esfuerzo vertical

σ_h = Esfuerzo horizontal

De acuerdo la formulación de la Carga litostática se considera que: la dirección de los esfuerzos es exclusivamente vertical y horizontal, aplicables para suelos o rocas de condición homogénea; siendo además que, el macizo rocoso es de condición heterogénea.

Existen otros métodos para medir los esfuerzos como: a) el método Overcoring, que utiliza técnicas de sobreexcavación, validado para macizos rocosos de condición continua, homogénea, isotrópica y lineal-

elástico; b) el método de Fracturamiento hidráulico consistente en la inyección de fluido a presión en el taladro, para generar fisuras; considera al macizo rocoso, como roca elástica, isotrópica, continua y homogénea.

Luego de analizar los tres métodos anteriormente expuestos, podemos interpretar que la evaluación de los esfuerzos *in situ* son:

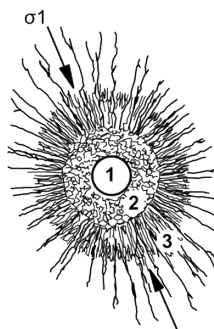
- válidas solamente para condiciones lineales, continuas, homogéneas e isotrópicas del macizo rocoso; en realidad el macizo rocoso en mayor proporción, es de condición no lineal, discontinua, heterogénea y anisotrópica,
- el valor del coeficiente k , no es correctamente determinada, es un valor muchas tomadas al azar por los consultores, y
- no precisan la orientación del esfuerzo principal. En ese contexto, es razonable proponer nuevos métodos para evaluar la orientación y la magnitud de los esfuerzos *in situ*, y acercarlos cada vez más, a su verdadero valor.

1.2 Esfuerzos *in situ* en el macizo rocoso

Los esfuerzos en un punto interno del macizo rocoso, en un determinado punto del macizo rocoso, es el resultado de una serie de fuerzas de distinto origen y son el producto de la acumulación de eventos geológicos de variada condición estructural, y de constante dinamismo estructural; implicando que los esfuerzos *in situ*, se transmitan en diferentes ángulos, y magnitud. Al realizarse la excavación, los esfuerzos se alteran su dirección, produciéndose una nueva redistribución, originando un campo de esfuerzos. (Oyanguren, Irizar, Huerta, & Obeso, 1984)

1.3 Fracturamiento alrededor de taladros detonados

Según (Hoek & Brown, 1985, págs. 432-433); la detonación de taladros producen fisuras de mayor y menor longitud, mostrando que las fisuras de mayor longitud, se ven favorecidas y son coincidentes con la dirección del esfuerzo mayor σ_1 *in situ*; deduciendo que el esfuerzo menor σ_3 será perpendicular y a 90° del esfuerzo principal mayor. (Ver Figura 1)



Esfuerzo principal mayor σ_1

Figura 1. Fisuración de taladro detonado en relación al Esfuerzo principal mayor, con dirección y magnitud σ_1 .
Fuente: (Hoek & Brown, 1985)

II. METODOS

2.1 Método de Detonación de Taladros

El Método de Detonación de Taladros, es un método indirecto para evaluar la orientación y la magnitud de los esfuerzos *in situ* en el macizo rocoso; el macizo rocoso es de condición homogénea y heterogénea, en esas circunstancias los esfuerzos se transmiten en distintas direcciones según el tipo de rocas que encuentra a su paso.

El proceso del método se desarrolla en 3 fases: 1) perforación y detonación del taladro, para obtener fisuras radiales de distinta longitud; 2) selecciona las fisuras largas y cortas 3) se une con tiza o pintura, los extremos de esas fisuras, conformando la figura geométrica de la elipse o el círculo.

En ese contexto; el Método de Detonación de Taladros busca evaluar los esfuerzos *in situ*, mediante la interpretación de la geometría de las fisuras producidas por la detonación de los taladros.

