



Análisis técnico-económico del sostenimiento con ladrillos en los túneles populares del municipio de Moa*

Christiaan Tangeni Omwene Hilunduta

Carrera: Ingeniería en Minas.

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: En el trabajo se realiza un análisis técnico-económico de la fortificación de ladrillos empleada en el sostenimiento de los túneles populares del municipio de Moa para demostrar su efectividad. Se analizaron los diferentes materiales y se comprobó que el sostenimiento con el empleo de ladrillos en la bóveda resulta menos costosa que la del hormigón prefabricado.

Palabras clave: Túnel; ladrillo; análisis técnico económico.

Technical and economic assessment of tunnel's brick lining in the municipality of Moa

Abstract: This work consists of a technical and economic assessment of the bricks installed to support the existing tunnels in Moa to ensure their effectiveness. The different materials of construction were analyzed. The results indicated that the alternative of using bricks to build the vaults is more cost efficient than that of prefabricated concrete.

Key words: tunnel; brick; technical and economic assessment.

Introducción

La construcción de túneles populares en Cuba surge como resultado de las orientaciones del Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz al pueblo revolucionario, de construir, en tiempo de paz, túneles populares en toda la nación con el propósito de garantizar su protección y defensa.

Para la elección de los sostenimientos de excavaciones subterráneas de pequeña sección influenciada por la acción sísmica, Mondejar (2001) propone una metodología partiendo de que la magnitud de las cargas que provocan los sismos en las excavaciones pueden ser calculadas a partir de considerar el campo de tensiones generado como un campo de tensiones cuasiestático de tensiones normales y tangenciales.

Cartaya (1994) utilizó unas expresiones para determinar la fortificación de hormigón monolítico en la bóveda y de piedra en la pared. Estas expresiones fueron de gran aporte para este trabajo, ya que los ladrillos en la bóveda forman un sistema que se comporta como hormigón monolítico.

Caracterización de los procesos tecnológicos de la construcción de los túneles de Moa

Durante la construcción de túneles se ejecutan las siguientes operaciones:

1. Preparación del terreno: La preparación del terreno consiste en la eliminación de todos los obstáculos que se encuentren dentro del área destinada a la realización de la obra y que puedan entorpecer los trabajos ejecutados anteriormente, consiste también en la ubicación del lugar donde irán tanto los materiales de la obra como el escombros. También garantiza el terreno donde se mezclarán o donde se preparará el hormigón y demás. Para el desarrollo de esta actividad se utilizan medios manuales y mecanizados tales como, machetes, picos, palas, buldócer y otros.

2. Arranque de la roca: El arranque de las rocas se realiza de forma manual y de forma mecanizada:

Para la forma manual se emplean picos y barretas de excavación, cuando las rocas son de baja fortaleza o tierra. Por ser esta propensa al derrumbe, en estos casos solo se alcanza una longitud de avance de 1,2 m cada 2 días.

El arranque de forma mecanizada se realiza con martillos rompedores, se emplea en rocas de fortaleza media y alta, alcanzando un avance lineal de 1,3 m cada semana.

En la construcción de túneles en Moa para el arranque mecanizado se emplea actualmente el martillo picador del tipo MO-8. En la Tabla 1 se exponen sus principales características técnicas.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del martillo rompedor

MO-8	Parámetros
Peso en kg	8
Números de golpes por minuto	1 800
Energía de golpe kg/m	3,15
Presión de aire comprimido kg/m ²	5
Gasto de aire m ³ /min	1,2

3. Acarreo de escombros: El acarreo de escombros se realiza de forma manual. Este método de carga en la actualidad prácticamente no se emplea (en cuanto a trabajos ingenieriles de túneles), debido a que no es productivo, sólo se admite cuando el volumen a cargar es muy pequeño. El instrumento para esa actividad es la pala.

4. Transportación de la roca: Para el traslado del material desde el frente de trabajo hasta la salida de la excavación se cuenta con carretillas manuales. El material se carga con la pala manual a las carretillas obteniéndose una baja productividad.

