

MECÁNICA DE ROCAS GRANULADAS CARGADAS SOBRE LAS ESTRUCTURAS DE SOPORTE

ROCK MECHANICS GRANULATED CHARGED ON SUPPORT STRUCTURES

Enrique Toledo*, Alfonso Romero*, Gerardo Mendoza*, Mario Cedrón*,
Pablo Núñez**, Elard León**, Sósimo Fernández**

RECIBIDO: 09/04/2014 – APROBADO: 29/05/2014

RESUMEN

Esta investigación, se ha ejecutado en un prototipo de madera especialmente diseñado para estudiar la variación de las cargas en función de la altura cargada, registrada en una balanza ubicada debajo del prototipo, con el fin de estudiar la relación de la granulometría, con su gravedad específica y su contenido de humedad. Con este método, en el campo frente a las rocas colapsadas de un túnel, se podrán calcular las estructuras de soporte, utilizando el material pertinente y adecuado para que resista durante el tiempo que transcurra la accesibilidad al área de explotación. Si su aplicación se generaliza, su alcance podría ampliarse y revolucionar el estudio de la mecánica de rocas orientado a la minería subterránea, por la sencillez de su aplicación, abriendo un nuevo capítulo en el estudio de la mecánica de las rocas granuladas.

Palabra clave: Derrumbes, túnel colapsado, rocas granuladas, estructuras cargadas, prototipo de cargas.

ABSTRACT

This research has been implemented in a prototype timber specially designed to study the variation of loads depending on the height charged, recorded on a scale prototype located low in order to study the relationship of the grain, with its specific gravity and moisture content; with this method in the field against the rocks collapsed a tunnel may be calculated support structures, using the relevant and appropriate material to resist during the time elapsing access to the area of operation. If its application is generalized, its scope could be expanded and revolutionize the study of rock mechanics oriented underground mining, for the simplicity of its application, opening a new chapter in the study of the mechanics of granular rocks.

Keywords: Landslides, collapsed tunnel, granular rocks, loaded structures, prototype fillers.

* Docentes de la E.A.P.I. de Minas de la FIGMMGC de la UNMSM. E-mail: fenriquetoledog@hotmail.com, Telf.: 6545226, Cel.: 994416215.

** Docentes de la E.A.P.I. de Metalurgia de la FIGMMGC de la UNMSM. E-mail: pablonunez@terra.com.pe, Telf.: 4723534, Cel.: 992324435.

I. INTRODUCCIÓN

Las pruebas de mediciones de las cargas que podrían ejercer las rocas colapsadas sobre cualquier estructura de soporte en un túnel minero o de servicio se efectuaron en la Ciudad Universitaria, donde se depositaron materiales de construcción, como en el campus de la Facultad de Psicología y de la Escuela de Ingeniería Geográfica. Para este fin se utilizó un prototipo de madera construido por nuestros alumnos, bajo la dirección del responsable de este proyecto de investigación, en el laboratorio de Mecánica de Fluidos y Ventilación de Minas. Debajo del prototipo se colocó una balanza para registrar el peso de las personas; luego, utilizando un depósito de volumen constante, se procedió a cargar paulatinamente arena de cantera de malla de $\frac{1}{4}$ primero, registrándose su peso y la altura cargada, luego se procedió de la misma manera para registrar los pesos y las alturas de carga en piedra chancada de malla de $\frac{3}{4}$; asimismo, también se procedió con arena húmeda de malla de $\frac{1}{4}$. Un colapso o derrumbe de túnel o galería tiene las mismas fases que un suelo, a diferencia de las rocas inalteradas; el material de derrumbe, así como los suelos, constan de tres fases: la fase sólida, la líquida y la gaseosa, las dos últimas ocupan los vacíos entre los gránulos.

En estas mediciones se encontró que cada volumen ingresado al prototipo pesaba menos que el anterior, a medida que subía la altura cargada; sin embargo, su peso se incrementaba en razón inversa a su altura, debido a la descomposición de las fuerzas en las paredes del prototipo, al actuar la fuerza de rozamiento; corroborando la teoría de la mecánica racional, dando la impresión de que la forma rectangular de prototipo se transformaba en una pirámide truncada, con tendencia a convertirse en pirámide al no registrar más cargas en la balanza.

Las aristas de la pirámide tienden a la verticalidad, debido al bajo coeficiente de rozamiento entre la madera y los materiales de construcción, lo que nos indica que al rozar con roca inalterada la generatriz del cono de rozamiento tenderá a ser obtusa, con la consecuente disminución de la altura cargada.

II CONSIDERACIONES TEÓRICAS

2.1. El problema del colapso en la perforación de túneles

El problema común y cotidiano en las operaciones mineras y perforación de túneles es el control del colapso o derrumbe del techo o los flancos; muchas veces nos puede sorprender y ocurrir intempestivamente estos casos. El problema se presentará cuando el colapso nos sorprenda y actuemos empíricamente, entonces: ¿Qué es lo primero que debemos conocer para resolver el problema? Desde hace mucho tiempo se aplican técnicas para atravesar derrumbes, como el uso de hincado de “marchavantes” o el clavado de cuarterones de madera con la punta tajada en bisel (Lewis, R. 1967) en un solo extremo. Sin embargo, puede repetirse el problema en el mismo lugar; en este caso, porque el material utilizado como sostenimiento fue insuficiente para soportar la carga actuante sobre la estructura. También se puede aplicar la tecnología de inyección de “lechada de cemento” o la tecnología del *Foundation Grouting* (Peurifoy, L. 2006); no obstante, el

grouting es solo un estabilizador de flujo de la roca colapsada para poder abrir el espacio libre de la galería o túnel, seguidamente se procederá a sostener con concreto armado aplicado por aspersión con aire comprimido, denominado Shotcrete (Vanderwalle, M. 2005) o “gunitado”. Muchas veces los derrumbes son impredecibles porque en el interior de la tierra ocurrieron fenómenos dinámicos que afectaron la resistencia a su peso propio, como las *capas contorsionadas* (De Sitter, U. 2006), que pueden considerarse como microestructuras, limitadas a determinados estratos, que se encuentran en medios y condiciones muy variados. El fenómeno se ha atribuido a causas muy diferentes, las principales son: 1) Deslizamiento de laderas y cargas de sedimento supra yacientes. 2) Acciones de corrientes glaciares. 3) Movimientos de capas deshelasadas sobre un subsuelo permanentemente helado. Las estructuras correspondientes se denominan “contorsiones involu-cradas”. 4) Deslizamiento por gravedad. 5) Corrimiento. 6) Contorsiones tectónicas internas.