2.2 Proceso de fisuración del taladro detonado

Consiste en realizar un taladro de aproximadamente 1 metro, en la dirección convenida, se carga con explosivos y

se detona; el explosivo se desempeña como objeto cortante, generando el desarrollo de fisuras radiales con diferente longitud y orientación denominada *fisuramiento radial*. Al unir los extremos de estas fisuras, se obtiene la figura elíptica o circular, compuesta de dos ejes mayor y menor, en diferente posición. (Ver Figura 2 a, b, c y d.)

La longitud y geometría, de las fisuras producidas en el taladro detonado, la posición de los ejes mayor y menor de la elipse, varían de acuerdo a la profundidad, y a la transmisión de los esfuerzos *in situ*, por las diferentes condiciones homogéneas y heterogéneas del macizo rocoso. (Berrocal, 2015)

2.3 Medición del ángulo del esfuerzo principal mayor

El ángulo (α) del desplazamiento del esfuerzo principal mayor, está delimitado por la línea horizontal y el eje mayor de la elipse, se mide en grados, (Ver Figura 3 y 4) (Berrocal, 2015)

2.4 Estimación del coeficiente k

El coeficiente k es un valor numérico adimensional, es la variable que diferencia el valor de la magnitud, tanto del esfuerzo principal mayor y el esfuerzo principal menor. En el Método de Detonación de Taladros el coeficiente

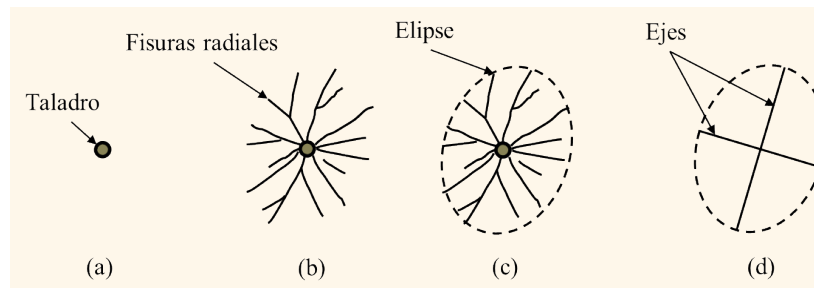


Figura 2. Transmisión de esfuerzos por el macizo rocoso en rocas homogéneas y heterogéneas. Fuente propia: (Berrocal, 2015)

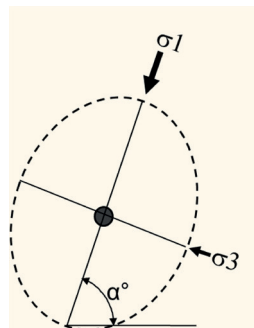


Figura 3. Ángulo (α) del esfuerzo principal mayor, y longitud de los ejes mayor y menor en la elipse. Fuente propia: (Berrocal, 2015)



Figura 4. Delineación de la elipse, con sus ejes mayor y menor, y el ángulo (α).
Fuente propia: (Berrocal, Medición de esfuerzos *in situ*, mediante el Método de Detonación de Taladros en la U.P. Marañón de Compañía Minera Poderosa S.A., 2020)

k , se obtiene dividiendo la longitud del eje de tendencia horizontal, sobre la longitud del eje de la elipse de tendencia vertical, en la elipse (Ver Fig. 5)

Sucesivamente empleamos la fórmula (3), para calcular el *coeficiente k*. (Berrocal, M., 2015)

$$k = \frac{\text{Longitud de tendencia horizontal en la elipse}}{\text{ongitud de tendencia vertical en la elipse}} = \frac{D}{d} \quad (3)$$

2.5 Estimación del Factor de Corrección (FC)

Por las condiciones heterogéneas y homogéneas del macizo rocoso, las direcciones del ángulo (α) de los esfuerzos mayor y menor σ_1 y σ_3 , no serán constantes y variarán continuamente. Para corregir estas variaciones se corrige con el Factor de Corrección (FC), de acuerdo al ángulo (α) del esfuerzo principal mayor de cada lugar. El cálculo del Factor de Corrección (FC); se respalda en las siguientes premisas:

- Las líneas a-a', b-b', c-c', y d-d'; de influencia horizontal y vertical, representan los esfuerzos en un plano con su correspondiente rumbo, en condiciones isotrópicas y anisotrópicas; estos 45 esfuerzos simulan atravesar el planeta tierra, pasando por su punto centro. (Ver Figura 6)
- Considerando al diámetro ecuatorial aproximado de la tierra de 12756 km, y dividiendo entre el diámetro polar de la tierra de 12713; resulta el valor de: 1.003
- La cantidad de 1.003, se divide entre dos sectores circulares, conformado por dos subsectores congruentes circulares de 45° cada uno y radios equivalentes, resulta el valor de: $1.003/2 = 0.5015$

- Para encontrar la influencia de cada grado de 0° a 90°, dividimos de 0° a 90° en partes de un cuadrante, donde se ubica la elipse de esfuerzos; siendo:

$$\frac{0,5015}{90} = 0.057722 = 0.0056$$

Por este sustento, se explican los números: 1.003 y 0.0056, contenidos en el valor Factor de Corrección F.C; calculándolo con la siguiente formulación:

$$FC = 1.003 + (0.0056)(\text{ángulo } \alpha \text{ de los esfuerzos } \sigma_1 \text{ y } \sigma_3) \quad (4)$$

Individualizando la ecuación (2), del Factor de Corrección (FC), para cada magnitud de esfuerzo σ_1 y σ_3 , resultan las siguientes ecuaciones:

$$FC1 = 1.003 + (0.0056)(\alpha) \quad (5)$$

$$FC3 = 1.003 + (0.0056)(90 - \alpha) \quad (6)$$

2.6 Formulación para el cálculo de esfuerzos *in situ* σ_1 y σ_3

La condición homogénea y heterogénea del macizo rocoso, se implica que los esfuerzos σ_1 , σ_3 , posean variados ángulos y magnitudes, debido a la transmisión de los esfuerzos, por el macizo rocoso, expresada en Kg/cm2, MPa y otras medidas; empleando las ecuaciones siguientes.
Fuente propia: (Berrocal, M., 2015)

$$\sigma_1 = FC1 * \gamma * Z \quad (7)$$

$$\sigma_3 = FC3 * k * \gamma * Z \quad (8)$$

Donde:

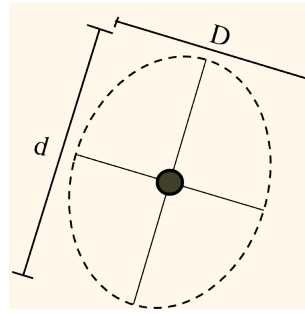


Figura 5. Longitud de los ejes mayor y menor en la elipse.
Fuente propia: Berrocal, M. (2015)

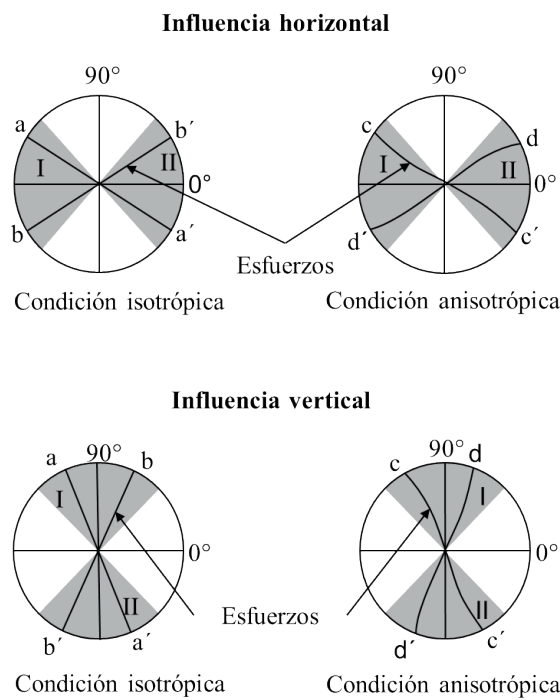


Figura 6. Ubicación de los esfuerzos por tendencia vertical y horizontal simulando el planeta tierra.
Fuente propia: (Berrocal, 2015)