La combinación arranque-cargay transportación complementan los procesos tecnológicos básicos. Para lograr el avance de la excavación, después de producirse el arranque con el martillo rompedor, se procede a la carga de las rocas a las carretillas que evacuará inmediatamente el material hasta la salida del túnel. Una carretilla se carga con 8 a 14 palas, dependiendo de los siguientes factores:

- Granulometría de la roca
- Volumen de la carretilla
- Estado de la carretilla
- Tamaño de la pala.

5. Ventilación: La ventilación de estas obras se realiza de forma natural aprovechando al máximo las condiciones del entorno local. Para ello se ubican pozos cada 50 y 100 metros con un diámetro 1,80 m que garanticen el caudal de aire necesario para las

condiciones del diseño previstas. Estos pozos se ubicarán previendo que el ángulo de incidencia de los vientos predominantes sean los más cercanos a los 90°. Aún con estos pozos en los frentes de trabajo no llega la ventilación necesaria por falta de circulación de aire.

6. Fortificación: En la construcción de cualquier obra subterránea, desde el punto de vista estructural, la fortificación es el factor fundamental para la estabilidad y la resistencia de la obra, ya que la misma se encarga de asimilar todas las tensiones existentes en el macizo rocoso, supliendo así todo el volumen de material extraído durante la excavación.

En las obras subterráneas para la defensa la fortificación debe también ser capaz de soportar las tensiones provocadas por los efectos de los medios de destrucción del enemigo garantizando así la actividad de la obra y cumpliendo los objetivos para los cuales fue diseñada.

Para los túneles populares de Moa se utilizan varios tipos de materiales; entre ellos, los más empleados son: arcos de hormigón prefabricado, bloques, ladrillos, cemento, arena, gravas, barras de acero, piedras o material de la excavación,

La preparación y colocación del acero es de gran importancia para armar el hormigón *in situ* empleado en la bóveda de las excavaciones.

Tabla 2. Normas para la colocación de acero en hormigón insitu, para los trabajos sostenimiento

Superficie de acero cm ²	Diámetro del acero en obra		Cantidad de barras de carga por m.i.	Espaciamiento en cm	Observaciones
	mm	pulgada			
13	25	1	3	25	Se emplea cuando no haya otro
12	19	5/8	4	19	Recomendables para entibar y cargar
12	16	3/4	5-6	16	Usos múltiples. Recomendable para soportes
10	12,5	1/2	7-8	12,5	La más útil y laborable. Uso múltiple
12,5	9	3/8	18-20 mazos de 2	10	Se emplea cuando no hay otro. 2 juntas
10	6,5 alambre	1/4	27-30 mazos	10	Se debe usar alambre como secundario. No recomendable
2,12 acero ale	7	0,28	6-7	14	Ideal por resistencia Laboreo y economía
2,28 acero ale	5	0,20	12-14 mazos de 2	14	Bueno y como secundario resistente económico

Dosificación: En dependencia de la dosificación establecida para la ejecución de las obras, el hormigón se clasifica en:

Hormigón de resistencia 50 kg/cm²

Hormigón de resistencia 100 kg/cm²

Hormigón de resistencia 150 kg/cm²

Hormigón de resistencia 175 kg/cm²

Hormigón de resistencia 200 kg/cm²

Hormigón de resistencia 250 kg/cm.

El hormigón de resistencia 200 kg/cm² se utiliza en los emboquillamiento, cerramientos e intercepciones. Su dosificación puede ser:

Cemento P-350 con materiales combinados de canteras.

Cemento P-350 con arena de Buenaventura. El hormigón mezclado con ese tipo de arena sólo se podrá emplear en cerramientos y pisos.

El hormigón de resistencia 50 kg/cm² se puede dosificar tanto con el cemento P-350 como el PP-250. Éste hormigón se utiliza en el macizo de los bloques prohibiendo seguir con el mortero de levante de muros.

El hormigón de resistencia 100kg/cm² se utiliza en la ejecución de los pisos. Puede también dosificarse con el cemento P-350 y el PP-250.

