

Recibido: 27 / 08 / 2009, aceptado en versión final: 30 / 09 / 2009

Durabilidad de los cortadores en máquinas tuneladoras tipo TBM de acuerdo a su posición en el cabezal

Cutters performance in Tunnel Boring Machines according to position on the Cutterhead

Mauro Giraldo Paredes¹, Oswaldo Ortiz Sánchez¹, Wilfredo Blas Guzmán¹

RESUMEN

Los cortadores en general son los elementos esenciales para triturar, fragmentar y desplazar a la roca durante una excavación. En el caso particular de las máquinas tuneladoras tipo TBM, los cortadores de disco desempeñan una función preponderante dado que el ataque a la roca se produce únicamente por compresión y rotación del cabezal que porta dichos cortadores.

El presente estudio se llevó a cabo durante la excavación del túnel de aducción N.º 4 del proyecto hidroeléctrico de Yuncán (Paucartambo II), ubicado en el distrito de Paucartambo, provincia y departamento de Pasco, donde se utilizó la TBM Atlas Copco Jarva MK 12 de 4,10 m de diámetro provisto con 27 cortadores de disco.

A partir del seguimiento de los cortadores, se pudo verificar que su duración en metros de túnel excavado, depende de su posición en el cabezal de una TBM, independientemente del tipo de roca. Se pudo demostrar que las cantoneras (gauge cutters) son las que se desgastan más, seguido por los frontales (face cutters) y siendo de mayor duración los centrales (center cutter).

Palabras clave: Máquina tuneladora, TBM, cortadores de disco, cortadores centrales, cortadores frontales, cantoneras, cabezal.

ABSTRACT

The cutters in general are the essential elements to crush, break and move to the rock during an excavation. In particular case of the tunnel boring machines (TBM), the disc cutters play a preponderant role since the attack to the rock takes place only by compression and rotation of the cutterhead that carries the cutters.

The present research was carried out during the excavation of the N° 4 headrace tunnel of the Yuncan hydroelectric project (Paucartambo II), located in Paucartambo district, Pasco province and department, where applied the MK 12 Atlas Copco Jarva TBM, that has 4.10 m cutterhead diameter provided with 27 disc cutters.

From the pursuit of the cutters, its life in meters of excavated tunnel could be verified that, depends on its position in the mill pillow of a TBM, independent of the type of rock. It was possible to be demonstrated that the reinforcements (gauge cutters) are those of greater wearing down, followed by the frontals (phase cutters) and being of greater duration the power stations (to center to cutter).

Keywords: Tunnel Boring Machine, TBM, disc cutters, center cutter, face cutter, gauge cutters, cutterhead.

¹ EAP de Ingeniería de Minas de la UNMSM. E-mail: egiraldop@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

Los cortadores de roca constituyen la parte esencial de los equipos de perforación y excavación, y existen una variedad de estos elementos, para distintas aplicaciones y condiciones, entre ellos se tienen los discos, rodillos, picas, dientes y brocas.

El estudio de campo para los efectos de la presente investigación, se llevó a cabo en el túnel de aducción N.º 4 del proyecto hidroeléctrico de Yuncán (Paucartambo II), donde se utilizó la TBM Atlas Copco Jarva MK 12 de 4,10 m de diámetro y provisto con 27 discos cortadores entre gauge, center y face cutters.

El tipo de roca predominante, durante el presente estudio, estuvo entre el tipo II y III según la clasificación de macizos rocosos de Bieniawski. Los parámetros de la TBM como empuje (thrust) y amperaje de los motores principales, en promedio se mantuvieron en 150-160 bar y 170-200 amperios, respectivamente. Por el riesgo que los cortadores se carbonicen y se destruyan por la fuerza de empuje de la TBM, su cambio se hacía por grupos, de 4, 5 o más cortadores, por ejemplo el caso de los centrales se cambiaban ambos (4 discos), y los 5 gauge simultáneamente.

Los resultados del análisis muestran que la posición de los cortadores en el cabezal, definitivamente influye en su duración en metros de túnel excavado. En el gráfico resultante del presente estudio y haciendo la curva de tendencia exponencial, se observa la influencia de la posición de los cortadores en su desgaste. Concluyéndose que los que más se desgastan son los gauge, seguido por los face y siendo los de menor desgaste los center.

II. ASPECTOS GENERALES DEL ESTUDIO

Los cortadores son los elementos esenciales de todo equipo o maquinaria de corte. Cada máquina emplea un tipo de cortador, de acuerdo al mecanismo de ataque a la roca, ya sea por compresión, rotación, percusión o la combinación de estos mecanismos; además se debe considerar el tipo de roca. Con esa premisa, los cortadores de roca se clasifican en cortadores de disco; dientes, picas, azadón para TBM; cortadores de rodillos, picas y brocas.