Normalmente, está perfectamente justificada la suposición de que, en todos estos tipos de trastornos, la disminución de la presión granular (como consecuencia de un aumento relativo de la porción hidrostática de la presión litostática) ha jugado un papel importante, porque entonces la roca pasa a ser una suspensión de sus granos en agua, capaz de fluir bajo cualquier gradiente dinámico. Si no tenemos las evidencias, no podremos predecir el fenómeno y puede ocurrir el colapso. Para solucionar este problema hemos diseñado el prototipo correspondiente y con las mediciones efectuadas en el campo calcularemos la carga actuante sobre la futura estructura, diseñada adecuada y pertinentemente para cada caso.

2.2. La base teórica en que se sustenta este problema

Todos los seres animados nos desplazamos sobre cualquier superficie en este planeta, gracias a la fuerza de rozamiento. Timoshenko en su libro nos recuerda a Coulomb así:

El problema del rozamiento entre dos placas limpias y secas fue investigado por primera vez y de manera completa por Coulomb, (Timoshenko, S. et al. 2009) quien publicó en 1781 los resultados de un gran número de experiencias. Estos resultados de los experimentos de Coulomb pueden resumirse en las tres leyes del rozamiento:

1º. *El valor total del rozamiento que puede desarrollarse es independiente de la magnitud de la superficie de contacto.*

2º. *La cantidad total de rozamiento que puede desarrollarse es proporcional a la presión normal.*

3º. *Para velocidades de deslizamiento reducidas, el valor total del rozamiento que puede desarrollarse es prácticamente independiente de la velocidad.*

Estas leyes de rozamiento se expresan por la siguiente fórmula sencilla:

$$F = \mu N \dots \dots \dots (A).$$

Basado en estas leyes, si consideramos que F es la fuerza necesaria que debe iniciar el deslizamiento N la normal o (componente de la fuerza de gravedad) y μ constituye el coeficiente de rozamiento estático; pero si F es tan peque-

ña que es necesario para que continúe el desplazamiento; entonces μ cambia de nombre, a coeficiente de rozamiento cinemática; por lo tanto, los coeficientes estáticos y cinemáticos varían considerablemente para los diferentes materiales y la variadas condiciones de superficies que se presenten.

Para discernir la manera como el rozamiento afecta a las reacciones aplicadas entre las partículas de roca, podemos visualizar el ejemplo de la figura N° 1, donde se analiza, simulando colocar un bloque (A) sobre una superficie plana horizontal. Sobre este bloque (A) se aplica una fuerza (P) que forma un ángulo α con la vertical, como vemos en la parte (a) de la figura N° 9.

Para simplificar, supongamos que la fuerza (P) sea mucho mayor que el peso del bloque (A), de manera que se despreciaría la fuerza de gravedad o si se prefiere, podríamos suponer que esta fuerza podría ser una resultante de la fuerza de gravedad. La distribución real de la presión sobre la superficie de contacto entre el bloque (A) y el plano dependerá del punto de aplicación de la fuerza (P) y del ángulo (α); sin embargo, mientras subsista el equilibrio, es evidente que esta presión distribuida debe ser notablemente equivalente a una fuerza de reacción (R) que será igual pero de sentido contrario y colineal a la fuerza aplicada.

Si reemplazamos a esta reacción (R) por sus componentes (F) y (N), que actúan tangencial y normalmente respectivamente, a la superficie de contacto, como se muestra en la figura N° 1, la fuerza (F) representará al rozamiento entre la superficie y la componente (N) o la presión normal. De esta manera, la condición de equilibrio exige que la relación entre las componentes F y N sea: $F/N = \text{tangente } \alpha \dots \dots \dots (1)$

Cuando la fuerza aplicada (P) forma un ángulo límite (φ) con la vertical como vemos en la figura (N° 1 b), para la cual es inminente el deslizamiento del bloque, tenemos al igual que antes que:

$$F/N = \text{tangente } \varphi \dots \dots \dots (2).$$

También ya habíamos visto que la condición para provocar el deslizamiento es:

De las ecuaciones (2) y (3) obtenemos la importante relación:

$$F = \mu N \dots \dots \dots (A)$$

$$\mu = (F/N) \dots \dots \dots (3)$$

También de las ecuaciones 2 y 3 obtenemos otra importante relación:

$$\text{Tangente } \varphi = \mu \dots \dots \dots (B)$$

El ángulo límite φ , igual al arco tangente del coeficiente de rozamiento, se denomina ángulo de rozamiento.

Resumiendo esta discusión: siempre que sea inminente el movimiento, la reacción total R, proporcionada por la superficie de apoyo, estará inclinada con respecto a la normal de un valor igual al ángulo de rozamiento estático φ y actuará en el sentido de oponerse al movimiento inminente (fig.1-b). Cuando el movimiento no es inminente, la reacción total R será inclinada con respecto a la normal, formando cualquier ángulo que sea necesario para mante-

ner el equilibrio (fig. 1-a). Si consideramos una superficie ideal muy lisa, para la cual el coeficiente de rozamiento es cero, el ángulo de rozamiento también es cero y la reacción total R es normal a la superficie, tal como supusimos anteriormente.

En la discusión que anteceditamos, se consideró a la fuerza P como actuando en el plano de la figura; sin embargo, podemos generalizar esta discusión de que, mientras la recta de acción de la fuerza aplicada P esté comprendida, completamente, dentro de cierto cono, engendrado por una recta que forme el ángulo de rozamiento estático φ con la normal a la superficie de contacto y cuyo vértice pertenezca a esta superficie, el bloque permanecerá en equilibrio, cualquiera que sea la magnitud de la fuerza. Este cono se denomina: *cono de rozamiento estático*.

Esta es la teoría en que se basa esta investigación, que nos ha dado las pautas para diseñar el prototipo, a fin de evaluar las cargas actuantes en la estructura de soporte de los túneles y galerías con rocas del techo colapsadas o derrumbadas.