En las Tablas 3 y 4 se dan los indicadores de la dosificación empleada para la construcción de los túneles en Moa y en toda la provincia.

Tabla 3. Índices de consumo de materiales para la construcción

Denominación	Cemento (sacos)	Arena (carretillas)	Piedra (carretilla)
1 m ³ hormigón de resistencia (50 kg/cm ²)	1 (42,5kg)	3,16	4,25
1 m ³ hormigón de resistencia (75 kg/cm ²)	1 (42,5kg)	2,00	2,76
1 m ³ hormigón de resistencia (100 kg/cm ²)	1 (42,5kg)	1,44	1,94
1 m ³ hormigón de resistencia (150 kg/cm ²)	1 (42,5kg)	1,00	1,36
1 m ³ hormigón de resistencia (175 kg/cm ²)	1 (42,5kg)	0,83	0,88
1 m ³ hormigón de resistencia (200 kg/cm ²)	1 (42,5kg)	0,72	0,98
1 m ³ hormigón de resistencia (250 kg/cm ²)	1 (42,5kg)	0,52	0,77

Tabla 4. Indicadores sobre la dosificación a emplear en la construcción de obras

No.	Actividades	Dosificación		
		Cemento	Arena	Piedra
1	Levantado muro de bloques	1	3	--
2	Levantado muro de ladrillos	1	3	--
3	Colocación de cimbra	1	3	--
4	Colocación de Zapata (2,00 Mpa)	1	2	2,5
5	Fundición de cerramiento (2,00 Mpa)	1	2	2,5
6	Cogida de junta	1	2	--
7	Reseña interior	1	3	--
8	Fundición de piso (50 kg/cm ² ;1	1	2	2,3
9	Rehinche	1	18	--

Operaciones auxiliares: Dentro de las operaciones auxiliares se encuentran: construcción de los bancos, pintado y señalización de los diferentes objetos de obras, dirección y sentido del desplazamiento interior de los refugiados, depósitos de agua y punto de comunicación, entre otras.

Iluminación: En condiciones subterráneas, para aumentar la seguridad del trabajo y la productividad, es indispensable una buena iluminación. Por las características de esas obras y la situación económica del país se utilizarán al máximo los medios y fuentes alternativas de energía. Para ello se tiene previsto el uso de faroles, generadores, lámpara de corriente directa y el aprovechamiento de la luz solar. La disposición de diversos elementos para la eliminación se realiza por el techo a todo lo largo de los ejes, de acuerdo a los parámetros establecidos en las normativas del MINFAR. A medida que el frente avanza, cada 10–20 m se va alargando la red eléctrica de alumbrado, colocándose las lámparas a la distancia que demande la situación.

Construcción de desagüe: El agua que llega a las excavaciones se elimina por gravedad a través de zanjas construidas en el piso de estas, con una cierta inclinación hacia el colector. La forma, las dimensiones y el material de fortificación de la zanja se eligen en dependencia de una serie de factores.

Magnitud del flujo del agua en la excavación

Propiedades de las rocas

Tipo de fortificación que se emplean en la excavación

Dimensiones de la excavación

Trabajos topográficos: Las excavaciones objeto de estudio no se ejecutan a través de un proyecto como está establecido. El control de estos trabajos debe ser realizado por

medio de la topografía minera, la cual, en primer término da, en las condiciones concretas, las direcciones de las distintas excavaciones para que estas sean laboreadas lo cual permite rectificar las desviaciones de lo que se ha planificado. Sin embargo, estos trabajos en la mayoría de los casos se realizan después de terminada la excavación, lo que constituye una deficiencia significativa.

Colocación de tuberías y cables: Las tuberías y los cables se instalan en las excavaciones, de forma que no afecten el movimiento normal del personal. En las excavaciones que permanecen sin fortificar los tubos se suspenden de clavijas metálicas que se fijan en barrenos de hasta 40 cm de profundidad.

Acondicionamiento: Consiste en dar cumplimiento a diferentes acciones para crear las condiciones indispensables que permitirán la estancia del personal en la obra por el tiempo que sea, bajo costo de las inversiones y afectaciones no significativas al medio ambiente.

