

Recibido 19/10/11

Aceptado

SOSTENIMIENTO ECONÓMICO Y SEGURO PARA EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS

ECONOMIC AND SAFE SUPPORT FOR UNDERGROUND EXCAVATIONS

F. Enrique Toledo Garay¹; Gerardo Mendoza Delgadillo; Tomas Gallarday B.

RESUMEN

El sostenimiento más económico y seguro hasta ahora aplicado en el Perú, es el puesto en práctica en la Mina Cobriza, denominado Sot-Fer. Este método de aplicación del concreto armado en túneles y labores mineras mediante el Gunitado o *Shotcrete*, es producto del trabajo de investigación, sustentado en el ACI 318-81 y en el análisis de estructuras en arcos presentados en los libros de Timoshenko (Tomo II, pp: 97-109) y Olivera López (pp: 127-139); habiéndose calculado las cargas de trabajo bajo las propuestas de Stagg (pp: 103-124 y 193-222) y Hock (pp: 183-201). El Sot-fer es totalmente distinto al NMA (nuevo método austriaco) aplicado con éxito en muchos países del mundo.

Este método de aplicación del concreto armado mediante el Shotcrete, es mucho más eficiente, de más bajo costo y con mayor versatilidad que el NMA para adaptarse a eventuales cambios de la mecánica de rocas que se presentan en las operaciones mineras, precisamente en la inserción del acero dentro de la masa de concreto.

Palabra Clave: Shotcrete reforzado con acero de construcción

ABSTRACT

The most economical and safe support so far applied in Perú is implemented in Cobriza mine, called Shot-Fer. This method of application of rein forcer concrete tunnels and mine workings by Shotcrete or Gunitite is a product of the research, based on the ACI 318-81 and the analysis of structures submitted arches Timoshenko books (Volume II, pp: 97-109) and Olivera Lopez (pp: 127-139); having calculated the workload under the proposal Stagg (pp: 103-124 and 193-222) and Hock (pp. 183-201). The Sho-Fer is quite different from NAM (new Austrian method) applied successfully in many countries.

This method of application of reinforced concrete by Shotcrete, is much more efficient, lower cost and with greater versatility than the NAM to adapt to any changes in rocks mechanics that occur in mining operations, precisely in the insertion steel within the concrete mass

Keyword: Steel construction reinforced Shotcrete

¹ Docentes de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor San Marcos.

E-mail: fenriquetoledog@hotmail.com; mendelling@hotmail.com; tgb2@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

La mina Cobriza, perteneciente al distrito de Coris de la provincia de Churcampa del departamento de Huancavelica, se ubica en el flanco izquierdo del valle profundo del curso del río Mantaro a 190 Km al S60°E² de la ciudad de Huancayo. Este importante yacimiento de cobre, plata y bismuto ocurre en un solo manto calcáreo reemplazado por sulfuros que yace entre dos estratos de pizarras intensamente plegadas y fracturadas. El manto es una roca muy competente con un RQD de 95 a 100³ cuando no están interceptadas por fallas y las rocas encajonantes son deleznable con RQD de 60 a 30. Los problemas de sostenimiento se generan cuando se desarrollan túneles paralelos a las galerías (By – Passes) y rampas en los hastiales en pizarra.

1.1. Planteamiento del Problema

Las secciones transversales de los túneles y las labores mineras se perforan con secciones transversales cada vez mayores, para dar cabida al equipo de gran envergadura montado sobre llantas, para extraer mayor cantidad de mineral para compensar sus bajas leyes, esto ha generado mayores problemas de sostenimiento, donde la madera y los arcos de acero cada vez se están haciendo menos usual debido a su inoperancia, vulnerabilidad a la colisión de las máquinas y la lentitud de su operación en el sostenimiento de los túneles y labores mineras. En la mina Cobriza, las labores de desarrollo tienen cuatro metros de altura por seis metros de ancho, los que desde el principio fue sostenido con concreto simple y algunas veces reforzado con malla de alambre; sin embargo en tramos cercanos a la superficie o adyacentes a otras labores mineras, como tajeos, chimeneas y rampas este tipo de sostenimiento era insuficiente, colapsando el techo y los flancos de roca pizarrosa, con el consecuente retraso en las operaciones y generando costos elevados de la producción.

1.1.1. Determinación del Problema

En construcciones civiles y en minería, es hartamente conocido la aplicación del concreto armado y el Sotcreting; inclusive, la aplicación del concreto armado con el Sotcrete, como el Nuevo Método Austriaco (NMA); sin embargo este método para sostener túneles mineros que tienen una duración eventual, es lento y costoso. En esta investigación, después de analizar las fuerzas actuantes sobre la estructura de soporte y encontrar que la estructura sólo requiere refuerzo para contrarrestar la fuerza cortante entre el arco de medio punto y los “estribos” (flancos verticales del túnel); se ha buscado la manera más rápida, segura y económica de ensamblar el refuerzo metálico a la aplicación con el Shotcrete.