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_3 = Esfuerzo principal menor

k = Coeficiente adimensional

Z = Profundidad desde superficie al punto *In situ*

FC_1 = Factor de corrección (ángulo α)

FC_3 = Factor de corrección (90 – ángulo α)

Z = Profundidad desde superficie al punto *In Situ*

III. RESULTADOS

3.1 Lugares de ensayos

Para la evaluación de los esfuerzos *in situ*, en la U.P. Marañón de Compañía Minera Poderosa S.A.; se han seleccionado aleatoriamente 9 estaciones dentro de 3 zonas de operación, de labores mineras como: cruceros, galerías, rampas, y estocadas, con orientación de taladros al Norte.

En la tabla 1, se adjuntan las estaciones ensayadas, el ángulo (α), respecto a la línea horizontal, las longitudes de los ejes mayor y menor en la elipse y el valor del *coeficiente k*, según la fórmula (3) (Ver Tabla 1)

Tabla 1. Datos tomados de las estaciones y el valor del *coeficiente k*. Fuente propia: (Berrocal, Medición de esfuerzos *in situ*, mediante el Método de Detonación de Taladros en la U.P. Maraón de Compañía Minera Poderosa S.A., 2020)

Zona	Estación	(α) grados	(*) cm.	(**) cm.	Coeficiente <i>k</i>
1	Proy. Nv. 2300, rampa Katy-Lola 1	90	10	10.5	0.95
	Proy. Nv. 1915, crucero 5000, Choloque	81	30	41	0.73
	Proy. Nv. 1450, rampa Estrella-Karola techo	67	25	35.5	0.70
2	Proy. Nv. 1450, rampa Estrella-Karola techo	74	30	38	0.79
	Proy. Nv. 1450, rampa Estrella-Karola techo	44	50	48.5	1.03
	Proy. Nv. 1467, crucero SE, Choloque	89	28	33	0.85
	Proy. Nv. 1800, crucero NW- La Pajilla	86	10.5	14	0.75
3	Proy. Nv. 1800, crucero NW- La Pajilla	68	30	41	0.73
	Proy. Nv. 1800, crucero NW- La Pajilla	60	17	24.5	0.69

Leyenda: (*) Longitud de tendencia horizontal en la elipse (**) Longitud de tendencia vertical en la elipse

3.2. Evaluación de esfuerzos.

El cálculo de la evaluación de esfuerzos *in situ*, se realizó mediante la aplicación de las fórmulas (3), (5), (6), (7) y (8) para su comprensión se desarrolla lo ocurrido con los datos de Proyecto Nv. 1467, Crucero SE, Choloque

3.2.1. Cálculo del esfuerzo σ_1

Calculando FC1; aplicando la ecuación (5)

$$FC1 = 1.003 + (0.0056)(\alpha)$$

$$FC1 = 1.003 + (0.0056)(89^\circ)$$

$$FC1 = 1.501$$

Aplicando la ecuación (7), para calcular la magnitud del esfuerzo σ_1

$$\sigma_1 = FC1 * \gamma * Z$$

$$\sigma_1 = 1.501 * 2.72 \frac{ton}{m^3} * 324.70 m$$

$$\sigma_1 = 132.57 kg/cm^2$$

$$\sigma_1 = 13.00 MPa$$

3.2.2. Cálculo del esfuerzo σ_3

Calculando FC3; aplicando la ecuación (6)

$$FC = 1.003 + (90 - \alpha)$$

$$FC3 = 1.003 + (0.0056)(90 - 89)$$

$$FC3 = 1.009$$

Aplicando la ecuación (3), para calcular el valor del *coeficiente k*

$$k = \frac{D}{d} = \frac{28}{33}$$

$$k = 0.85$$

Aplicando la ecuación (8), para calcular la magnitud del esfuerzo σ_3

$$\sigma_3 = FC3 * k * \gamma * Z$$

$$\sigma_3 = 1.009 * 0.85 * 2.72 \frac{ton}{m^3} * 324.70 m$$

$$\sigma_3 = 75.75 kg/cm^2$$

$$\sigma_3 = 7.43 MPa$$

Sucesivamente en la Tabla 2, se muestra el cálculo de la evaluación de las magnitudes de esfuerzos a nivel global de la U.P. Maraón.