En la aplicación de la mecánica clásica a problemas de la mecánica de rocas (Stag-Zienkiewicz, 2010). Los problemas de interés de la mecánica de rocas pueden clasificarse en: I. Transmisión de tensiones: a) Estática (1) Peso propio, (2) Cargas exteriores; b) Dinámica (3) Seísmos (4) Vibraciones. II. Criterios de rotura: a) Del material rocoso; b) Del macizo rocoso. III. Problemas de fluencia y filtración: Teóricamente debiera ser posible las condiciones de transmisiones de tensiones y de rotura a partir de un único modelo clásico. Un método de este tipo requeriría un tratamiento estadístico muy completo y aún no se ha desarrollado la teoría correspondiente. Es necesario, por lo tanto, hacer hipótesis simplificadoras, con el objeto de obtener soluciones prácticas, las hipótesis geométricas adoptadas para resolver problemas tensionales no suelen tener en cuenta generalmente la orientación crítica de las estibaciones en las condiciones de rotura y, por lo tanto, es conveniente considerar ambos problemas separadamente.

En este proyecto de investigación, precisamente estamos tratando de resolver este problema separadamente, el de la transmisión de tensiones, utilizando un prototipo diseñado para aplicarlo prácticamente en cada caso.

Terrenos, datos teóricos (Vidal, V. 2005). La relación entre la dilatación transversal y la contracción longitudinal de las rocas (coeficiente de Poisson) varía mucho, lo que ocasiona variaciones importantes en los empujes horizontales. Por otra parte, los terrenos están más o menos estratificados, lo cual crea una anisotropía. A la estratificación se añade, a menudo, dos redes de fisuras o fracturas previas (por ejemplo, dos series de planos perpendiculares más o menos marcados e inclinados sobre la estratificación) plegamientos, fallas y accidentes de cualquier naturaleza que vienen a complicar cualquier proceso general. En el caso general, por consiguiente, es imposible hacer un cálculo; por el contrario, existen minas en las que el terreno, regular y bastante homogéneo, puede ser, en primera aproximación, asimilable a un esquema clásico de la mecánica de rocas. El cálculo dará entonces, por lo menos, el sentido y el orden de la magnitud de los fenómenos.

El más simple de estos esquemas es la elasticidad, al que se asimilan los yacimientos poco profundos de la explotación de carbón americanos y de las minas de hierro de Lorena.

Definitivamente en la mecánica de rocas y la mecánica de suelos no se pueden evaluar las deformaciones, las tensiones y las cargas colapsadas o por colapsar sin la ayuda de instrumentos de evaluación en el campo. No se puede evaluar con la simple mirada, ni siquiera con los mapeos en los planos geológicos y la aplicación de fórmulas, tampoco con las evaluaciones de los testigos en el laboratorio de mecánica de rocas; estos laboratorios son válidos para encontrar las resistencias a la compresión, la tracción y al corte de las rocas para ser usadas como materiales de construcción y no para predecir su comportamiento en el tiempo; por lo tanto, tenemos que utilizar instrumentos de medición in situ.

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes (Badillo, J. 2012): la sólida, la líquida y la gaseosa. La fase sólida está formada por partículas minerales y rocas (incluyendo la capa adsorbida); la líquida por agua (libre, específicamente), aunque en los suelos puede existir otros líquidos de menor significación; la fase gaseosa comprende sobre todo el aire, si bien pueden estar presentes otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido carbónico, etc.). La capa viscosa del agua adsorbida que presenta propiedades intermedias entre la fase sólida y la fase líquida suele incluirse en esta última, pues es susceptible de desaparecer cuando el suelo es sometido a una fuerte evaporación o secado.

Las fases líquidas y gaseosas del suelo suelen comprenderse en el volumen de vacíos, mientras que la fase sólida constituye el volumen de los sólidos.

Se dice que un suelo está totalmente saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por el agua. En estos casos se tiene que diseñar un sistema de drenaje del agua, ya sea por gravedad, por sifonado o por bombeo, si esto fuera imposible, se tratará de congelar el agua para atravesar los derrumbes.

Cuando nos encontramos frente a un túnel o una galería derrumbada, lo que más nos interesa es recuperar el pase, e inmediatamente actuamos empíricamente, sin importarnos la generación de los problemas del futuro; para trabajar con eficiencia y alta productividad, debemos pensar en la estabilidad y sustentabilidad de la resolución de nuestros problemas. *El material derrumbado tiene las mismas características de un suelo con sus tres fases, explicadas adelante por Badillo y Rodríguez; motivo por el cual hemos experimentado con grava y arena. La porosidad (Sánchez, A. 2008) (n) de un suelo es la relación entre el volumen de huecos o vacíos (V_v) y el volumen total del suelo (V), Intervalo de validez: $0 < n < 1$. También puede expresarse en porcentaje: $n = (V_v)/V$. El índice de poros o huecos (e) es la relación entre el volumen de huecos vacíos V_v y el volumen ocupado por las partículas sólidas V_s . Intervalo de validez: $0 < e < \infty$; expresado en porcentaje: $e = (V_v)/V_s$.*

Los resultados del tamizado y su representación gráfica, denominada curva granulométrica, con el eje de las abscisas con escala logarítmica que refleja los tamaños y el

eje de las ordenadas con escala natural que representa el peso acumulado.

La roca fragmentada ya sea de manera artificial, como algunas utilizadas en las construcciones de las edificaciones, o del modo natural, como se encuentran en las profundidades del subsuelo, fragmentadas y aglomeradas, que, por acción de la perforación de los túneles o galerías mineras, fluyen siguiendo la atracción de la gravedad y al caer a un piso horizontal se detienen formando un talud, al que se le denomina *talud natural*, cuya inclinación varía en función de su granulometría, al contenido de humedad, la forma exterior del grano y su gravedad específica, obedecen a las tres leyes de la fuerza de rozamiento. Osterman (Osterman, W. 2006) propone el siguiente teorema 33 sobre el rozamiento: *La fuerza de rozamiento W es una fracción determinada de la fuerza normal de contacto N perpendicular a la superficie de deslizamiento, y depende esencialmente de la naturaleza del material, de la superficie exterior y el líquido de lubricación;* que en el caso de derrumbes es el agua. De las condiciones propuestas en este teorema dependerá la dificultad o la facilidad con que se pueda estabilizar la roca colapsada o el derrumbe.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

El método aplicado en este proyecto de investigación es el experimental, de aplicación de las ciencias físicas a la tecnología de evaluación de las cargas de trabajo que deben soportar las estructuras de sostenimiento de túneles y labores mineras subterráneas. Las técnicas utilizadas en este método fueron las siguientes, en el orden de ejecución:

3.1. Diseño del prototipo

De acuerdo a la disponibilidad de una pequeña balanza de repostería, se diseñó un prototipo experimental de vidrio, adecuando sus dimensiones a la pequeña balanza disponible, con la finalidad de determinar experimentalmente la variación de carga de granos comestibles: arroz, azúcar y sal de cocina; con resultados negativos por la amplitud del área de sustento de la estructura de soporte de la balanza, respecto a su capacidad de pesaje. Ver las Figuras N° 1 y N° 2.