2.1. Cortadores de disco

Los cortadores de disco han sido diseñados básicamente para las TBM, mobile miner y shaft boring con diámetros de 11" a 20" (Deering, Kenneth *et al.*, 1991), siendo los más usados actualmente los de 17" y 19". Se fabrican de acero o con incrustaciones de carburo de tungsteno para rocas muy duras o abrasivas. Reciben un tratamiento térmico para alcanzar

una dureza entre 55HRC y 59 HRC y están diseñados para trabajar bajo presión mediante sellos para evitar la pérdida de aceite o el ingreso de suciedad al interior de los cortadores que pueden comprometer a los rodamientos y otras partes internas.

Se presentan en disco simple, discos mellizos y centrales. Los discos simples han sido diseñados para cortar roca dura y terreno mixto. Estos cortadores, son los de mayor uso y en caso de las TBM como frontales (face cutters) y cantoneras (gauge cutters). La fotografía N.º 1(a) muestra los cortadores simples (face cutters) utilizado en Yuncán. Los cortadores mellizos sirven para excavar roca suave, su montaje sobre el cabezal tiene mayor espaciamiento que los cortadores de disco simple; para terrenos muy abrasivos tienen incrustaciones de carburo de tungsteno (world tunnelling) como ilustra la fotografía N.º 1(b).

Por otro lado, los cortadores centrales, están diseñados para trabajar en la sección central del cabezal de la TBM, su radio de giro en el frente de corte es más pequeño que de otros cortadores, de tal forma que los discos pueden resbalar cuando rota el cabezal, que puede traducirse en fácil desgaste lateral de los discos. Tiene un montaje robusto y en parejas sobre un eje común como puede apreciarse en la fotografía N.º 2 instalados en el cabezal de la TBM (dos centrales).

2.2. Cortadores de dientes, picas y azadón para TMB

Estos cortadores están diseñados para la excavación de terrenos sueltos o de baja dureza. Se fabrican una variedad de estos cortadores como cortadores de dientes, los que ilustra la fotografía N.º 3; picas y picas de arrastre (drag picks), y azadón (hoe) que ilustra la fotografía N.º 4(c). Normalmente están provistas de este tipo de cortadores las TMB de escudos y las EPB como ilustra las fotografías 4(a) y (b).

2.3. Cortador de rodillos

Diseñados para distintos minadores continuos como el raise boring, shaf boring, etc. Entre estos se tienen los cortadores de rodillo con dientes, con botones de carburo de tungsteno y discos múltiples con o sin incrustaciones de carburo de tungsteno, se presentan en diámetros de 8" y 12". Los cortadores de rodillos se aplican principalmente en terrenos de dureza y abrasividad intermedia. Estos cortadores pueden atacar rocas en formaciones blandas e intermedias. Ver Fotografía N.º 5(a).

Cortadores de rodillos con botones, se aplican en formaciones duras y abrasivas cuya resistencia a la compresión está entre 80 y 250 MPa, llevan botones de carburo de tungsteno como muestra la fotografía N.º 5(b).



(a)



(b)

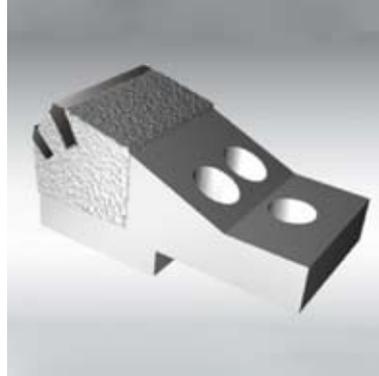
Fotografía N.º 1. Cortadores de disco. a) Discos simples Robbins en Yuncán. b) Discos mellizos de acero y con incrustaciones de carburo de tungsteno (Jiansui).



Fotografía N.º 2. Cortadores centrales en el cabezal de la TBM.



(a)



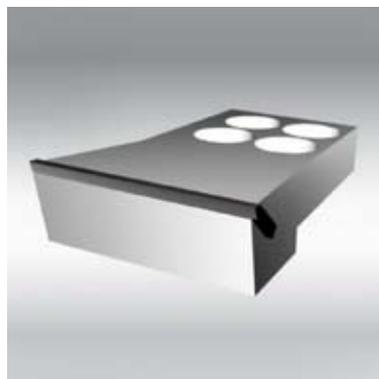
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fotografía N.º 3. Cortadores de dientes para TBM (Jiansui).



Fotografía N.º 4. Cabecal de TBM. a) Con cortadores de picas (picks). b) Con cortadores de picas de arrastre (drag picks). c) Cortador de azadón (hoe) en TBM.



Fotografía N.º 5. Cortadores de rodillos (Jiansui).



Fotografía N.º 6. Cortadores de picas. a) Picas G-38 (Sandvik). b) Picas en el cabecal de un roadheader.

Los cortadores de discos con botones tienen un diseño para cortar formaciones muy duras y abrasivas con resistencia a la compresión superior a 190 MPa, llevan incrustaciones de carburo de tungsteno como ilustra la Fotografía N.º 5(c).

2.4. Cortadores de picas

Estos útiles están diseñados para los minadores continuos tipo roadheader (ver Fotografía N.º 6(b)), rozadoras y minadores de superficie. Entre otros

fabricantes Sandvik, fabrica de 14, 18, 19, 22, 25 y 38 mm como ilustra la Fotografía N.º 6(a).