1.1.2. Formulación del Problema

¿De que manera podemos aplicar una estructura de concreto armado de construcción rápida y económica para entibar las labores (túneles y rampas) desarrolladas en Pizarra?

²RIVERA, A. M. Y OTROS.1984. “Manto Cobriza Apreciaciones de su Forma Zoneamiento y Probables Relaciones con el Modelo Sedimentario”. *XXII Convención de Geología*. Editado por Centromín Perú S.A. La Oroya, Perú. P: 2 - 14.

³STAGG – ZIENKIEWICZ.1990. *Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica*. Editorial Blume, Rosario, 17 Madrid-5, España. p:28.

1.2. Objetivo

El objetivo de este trabajo de investigación fue encontrar la estructura de concreto armado de construcción más rápida y económica para soportar la roca suelta en los desarrollos en pizarra.

1.3. Hipótesis

La manera más rápida, segura y económica de construir una estructura arqueada de concreto armado para que el acero tome los esfuerzos cortantes y el concreto los de compresión es reforzando la aplicación del concreto con *Shotcrete* con arcos de acero corrugado de construcción ensamblados en sus calibradores.

1.4. Justificación

Este método investigado por nosotros en Perú y denominado Shot-Fer se justifica por ser seguro durante su ejecución (sin ningún accidente incapacitante ni fatal registrados), de fácil y rápida aplicación (1,80 m/Tarea, en secciones de 4m por 6m y 0,17m de espesor), más económica, en Cobriza a US \$ 355/m (30% menos que el NMA, 16% menos que el shotcrete con bulonado y 63% menos que los arcos de concreto armado con cerchas de acero estructural)

II. ANTECEDENTES

El Shotcrete o Gunitado, es un método de aplicación del concreto simple a superficies naturales (rocas y suelos) y artificiales (estructuras de concreto, acero y mampostería), con diferentes finalidades; lanzándolo con mucha fuerza mediante el aire comprimido para que se adhiera a la superficie lanzada y se compacte. Este procedimiento se efectúa con la ayuda de una maquinaria de lanzamiento fabricada específicamente para este fin. En la actualidad hay tres modalidades de aplicación del shotcrete, respecto al momento de mezclarse con el agua: la mezcla seca, la semihúmeda y la húmeda. Para la aplicación en techos de túneles la mezcla seca genera menor cantidad de desperdicios de material y la semihúmeda además disminuye la generación del polvo durante la aplicación.

El espesor de la aplicación del shotcrete está en función del ancho del túnel y no requiere refuerzo metálico si la carga genera una fuerza cortante de baja magnitud. Cuando aparecían grietas en la aplicación del Shotcrete desde el principio de la aplicación de este método de sostenimiento, se utilizaban refuerzos de malla de alambre y pernos de roca; pero para ejecutar esta operación se tenía que perforar la roca; el hecho de perforar en roca deleznable, ocasionaba graves accidentes incapacitantes y fatales y la destrucción del equipo, por este motivo se inventó el Nuevo Método Austriaco (NMA)⁴. Pese a la ponderación que hace Rivas de la Riega, este método, también aplicado en la mina Cobriza, es lento, costoso y sobre dimensionado en estructura de acero y concreto, en comparación con el método Shot-Fer.

⁴RIVAS DE LA RIEGA, J.L. 1991. Morteros y Hormigones Proyectados. Artes Gráficas Lill,S.A.-Alpedrete, 7-Madrid-7. España. Pp 111-113

III. MÉTODO Y MATERIALES

El método empleado en las investigaciones de ingeniería es el analítico deductivo, como en este, siguiendo los siguientes pasos sistemáticos: primero, con la determinación de las características mecánicas de la pizarra para evaluar la carga que podría soportar la estructura de soporte; segundo, al haberse determinado los planos de clivaje y la variación el eje ternario respecto al eje vertical de la labor⁵, se determinó el caso más crítico para generalizar los cálculos; tercero, con los flancos de rotura de la roca tangentes a la labor y la gravedad específica se determinó las cargas de trabajo que debía soportar la estructura; cuarto, con esta información se estudió los esfuerzos de la estructura, según los análisis propuestos en los libros de resistencia de materiales⁶ y análisis de estructuras⁷ para incrementar el espesor de la losa de concreto; o si el caso lo requiriera, para reforzar con arcos de acero corrugado de construcción; quinto, se estudió las alternativas de ensamblaje del refuerzo metálico; sexto, se analizó los ciclos de operación para calcular la productividad y los costos. Los materiales empleados en este estudio fueron los planos y las secciones geológicas, las muestras de roca colapsada para medir y orientar los ángulos de los cristales de roca pizarrosa y efectuar las proyecciones cristalinas con la utilización de la plantilla estereográfica de 5 cm de radio de Wulff⁸ y el goniómetro de contacto, levantándolas en los planos de las labores haciéndolas coincidir con sus ejes verticales para obtener las cargas de trabajo de las estructuras.

