

Universidad Nacional de Ingeniería

**Programa Académico de Ingeniería Geológica, Minera
y Metalúrgica**

**Comparación Técnico - Económica
de dos Métodos de Construcción
de Túneles**

Tesis de Grado presentada por

Dante Luis Lanao Jiménez

Para Optar el Título de Ingeniero de Minas

LIMA - PERU

1 9 7 1

TABLA DE CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
I. INTRODUCCION	1
II. ANALISIS DE PREFACTIBILIDAD DE LA CONSTRUCCION DE TUNELES	
1. Túneles Mineros	3
2. Túneles en Carreteras	4
3. Túneles para Irrigaciones	6
III. CONSIDERACIONES GEOLOGICAS GENERALES EN LA CONSTRUCCION DE TUNELES	
1. Exploración y Levantamiento Geológico	8
IV. METODOS PARA LA CONSTRUCCION DE TUNELES	
1. Clasificación de Túneles	14
2. Método Convencional para la Construcción de Túneles	18
Perforación	19
Voladura	20
Carga y Transporte	20
3. Método que utiliza la Máquina Tuneladora Diseño y Funcionamiento de la Máquina Tuneladora	23
4. Ventajas y Desventajas de ambos métodos de construcción de túneles	24
32	32
V. ANALISIS COMPARATIVO DE COSTOS	36
1. Cálculo de Costos para el Método Convencional	40
Costos de Equipo	41
Costos de Labor	43
Costos de Fuerza Motriz	45
Costos de Revestimiento	45
Costo Total	46
2. Cálculo de Costos para el Método de la Máquina Tuneladora	47
Costos de Equipo	48
Costos de Labor	52
Costos de Fuerza Motriz	54
Costos de Revestimiento	55
Costo Total	56
3. Discusión	57
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFIA	62

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Dureza de diferentes Rocas.	13
2. Fluctuación de Diámetro de Túneles de acuerdo a su propósito.	17
3. Características de Máquinas Tuneladoras Exis- tentes.	31
4. Costos Finales y Tiempo de Terminación para cada Método.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Fotografía de un Jumbo para perforar Túneles	22
2. Fotografías de una Máquina Tunneladora . . Diferentes tipos de Elementos Cortadores .	25-25a 26-27
4. Operación de la Máquina Tunneladora	29
5. Fotografías mostrando la diferencia de Sobreexcavación	34
6. Variación de peso de Máquinas Tunneladoras de acuerdo al Diámetro de Túnel que tala- dran	38
7. Variación de precio de Máquinas Tunnelado- ras de acuerdo a sus Velocidades de Pe- netración	39

I. INTRODUCCION

En el Perú es muy necesario y urgente aplicar y desarrollar las nuevas técnicas de construcción de túneles para lograr una mejor utilización de las mismas con mayores velocidades de avance y a costos ventajosos. Existen tres campos importantes que lo requieren; primero en Minería con métodos de explotación subterráneos mas eficientes mejoraremos nuestra capacidad de producir minerales de depósitos mas profundos y fortaleceremos nuestras reservas evitando hasta cierto punto el descremamiento de nuestras minas. Segundo, es muy grande la importancia de los proyectos de irrigación de muchas zonas del desierto de la Costa y cuanto mas pronto dispongamos de una mejor tecnología, menor será el costo de los túneles de irrigación y tercero, el desarrollo vial del Perú enfrenta el grave problema de unir la Sierra y la Selva con los puertos y mercados costeros y menos difíciles resultarán las carreteras a través de túneles cuando su costo de construcción las justifique económicamente.

El presente trabajo tiene como principal objeto demostrar las ventajas y desventajas de los dos métodos básicos para la excavación de túneles en roca: El Método Convencional de Perforación y Voladura y el Método que utiliza la Máquina taladradora de túneles o Máquina Tunneladora; aunque estas máquinas han sido usadas en rocas blandas y medianamente duras por un cierto tiempo produciendo incrementos sustanciales en las velocidades de

penetración, el método de Perforación y Voladura es actualmente mas usado y hasta hace poco el único capaz de avanzar un túnel economicamente a través de roca dura. Las máquinas tuneladoras están ahora en desarrollo y sostienen la misma promesa. Los conceptos básicos y los equipos usados por los dos métodos de excavación de túneles son muy diferentes para cada cual de modo que las mejoras requeridas son también diferentes.

El segundo capítulo se refiere a las pautas que rigen el desarrollo de un Análisis de Eficiencia de Inversión que justifica el planeamiento de construcción de túneles en las areas de Minería, Carreteras e Irrigaciones. El próximo capítulo considera la importancia del estudio de los factores geológicos cuando se va a construir un túnel.

Las características principales de los métodos Convencional y de la Máquina Tuneladora, son detalladas en el cuarto capítulo seguidas de una discusión de las ventajas y desventajas de cada método.

En el siguiente capítulo es desarrollado un análisis comparativo para determinar la diferencia de costos de cada método. Se ha considerado en dólares los precios de equipos y mano de obra ya que en el Perú no se tiene aún experiencia en el uso de la máquina Tuneladora. El análisis comparativo de costos se ha calculado tomando como modelo el túnel que se ha proyectado como parte de las obras de irrigación de las Pampas de Olmos.