Tabla 2. Valores de las magnitudes de la U.P. Maraón. Fuente propia: (Berrocal, Medición de esfuerzos *in situ*, mediante el Método de Detonación de Taladros en la U.P. Maraón de Compañía Minera Poderosa S.A., 2020)

Estación	(α) grados	Z (*) m	γ (*) ton/m ³	FC1	FC3	<i>k</i>	σ_1 MPa	σ_3 MPa
Proy. Nv. 2300, Rpa. Katy-Lola 1	90	766.39	2.72	1.507	1.003	0.95	30.81	19.48
Proy. Nv. 1915, Cr. 5000, Choloque	81	1321.51	2.72	1.457	1.053	0.73	51.36	27.10
Proy. Nv. 1450, Rpa. Estrella-Karola	67	691.30	2.72	1.378	1.132	0.70	25.41	14.61
Proy. Nv. 1450, Rpa. Estrella-Karola	74	619.70	2.72	1.417	1.093	0.79	23.42	14.27
Proy. Nv. 1450, Rpa. Estrella-Karola	44	635.14	2.72	1.249	1.261	1.03	21.16	22.00
Proy. Nv. 1467, Cr. SE, Choloque	89	324.70	2.72	1.501	1.009	0.85	13.00	7.43
Proy. Nv. 1800, Cr. NW- La Pajilla	86	532.20	2.72	1.485	1.025	0.75	21.08	10.91
Proy. Nv. 1800, Cr. NW- La Pajilla	68	559.20	2.72	1.384	1.126	0.73	20.64	12.26
Proy. Nv. 1800, Cr. NW- La Pajilla	60	554.20	2.72	1.339	1.171	0.69	19.79	11.94

Leyenda: (*) Proporcionado por Compañía Minera Poderosa S.A. - CMPSA

3.3. Promedio global de la U.P. Marañón

Con la finalidad de obtener, el valor global en la U.P. Marañón, se procedió a promediar los valores de las direcciones, *coeficiente k* y las magnitudes de esfuerzo *in situ*, de las zonas 1, 2 y 3.

Corroborando los valores mostrados en la Tabla 3, se procede a esbozar la figura 7, indicando que la magnitud del esfuerzo principal mayor σ_1 , es de tendencia vertical y el esfuerzo principal menor σ_3 , es de tendencia horizontal, en una dirección global de 73°

IV. DISCUSIÓN

La metodología del Método de Detonación de Taladros, ésta explicado con fundamentos razonables y lógicos para evaluar los esfuerzos *in situ* en el macizo rocoso; con los sustentos siguientes.

4.1. Fisuramiento del taladro.

Después de la detonación de un taladro con explosivos, es posible visualizar fisuras radiales alrededor del taladro, algunas fisuras son de mayor y menor longitud y otras de menor longitud. En ese contexto; la evaluación de los esfuerzos *in situ* del lugar, consiste en interpretar del estado de la geometría de las fisuras producidas.

4.2. Dirección del esfuerzo mayor y menor *in situ*.

Según (Hoek & Brown, 1985), la detonación de taladros producen fisuras de mayor y menor longitud; mostrando que las fisuras de mayor longitud, se ven favorecidas y son coincidentes con la dirección del esfuerzo mayor σ_1 ; deduciendo que el esfuerzo menor σ_3 es perpendicular al esfuerzo principal mayor. En ese contexto; de acuerdo a las

longitudes de las fisuras producidas, es posible delinear la figura de una elipse con sus ejes mayor y menor.

4.3. Formulación del *coeficiente k*.

En la elipse obtenida por la detonación de taladros, es factible medir la longitud del eje de tendencia horizontal y el eje de tendencia vertical de la elipse. Siendo la circunferencia ecuatorial de 40,076 kilómetros y la circunferencia polar de 40,009 kilómetros aproximadamente del planeta tierra; en base a éstas premisas, es justificable dividir la longitud horizontal sobre la longitud vertical, para calcular el valor del *coeficiente k*.