Tabla N°1. Relación Cemento / Árido para Shotcrete⁹

Usos	Resistencia a los 28 días en kg/cm ²	Mezcla en Volumen	Mezcla en Peso	Mezcla Resultante Insitu en peso
Taludes	200	1:6.5	1:6.0	1:4.1
Sección de Gran Espesor	230	1:5.5	1:5.0	1:3.6
Sección de Gran Espesor	240	1:5.0	1:4.5	1:3.5
Universal	250	1:4.5	1:4.0	1:3.2
Alta Resistencia	300	1:4.0	1:3.5	1:2.8
Alta Resistencia	360	1:3.4	1:3.0	1:2.0
Aplicaciones Refractarias	400	1:2.2	1:2.0	1:1.2

Tabla N° 2. Variación de las Relaciones entre Áridos, Cemento y Agua – Tabla de Studebaker

⁵HOCK,E and BROWN,E.T.1997.*Underground Excavation in Rock*. The Institution of Mine and Metallurgy, London, England, Chapter 7 pp:183-201

⁶TIMOSHENKO, S. 2 002. *Resistencia de Materiales*. Editorial Espasa-Calpe, S.A. Madrid España, pp: 97 -109

⁷ OLIVERA LOPEZ, ALFONSO. 2007. *Análisis de Estructuras*. Norgis Editores. México ,México, pp:105 - 123

⁸DANA- HURLBUT.2008. *Manual de Mineralogía*. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España, pp:31- 41

⁹Ivid, RIVAS DE LA RIEGA, J.L. 1991. *Morteros y Hormigones Proyectados*.pp:73 -75.

Modulo de Finura	Cemento / Árido (en peso)	Agua/Cemento (en peso)	% de Agua de los Áridos (en peso)
2.49 Áridos finos	1/3.5	0.54	20.0
	1/4.0	0.59	19.0
	1/4.5	0.65	19.5
	1/5.0	0.69	19.7
	1/6.0	0.80	20.5
2.96 Áridos medios	1/3.0	0.37	18.5
	1/3.5	0.48	17.2
	1/4.0	0.55	17.1
	1/4.5	0.57	15.8
	1/5.0	0.62	16.3
	1/6.0	0.68	16.5
3.26 Áridos gruesos	1/3.0	0.36	17.3
	1/4.0	0.44	15.0
	1/5.0	0.56	15.3
	1/6.0	0.65	15.0

Para el cálculo de estructuras de concreto se ha utilizado los lineamientos de ACI Code 318 - 81, expuestos en libro de Harry Parke¹⁰ y las proporciones de mezcla recomendados en las tablas 1 y 2 extraídos del libro de Rivas de la Riega.

IV. RESULTADOS

Después de haberse efectuado los cálculos de cargas de trabajo de la estructura de soporte, se obtuvo los siguientes resultados:

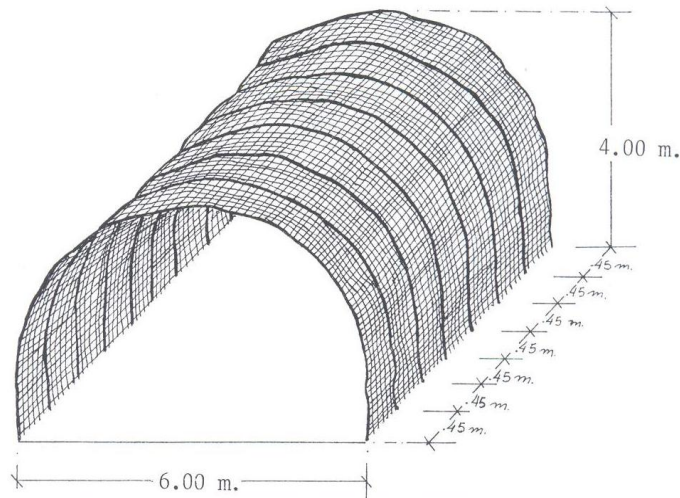
Ancho o luz de la estructura: 6 m; altura: 4 m; espesor total: 0,17 m; espesor de la primera capa de Shotcrete: 0,08 m; espesor del recubrimiento del refuerzo metálico o segunda capa de Shotcrete: 0,09 m, para que soporte el roce y colisión de las máquinas.

Características del refuerzo de acero:

$$A_s = N^{\circ} 5 \phi \frac{5}{8}'' @ 0,45 m; \text{ Malla de alambre } N^{\circ} 8; \text{ con cocada } 10 \text{ cm } x 10 \text{ cm.}$$

En la gráfico N° 1 se muestra el diseño de refuerzo de acero obtenido de los cálculos del estudio de investigación, pero lo novedoso es el ensamblaje de este refuerzo en las operaciones de Shotcreting, como lo veremos en el diseño de la parte operativa.