2.5. Brocas

Estos elementos de corte están diseñados para perforar taladros con distintos propósitos, entre otros, para alojar explosivos para voladuras, taladros pilotos, pozos, sostenimiento y sondaje. Asimismo, para extracción de testigos de roca en caso de la perforación diamantina. Existe una variedad y tamaño



Fotografía N.º 7. Barrenos integrales, brocas de insertos y escariadoras (Sandvik).



Fotografía N.º 8. Martillos DTH provistos con sus respectivas brocas (Atlas Copco).

de ellos, como brocas para perforadoras martillo en cabeza (TH), Martillo en fondo (DTH), rotativas (RD) y diamantinas.

Las brocas para perforadoras rotopercutivas con martillo encabeza, se tienen brocas de insertos (en cruz y X), de botones, retráctiles con diámetros que van de 1" a 5". Dentro de este grupo también están los barrenos integrales, las brocas escariadoras y el ODEX. Ver Fotografía N.º 7.

Las brocas para las perforadoras martillo en fondo (DTH), tienen un diseño especial a diferencia de los de martillo en cabeza, puesto que en el caso de los DTH, la percusión es propinada directamente sobre las brocas, se presentan en tamaños que van de 4" a 36", como ilustra la fotografía N.º 8.

Las brocas para perforadoras rotativas se presentan en dos tipos: brocas tricónicas y las brocas de arrastre. Las brocas tricónicas, se presentan en diámetros entre 6" y 24". Tienen un diseño especial con tres conos provistos de elementos de corte, que rotan sobre sus propios rodamientos y atacan la roca por los mecanismos de indentación y corte. Existen dos tipos de estas brocas, de insertos de carburo de tungsteno como ilustra la Fotografía N.º 9(a) y

de dientes de acero mostrado en la Fotografía N.º 9(b), y dependiendo de su contextura pueden cortar cualquier tipo de roca.

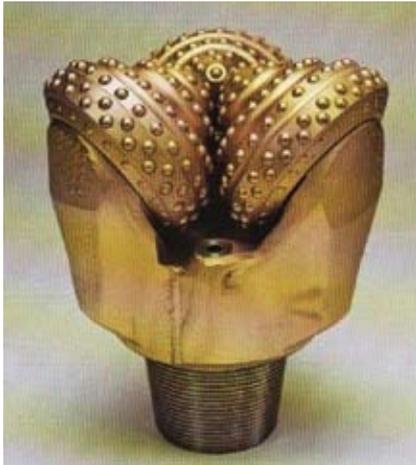
Las brocas de arrastre (Drag Bits) son útiles porque atacan la roca por corte y están diseñados con dos o más aletas o cuchillas de corte, de acuerdo a ello pueden clasificarse en bilabiales, multialetas y escariadoras de diámetros que varían entre 100 y 400 mm. Las fotografías 10 (a) y (b), ilustran una broca de arrastre de 3 aletas (trialetas) y una escariadora, respectivamente. Se aplican principalmente en la perforación de rocas suaves, sin embargo, también pueden aplicarse en la perforación de terrenos de dureza mayor para lo cual tienen insertos de carburo de tungsteno.

Las brocas especiales PDC (PDC bits): Estas brocas compactas de diamante poli cristalino (polycrystalline diamond compact, PDC) se utilizan en perforación de pozos en rocas suaves como lutitas, arenas y arcillas, donde la sarta de perforación es accionado con presión neumática. Se presentan en distintas configuraciones como lo ilustra la Fotografía N.º 11 y con diámetros que van de 91 a 400 mm.

Las brocas diamantinas son cortadores que sirven para extraer testigos de roca (núcleos), con la finalidad de hacer diferentes estudios del terreno como el análisis mineralógico, cubicación de reservas minerales, determinación de las propiedades geomecánicas del terreno, entre otros. Se fabrican en diferentes diámetros como ilustra la Fotografía N.º 12. En su sección frontal lleva incrustaciones de diamante para cortar cualquier tipo de roca.

III. MÉTODOS Y RESULTADOS DEL ESTUDIO

Como parte del desarrollo del presente proyecto de investigación, el estudio de campo se llevó a cabo con los cortadores de tipo disco simple y centrales en el proyecto hidroeléctrico de Yuncán (Paucartambo II),



(a)



(b)

Fotografía N.º 9. Brocas tricónicas. a) Con botones de carburo de tungsteno. b) Con dientes de acero.



(a)



(b)

Fotografía N.º 10. Brocas especiales. a) Brocas de arrastre de tres aletas Chevron. b) Broca de arrastre escariadora.

ubicado en el distrito de Paucartambo, provincia y departamento de Pasco, donde se utilizó, entre otros, la TBM MK 12 (Giraldo, 2008), cuyas principales características son:

TBM Atlas Copco Jarva MK 12

Diámetro del cabezal: 4100 mm

Velocidad de rotación del cabezal: 12.2 RPM

Cortadores de disco

Marca Robbins de 17"

Disposición de cortadores

4 cortadores centrales únicos (dos discos dobles).