4.4. Formulación del Factor de Corrección (FC)

El macizo rocoso es de composición homogénea (comúnmente suelos) y heterogénea. Las rocas heterogéneas son de distinta composición, de diferente formación geológica y propiedades únicas por cada lugar; por esta condición los esfuerzos se transmiten en distintas direcciones, según el material presente del lugar, medibles en grados sexagesimales.

Una manera de evaluar proporcionalmente las direcciones de los esfuerzos *in situ*, en relación a cada grado sexagesimal con el planeta Tierra, es compensar matemáticamente éstas direcciones usando el Factor de Corrección (FC).

4.5. Evaluación de la magnitud de esfuerzos *in situ*.

La formulación del Método de Detonación de Taladros, es adaptada de la formulación del método de la Carga litostática (fórmulas 1 y 2), para evaluar los esfuerzos horizontales y verticales *in situ*, en combinación con el valor del Factor de Corrección (FC), por condiciones anisotrópicas e isotrópicas del macizo rocoso y la valoración apropiada del *coeficiente k*

Tabla 3. Valores de las magnitudes de la U.P. Marañón. Fuente propia: Berrocal, M. (2020)

U.P. MARAÑÓN - CMPSA	(α) Grados	k	σ_1 MPa	σ_3 MPa
PROMEDIOS GLOBALES	73	0.79	25.19	15.56

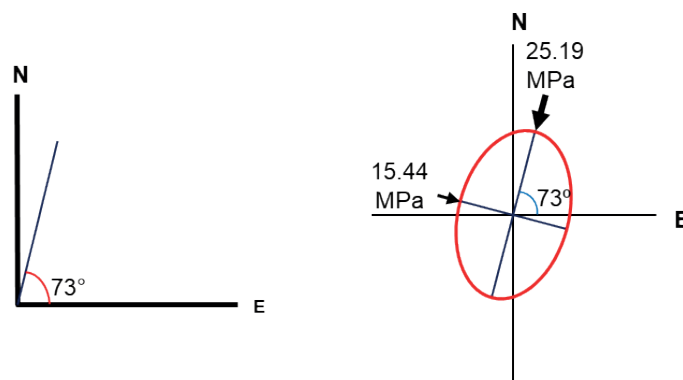


Figura 7. Valores promedio de la dirección y magnitud de esfuerzos *in situ*. Fuente propia: Berrocal, M. (2020)

V. CONCLUSIONES

- El análisis de esfuerzos mediante el Método de Detonación de Taladros, permite calcular en el mismo instante: la dirección y la magnitud de los esfuerzos *in situ*; y con esta información aplicar las acciones correctivas en el lugar de operación.
- Las condiciones del macizo rocoso en la Unidad de Producción Marañón, están compuestas de rocas heterogéneas de comportamiento anisotrópico.
- Los resultados obtenidos en la U.P. Marañón son: *coeficiente k* de 0.79, dirección promedio 73°, magnitud del esfuerzo principal mayor de 25.19 MPa, magnitud del esfuerzo principal menor de 15.56 MPa
- El ensayo de evaluación de esfuerzos *in situ*, requiere aproximadamente una hora, y no es necesario paralizar labores aledañas, y es de bajo costo.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

VI. REFERENCIAS

- Berrocal, M. (2015). *Estabilidad de excavaciones subterráneas* (Primera edición ed.). Lima.
- Berrocal, M. (2020). *Medición de esfuerzos in situ, mediante el Método de Detonación de Taladros en la U.P. Marañón de Compañía Minera Poderosa S.A.* Lima.
- Oyanguren, P. R., Irizar, L. d., Huerta, R. L., & Obeso, E. G. (1984). *Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea*. Madrid: Instituto geológico y minero de España.
- Hoek, E., & Brown, E. (1985). *Excavaciones subterráneas en roca* (Primera edición ed.). Mexico: Calypso.