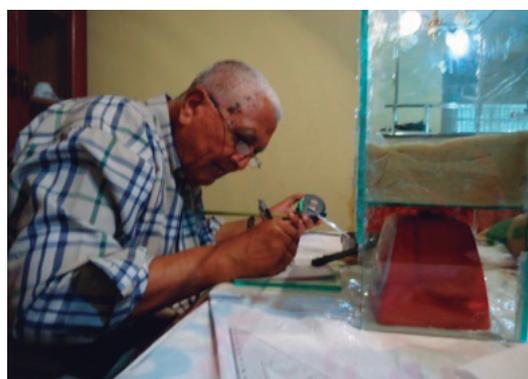


Figura N° 1. Pesada de arroz. Llegó a la máxima escala sin alcanzar la debida altura.

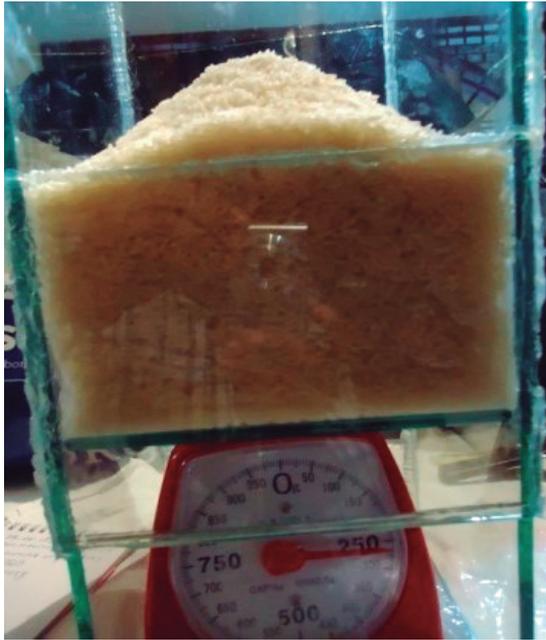


Figura Nº 2. Registro de las pesadas de arroz.

2.2. Construcción del prototipo y operaciones de pesado sistemático de agregados de construcción

Por la experiencia negativa obtenida con el pequeño prototipo de vidrio, se decidió utilizar una balanza para controlar el peso de las personas; sin embargo, mejores resultados se hubieran obtenido con una balanza de mayor capacidad.

En función de las dimensiones de la balanza disponible para pesar personas y la gravedad específica de los materiales de construcción, se calculó las dimensiones del prototipo, construido por nuestros alumnos en el laboratorio de Mecánica de Fluidos y Ventilación de Minas. Con el prototipo instalado sobre la balanza, se procedió a pesar los agregados de construcción secos de granulometrías de ¼” y ¾”; además de las pruebas con agregados húmedos de ¼”, como se puede apreciar en las Figuras del Nº 3 al Nº 6 y las Tablas del Nº 1 al Nº 4.

Tabla Nº 1. Primer experimento: Medición de cargas con roca granulada seca. Día 07/10/13, con 26 pesadas en la primera medición de campo

Φ=¼” Nº	W, Kg	h, mm	H- h1 , mm	h1 , mm
1	3,0	1207	46	46
2	6,0	1162	91	45
3	8,0	1112	141	47
4	10,0	1065	188	47
5	15,0	1020	233	45
6	16,0	980	273	40
7	17,0	935	318	45
8	18,0	880	373	55
9	19,0	830	422	49
10	21,0	785	478	45
11	22,0	745	508	30
12	23,0	685	568	60

13	24,0	655	598	30
14	25,0	595	658	60
15	25,5	545	708	50
16	26,0	495	758	50
17	27,0	445	808	50
18	28,0	395	858	50
19	28,5	345	908	50
20	29,0	290	963	55
21	30,0	240	1013	50
22	31,0	205	1048	35
23	31,5	155	1098	50
24	31,8	105	1148	50
25	32,0	50	1203	55
26	32,0	0	1253	50

Leyenda: Peso =W.

Altura del prototipo =H =1 253 mm.

Altura medida = h; Altura cargada =h₁

Ángulo de reposo = :1= 32°; 2=34°;

3= 35°

Ángulo de caída = α:1= 53°; 2=52°; 3=55°.

Granulometría = ¼”

Tabla Nº 2. Segundo Experimento: Día 14/10/13. Medición de cargas con roca granulada

Φ= ¾ Nº	W, Kg	h, mm	H- h1 , mm	h1 , mm
1	3,0	1185	68	68
2	5,0	1148	105	37
3	7,0	1113	140	35
4	10,0	1065	188	48
5	12,0	1018	235	47
6	13,0	976	277	42
7	14,9	927	326	49
8	15,5	885	368	42
9	16,0	840	413	45
10	17,0	795	458	45
11	17,8	753	500	42
12	18,0	705	548	48
13	18,1	653	600	52
14	18,2	610	643	43
15	18,5	563	690	47
16	19,0	519	734	44
17	19,5	465	788	54
18	20,0	423	830	42
19	20,1	373	880	50
20	20,9	328	925	45
21	21,0	268	985	60
22	21,1	233	1020	35
23	20,3	178	1075	55
24	21,8	133	1120	45
25	22,0	78	1175	55
26	22,2	37	1216	41
27	22,4	0	1253	37

Leyenda: Peso =W.

Altura del prototipo = H =1 253 mm.

Altura medida=h; Altura cargada = h_1 .
 Ángulo de reposo: : 1= 31°; 2=33°; 3= 35°
 Ángulo de caída= β :1= 43°; 2=42°; 3=45° Granulometría = 3/4"

Tabla Nº 3. Tercer experimento: día 21/10/13. Medición de cargas con roca granulada húmeda, con 27 pesadas en la tercera medición de campo.