¹⁰ PARKER, HARRY y AMBROSE, JAMES. 2009. Diseño Simplificado de Concreto Reforzado. Limusa Noriega Editores, México D.F., México, pp: 131 – 153.



DISPOSICION TRIDIMENSIONAL DEL REFUERZO METALICO:

Fierro N° 5 = ϕ 5/8" Cada 0.45 m.

Malla de alambre N° 8; con cocada de 10 cm. x 10 cm.

0 1m 2m

Escala: 1/100

Figura N° 1. Disposición Tridimensional del Refuerzo metálico con acero corrugado de construcción y malla de alambre, después de la primera capa de Shotcrete

4.1. Operaciones para la Aplicación del *Shot Fer*

se obtuvo los siguientes resultados para ejecutar la operación, primero se aplica la primera capa de *Shotcrete*, que para el caso de Cobriza fue 8 cm, luego se colocan los calibradores de alambre N° 14, espaciados cada 45 cm, hundidos en una masa de cemento con aditivo acelerante sika en la proporción volumétrica de 2 a 1; con estos calibradores se amarra la malla de alambre N° 8 con "cocada" de 10cm X 10cm; de bajo de esta malla de alambre, se amarran las varillas corrugadas de construcción N° 5 o de 16 mm de diámetro ($\Phi = 5/8$ "), arqueados y traslapados, como se muestra en la figura N° 1; luego se aplica la segunda capa de *Shotcrete* de 9 cm de espesor, con lo que se logra un espesor total de concreto de 17 cm ó (6 11/16") para el caso de túneles de 6 m de ancho por 4 m de altura en roca deleznable.

V. DISCUSIÓN

La mina Cobriza es un yacimiento formado por un manto de sulfuros y silicatos ferro magnesianos, los que fueron reemplazados en calizas, este manto es muy competente; pero las rocas encajonantes son pizarras, cuya competencia al auto sostenimiento es muy variable, desde mediana hasta incompetente, especialmente cuando las labores atraviesan fallas y cuando es debilitada por la apertura de labores adyacentes. El desarrollo de las labores en pizarra es imprescindible con fines de acceso al yacimiento y los tajeos de explotación.

5.1. Comportamiento Mecánico de la Pizarra

Observando el comportamiento mecánico de la pizarra se determinó que se fractura mediante planos de clivaje, los que se exfolian en perfectos romboedros; cuyo eje ternario gira en el espacio en función al plegamiento de los estratos. La posición del eje ternario del romboedro está relacionada con el eje vertical de la labor, según la posición de ésta y respecto al plegamiento de los estratos, se encuentra el caso más crítico de carga. Esta posición del eje ternario del romboedro respecto al eje de la labor creará diferentes condiciones de carga sobre la estructura de soporte, pero la condición más desfavorable se manifiesta cuando el eje ternario del romboedro coincide con el eje de la labor; con esta posición, la estructura de diseño tendrá que resistir la máxima carga, siendo ésta la carga de diseño.

5.2. Criterios para el Análisis de Estructuras

Se puede aplicar dos criterios para analizar y calcular las estructuras de concreto armado aplicados con el método Shot-Fer.

5.2.1. Criterio del Arco Parabólico

Si la labor tiene una sección semejante a un arco parabólico y no se han encontrado fallas que podrían deformar la sección, se aplicará el análisis de la estructura de un arco parabólico hiperestático articulado en los apoyos. Aplicando el segundo teorema de Castigliano para encontrar la intensidad, dirección y sentido de las reacciones, mediante la energía de deformación; se demuestra que estos arcos tienen un momento flexionante igual a cero quedando las fuerzas cortantes en los puntos intersección del arco de medio punto con los flancos rectos del túnel.

5.2.2. Criterio de Pórticos

En el caso de que la sección de la rampa o el túnel haya sido deformada, se empleará el criterio de los pórticos cargados en la Trave y los Postes, según cada caso presentado en un determinado tramo de una labor minera. Como las condiciones son muy diversas no lo desarrollaremos como ejemplo, ya que el problema consistirá sólo en calcular y graficar el diagrama de los momentos de flexión y de corte para cada caso particular y aplicar el cálculo de vigas y columnas de concreto armado.