II. ANALISIS DE PREFACTIBILIDAD DE LA CONSTRUCCION DE TUNELES.

1. Túneles Mineros.-

Los túneles en Minería se construyen principalmente para los siguientes fines: Extracción, exploración, drenaje, ventilación. Todo análisis de prefactibilidad o estudio de justificación económica para la construcción de un túnel en la industria minera, tiene que estar basado principalmente en los factores que determinan la mayor o menor productividad de esta industria y que son: Volúmen y ley del yacimiento o Volúmen de reservas económicas del yacimiento, monto de capital disponible, métodos de trabajo y calidad de personal.

Si existiese en un caso particular la necesidad de drenaje de una mina cuya extracción se realiza mediante un pique, se consideraría dos alternativas, una la de construir un túnel de desagüe y otra la de instalar un sistema de bombeo, entonces se procederá a calcular los costos totales de cada alternativa a largo, mediano y corto plazo. Basando estos resultados en los factores de productividad de dicha mina puede darse el caso de que un sistema de bombeo sea mas barato a corto plazo debido al volúmen de reservas económicas de la mina o que siendo de igual costo ambas alternativas podamos definirnos por las ventajas que obtengamos del túnel por razones de ventilación, exploración, etc.

En general un análisis de prefactibilidad para construir un túnel en Minería debe realizarse como sigue:

1. Establecer el costo total del túnel y sus alter-

nativas a largo, mediano y corto plazo, teniendo en cuenta los factores de productividad de la mina.

b) Establecer las ventajas y desventajas que ofrece el túnel y las alternativas analizando factores muy importantes tales como ubicación y tipo de yacimiento, vida de la mina, futuras exploraciones, ubicación de la planta concentradora, campamentos, etc. Estas ventajas y desventajas se deben valorizar en términos de costos de operación, mantenimiento, reemplazamientos, costos de energía, etc., de modo que obtengamos luego de una sumatoria un costo final para cada caso.

2. Túneles en Carreteras.-

El planeamiento de toda ruta para tráfico debe ser precedido por un análisis económico y ningún diseño real puede ser preparado sin que la construcción de la ruta sea justificada económicamente (Análisis de eficiencia de la Inversión). Esto es de especial significado en el caso de túneles, los cuales son las mas caras estructuras en Ingeniería Civil y así sus costos específicos por unidad de longitud en rutas de tráfico o transporte son muchas veces mas altos que aquellos de línea abierta. Consecuentemente el ahorro en distancia mediante el túnel y el volumen de tráfico que lo recorre deben ser suficientes para resultar en ahorros en costos de longitud y de operación y compensar los altos costos específicos de construcción.

Debe determinarse primero el anticipado volumen de tráfico, para cuyo caso se hace un estudio del área efectiva aledaña a la proyectada vía, su población, consumo y

producción industrial, presentes y por lo menos de los próximos 10 años. Lo anterior proporciona una base para un estimado del número de vehículos que usarán la ruta. Establecidos estos costos y los costos de operación por unidad de longitud la economía de la construcción puede ser determinada por diferentes métodos.

Sea C_1 el costo de construcción de la ruta que incluye el túnel, tenemos:

$$C_1 = L_t \cdot K_t + L_1 \cdot K \quad \text{donde:}$$

L_t es la longitud del túnel

L_1 es la longitud de la ruta que llega al túnel mas la de la ruta que sale del túnel,

Sea C_2 el costo de construcción de la ruta alternativa que no incluye el túnel (ruta de línea abierta), tenemos

$$C_2 = L_2 \cdot K \quad \text{siendo:}$$

L_2 la longitud de la ruta de línea abierta,

K_t y K son los costos totales de capital por metro lineal de túnel y de ruta abierta respectivamente. Si denominamos U_1 al costo de operaciones total anual por todos los vehículos que usan la ruta que incluye el túnel y U_2 al costo de operaciones total anual de la ruta alternativa que no considera el túnel, tendremos que el exceso de capital invertido en el túnel será recuperado luego de un período de:

$$t = \frac{C_1 - C_2}{U_2 - U_1}$$

La construcción de un túnel parece ser justificada cuando t es menor que un cierto período de amortización comunmente aceptado, generalmente tomado alrededor de 10 años.

Los costos de operación pueden ser comparados sobre una base que considere ciertas distancias como las diferencias de cotas entre los puntos mas alto y bajo del túnel y de la ruta alternativa.

3. Túneles para Irrigaciones.-

La principal justificación económica para este tipo de proyectos queda establecida por el hecho de que, como en el caso del proyecto de irrigación de las Pampas de Olmos, luego de tomar en consideración todas las posibles alternativas, el proyecto de construcción de un túnel es el método mas economicamente factible de irrigar una zona determinada. Como alternativas para la consecución del mismo fin, se realiza estudios de desalinización de aguas marinas, estudios de aguas subterráneas y las posibilidades de su extracción, etc.