$\Phi = 1/4''$ Nº	W, Kg	h, mm	H- h_1 , mm	h_1 , mm
1	2,5	1189	64	64
2	5,0	1140	113	49
3	7,0	1095	158	45
4	9,9	1054	199	41
5	11,2	1011	242	43
6	12,0	962	291	49
7	13,8	924	329	38
8	14,6	870	383	54
9	15,0	831	422	39
10	15,2	788	465	43
11	15,5	742	511	46
12	15,6	694	559	48
13	16,0	652	601	42
14	17,0	594	659	58
15	17,0	553	700	41
16	18,0	504	749	49
17	18,5	460	793	44
18	18,6	427	826	33
19	18,9	378	875	49
20	19,0	337	916	41
21	20,0	280	973	57
22	20,1	232	1021	48
23	20,1	186	1067	46
24	20,1	140	1113	46
25	20,1	94	1159	46
26	20,1	45	1208	49
27	20,1	2	1251	43

Leyenda:

Peso =W.

Altura del prototipo = H = 1 253 mm.

Altura medida =h; Altura cargada= h_1 .

Ángulo de reposo= α :1= 31°; 2=33°;

3= 35°.

Ángulo de caída = β :1= 43°; 2=42°; 3=45°.

Granulometría = 1/4".

Tabla Nº 4. Cuarto Experimento: día 28/10/13. Medición de cargas con roca granulada húmeda, con 28 pesadas en la cuarta medición de campo.

$\Phi = 1/4''$ Nº	W, Kg	h, mm	H- h_1 , mm	h_1 , mm
1	3,00	1187	66	66
2	5,00	1160	93	27
3	6,00	1100	153	60
4	8,00	1060	193	49
5	9,00	1018	235	42

6	9,50	975	278	43
7	10,00	918	335	57
8	11,00	865	388	53
9	11,50	834	419	31
10	12,00	776	477	58
11	13,00	738	515	38
12	13,50	704	549	34
13	14,00	648	605	56
14	15,00	593	660	55
15	17,00	553	700	40
16	18,00	504	749	49
17	18,50	460	793	44
18	18,60	427	826	33
19	18,90	378	875	49
20	19,00	337	916	41
21	20,00	280	973	57
22	20,10	232	1021	48
23	20,10	186	1067	47
24	20,10	140	1113	46
25	20,10	94	1159	46
26	20,10	45	1208	49
27	20,10	2	1251	43
28	20,20	0	1253	2

Leyenda:

Peso =W.

Altura del Prototipo =H = 1 253 mm.

Altura medida=h; = Altura cargada= h_1 .

Ángulo de reposo= α :1= 31°; 2=33°;

3= 35°.

Ángulo de caída = β :1= 43°; 2=42°; 3=45°.

Granulometría = 1/4".

Los días 21/10/13 y 28/10/13 se procedieron a las operaciones de pesado de los agregados húmedos, remanente de las construcciones de la escuela de Ingeniería Geográfica. Las Tablas Nº 3 y Nº 4 son los resultados de las mediciones en estos días respectivamente. Como se puede observar en las Tablas Nº 3 y Nº 4, a partir de la altura 1,021 m la carga en la tabla Nº 3 no se incrementa hasta llegar a la cumbre del prototipo, indicando que el vértice de la pirámide se encuentra a 1,021 m, igualmente se produce el mismo efecto en la Tabla Nº 4.

El día 14 del mismo mes y año, se utilizó grava de construcción seca con granulometría de malla 3/4" perteneciente a las mismas construcciones, como aparece en las figuras del Nº 5 y Nº 6.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Toda la información del campo se ha procesado para determinar las fuerzas actuantes sobre la estructura, menuda por el rozamiento con la que se ha adherido a las paredes del prototipo; por lo tanto, se ha calculado el volumen y el peso específico del material en cada uno de estos tramos, visualizando la pérdida de peso en función de la altura de carga.

Si en el tramo 2 se ha obtenido el peso específico de 1,782 kg/ m³, con un área de la base de 0,037m², asumiendo que el material ha adoptado la forma de una pirámide porque

a partir de esta altura ya no hay incremento de peso, como se puede observar en la Tabla N° 5, a partir de la pesada N° 25 ya no hubo incremento de peso; vemos que a partir de la pesada N° 23 el incremento de peso fue muy poco significativo. Por lo tanto, la carga se habría convertido en una pirámide debido a la sección rectangular del prototipo. Si este prototipo hubiera tenido una sección circular, estaríamos frente a un cono de rozamiento, corroborando la ley de Coulomb.

Tabla N° 5. Procesamiento de la primera medición de cargas con roca granulada de ¼” y seca del día 07/10/13.

$\Phi=1/4''$ N°	W Kg	h ₁ m	A m ²	V m ³	Pe Kg/m ³
1	3,0	0,046	0,037	0,0017	1 762,63
2	6,0	0,091	0,037	0,0034	1 782,00
3	8,0	0,141	0,037	0,0053	1 533,45
4	10,0	0,188	0,037	0,0069	1 437,61
5	15,0	0,233	0,037	0,0086	1 739,94
6	16,0	0,273	0,037	0,0101	1 584,00
7	17,0	0,318	0,037	0,0118	1 444,84
8	18,0	0,373	0,037	0,0138	1 304,25
9	19,0	0,422	0,037	0,0156	1 216,86
10	21,0	0,478	0,037	0,0177	1 187,38
11	22,0	0,508	0,037	0,0188	1 170,46
12	23,0	0,568	0,037	0,0210	1 094,40
13	24,0	0,598	0,037	0,0221	1 084,70
14	25,0	0,658	0,037	0,0243	1 026,86
15	25,5	0,708	0,037	0,0262	973,43
16	26,0	0,758	0,037	0,0280	927,05
17	27,0	0,808	0,037	0,0236	829,24
18	28,0	0,858	0,037	0,0317	882,00
19	28,5	0,908	0,037	0,0336	848,32
20	29,0	0,963	0,037	0,0356	813,90
21	30,0	1,013	0,037	0,0356	841,96
22	31,0	1,048	0,037	0,0388	799,46
23	31,5	1,098	0,037	0,0406	775,37
24	31,8	1,148	0,037	0,0425	748,66
25	32,0	1,203	0,037	0,0445	718,92
26	32,0	1,253	0,037	0,0464	690,24

Leyenda: Peso =W.

Altura del prototipo =H =1 253 mm.

Altura medida=h; Altura cargada=h₁.