18 cortadores frontales individuales

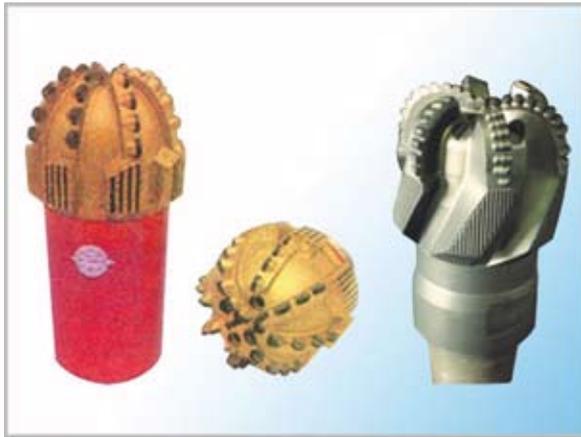
5 cortadores de contorno individuales

Total 27 cortadores de disco

Para el levantamiento de datos de campo, se tenía diseñado una serie de formatos, como el reporte del operador que entre otros datos reportaba el cambio de cortadores, identificando con los números soldados en la coraza del cabezal. Asimismo, el personal mecánico identificaba a los cortadores mediante un código además de su posición en el cabezal, la misma que podía variar de un cambio a otro, además llevaba el registro del desgaste en mm y graficaba el perfil de desgaste.

A partir de los reportes que atañen a este estudio, se procedió a hacer el consolidado del movimiento de cortadores en la TBM MK 12, y se obtuvieron los resultados que se detallan más adelante.

En Yuncán se probó una serie de discos de corte de 17" de diámetro, entre ellos los discos duros HD- $\frac{3}{4}$ " y simples AM - $\frac{5}{8}$ ". Posteriormente se hizo lo propio con cuatro tipos de discos HD - $\frac{5}{8}$ ", HD - $\frac{1}{2}$ "; AM - $\frac{5}{8}$ " y XR - $\frac{5}{8}$ ". Se determinó que este último



(a)

Fotografía N.º 11. Brocas especiales PDC. a) King-drilling. b) Baker Hughes.



(b)



(a)

Fotografía N.º 12. Brocas diamantinas. a) 800 px. b) Core Drills 350.



(b)

es demasiado suave, de desgaste muy rápido. Finalmente se estandarizó el uso de dos tipos de discos HD - 1/2" y AM - 5/8" (ver Fotografía N.º 17(b)).

3.1. Ensamblaje y control de los cortadores

Los cortadores centrales (center cutters) están ensamblados en parejas (dobles), como lo ilustra la Figura N.º 1 y están enumerados como sigue: 1-3 y 2-4 (cuatro cortadores), durante su montaje se llena con dos litros de aceite OMALA 320 (Shell) por pareja o sea cuatro litros por juego, para lubricar sus rodamientos (ver Figura N.º 1). La Fotografía N.º 13 ilustra el reemplazo de un cortador central para su mantenimiento en el taller de cortadores.

Los cortadores frontales (face cutters) están enumerados de 5 a 22 (18 cortadores), durante su ensamblaje se rellena un litro de aceite para lubricar los rodamientos internos, como lo ilustra la Figura N.º 2. Las cantoneras (gauge cutters) son las que definen la sección del túnel y están ensambladas en el cabezal de tal manera que configuren en frente de la excavación ligeramente curvados en las esquinas, estos cortadores están enumerados de 23 a 27

(cinco cortadores), este último puede apreciarse en la Fotografía N.º 15.

3.2. Monitoreo del desgaste de los cortadores

Como en cualquier operación de TBM, el personal mecánico ingresa permanentemente delante del cabezal, al menos cada 2 ó 3 ciclos de excavación (re-gripping) para su inspección, calibrar el desgaste de los discos, revisar los pernos y tuercas de sujeción de los cortadores, pérdida de aceite por los cortadores, reemplazo de cortadores, entre otros. Al verificar que el desgaste de los discos ha alcanzado las alturas establecidas, se procedía a extraer y reemplazar los cortadores, como se puede apreciar en la Fotografía N.º 16, la que corresponde a los cinco gauge cutters desgastados extraídos. La importancia del cambio oportuno radica en que se garantiza la productividad de la TBM (Cigla M. *et al.*), sección de excavación, se protege a las monturas de los cortadores, la coraza del cabezal, los scrapers, etc.