En el Perú se tiene muchos proyectos de irrigación para diferentes zonas del desierto de la Costa, todos ellos con iguales o muy similares características y en cada caso se ha considerado como estructura principal un túnel para el transporte de las aguas de un lado a otro de la Cordillera Occidental.

Los siguientes factores son muy importantes y quedan involucrados en cualquier análisis de prefactibilidad para la construcción de un túnel de irrigación en una zona:

a) Geografía Regional de la zona que incluye ambas: la zona de toma de agua y la zona por irrigar.

b) Ventajas y desventajas que ofrece dicha zona para la construcción de los sistemas suplementarios tales como: Distribución de aguas, generación de electricidad (instala-

ción de hidroeléctricas que aprovechan la caída del túnel) y su transmisión a las ciudades circundantes, desarrollo industrial, etc.

c) Tiempo de completamiento de la construcción de todos los trabajos civiles e hidráulicos.

d) Peso y precios de toda la producción agraria que se obtendría de la zona irrigada.

e) Influencia Socio-Económica de la irrigación.

III. CONSIDERACIONES GEOLOGICAS GENERALES EN LA CONSTRUCCION DE TUNELES

1. Exploración y Levantamiento Geológico.-

La mas importante fase de los trabajos preliminares en la construcción de túneles es la cuidadosa exploración de las condiciones geológicas. El ambiente geológico afecta decisivamente dos factores: a) Las cargas que actuan sobre el túnel y b) La elección del método mas adecuado a emplearse para la construcción del túnel.

Por esta razón es indispensable la consulta a un geólogo cuando se considera los primeros planes para el túnel o alguna otra estructura subterránea extensa.

Los expertos, como resultado de una experiencia local previa o de mapas geológicos existentes, pueden indicar en esta temprana etapa de diseño, ciertas formaciones geológicas o estratificaciones que dificulten los trabajos de construcción o aun que los hagan imposibles. La información obtenida de mapas geológicos de gran escala es solo de carácter general y no se obtendrá una visión detallada de las condiciones geológicas si no se realizan exploraciones minuciosas de suelo y rocas.

La ubicación general del túnel está regida por intereses de transporte o tráfico mientras que la exacta ubicación es controlada por las condiciones geológicas que prevalecen en el área. Una consideración importante en seleccionar la ubicación de un túnel son sus puntos de sali-

da y entrada (Portadas del Túnel); estas portadas actuando como paredes retentivas son muy sensibles a estratificaciones adversas, lo cual puede resultar en una tendencia a derrumbarse.

Cuanto mas cuidadosa y eficiente es la exploración del ambiente y condiciones geológicas de la localización propuesta, mayor confianza habrá en la preparación de planos del túnel y en la elección del método de construcción del mismo todo lo cual redundará en un túnel construido con mayor rapidez y óptima economía.

Brevemente expuesto, los propósitos de una exploración geológica son los siguientes:

1. Determinación del origen y de la verdadera condición de las rocas.
2. Recolección de datos hidrológicos e información de gases subterráneos y temperaturas de suelo.
3. Determinación de propiedades físicas, mecánicas y de resistencia de las rocas a lo largo de la línea o eje del túnel y
4. Determinación de rasgos geológicos que puedan afectar la magnitud de presiones de rocas a ser anticipadas a lo largo de las localizaciones propuestas.

Las exploraciones deben tender a:

1. Investigar lo que será la cubierta del túnel
2. La determinación de la posición y calidad de la roca subterránea.
3. Las condiciones de drenaje superficiales.
4. La posición, tipo y volumen de los gases contenidos en las rocas subterráneas.

5. La determinación de las propiedades físicas y la resistencia a ser taladradas de las rocas que se hallen. La Tabla No. 1 muestra una clasificación de las rocas de acuerdo a su resistencia a la compresión.

La secuencia de exploraciones geológicas referidas a la construcción de túneles puede dividirse en tres grupos:

a) Investigaciones de carácter general previas al planeamiento, las cuales deberían incluir la inspección bibliográfica y estadística de la morfología, petrografía, estratigrafía e hidrología del medio ambiente. Esto debe ser completado por un reconocimiento extensivo del campo y por exploraciones superficiales. El reconocimiento a pie del área, donde fuere posible, ampliará los datos obtenidos por previos estudios bibliográficos. Mediante fotografías aéreas no solo pueden ser obtenidos muchos de los datos arriba mencionados sino que un observador entrenado o especialista puede identificando la vegetación, sacar conclusiones a cerca de características químicas y el origen (ígneo o sedimentario) de la cama rocosa enterrada, además de otros datos como afloramiento de fallas, plegamientos, etc.

Los estudios hidrológicos involucran las corrientes de drenaje, ubicación de manantiales, determinaciones de pH. Las características mineralógicas, químicas y termales del agua superficial local, contribuyen con valiosa información relativa a la naturaleza de la cama rocosa y sus condiciones.

Se programa investigaciones geoquímicas para es-

tablecer una correlación entre el suelo y la cama rocosa yacente. La composición total, concentración anormal de elementos y su relativo porcentaje en suelos residuales puede ser un resultado muy valioso para fijar la naturaleza, extensión y el grado de descomposición de dicha capa.