5.3. Cálculo de las Cargas Aplicadas a la Estructura

Previamente se dibuja a escala la sección transversal del túnel, que debe tener una línea sinuosa punteada, sobre la sección diseñada, de 6 m de ancho ($a = 6$ m) y 4 m de altura ($h = 4$ m); el radio de curvatura del techo es de 3 m ($R = 3$ m = $a/2$) y las partes rectas laterales del túnel o la rampa es de 1 m ($h' = h - R = 4$ m - 3 m = 1 m); la línea continua sinuosa es la sección real de la labor, debido a la sobre rotura de las explosiones en su avance. Siendo (p') la distancia entre A y B, denominado perímetro de diseño o *intrado* del arco y (p) la distancia sinuosa entre los puntos: A, D, E', G y B, denominado el perímetro real o *extrado* del arco, o también de recubrimiento con *Shotcrete*, $p = (\delta / \delta') p'$, siendo δ el promedio de mediciones del contorno con cinta de lona cada 50 m de avance de la labor, se obtiene la siguiente expresión matemática para el cálculo estructural y el de los materiales:

$$p' = \pi R + 2h' = \pi \left(\frac{a}{2} \right) + 2 \left(h - \frac{a}{2} \right) = 2h + \frac{a}{2} (\pi - 2) = 2h + \frac{a}{2} (3,1416 - 2) = 2h + 0,5708(a)$$

Reemplazando valores para $a = 6$ m; $h = 4$ m y $\delta = 1,25$:

$$p = (1,25) [2(4) + 0,5708(6)] = 1,25(8 + 3,4248) = 1,25(11,4248) = 14,28 \text{ m}$$

Tangente al contorno sinuoso de la labor se dibuja un fragmento de pizarra según los planos de partición romboédrica o de clivaje, para representar la inestabilidad. Mediante el planímetro o aplicando geometría elemental plana, se calculan por separado las áreas achuradas en el techo y los costados de la labor, estas áreas se multiplican por una unidad de longitud, que para el caso del Shot-Fer se multiplicó por 0,45 m debido a que esta longitud es el espaciamiento ($s = 0,45$ m) del refuerzo metálico lo mismo que el ancho de la losa ($b = 0,45$ m).

$$\text{Área del Techo} = 6,330 \text{ m}^2$$

$$\text{Áreas laterales} = 1,191 \text{ m}^2$$

Cálculo del peso de los Prismas por unidad de longitud:

$$\text{Techo} = P_T = 6\,330 \times 0,45 = 2\,848,50 \text{ m}^3$$

$$\text{Laterales} = P_{LA} = 1\,191 \times 0,45 = 0,5360 \text{ m}^3$$

Peso de los prismas: Siendo el peso específico de la pizarra:

$$\text{Peso específico de la pizarra de Cobriza} = P_e = 3,00 \text{ t/m}^3$$

$$\text{Carga en el techo} = P_T = 2\,848,5 \times 3 = 8\,545,50 \text{ kg}$$

$$\text{Cargas laterales} = P_{LA} = P_{LB} = (0,5360) 3 (\text{sen } 55^\circ) = (0,5360) 3 (0,81915204) = 1,317 \text{ kg.}$$

5.3.1 Calculando la Carga Uniformemente Repartida Sobre el Arco

Sabemos que para un arco de 6m de luz o ancho de labor y 4m. de flecha (f) o altura de labor el perímetro de diseño p' es igual a 11,42 m, siendo este el intrado del arco y el perímetro real o rugoso p es igual a 14,28, el extrado del arco.

Entonces la carga de la pizarra será:

$$W_1 = \frac{P_T + 2(P_L)}{p'} = \frac{8,5455 + 2(1,317)}{11,42} = \frac{8,5455 + 2,634}{11,42} = \frac{11,179}{11,42} = 0,9789 \text{ t/m}$$

5.3.2 Calculo del Peso Propio de la Losa

Esta carga se calcula multiplicando el espesor de la losa: $e = \frac{L}{35} = 0,17m$ por el espaciamiento ($s = 0,45$) del refuerzo metálico y por el peso específico del concreto ($Pe = 2,40$): $W_2 = 0,17 \times 0,45 \times 2,40 = 0,1836 \text{ t/m}$

5.3.3 Carga Total

Es la suma de estas dos cargas: $W' = W_1 + W_2 = 0,9789 + 0,1836 = 1,1625 \text{ t/m}$.

5.3.4 Carga de Diseño

La carga de diseño es la fuerza uniformemente repartida para calcular las dimensiones de la estructura, ésta es la suma de la carga muerta (W') o peso muerto por unidad de longitud en el intrado del arco, más las cargas dinámicas (W''), causadas por la vibración de los disparos y las filtraciones de agua; que para este caso se ha considerado el 50% de la carga muerta ($W'' = 0,50 W'$):

$$W = W' + W'' = W' + 0,50 W' = 1,50 W' = 1,50 (1,1625) = 1,744 \text{ t/m}$$

5.4. Análisis Estructural del Arco

Para calcular la estructura de concreto armado, se requiere encontrar la máxima fuerza cortante (V_u) y la máxima carga axial (N_u); para lo cual debemos encontrar antes las componentes verticales V_A y V_B ; así como, las componentes horizontales H_A y H_B en cada uno de los apoyos del arco. Como esta estructura es hiperestática, las componentes horizontales y verticales de las reacciones en los apoyos: H_A , H_B , V_A , V_B . Vemos que las incógnitas son cuatro; por lo tanto, también las ecuaciones tienen que ser cuatro:

$$1) \sum F_x = 0; H_A + H_B + P'_L \cos 55^\circ - P''_L \cos 55^\circ = 0; H_A = -H_B$$

$$2) \sum F_y = 0; V_A + V_B - P_T - P'_L \text{sen} 55^\circ - P''_L \text{sen} 55^\circ = 0$$