El desgaste radial de los discos cortadores no siempre es uniforme sino sesgado. La Figura N.º 2 ilustra el perfil de desgaste de los discos centrales 1 y 2, grafica-

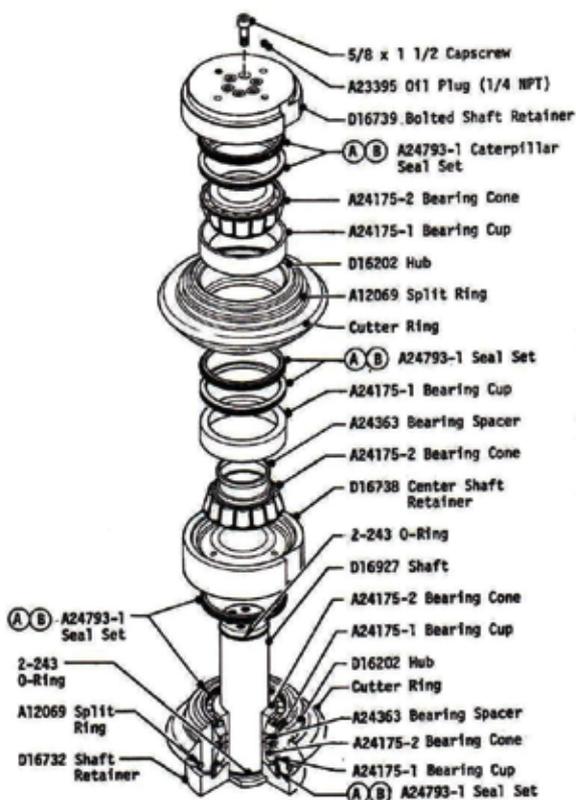


Figura N.º 1. Ensamblaje del disco central.

do por los mecánicos de turno, como puede verificarse sus desgastes son sesgados a la izquierda. La figura N.º 5(a) ilustra el perfil de desgaste de los cortadores cantoneras (gauge cutters). En estos el desgaste es casi uniforme (ligeramente sesgado a la derecha), mientras que los cortadores frontales (face cutters) tienen un desgaste bastante sesgado a la derecha, como puede observarse en la Figura N.º 5(b).

Dado que los perfiles de desgaste no son uniformes, para establecer el desgaste de los cortadores se medía el desgaste a la derecha y a la izquierda a fin de consignar el promedio de ambos.

3.3. Mantenimiento y reemplazo de discos

Cuando los discos cortadores center, face y gauge sufrían desgastes máximos de 35, 25 y 15 mm (desgaste radial), respectivamente; se extraían del cabezal para su reemplazo y eran conducidos al taller de cortadores, donde se desmontaba cortando los disc ring desgastados con disco de devaste u oxicorte. La Fotografía N.º 17(a) ilustra a un técnico de cortadores iniciando el desmontaje de un disco face (taller de cortadores), cortando el disc ring con oxicorte, y la Fotografía N.º 17(b) muestra el almacén de discos u otras partes del cortador, donde se exhibe el disc ring nuevo.



Fotografía N.º 13. Extracción de cortadores centrales desgastados para su cambio.

Cada vez que se extrae el cortador del cabezal de la TBM por desgaste, la mayoría de las partes se vuelven a utilizar (ensamblar). Las partes que normalmente se reemplazan cada vez son: Los disc ring (la Fotografía N.º 18 ilustra una pila de discos desgastados desmontados con oxicorte), los empaques (O-ring), los retenes y el aceite. El Cuadro N.º 1 muestra en resumen, el reemplazo de las partes del cortador en función del número de cambios del disc ring por tipo de cortador; así, por ejemplo, para el caso de los cortadores centrales el eje, cubetas y los rodajes se descartan después de 20 cambios. En dicho cuadro también se reporta el número de cortadores que puede ensamblar por día el equipo técnico de cortadores (3 personas), es decir, un disco central o cinco frontales o cinco cantoneras.

3.4. Rendimiento de los cortadores de acuerdo a su posición en el cabezal de la TBM MK 12

De los datos precedentes y el registro del desgaste de cortadores, el rendimiento de los cortadores en la máquina tunelera TBM MK 12 en metros de túnel, se presenta en el Cuadro N.º 2, de donde se concluye que los cortadores que más frecuentemente se reemplazan son los gauge cutters, y los que más metros de túnel excava son los center cutters.

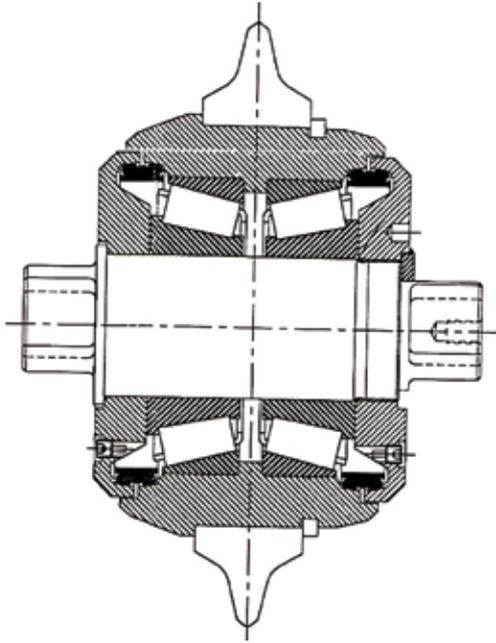


Figura N.º 2. Ensamblaje de un face cutter.