Las exploraciones geofísicas (sean de resistividad eléctrica o métodos sísmicos) son de mucha ayuda en la exploración de los límites de la roca del suelo cuando se delinear zonas de falla o corte, cuerpos ígneos o cuerpos de mineral, estructuras geológicas o fenómenos similares sin embargo, son muy aconsejables las verificaciones mediante perforaciones diamantinas.

b) Investigaciones geotécnicas (subterráneas) detalladas paralelas al planeamiento pero previas al proceso de construcción mediante las cuales se obtiene una mejor información sobre las propiedades físicas y químicas de las rocas a ser taladradas, tanto como su condición (alteración, consistencia, densidad relativa, fisuración). Información sobre la localización y profundidad de capas, plegamientos, fallas, planos de camas rocosas y juntas tanto como la localización, cantidad y composición química de aguas subterráneas asociadas al medio es de mucha importancia. La determinación de ocurrencia de gas y aumento de temperatura en las rocas tanto en localización como en extensión es similarmente valiosa.

c) Las investigaciones Geológicas deben continuar durante el proceso de construcción del túnel, no solamente para verificar los datos obtenidos durante el planeamiento sino también para asegurar si el método de construcción que se

sigue es el correcto o necesita ser modificado. Por esta razón un taladro piloto debe ser perforado adelantándose al frente del túnel para explorar las condiciones reales de la roca tomando muestras en las cuales pueda realizarse análisis químicos de resistencia y ocasionalmente para mediciones in-situ de las presiones laterales de la roca.

Tabla No. 1.

Dureza de diferentes rocas 'x'.

<u>Descripción</u>	<u>Resistencia a la Compresión (psi) = lbs/pulg²</u>	<u>Rocas típicas encontradas</u>
Blanda	6000 - como máximo	Esquisto, Capas Rojas, Arcillas.
Semi-Blanda	6000 - 12000	Dolomita, Arenisca, Mármol, Riolita.
Semi-Dura	12000 - 25000	Caliza, Granito, Gneiss, Riodacita
Hard Dura.	25000 - como mínimo	Diorita, Cuarzita, Horneblenda.

'x' (Zandly 1970)

IV. METODOS PARA LA CONSTRUCCION DE TÚNELES

1. Clasificación de Túneles.-

Los túneles son pasajes subterráneo para transporte, sirven para varios propósitos incluyendo: minería, suministro de agua potable, servicios de drenaje, ferrocarriles y movimiento vehicular.

En la mayoría de los casos, el propósito del túnel es lo que determina la forma y dimensiones de su sección transversal pero, esta sección también varia de acuerdo al método de construcción del túnel; las cargas internas que actúan sobre el túnel; tipo, resistencia, presiones y contenido de agua del terreno y de acuerdo a la resistencia del material que cubrirá el túnel.

Una clasificación muy interesante de acuerdo a los propósitos a que sirven los túneles es dada por K. Szechy (1967). Las secciones transversales mas comunmente adoptadas se indican en cada caso:

A. Túneles para Tráfico.

1. Túneles para ferrocarril: Sección en forma de herraje.
2. Túneles para carreteras: Sección de arco aplanado.
3. Túneles para peatones: Sección rectangular o circular.
4. Túneles para navegación: Sección mixta de arco aplanado y base rectangular.

B. Túneles para transporte.

1. Túneles para Centrales Hidroeléctricas: Sección circular o de herraje.
2. Túneles para suministro de agua potable: Sección circular.
3. Túneles para admisión y conducción de servicio públicos: Sección rectangular o circular.
4. Túneles para transporte en plantas industriales: Sección variable en cada caso.

Clasificación de Métodos de Construcción de Túneles.-

Otro muy importante criterio de clasificación de túneles es de acuerdo al método de construirlos y tenemos los siguientes:

1. Corte y Recubrimiento.- Cuando los túneles son excavados a cielo abierto y luego recubiertos subsecuentemente.
2. Roca Dura.- Cuando el túnel es construido a través de rocas que requieren perforación y voladura o algún otro proceso similar de alta energía para su arranque.
3. Roca Blanda.- Este método puede definirse como la aplicación de maquinaria a suelos que no se autosostienen. Este método de construcción es llevado a cabo usando (Shields) protectores tubulares pues el principal problema es el de sostener el terreno mientras el túnel avanza y se construye el sostenimiento permanente.
4. Tubos Sumergidos.- Este método es usado principalmente para la construcción de túneles subacuáticos cuando el fondo o cama del río o lago esta constituido por capas sueltas

y permeables a una considerable profundidad y en donde es imposible hacer drenaje. En este caso el túnel es construido por lanzamiento y hundimiento de tubos prefabricados (caissons) dentro de trincheras previamente dragadas en el fondo del río o lago.

La Tabla No. 2 indica, basada en la experiencia, la variación de los diámetros de túneles clasificados de acuerdo a su propósito.