Caracterización de los materiales

Ladrillo: Un ladrillo es una pieza cerámica, generalmente ortoédrica, obtenida por moldeado, secado y cocción a altas temperaturas de una pasta arcillosa, cuyas dimensiones suelen rondar entre 24 x 12 x 6 cm. Se emplea en albañilería para la ejecución de muros, tabiques, tabicones, etc. En los túneles del municipio se emplean para la construcción de los bancos y para el sostenimiento de la bóveda del techo de la excavación.

La arcilla con la que se elaboran los ladrillos es un material sedimentario de partículas muy pequeñas de silicatos hidratados de alúmina, además de otros minerales como el caolín, la montmorillonita y la illita. Se considera el adobe como el precursor del ladrillo, puesto que se basa en el concepto de utilización de barro arcilloso para la ejecución de muros, aunque el adobe no experimenta los cambios físico-químicos de la cocción. El ladrillo es la versión irreversible del adobe, producto de la cocción a altas temperaturas.



Figura 1. Nomenclatura de las caras de un ladrillo.

Su forma es la de un prisma rectangular, en el que sus diferentes dimensiones reciben el nombre de soga, tizón y grueso, siendo la soga su dimensión mayor. Así mismo, las diferentes caras del ladrillo reciben el nombre de tabla, canto y testa, respectivamente.

Existen diferentes formatos de ladrillos, por lo general de un tamaño que permita manejarlo con una mano. En particular, destacan el formato métrico, en el que las dimensiones son 24 x 11,5 x 5,25 / 7 / 3,5 cm (cada dimensión es dos veces la inmediatamente menor, más 1 cm de junta) y el formato catalán de dimensiones 29 x 14 x 5,2 / 7,5 / 6 cm, y los más normalizados que miden 25 x 12 x 5 cm. Actualmente también se utilizan, por su gran demanda dado su reducido coste en obra, medidas de 50 x 24 x 5 cm.

Bloques: Los bloques se construyen comprimiendo por vibración, de forma adecuada, una mezcla de arena, agua y cemento Portland en un molde, del que luego se extrae y deja fraguar el tiempo necesario, antes de su utilización, portando carga. Existen diferentes dimensiones y diseños de bloques de acuerdo al fabricante, aplicación particular, posición en la pared, ambiente de utilización, etc. y, en general, se corresponde a las normas o estándares de construcción de cada país.

En cuanto a las dimensiones estándares de los bloques, aunque varían de país a país, lo común es encontrar cuatro tamaños principales que son: bloque estrecho (10 x 40 x 20 cm), bloque normal (15 x 40 x 20 cm) y (20 x 40 x 20 cm), bloque ancho (25 x 40 x 20 cm) y bloque extra (30 x 40 x 20 cm).

Instalación: Hay muchos factores a tener en cuenta durante la construcción de paredes de bloques, no obstante el esquema del montaje es común para todas las paredes.

Durante el montaje, los bloques se colocan en filas usando una mezcla apropiada de arena y cemento (mortero), de forma tal que las uniones entre ellos queden alternadas de una fila a la otra, y nunca deben coincidir en dirección vertical. Estas uniones tienen menos resistencia mecánica que el cuerpo del bloque por lo que si se colocan de manera coincidente la pared con el tiempo terminaría agrietada verticalmente por esas uniones.

En el montaje de los bloques para confeccionar una pared es muy importante cumplir con las siguientes condiciones:

1. Las líneas de los bloques deben ser rectas o estar en concordancia con algún trazo preestablecido, sin zigzagueo que desluzcan y empeoren la calidad del trabajo.
2. Todas las líneas deben coincidir en un plano sin líneas o bloques salientes, en caso contrario la cantidad de estuco o repello para culminar la pared crece considerablemente para dar una buena terminación.
3. Las líneas y los bloques deben estar nivelados horizontalmente.
4. La pared una vez terminada debe estar nivelada verticalmente. Una pared inclinada disminuye considerablemente la resistencia portadora del sostenimiento.
5. El grueso del mortero de unión debe ser constante tanto en las uniones verticales como horizontales.