Fotografía N.º 14. Face cutters montados en el cabezal de la TBM.

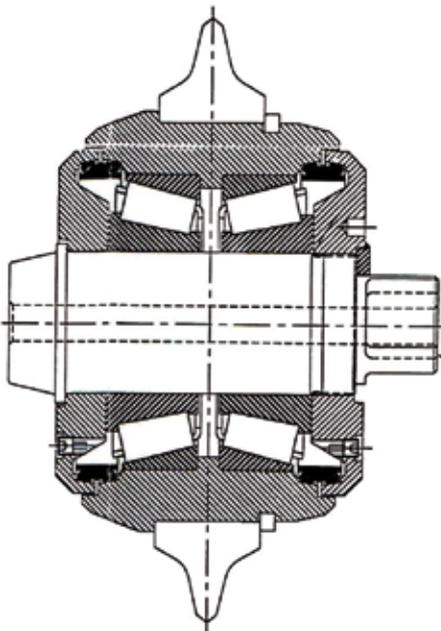
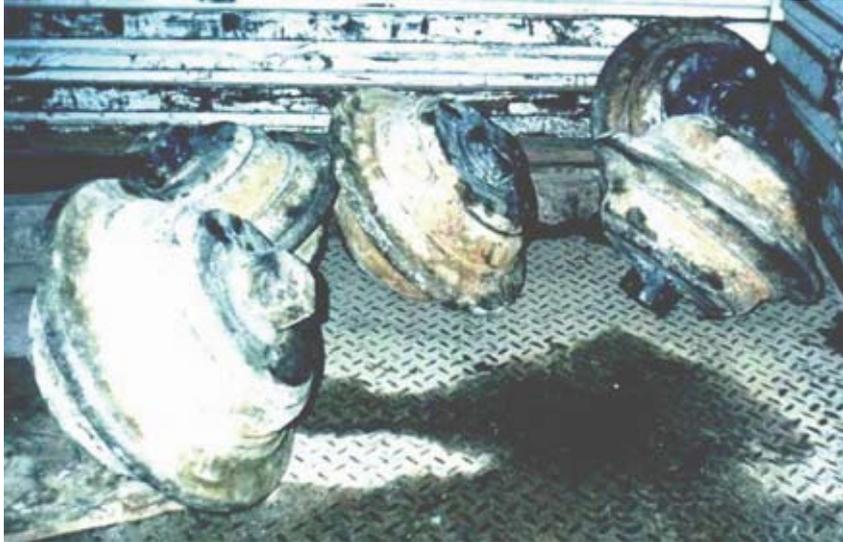


Figura N.º 3. Ensamblaje de un gauge cutter.



Fotografía N.º 15. Cortador Gauge N.º 27 en el cabezal de la TBM MK 12.



Fotografía N.º 16. Gauge cutters (5) extraídos del cabezal.

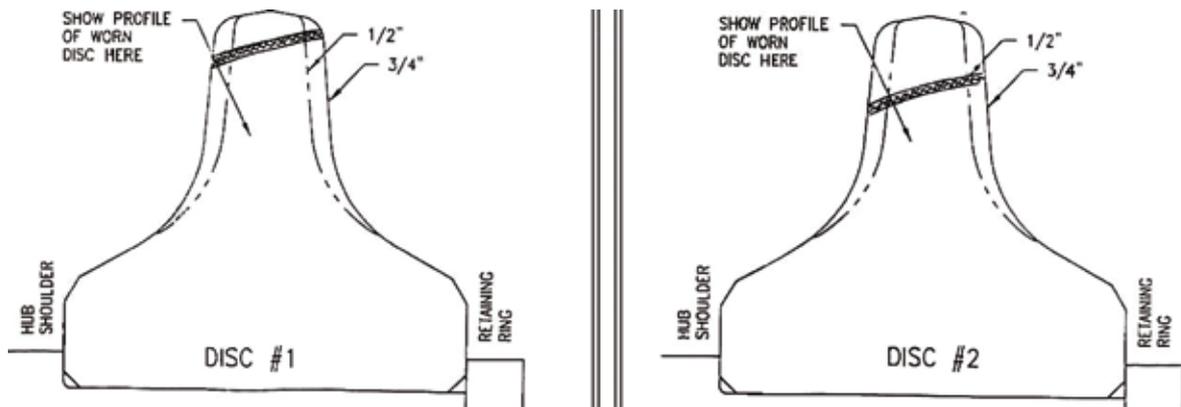


Figura N.º 4. Desgaste típico de los cortadores centrales (center cutter).