Tabla No. 2

Fluctuación de Diámetro de Túneles de acuerdo a su Propósito

Diámetro en pies	5	10	15	20	25	30	35	40
Túneles para:								
Ferrocarriles							28	35
Transporte Urbano		10	15	20				
Carreteras						25	35	
Hidroeléctricas	6							
Abastecer agua	6	10						
Irrigaciones		10	15	20				
Drenaje	6	10						
Alcantarillado	6			20				
Cables		10	12					
Minería		10	15	20				
Almacenaje		10	15					

6 pies de diámetro de túnel es el mínimo para excavaciones por Perforación y Voladura o con Máquinas Tuneladoras.

2. Método Convencional para la construcción de túneles (Perforación y Voladura).-

El método mas usado para la construcción de túneles listos para ser excavados es el de Perforación y Voladura. Este método es la repetición de un ciclo de operaciones, cada una de las cuales realiza una contribución amplia y determinada en el controlado avance del frente del túnel. Factores tales como la forma y tamaño de la sección transversal y el tipo de roca a ser penetrado influyen en detalles del método de trabajo. Pero el orden básico de progresión en todos los túneles grandes o pequeños es primero perforar todos los taladros requeridos para arrancar toda el area seccional del túnel, en tal número y siguiendo una distribución como para lograr un adecuado avance con el mínimo consumo de explosivos y con una fragmentación apropiada para una limpieza eficiente. En el segundo paso el material es disparado (volado), tercero es cargado sobre algún tipo de equipo transportador y cuarto el desmonte debe ser desalojado de una manera rápida y segura. Algunas operaciones suplementarias tan importantes como las mencionadas son: Desatado, Ventilación, Drenaje y Sostenimiento.

Este método es de uso general en Ingeniería de Minas en todo el mundo, muchos tipos de equipos son usados en cada fase del ciclo pero y de acuerdo a la naturaleza del terreno, no hay límite de tamaño y forma de las excavaciones que pueden ser hechas.

Muchas mejoras recientes en equipo y técnica han

elevado la eficiencia del método de Perforación y Voladura. De acuerdo a los expertos los mas cercanos futuros desarrollos incluyen Jumbos automatizados hasta alcanzar características de maquinaria de precisión, capaces de ser programadas por computadoras. Actualmente se alcanzan avances de 40 a 60 pies por dia bajo buenas condiciones durante la presente década serian posibles avances de hasta 80 pies diarios.

La siguiente es una enumeración de los factores que afectan los costos y eficiencia de cada operación en este método de construcción de túneles. Mayores descripciones del proceso de trabajo no son necesarias desde que ésta es una rutina muy conocida por gente relacionada con los campos de Ingeniería Minera y Civil.

Perforación.- La maquinaria para realizar esta fase del ciclo varia ampliamente en velocidades de penetración y requerimientos de personal. El desarrollo de equipos de perforación mas pesados, montados en jumbos de control mecánico, ha adelantado la práctica de perforar taladros cada vez mas largos en la construcción de túneles (ej:el jumbo Gardner-Denver con 6 máquinas G.D. 123 para taladros de 13 pies y 1 máquina G.D. 133 para perforar el corte).

Durante la operación de perforación del frente, los siguientes son factores muy importantes que afectan los costos del túnel y la eficiencia de la mano de obra:

1. Velocidad de penetración a ser alcanzada en cada ciclo.
2. Tipo y cantidad de explosivo a ser usado.

3. Distribución apropiada de taladros para evitar sobreexcavación o disparos soplados.

4. Apropiada distribución de taladros para alistar el material arrancado en la forma mas sencilla para la limpieza con las facilidades existentes.

Voladura.- Muchos tipos de explosivos y detonadores han sido probados para hacer del cargado y chispeo una operación mas eficiente y segura.

Una buena práctica durante las primeras etapas de la construcción de un túnel, es determinar por experimentos sucesivos la distribución óptima de taladros y la cantidad mínima eficiente de explosivos.

Se podría considerar como exitosa una técnica de voladura cuando:

1. Controla, tanto como sea posible, sus efectos en las estructuras cercanas y en la roca circundante.

2. Controla, tanto como sea posible, el peligro ofrecido por la presión de aire causada por los disparos.

3. Minimiza el tiempo de cargado de explosivos y la mano de obra requerida.

4. Cuando es eficiente en términos de minimizar la sobreexcavación que debe ser removida mediante desatado y que incrementa los costos de sostenimiento y enconcretado.

5. Cuando es eficiente en términos de evitar disparos soplados que conducen a pérdida de tiempo en reperfusión, explosivo adicional y costos de mano de obra mas alto.

Carga y Transporte.- Esta fase empieza tan pronto como el frente del túnel, luego del disparo, no ofrezca peligro pa-

ra el retorno de hombres y máquinas. Entre los equipos mas comunmente usados están los cargadores frontales (overhead loaders), palas mecánicas. Para la extracción del material roto se adaptan camiones, locomotoras y vagones. Extraer el desmonte desde el frente del túnel es una de las mas costosas operaciones del método convencional porque no es realizada ni continua ni automaticamente.