Ángulo de reposo = α ; Ángulo de caída = β

α : ; 1= 32°; 2=34°; 3= 35°;

β : ; 1= 53°; 2=52°; 3=55°;

Granulometría = ¼ “

Si: volumen de pirámide: $V_{pi} = 1/3 (Bxh_1)$ $V_{pi} = 1/3 (0,037)(1,203) = 0,014837 \text{ m}^3$

$P_{Esp} = 1 782,00 \text{ kg/m}^3$

$W = 1 782,00 \text{ kg/m}^3 \times 0,01484 \text{ m}^3$

$W = 26,445 \text{ kg}$

$P = 26,445/0,037 \text{ m}^2 = 714,73 \text{ kg/m}^2$

Presión sobre la estructura = 714,73 kg/m²

En este caso también tenemos una pirámide, porque el prototipo tiene una sección rectangular; si hubiera sido circular estaríamos frente a un cono de rozamiento, como plantea Timoshenko al explicar los principios de la ley de rozamiento planteada por Coulomb: mientras la recta de acción de la fuerza aplicada P esté comprendida, completamente, dentro de cierto cono engendrado por una recta que forme el ángulo de rozamiento estático ϕ con la normal a la superficie de contacto y cuyo vértice pertenezca a esta superficie, el bloque permanecerá en equilibrio, cualquiera que sea la magnitud de la fuerza. Este cono se denomina: *cono de rozamiento estático*.

Tabla N° 6. Procesamiento de la segunda medición de cargas con roca granulada de ¾” y seca. Registrado en el campo el día: 14/10/13.

$\Phi=3/4''$ N°	W kg	h ₁ m	A m ²	V m ³	Pe kg/m ³
1	3,0	0,068	0,037	0,0025	1 192,37
2	5,0	0,105	0,037	0,0039	1 287,00
3	7,0	0,140	0,037	0,0052	1 351,35
4	10,0	0,188	0,037	0,0070	1 437,61
5	12,0	0,235	0,037	0,0087	1 380,10
6	13,0	0,277	0,037	0,0102	1 268,42
7	14,9	0,326	0,037	0,0121	1 235,28
8	15,5	0,368	0,037	0,0136	1 138,37
9	16,0	0,413	0,037	0,0153	1 047,05
10	17,0	0,458	0,037	0,0170	1 001,00
11	17,8	0,500	0,037	0,0185	962,16
12	18,0	0,548	0,037	0,0203	887,75
13	18,1	0,600	0,037	0,0222	815,32
14	18,2	0,643	0,037	0,0238	765,00
15	18,5	0,690	0,037	0,0255	724,64
16	19,0	0,734	0,037	0,0272	699,61
17	19,5	0,788	0,037	0,0292	656,81
18	20,0	0,830	0,037	0,0307	651,25
19	20,1	0,880	0,037	0,0326	617,32
20	20,9	0,925	0,037	0,0342	610,66
21	21,0	0,985	0,037	0,0364	576,21
22	21,1	1,020	0,037	0,0377	559,09
23	20,3	1,075	0,037	0,0398	510,37
24	21,8	1,120	0,037	0,0414	526,06
25	22,0	1,175	0,037	0,0435	506,04
26	22,2	1,216	0,037	0,0450	493,42
27	22,4	1,253	0,037	0,0464	483,16

Leyenda: Peso =W;

Altura del prototipo =H = 1 253 mm;

Altura medida =h; Altura cargada =h₁;

Ángulo de reposo = α ; Ángulo de caída= β

α : ; 1= 32°; 2=34°; 3= 35°;

β : ; 1= 53°; 2=52°; 3=55°.

Granulometría = ¾”

Si: volumen de pirámide: $V_{pi} = 1/3 (Bxh_1)$ $V_{pi} = 1/3 (0,037)(1,253) = 0,015454 \text{ m}^3$

$P_{Esp} = 1 438,00 \text{ Kg/m}^3$

$W = 1\,438,00 \text{ Kg/m}^3 \times 0,0155 \text{ m}^3$

$W = 22,289 \text{ Kg}$

$P = 22,2235/0,037 \text{ m}^2 = 602,41 \text{ Kg/m}^2$

Presión sobre la estructura = 602,41 Kg/m²

En esta Tabla N° 6, la última pesada es de 200 g mayor que la anterior y no se repite ninguna magnitud igual a la última pesada, por lo tanto estamos frente a una pirámide truncada; sin embargo, no conocemos el plano de truncamiento menor; no podemos deducir físicamente, pero sí matemáticamente el área menor de la pirámide truncada. Por lo tanto, en estos casos se debiera construir un prototipo de mayor altura para encontrar el vértice de la pirámide; pero ya podemos asumir que el material ha adoptado la forma de una pirámide porque, a partir de la pesada N° 24, la variación es de 200 g, por lo tanto asumiremos que el vértice del cono está muy cerca de 1,253 m del prototipo solo por este caso; de lo contrario, se tiene que construir un prototipo de 1,350 m.

Tabla N° 7. Procesamiento de la tercera medición de cargas con roca granulada de ¼" y 14% de húmeda. Registrado en el campo el día 21/10/13.

$\Phi = \frac{1}{4}"$ N°	W Kg	h ₁ m	A m ²	V m ³	Pe Kg/m ³
1	2,5	0,064	0,037	0,0024	1041,67
2	5,0	0,113	0,037	0,0042	1190,48
3	7,0	0,158	0,037	0,0058	1206,90
4	9,9	0,199	0,037	0,0074	1337,84
5	11,2	0,242	0,037	0,0090	1244,44
6	12,0	0,291	0,037	0,0108	1111,11
7	13,8	0,329	0,037	0,0122	1131,15
8	14,6	0,383	0,037	0,0142	1028,17
9	15,0	0,422	0,037	0,0156	961,54
10	15,2	0,465	0,037	0,0172	883,72
11	15,5	0,511	0,037	0,0189	820,11
12	15,6	0,559	0,037	0,0207	753,62
13	16,0	0,601	0,037	0,0222	720,72
14	17,0	0,659	0,037	0,0244	696,72
15	17,0	0,700	0,037	0,0259	656,37
16	18,0	0,749	0,037	0,0277	649,82
17	18,5	0,793	0,037	0,0293	631,40
18	18,6	0,826	0,037	0,0306	607,84
19	18,9	0,875	0,037	0,0324	583,33
20	19,0	0,916	0,037	0,0339	560,47
21	20,0	0,973	0,037	0,0360	555,55
22	20,1	1,021	0,037	0,0578	347,75
23	20,1	1,067	0,037	0,0385	522,08
24	20,1	1,113	0,037	0,0412	487,86
25	20,1	1,159	0,037	0,0429	468,53
26	20,1	1,208	0,037	0,0447	449,66
27	20,1	1,251	0,037	0,0463	434,13

Leyenda:

Peso = W;

Altura del prototipo = H = 1 253 mm;

Altura medida = h; Altura cargada = h₁;

Ángulo de reposo = α ; Ángulo de caída = β

α : ; 1= 31°; 2=33°; 3= 35°;

β : ; 1= 43°; 2=42°; 3=45°;

Granulometría = ¼" con 14% de humedad.