Reemplazando términos y resolviendo:

$$V_B = P_T + 2(P'_L \text{sen} 55^\circ) - V_A = 8,545 + 2[1,317(0,8192)] - V_A = 10,703 - V_A$$

$$V_B = 10,703 - V_A$$

3ª Ecuación: suma de momentos respecto al punto B del apoyo del arco, referido a la figura N° 1; en este caso, los brazos de momentos $m' = 4,40 \text{ m}$ y $m'' = 0,30 \text{ m}$, se midieron con el escalímetro en el plano de la referida figura: $\sum M = 0$.

$$V_A(L) - P_T\left(\frac{L}{2}\right) - P'(m') - P''(m'') = 0 \rightarrow V_A = \frac{8,545(3,00) + 1,317(4,40) + 1,317(0,30)}{6,00}$$

$$V_A = 5,31 \text{ t} \dots\dots\dots V_B = 5,39 \text{ t}$$

4^{ta} Ecuación: se obtiene aplicando el segundo teorema de Castigliano que dice: “La derivada parcial, con respecto a una carga de trabajo de deformación (U), producido por un sistema de cargas del cual forma parte la carga que se trata (H_A) es igual a cero”.

$$\frac{dU}{dH_A} = 0 ; \dots(1); \text{ Referido a la 49, vemos que si analizamos el arco parabólico en las}$$

coordenadas del punto D, o cualquier otro punto tendremos: $(X')^2 = K ; \dots\dots\dots(2).$

$$\text{En el eje del arco tendremos: } X' = \frac{L}{2} ; \quad Y' = f ; \quad K = \frac{L^2}{4f}$$

$$\text{expresión tendremos: } \left(\frac{L}{2} - X\right)^2 = \frac{L^2}{4f}(Y) \text{ Despejando (Y) tendremos:}$$

$$Y = 4f \left(\frac{X}{L} - \frac{X^2}{L^2} \right); \dots\dots\dots (3)$$

Tomando el momento estático respecto a la luz del arco, que es el de flexión producida por las fuerzas que se encuentran a la izquierda del punto (E) o el eje del arco:

$$M_{est} = W \left(\frac{l}{2} \right) (X) = \frac{WX^2}{2} ; \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{El trabajo producido por la deformación es: } U = \int_A^B \frac{M^2 ds}{E I} = 0 ; \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{Reemplazando la ecuación (5) en la (1), tenemos: } \frac{dU}{dH_A} = \int_A^B \frac{M \partial}{E I dH_A} = 0 ; \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{Tomando momentos respecto al punto (E) del arco tendremos: } M_E = H_A Y - M_{est.}; \dots (7)$$

$$\text{Reemplazando (7) en (6): } \frac{dU}{dH_A} = H_A \int_A^B Y^2 ds + \int_A^B M_{est.} Y ds = 0 ; \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{Puesto que: } \frac{\partial M}{\partial H_A} = Y ; \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{Despejando obtenemos: } H_A = \frac{\int_A^B M_{est.} Y ds}{\int_A^B Y^2 ds} ; \dots\dots\dots (10)$$

Como: $H_A = H_B = H$; Reemplazamos ésta expresión en la ecuación (10) y obtenemos:

$$H = \frac{\int_A^B \left(\frac{WL}{2} X - \frac{WX^2}{2} \right) 4f \left(\frac{X}{L} - \frac{X^2}{L^2} \right) dX}{\int_A^B 4f \left(\frac{X}{L} - \frac{X^2}{L^2} \right)^2 dX} ; \dots\dots\dots (11)$$

Resolviendo y reemplazando términos:

$$M_x = \frac{WL}{2}X - \frac{WX^2}{2} - \frac{WL^2}{8f} \left(4f \frac{X}{L} - \frac{X^2}{L^2} \right) = \frac{WLX}{2} - \frac{WX^2}{2} - \frac{WLX}{2} + \frac{WL^2}{2}; \dots\dots\dots (12)$$

La ecuación (14) demuestra que en el arco no hay momento de flexión. La estructura quedará solamente sujeta a cargas axial (N_D) y cortante (V_D).