Algunos factores complican el problema de carga y transporte:

1. El tamaño de la sección limita el tamaño de los carros o vagones que pueden ser usados pues el pequeño espacio disponible junto al equipo cargador no permite un rápido cambio de carros cargados por vacios,

2. A lo largo del túnel especialmente cuando éstos son de gran longitud, el tren cargado que está saliendo debe dejar pasar sin demora al tren vacio que está regresando al área de limpieza.

Algunas nuevas ideas han sido aplicadas para evitar el tiempo de espera a la máquina de carga; camiones que ruedan hacia adelante y en retroceso sin la necesidad de un espacio de giro en el frente del túnel, el jumbo Gantry que permite una casi simultánea operación de limpieza y perforación, el cambio tipo California que apura el cambio de carros cargados por otros vacios; todas estas máquinas han sido exitosamente usadas.



Figura No. 1 Fotografía de un Jumbo para perforar Túneles

3. Método que utiliza la Máquina Tuneladora.-

La denominada Excavación Rápida se ha casi convertido en sinónimo de perforación de taladros de gran diámetro. Este concepto funciona para distintos tipos de trabajos subterráneos tales como: Túneles horizontales o desarrollo de niveles en minas, perforación de chimeneas, perforación de piques. La penetración continua del frente de un túnel utilizando solamente una máquina que simultáneamente rompe la roca y palea o recoge los fragmentos es un método que simplifica grandemente el proceso de construcción de túneles.

Desde 1953, se ha utilizado más de 50 máquinas¹ tuneladoras para perforar túneles de diferentes diámetros (hasta 36 pies) y longitudes (hasta 14 millas), en rocas duras o blandas y con mayor o menor éxito. En rocas blandas o semi duras, bajo condiciones adecuadas, las mencionadas máquinas han superado los métodos convencionales tanto en velocidad como en economía. Hoy en día está establecido en países europeos y en Estados Unidos que aumentaría el uso de estas máquinas si continúa el actual nivel económico y si las máquinas son construidas más flexibles y con un rendimiento mejorado desde el punto de vista económico.

Una máquina tuneladora a la que se considere exitosa debe ser capaz para:

1. Taladrar en forma continua a través de diferentes tipos de terreno y roca,
2. Colectar y remover los fragmentos de roca

arrancados, a la misma velocidad a la cual son producidos.

3. Excavar diversas formas de secciones transversales (no solamente circulares) y dentro de una escala de diámetros.

4. Permitir la construcción del sostenimiento del túnel y del recubrimiento del mismo, inmediatamente después del frente de perforación (ej.: a no más de 6 pies del frente cuando el túnel es perforado en roca suelta).

5. Taladrar el túnel con la dirección y gradiente correctas y ajustar errores de curva tanto en plano horizontal como vertical.

6. Controlar el medio ambiente en el túnel (calor, polvo, agua, etc.).

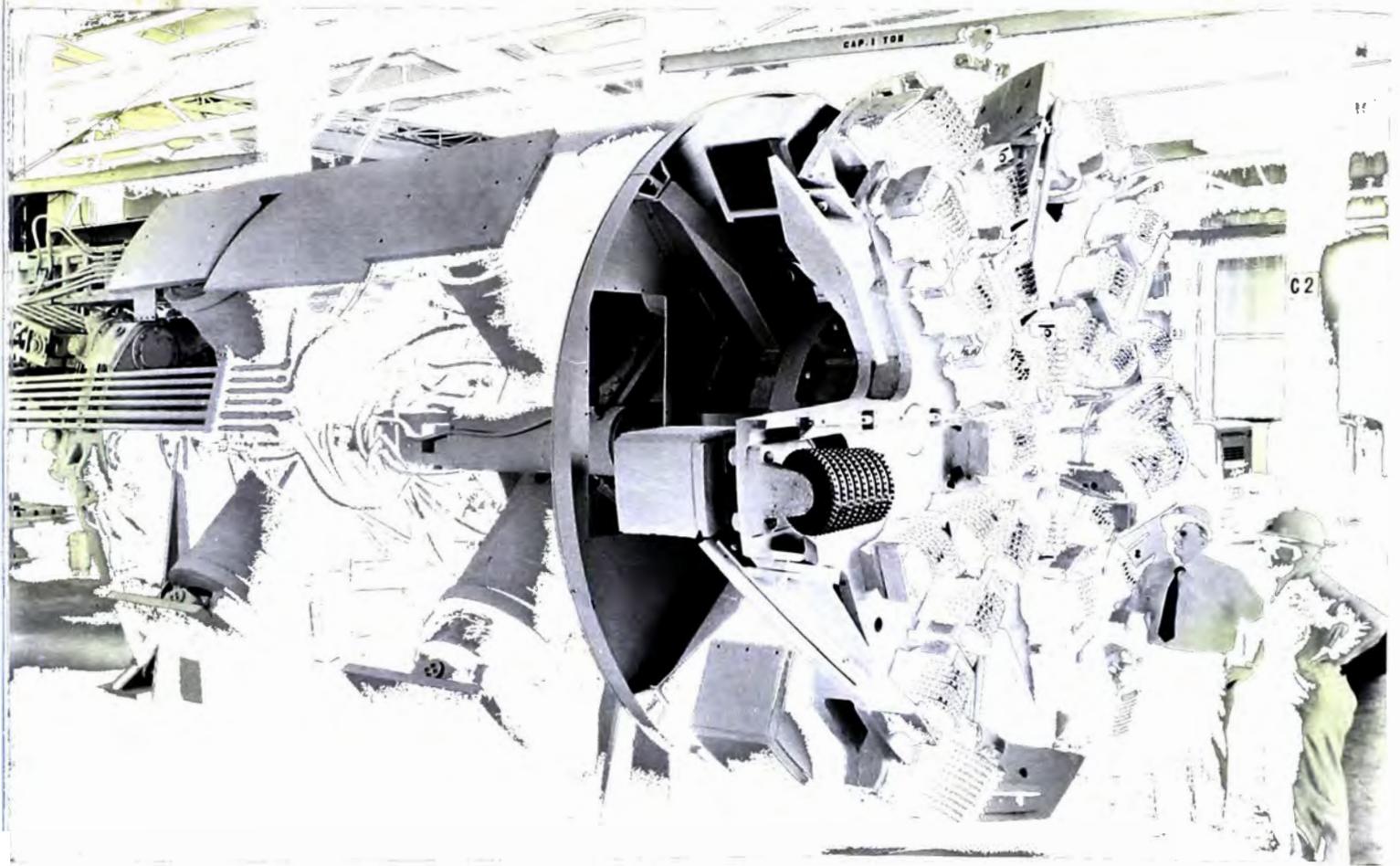
Además cada modelo de máquina debe prestarse a un fácil desmontaje de piezas relativamente pequeñas y a un fácil y rápido cambio de los elementos cortadores (Cutters) que son descartables en todos los casos.