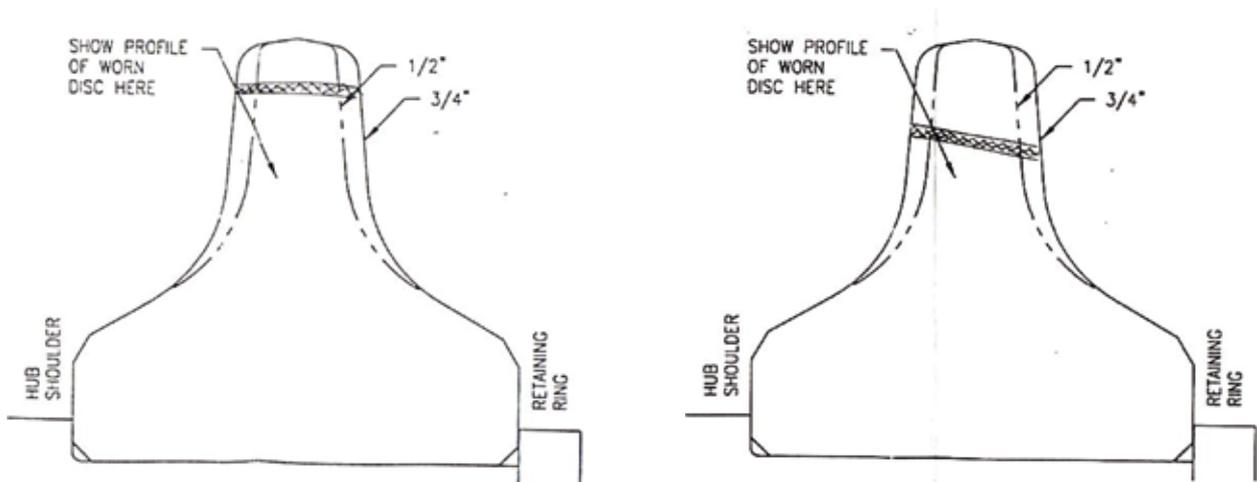


Figura N.º 5. Desgaste típico de cortadores. (a) Gauge cutters. (b) Face cutters.



(a)



(b)

Fotografía N° 17. (a) Técnico de cortadores desmontando un cortador para su reemplazo. (b) Disc rings en el almacén de cortadores y conexos.

Cuadro N° 1. Vida de los componentes de los cortadores en función del número de cambios de los disc ring y requerimientos para su ensamblaje.

Rubro	Número de cambios de disco para su descarte (vida en función de los discos)		
	Central	Facial	Cantoneras
Disco cortador (Standard alloy), 17"x3/4"-am 1724-1	1 (Desgaste máx. 35 mm)	1 (Desgaste máx. 25 mm)	1 (Desgaste máx. 15 mm)
Cubo del cortador (Hub)	20	20	20
Eje del cortador (Shaft)	20	10	10
Retén final del eje (Shaft retainer)	1	.....	.....
Retén empernado del eje (Shaft retainer)	1	.....	.....
Retén izquierdo del eje (Shaft retainer)	.....	1	1
Retén derecho del eje (Shaft retainer)	.....	1	1
Bloqueador (Tab, locking)	.....	1	1
Cubeta del rodaje (bering cup)	20	10	10
Rodaje cónico (bearing cone)	20	10	10
Juego de empaquetaduras (seal set)	1	1	1
Espaciador de rodajes de 60 ton (spacer)	20	.....	.....
Espaciador de rodajes de 70 ton (spacer)	20	.....	.....
Tornillo de cabeza hueca (socket head cap screw)	1	.....	.....
Tapón magnético (plug)	.....	1	1
Tapón de aceite hexagonal (hex socket plug)	1	.....	.....
O-ring	1	1	1
Retén del disco (split ring)	1	.....	.....
Aceite lubricante (omala 320)	1(4 Litros/mellizo)	1(1 Litro/cortador)	1 (1 Litro/cortador)
Mano de obra para su ensamblaje (1 experto + 2 ayudantes), número de cortadores ensamblados por día	1 Mellizo	5	5



Fotografía N° 18. Disc ring reemplazados cortando con oxicorte.

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Del Cuadro N.º 2 se deduce que los centre cutters alcanzan una duración de 582,75 m de túnel, mientras que los face cutters logran excavar entre 224,5 y 442,49 m de túnel, y los gauge cutters son los de reemplazo más frecuente, alcanzando excavar entre 119,1 y 130,17 m de túnel.

El Gráfico N.º 1, por otro lado, muestra la curva de desgaste de los cortadores de acuerdo a su posición en el cabezal. Como el reemplazo de cortadores se lleva a cabo por grupos, nunca individualmente, el rendimiento de este grupo de cortadores es similar. La curva de tendencia exponencial explicita el desgaste de los cortadores en función de su posición en el cabezal.

Cuadro N.º 2. Vida promedio de los discos en desgaste radial y en metros de túnel de acuerdo a su posición en el cabezal.