Según el tipo de material que los componen los bloques pueden ser:

Bloque termoarcilla

Bloque de hormigón

Bloque de concreto simple (siendo los dos primeros los más utilizados a nivel mundial).

Al ser un material prefabricado, pueden existir tantos modelos de bloque de hormigón como fabricantes existan en el mercado.

Cálculo de la fortificación con el empleo de ladrillos y bloques

Altura de la bóveda (h_0)

$$h_0 = \frac{1}{3}b$$

Para la sección grande $h_0=114$ cm y para la sección pequeña $h_0=74$ cm.

Donde b : ancho de la excavación

Altura de las paredes de la excavación (h)

$$h = H_e - h_0$$

Donde H_e : altura de la excavación

Sección grande $h = 118$ cm

Sección pequeña $h = 140$ cm

Espesor del ladrillo en el centro de la bóveda (d_0)

$$d_0 = 4.4 \frac{b}{r_c \sqrt{f}} \sqrt[3]{\frac{b}{h_0}}$$

Donde: r_c : resistencia a la comprensión del ladrillo

Espesor en toda la bóveda (d). Se recomienda para excavaciones de sección normal (no más de 6 m de ancho), que el espesor sea constante, es decir, $d = d_0$.

Espesor de la pared (D)

$$D = 1.5 \cdot d_0$$

En la Tabla 5 se muestran los valores arrojados del cálculo del espesor

Tabla 5. Resultados del cálculo del espesor

Roca	Coeficiente de fortaleza	d_0		d		D	
		Sección G	Sección P	Sección G	Sección P	Sección G	Sección P
Serpentinita Alterada	2,31 2,08	3,05 3,21	2,22 2,34	3,05 3,21	2,22 2,34	4,57 4,815	3,33 3,5
Serpentinita Fresca	2,116	3,189	2,32	3,11	2,32	4,7835	3,48
Serpentinita Meteorizada	0,66 0,61	5,713 5,94	3,77 4,32	5,71 5,94	3,77 4,32	8,57 8,91	5,66 6,48

Se procede después a realizar la rectificación de los parámetros de forma orientativa para cada elemento de la fortificación por separado. Para todas las rocas y las diferentes secciones, las rectificaciones son las siguientes:

$$d_0 = d = 12$$

$$D = 15 \text{ cm}$$

La magnitud de la carga (q_0) que actúa en la sección del candado $q_0 = 1.5 \cdot d_0 \cdot 5 \cdot d_0 \cdot \gamma_v$

γ_v : promedio ponderado de las masas volumétricas del ladrillo y del material de relleno, en nuestro caso ese material será la roca arrancada en los frentes.

Tabla 6. Magnitud de la carga que actúa en la sección

Roca	f	γ_v	q_0 (t/m ²)
Serpentinita alterada	2,31	1,719	0,3609
	2,08	1,6565	0,347865
Serpentinita fresca	2,116	1,619	0,33999
Serpentinita meteorizada	0,66	2,4565	0,515865
	0,61	2,6165	0,549465

La intensidad de la carga en la sección en la que la bóveda se apoya (q_H) se determina a partir de la condición de que el peso de la fortificación se supone igual al área de la carga.

a) área de la sección de la semibóveda (S_1); m^2 o cm^2

$$S_1 = \frac{3\pi d}{360} \cdot [(R+0.7d) \cdot \alpha + (r+d_r) \cdot \beta]$$

α : ángulo central de la bóveda 3 centros (en grados)

β : ángulo lateral de la bóveda 3 centros (en grados)

$R = r$

$\alpha = \beta = 45^\circ$

b) peso del metro lineal del semiancho (Q)

$$Q = S_1 \cdot \gamma_1$$

c) intensidad de la carga al nivel del apoyo de la bóveda (q_H)

$$q_H = \frac{0.1047 \cdot [(R+0.7d) \cdot \alpha + (r+0.7d_r) \cdot \beta] \cdot \gamma_0 \cdot d_0}{(b-d) \cdot q_0}$$