Para un mayor uso de las máquinas tuneladoras en Minería, se les debe construir aptas para perforar curvas cerradas. Esto es muy importante y probablemente originará el que las máquinas sean construidas en segmentos articulados.

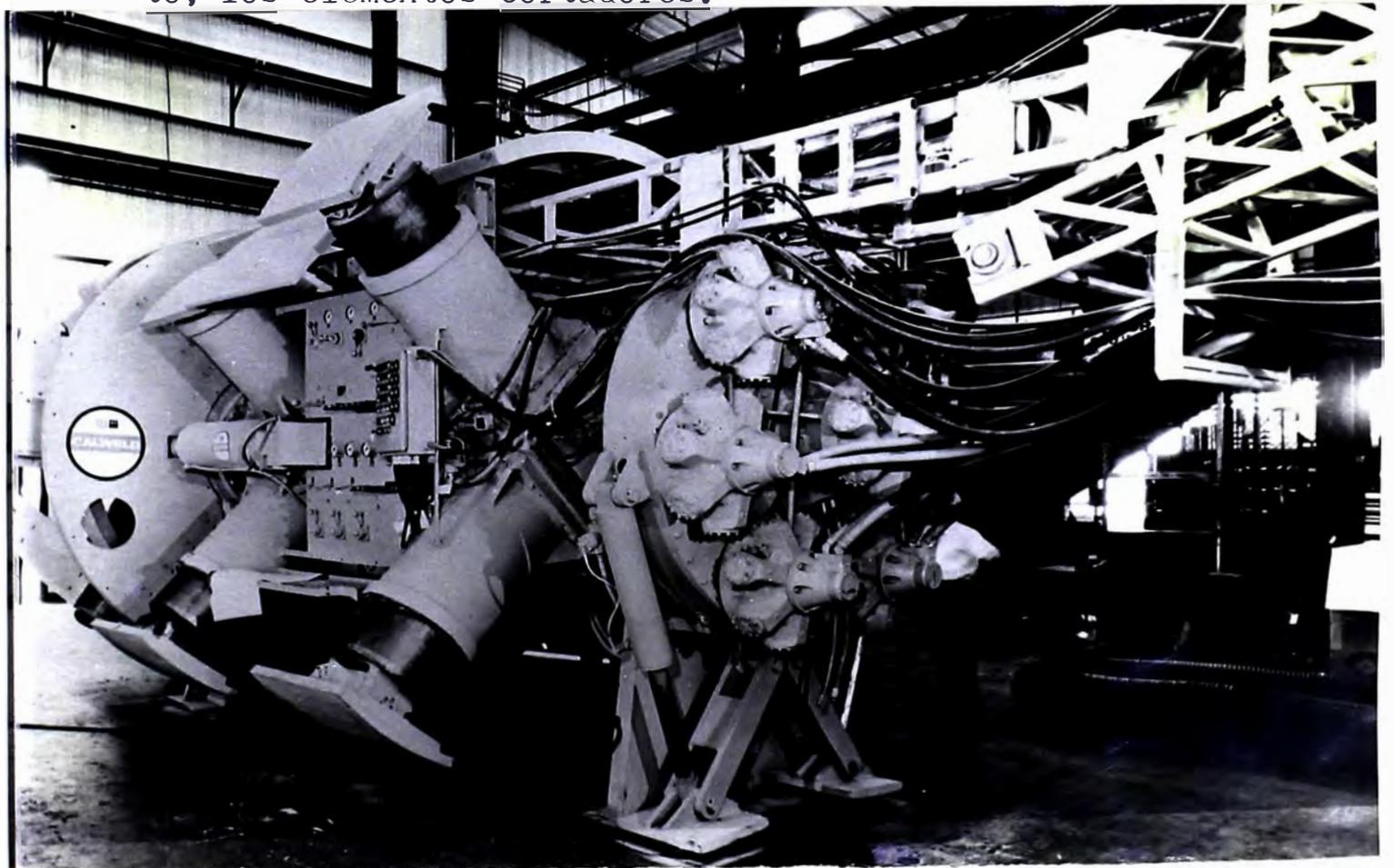
Diseño y Funcionamiento de la máquina Tuneladora.-