Posición en el cabezal	Tipo de cortador	Desgaste promedio (mm)	Vida promedio en metros de túnel (m)
1	Central (Center)	20.3	582.75
2	Central (Center)	20.3	582.75
3	Central (Center)	20.3	582.75
4	Central (Center)	20.3	582.75
5	Frontal (face)	22.5	442.49
6	Frontal (face)	22.0	442.49
7	Frontal (face)	22.5	442.49
8	Frontal (face)	24.0	397.51
9	Frontal (face)	24.0	442.49
10	Frontal (face)	22.5	397.51
11	Frontal (face)	24.5	442.49
12	Frontal (face)	27.5	397.51
13	Frontal (face)	31.0	397.51
14	Frontal (face)	24.0	358.44
15	Frontal (face)	17.3	294.24
16	Frontal (face)	22.7	300.57
17	Frontal (face)	22.8	289.46
18	Frontal (face)	20.7	260.06
19	Frontal (face)	19.3	237.53
20	Frontal (face)	21.9	237.68
21	Frontal (face)	25.9	203.24
22	Frontal (face)	27.8	224.50
23	Cantonera (Gauge)	18.0	130.17
24	Cantonera (Gauge)	14.7	129.90
25	Cantonera (Gauge)	14.6	129.86
26	Cantonera (Gauge)	15.4	128.17
27	Cantonera (Gauge)	15.4	119.10

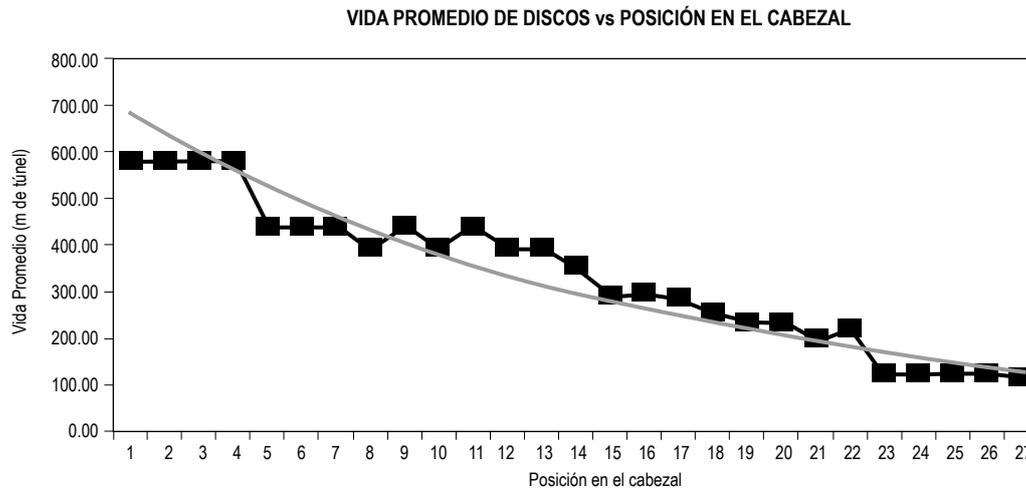


Gráfico N.º 1. Rendimiento de los discos cortadores en función de su posición en el cabezal.

V. CONCLUSIONES

1. Los cortadores son las herramientas esenciales de todo equipo de perforación, excavación y corte, y su productividad en gran medida depende de estos elementos; acorde a ello, existe una variedad de diseños, tamaños y durezas para cada tipo de máquina y terreno.
2. Los cortadores de disco para TBM han venido evolucionando en diámetro a medida que se requerían ejercer mayores cargas sobre los cortadores para cortar rocas duras. Así en 1961 el diámetro era de 11", y sus rodamientos eran capaces de soportar una carga máxima de 8,7 TM, en 1983 se introdujo los de 17" para una carga máxima de 22 TM y en 1989 y 2006 se introdujeron los de 19" y 20", respectivamente, y pueden soportar cargas de hasta 32 TM (World tunnelling).
3. Los cortadores de disco de mayor aplicación en máquinas tuneladoras actualmente son los de 17" y 19", con durezas que varían entre 55 y 59 HRC.
4. El desgaste radial de los cortadores de disco para TBM es sesgado y se reemplazan cuando la máxima altura del desgaste alcanza 35, 25 y 15 mm según sean cortadores centrales, frontales o cantoneras, respectivamente.
5. La posición de los cortadores en el cabezal influye en su rendimiento en metros de túnel excavado.

Así, los discos de los cortadores centrales (cuatro discos) se cambian cada 582,75 m de túnel excavado, mientras que los discos de los face cutters (18 discos) se reemplazan luego de entre 224,5 y 442,49 m de túnel, y los gauge cutters (cinco discos) de reemplazo más frecuente, alcanzan a excavar entre 119,1 y 130,17 m de túnel.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Giraldo Paredez, EM. (2008). *Influencia del tipo de roca en el rendimiento de máquinas tuneladoras tipo TBM*. IIGEO, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
2. Cigla M., Yagiz, S. & Ozdemir, L. *Application of Tunnel Boring Machine in Underground Mine Development*. Excavation Engineering & Earth Mechanics Institute, Department of Mining Engineering. Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
3. World Tunnelling. *The Cutting Edge*.
Mining.mines.edu/emi/papers/magazines/magazine3.pdf
4. Deering, Kenneth; Dollinger, Gerald L.; Krauter, David & Roby, Joseph A. (1991) *Development and Performance of Large Diameter Cutters for use on High Performance TBM's*. The Robbins Company, Kent, Washington, USA.