Tabla 7. Valores arrojados del cálculo de la intensidad de la carga que actúa

Roca	Sección grande R = 1,02 m			Sección pequeña R = 0,62 m		
	S_1 (m^2)	Q (t.m)	q_H (t/m)	S_1 (m^2)	Q (t.m)	q_H (t/m)
Serpentinita alterada	0,312	0,5694	0,104	0,199	0,363	0,1094
	-	0,5304	0,10045	-	0,3383	0,1058
Serpentinita fresca	-	0,507	0,0983	-	0,32357	0,10353
	-	-	-	-	-	-
Serpentinita meteorizada	-	1,0296	0,1315	-	0,6567	0,13848
	-	1,12944	0,13542	-	0,72038	0,14262

La capacidad portadora (q) debe poseer la fortificación de ladrillos para las condiciones dadas, a fin de conservar su estabilidad. Se determinó y se pudo comparar con la presión minera o carga causada por la deformación del macizo que es menor que la capacidad portadora de la fortificación propuesta.

Desarrollo del cálculo de la capacidad portadora de la bóveda

Cálculo de la capacidad de carga

Para la sección pequeña

A partir de las dimensiones geométricas de la fortificación de esas sección se obtuvo el ángulo de los bloque $\beta=6^\circ 18$

$$m = \frac{2}{\varphi} \arccos \frac{R}{R+d} m = 10,5$$

$$m_1 = m_2 = \frac{m}{2} m = \text{número de bloques } m_1 = 5,25 \quad m_2 = m_1$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = m_1 \quad \varphi = 45,7084$$

En la distribución de los ladrillos midiendo a escala por Autocad $\alpha_1=38^\circ$.

$$R=62 \quad R_1=74 \quad \alpha_1=38^\circ$$

$$\alpha_1 = \sqrt{R_1^2 + R^2 - (2 \cdot R_1 \cdot R \cdot \cos(\alpha_1))}$$

$$\alpha_1 = 45,708 \quad \alpha_2 = \alpha_1 \alpha_2 = 45,708$$

$k \rightarrow$ coeficiente de flexibilidad de las uniones. Se toma 0,5.

Si: $\beta=90^\circ$

$$\delta = 2\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \alpha = 1,326$$

Los máximos desplazamientos lateral y vertical son:

$$U_t = R_1 \cdot (1 - \cos(\alpha)) - \sqrt{\alpha^2 - (R_1 \cdot \sin(\alpha) - (\alpha_1 - k \cdot d) \cdot \sin(\beta))^2} U_t = 19,286$$

$$U_1 = \sqrt{((\alpha_1 - k \cdot d) \cdot \sin(\beta) - R \cdot \sin(\alpha_1))^2 + (R_1 - U_t - (\alpha_1 - k \cdot d) \cdot \cos(\beta) - R \cdot \cos(\alpha_1))} U_1 = 6,9$$

Los desplazamientos permisibles:

$$U_{1perm} = 0,60 U_1$$

$$U_{1perm} = 4,1 \quad U_{1perm} = 0,60 U_t \quad U_{1perm} = 11$$

El ángulo mínimo β , o sea, β_0 se determina por:

Conclusiones

El uso de ladrillos para la fortificación del techo de los túneles populares estudiados resulta seguro, ya que este sostenimiento puede soportar cargas mayores que la presión minera que reciben actualmente.

Según análisis comparativo y la valoración económica se determinó que el sostenimiento con el empleo de ladrillos en la bóveda resulta menos costosa que la del hormigón prefabricado.

Referencias bibliográficas

CARTAYA, M. 1994: *Aplicación de métodos computarizados en el proyecto de cálculo de las fortificaciones subterráneas horizontales*. Tesis de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.

CARTAYA, M. 2001: *Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país*. Tesis de doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.

MONDEJAR, O. 2001: *Metodología para la elección de los sostenimientos en excavaciones subterráneas de pequeña sección influenciadas por acción sísmicas*. Tesis de doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.

*Trabajo tutorado por la Dra. C. Mayda Ulloa Carcacés y el Ing. Frank Guilarte Matos.