5.5. Determinación de cargas axiales: para determinar éstas cargas bastará multiplicar la suma de las cargas verticales por el seno del ángulo α y la componente horizontal de la reacción por el coseno del mismo ángulo, correspondiente al punto de estudio, así tendremos:

5.5.1. Cargas axiales en un determinado punto (D):

$$N_D = \left(\frac{WL}{2} - WX \right) \text{seno } \alpha + H_A \text{ cos } \alpha$$

Para: $X = 0,45 \text{ m}$ y $\alpha = 45^\circ \rightarrow \text{seno } 45^\circ = 0,7071$ y $\text{cos } 45^\circ = 0,7071$

$$N_D = W \left(\frac{L}{2} - X \right) \text{seno } \alpha + H_A \text{ cos } \alpha = 1,744 \left(\frac{6}{2} - 0,45 \right) 0,7071 + 1,962(0,7071) = 4,532 \text{ t}$$

Cuando $N_D = H_A$; el punto (D) se encuentra en el apoyo, entonces: $X = 0$ $\alpha = 90^\circ$

$$N_u = 1,744 \left(\frac{6}{2} - 0 \right) 1 + 1,962(0) = 5 \text{ 232 kg}$$

La máxima carga axial N_u se encuentra en la corona del arco, con la que se efectuará el diseño de la estructura de sostenimiento: $N_u = 5 \text{ 232 kg}$

5.5.2. Determinado de la fuerza cortante

Para calcular éstas fuerzas bastará multiplicar la suma de las cargas verticales por el coseno del ángulo α y las componentes horizontales de la reacción por el seno del mismo ángulo, correspondiente al punto de estudio (D), así tendremos:

$$V_D = \left(\frac{WL}{2} - WX \right) \text{Cos } \alpha + H_A \text{ seno } \alpha ; \quad \text{Se llega a calcular la máxima fuerza cortante en un}$$

punto tal que: $X = 0,45 \text{ m}$ y $\alpha = 45^\circ$

$$V_D = 1,744 \left(\frac{6}{2} - 0,45 \right) 0,7071 + 1,962(0,7071) = 4,532 \text{ t} = 4 \text{ 532 kg}$$

La máxima fuerza cortante V_u está a 45° del foco, respecto a la horizontal, con esta fuerza se efectuará el diseño: $V_D = V_u$; $\rightarrow V_u = 4 \text{ 532 kg}$

5.5.3. Diseño del concreto armado

Los cálculos se inician con el diseño de la mezcla de agregados, luego con el dimensionamiento de la losa y el refuerzo metálico.

5.5.4. Cálculo de las dimensiones de la losa y del refuerzo metálico

Con fuerzas calculadas $V_n = 5\,223$ kg y $V_u = 4\,532$ kg se puede entrar en las fórmulas del ACI considerando que:

$$e = \frac{\text{claro}}{35} = \frac{600\text{cm}}{35} = 17\text{cm}: \dots\dots\text{siendo } d = e - i = 17 - 5 = 12 \text{ cm.}$$

$i = 5$ cm recomendado por el ACI para el recubrimiento, pero para proteger del rozamiento de las máquinas incrementaremos a 9 cm durante la ejecución.

$s = b$; o sea espaciamiento = ancho de losa: $\dots s = b = 0,45 \text{ m.} = 45 \text{ cm.}$

$A_g = \text{Área transversal de la losa:} \dots\dots A_g = b(e) = 45 \times 17 = 765 \text{ cm}^2$

Formulas A.C.I. 318 para Cascarones de concreto: esfuerzo de corte que toma el concreto:

$$v_c = 0,50\sqrt{f'_c} (1 + 0,007) \frac{N_u}{A_g} = 0,5\sqrt{280} \left(1 + 0,007 \frac{5\,232}{756} \right) = 8,77 \text{ kg/cm}^2$$

1) Esfuerzo de corte que toma la estructura siendo $\Psi = 0,7$ el factor de reducción de capacidad de

$$\text{carga para cascarones: } v_u = \frac{V_u}{\Psi(b)(d)} = \frac{4\,532}{0,7(45)(12)} = 12 \text{ kg/cm}^2$$

2) Calculando el área de refuerzo metálico:

$$A_s = \frac{(v_u - v_c)(b)(s)}{f_y} = \frac{(12,00 - 8,77)(45)(45)}{2,800} = 2,34 \text{ cm}^2$$

3) Buscando los diámetros requeridos del refuerzo metálico:

La malla de alambre # 8 en 45 cm tiene 5 fibras de $0,13 \text{ cm}^2$ de área transversal cada uno, entonces:

$$A_s, \text{ de la malla de alambre} = 5(0,13) = 0,65 \text{ cm}^2$$

$$A_s \text{ de la varilla de refuerzo} = 2,38 - 0,65 = 1,68 \text{ cm}^2$$

$$\text{Varilla N}^\circ 5 \text{ tiene: } A_s = 2,00 \text{ cm}^2, \quad \phi = 5/8''$$

$$\text{Varilla N}^\circ 4 \text{ tiene: } A_s = 1,29 \text{ cm}^2, \quad \phi = 1/2''$$