Si: volumen de pirámide: $V_{Pi} = 1/3 (Bxh_1)$ $V_{Pi} = 1/3 (0,037)(1,021) = 0,012592 \text{ m}^3$

$P_{Esp.} = 1\,338,00 \text{ kg/m}^3$

$W = 1\,338,00 \text{ kg/m}^3 \times 0,012592 \text{ m}^3$

$W = 16\,849 \text{ kg}$

$P = 16\,8849 \text{ kg}/0,037 \text{ m}^2 = 455,37 \text{ kg/m}^2$

Presión sobre la estructura = 455,37 kg/m²

Tabla N° 8. Procesamiento de la cuarta medición de cargas con roca granulada de ¼" y húmeda Registrado en el campo el día: 28/10/13.

$\Phi = \frac{1}{4}"$ N°	W Kg	h ₁ m	A m ²	V m ³	P _{Esp.} Kg/m ³
1	3,00	0,066	0,037	0,0024	1250,95
2	5,00	0,093	0,037	0,0034	1453,50
3	6,00	0,153	0,037	0,0057	1060,12
4	8,00	0,193	0,037	0,0071	1120,42
5	9,00	0,235	0,037	0,0087	1034,53
6	9,50	0,278	0,037	0,0103	922,33
7	10,00	0,335	0,037	0,0124	806,45
8	11,00	0,388	0,037	0,0144	763,89
9	11,50	0,419	0,037	0,0155	741,94
10	12,00	0,477	0,037	0,0176	681,82
11	13,00	0,515	0,037	0,0191	680,63
12	13,50	0,549	0,037	0,0203	665,02
13	14,00	0,605	0,037	0,0224	625,00
14	15,00	0,660	0,037	0,0244	614,75
15	17,00	0,700	0,037	0,0259	656,37
16	18,00	0,749	0,037	0,0277	649,82
17	18,50	0,793	0,037	0,0293	631,40
18	18,60	0,826	0,037	0,0306	607,84
19	18,90	0,875	0,037	0,0324	583,33
20	19,00	0,916	0,037	0,0339	560,47
21	20,00	0,973	0,037	0,0360	555,56
22	20,05	1,021	0,037	0,0378	530,42
23	20,08	1,067	0,037	0,0395	508,35
24	20,10	1,113	0,037	0,0412	487,86
25	20,10	1,159	0,037	0,0429	468,53
26	20,10	1,208	0,037	0,0447	449,66
27	20,10	1,251	0,037	0,0463	434,13
28	20,10	1,253	0,037	0,0464	433,19

Leyenda:

Peso = W;

Altura del Prototipo = H = 1 253 mm;

Altura medida = h; Altura cargada = h₁;

Ángulo de reposo = α ; Ángulo de caída = β

α : ; 1= 31°; 2=33°; 3= 35°;

β : ; 1= 43°; 2=42°; 3=45°;

Granulometría = ¼" con 20% de humedad.

Si: volumen de pirámide: $V_{Pi} = 1/3 (Bxh_1)$ $V_{Pi} = 1/3 (0,037)(1,113) = 0,013727 \text{ m}^3$



Figura N° 3. Llenado paulatino por tramos del prototipo y registro de las pesadas de arena seca de $\phi = \frac{1}{4}$.



Figura N° 4. Mediciones previas y registro de las primeras pesadas de grava $\phi = \frac{3}{4}$ ".



Figura N° 5. Continuación del registro de las pesadas de grava $\phi \frac{3}{4}$ ", eliminando la formación de talud con el listón largo de madera.



Figura N° 6. Registro de las pesadas de arena de $\phi \frac{1}{4}$ " eliminando la formación de talud.



Figura N° 7. Llenado paulatino en el prototipo a volúmenes constantes para el registro de las pesadas de arena de $\phi \frac{1}{4}$ " eliminando la formación de talud.



Figura N° 8. Culminación con el llenado del prototipo con registro total de las pesadas de arena de $\phi \frac{1}{4}$ " eliminando la formación de talud.

$$P_{\text{Esp.}} = 1\,454,00 \text{ kg/m}^3$$

$$W = 1\,454,00 \text{ kg/m}^3 \times 0,013727 \text{ m}^3$$

$$W = 19,959 \text{ kg}$$

$$P = 19,959 \text{ kg} / 0,037 \text{ m}^2 = 539,43 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Presión sobre la estructura} = 539,43 \text{ kg/m}^2$$

En este caso, visualizando la Tabla N° 7 también, vemos que a partir de la pesada N° 22 ya no se registra incremento de peso respecto a las anteriores; por lo tanto, la carga se habría convertido en una pirámide, debido a la sección rectangular del prototipo. Si este prototipo hubiera tenido una sección circular, estaríamos frente a un cono, corroborando la ley de Coulomb. Asimismo en este caso tenemos una pirámide de una altura menor que la de la tabla N° 8 por su limitada humedad del 14% que favorece la cohesión entre las partículas, causado por la película de tensión superficial del agua.

En el tramo 2 de la tabla N° 8 se ha obtenido el peso específico de $1\,454,00 \text{ kg/m}^3$, con un área de la base de $0,037 \text{ m}^2$. Como se puede ver en esta tabla N° 8, se asume que el material ha adoptado la forma de una pirámide porque a partir de la pesada N° 24 y la altura 1,113 ya no registra incremento de carga, pese a continuarse la alimentación de agregados en el prototipo. También vemos que a partir de la pesada N° 21 el incremento de peso es muy poco significativo; por lo tanto, la carga se habría convertido en una pirámide, debido a la sección rectangular del prototipo. Si este prototipo hubiera tenido una sección circular, también estaríamos frente a un cono, corroborando la ley de Coulomb.

En este caso tenemos una pirámide de una altura mayor que la anterior, por su mayor humedad (6% más que la semana anterior, debido a la intensidad de la lluvia) con 20%, que todavía favorece la cohesión entre las partículas, por el mismo motivo que la película de tensión superficial del agua une las partículas finas de sólidos.