Se debe escoger el mayor:

1 varilla N° 5 de $\phi 5/8'' @ 45 \text{ cm.}$

$$\text{Total } A_s = 2.00 + 0.65 = 2,65 \text{ cm}^2$$

4) Cálculo del traslape del acero corrugado: $t = 30(\phi) = 30 \times 1,6 = 48 \text{ cm}$

5) Cálculo el recubrimiento o la segunda capa de shotcrete:

$$i = 2 \phi + 5,8 = 2(1.6) + 5,8 = 3,2 \text{ cm.} + 5,8 = 9$$

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El Shotcroete reforzado con acero de construcción o Shot-Fer es un método de sostenimiento seguro, aplicable en labores subterráneas de pequeña o gran sección transversal y puede soportar cargas tanto más que un arco de concreto armado con alma de cerchas de acero estructural reforzado con acero de construcción y concreto vaciado por métodos tradicionales y de similares dimensiones; dependiendo de las condiciones de diseño para cada caso.
- El método Shot-Fer permite reparar y reforzar la estructura de soporte, cuantas veces aparezcan fisuras en la losa, aplicando capas superpuestas de refuerzo metálico y Shotcrete, si en los cálculos no se consideraron parámetros de causas naturales de difícil evaluación.
- El método Soht-Fer se aplicó en la mina Cobriza cotidianamente en tres frentes de desarrollo en pizarra a la vez, con resultados óptimos desde el punto de vista estructural, económico, operacional y sin registrar accidentes incapacitantes; inclusive para pasar y sostener labores derrumbadas.
- El método Shot-Fer tiene las siguientes ventajas sobre el Shotcrete combinado con el bulonado con diferentes pernos de roca: no ha registrado accidentes fatales e incapacitantes por no requerir la perforación en rocas deleznable como para la colocación de pernos de roca; es 20% por metro lineal de avance más barato que el Shotcrete bulonado; no requiere de máquinas costosas y perforadoras como el bulonado.
- El método Shot-Fer tiene las siguientes ventajas sobre los arcos de concreto armado vaciado en encofrados con cerchas: es de fácil y rápida ejecución; se utiliza menor cantidad de equipo, personal, herramientas y materiales por metro de avance, no requiere de bomba de concreto, no requiere de desquinches para ampliar la sección a fin de introducir las cerchas, la acción portante del Shot-Fer es inmediata; por todo esto, los arcos de concreto vaciado cuesta 2,7 veces más que el Shot-Fer.
- El método Shot-Fer tiene los siguientes inconvenientes: se requiere de una máquina de aplicación de Shotcrete y el lugar de trabajo requiere de regular a buena ventilación.
- La aplicación de Shot-Fer es recomendable para estabilizar y sostener cualquier tipo de roca deleznable, tanto en la apertura de nuevas labores como para pasar y sostener derrumbes.

VII. AGRADECIMIENTOS

Al vicerrectorado de Investigación que través del Consejo Superior de Investigación por haber dado las pautas para mejorar las publicaciones, a la comisión de edición por su tesonera dedicación en mejorar la calidad de las publicaciones.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. DANA- HURLBUT, (2008). *Manual de Mineralogía*. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España, pp:31- 41
2. HOCK,E and BROWN,E.T. (1997).*Underground Excavation in Rock*. The Institution of Mine and Metallurgy, London, England, Chapter 7, pp: 183-201.
3. OLIVERA LOPEZ, ALFONSO. 2007. *Análisis de Estructuras*. Norgis Editores. México, México, pp:105 – 123.
4. PARKER, HARRY, 1996. *Diseño Simplificado de Concreto Reforzado*. Editorial Limusa, S.A., de C.V. Mexico D.F.
5. RIVAS DE LA RIEGA, J.L. 1991. *Morteros y Hormigones Proyectados*. Imprime: Artes Gráficos Lillo, S.A.-Alpedrete,7 .Madrid España. pp: 73 -75 y 83 -113.
6. RIVERA, A. M. Y OTROS.1984. “Manto Cobriza Apreciaciones de su Forma Zoneamiento y Probables Relaciones con el Modelo Sedimentario”. *XXII Convención de Geología*. Editado por Centromín Perú S.A. La Oroya, Perú. P: 2 - 14.
7. STAGG – ZIENKIEWICZ.1990. *Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica*. Editorial Blume, Rosario, 17 Madrid-5, España. p:28.
8. TIMOSHENKO, S. 2 002. *Resistencia de Materiales*. Editorial Espasa-Calpe, S.A. Madrid, España, tomo II, pp: 97-109.