4.1. Aplicación práctica en explotación de minas

En el sistema de minado subterráneo convencional y con rampas, se puede aplicar para determinar la carga por unidad de área o la presión ejercida por las rocas colapsadas sobre elementos de sostenimiento; y con esta información, efectuar el cálculo de estructuras de madera, acero, o concreto armado. Asimismo, en cualquier sistema de minado, se puede aplicar en el cálculo de estructuras para la construcción de tolvas, determinando la presión ejercida por el mineral sobre las caras de la tolva.

También es aplicable en el cálculo de la inclinación de los echaderos de mineral (Ore Passes), para determinar la forma y ángulos de taludes de las bolsas de mineral in situ (Ore Pocket).

Con estos parámetros se calcularán, además, los ángulos críticos de caída del mineral por las chimeneas perforadas en roca; de manera que la energía cinética de la caída del mineral, debido a ángulos demasiado obtusos, producen desgastes, forman zanjas, donde se atracan los fragmentos mayores, y producen atoros. Igualmente, si el

ángulo de caída es demasiado agudo, el mineral bajará lentamente también y producirá atoros por acumulación de los finos. Los problemas generados en las operaciones mineras precisamente se originan por falta de prevención calculada en función de los parámetros de ingeniería.

V. CONCLUSIONES

1. Una roca de subsuelo colapsada se asemeja a un suelo, porque, así como está, consta de tres fases: sólida, que es la sustancia rocosa; la fase líquida, que es el agua u otro líquido; y la fase gaseosa, que es el aire o cualquier gas, como el dióxido de carbono o el dióxido de azufre, etc. Estas fases son las causas de su inestabilidad y principalmente de los derrumbes.
2. Con el auxilio de un adecuado prototipo, se puede determinar con facilidad las cargas actuantes sobre una futura estructura de entibación, para atravesar el derrumbe a fin de normalizar el transporte en un túnel o una galería de mina. Si se logra diseñar el prototipo adecuado, teniéndose en cuenta las siguientes consideraciones: contenido de agua, la gravedad específica, la granulometría de la roca fragmentada naturalmente, formas de fragmentación, características de textura y estructura de los granos. El contenido de humedad es determinante para que pueda mejorar o empeorar su estabilidad; si la humedad se encuentra por debajo del 20%, favorece su estabilidad debido a la película de tensión superficial del agua.
3. Un prototipo de sección circular y construido de malla fina de acero puede dar mejores resultados en las mediciones de campo, debido a que el coeficiente de rozamiento del acero es conocido.
4. Al conocer las características físicas de las rocas colapsadas, podemos planificar rápida y adecuadamente la solución del problema de la normalización de las operaciones mineras o de ejecución de túneles.
5. En el procesamiento de la información de campo, se ha podido visualizar la formación del cono de rozamiento y sus dimensiones en función de las características físicas y geométricas de nuestro prototipo; habiéndose calculado las presiones que pueden ejercer sobre las estructuras de sostenimiento, según las tablas N° 5, $714,73 \text{ kg/m}^2$; N° 6, $602,41 \text{ kg/m}^2$ (debido al mayor tamaño de los fragmentos); N° 7, $455,37 \text{ kg/m}^2$, (debido al 14% de humedad); N° 8, $539,43 \text{ kg/m}^2$ (debido al 20% de humedad).

VI. AGRADECIMIENTOS

Mi especial reconocimiento al Vicerrectorado de Investigación, el Consejo Superior de Investigación y el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica, Geográfica y Civil, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, en la persona del Sr. Mag. Ing. Daniel Lovera Dávila, por el apoyo brindado a

mis investigaciones; asimismo, al señor doctor Ing. Carlos Francisco Cabrera Carranza, decano de nuestra facultad, por las facilidades incondicionales para hacer realidad esta investigación científico- tecnológica y su publicación. También no puedo soslayar mi gratitud a los miembros y colaboradores de mis proyectos de investigación, los ingenieros: Mario Fernando Cedrón Lassus, Pablo Antonio Núñez Jara, Elard Felipe León Delgado, Alfonso Alberto Romero Baylón, Gerardo Mendoza Delgadillo y Sósimo Fernández Salinas; por sus esfuerzos en cristalizar los estudios en el laboratorio de Mecánica de Fluidos y Ventilación de Mina de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Badillo, Juárez y Rodríguez, Rico.(2012). Mecánica de Suelos. Capítulo III: "Relaciones Volumétricas y Gravimétricas de los Suelos", pp: 51 a 161. Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores, Balderas 95, México, D.F.
2. De Sitter, L.U. (2006). Geología Estructural, Capítulo 21: "Capas contorsionadas, Causas de la contorsión", pp: 286 a 299. Editorial Omega S.A., Barcelona España.
3. Lewis, Robert S., (1967). Elements of Mining, chapter III: "The Support of Mine Excavations, pp: 40 a 71. Edit: John Wiley and Sons, Inc, New York, London, Sydney.
4. Osterman, W. (2007). Mecánica Aplicada al Laboreo de Minas, capítulo 1º: V. Rozamiento, pp: 82 a 89. Ediciones Omega, S.A., Casanova, 220, Barcelona, España.
5. Peurifoy, E.L.,(2006). Construction Planning, Equipment, and Methods, chapter 13: "Foundation Grouping", pp: 315 a 324. International student Edition, Mc Graw-Hill Book Company, Inc, New York, USA.
6. Sánchez, A. Matías. (2008). Ejercicios Resueltos de Geotecnia, Capítulo I: "Propiedades y Clasificación de los Suelos", pp: 3 al 14. Bellisco, Ediciones Técnicas y Científicas, Madrid España.
7. Stag - Zienkiewicz. (2008). Mecánica de Rocas en la Ingeniería Practica, Capítulo IX: "La mecánica clásica o de Medios Discontinuos en problemas de mecánica de Rocas", pp: 259 a 279. Editorial Blume, Barcelona, España.
8. Timoshenko, S. and Young. (2005). Engineering Mechanics, Chapter II: Guests Power on a Plain, pp: 41 a 47. Edit: McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, USA.
9. Vandewalle, Marc. (2005). Tunneling is an Art, chapter I: "Shotcreting Systems and Equipment", pp: 13 to 115. Edition NV Bekaert, Zvevegem, Belgium.
10. Vidal, V. (2006). Explotación de Minas, Tomo I: "Trabajos Mineros", Tercera Parte: "Sostenimiento", Capítulo I: "Terrenos Datos Teóricos", pp: 340 a 418. Ediciones Omega, Barcelona, España.