Estas máquinas, sin excepción, incorporan en su estructura los siguientes componentes: (fig. No. 2)

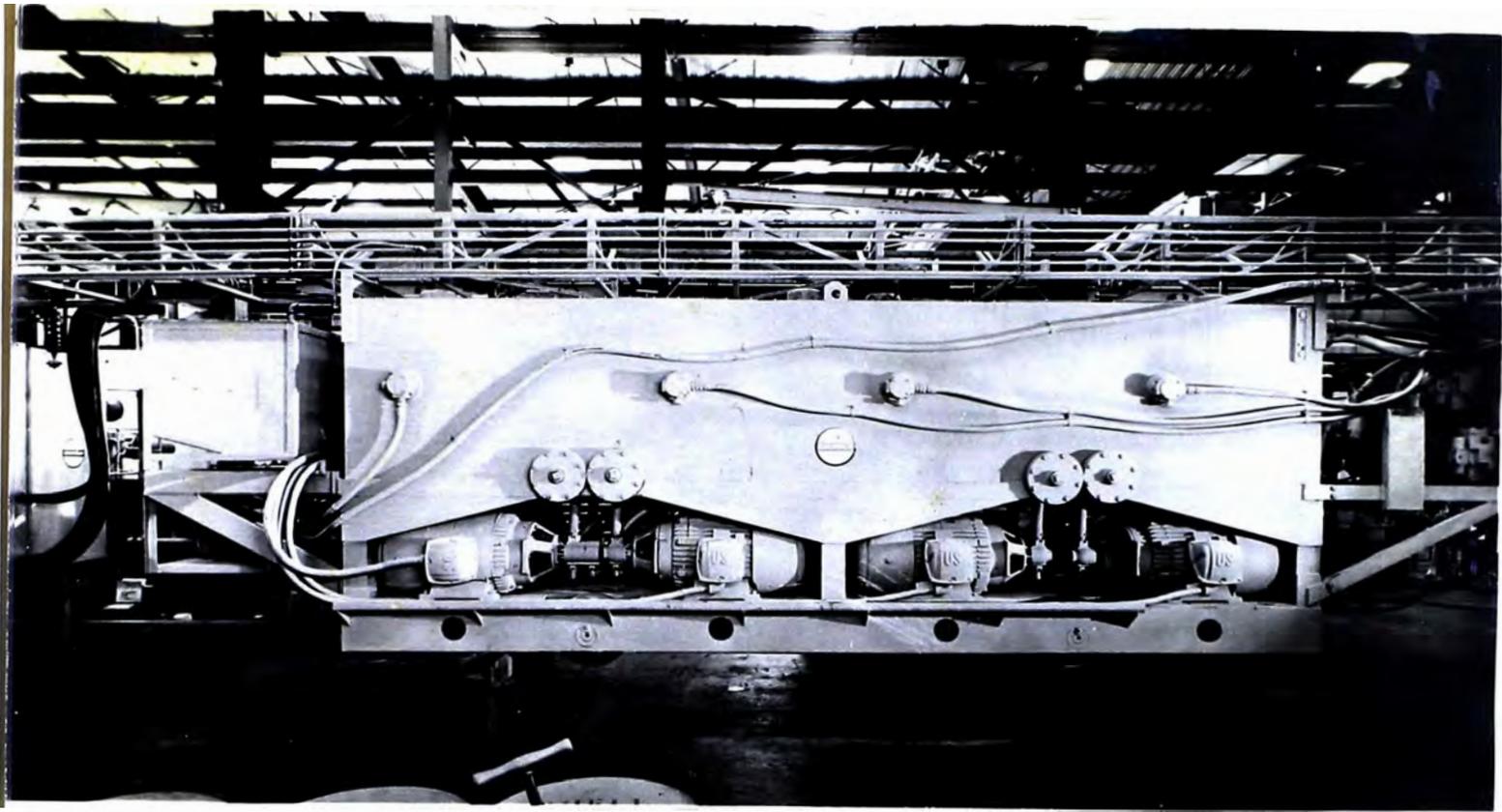
a) La cabeza Taladrante.- Un elemento construido de acero, generalmente algo cóncavo, lleva los elementos cortantes (fig. 3); lleva paletas adaptadas a su periferia que sirven para recolectar y vaciar los fragmentos de roca



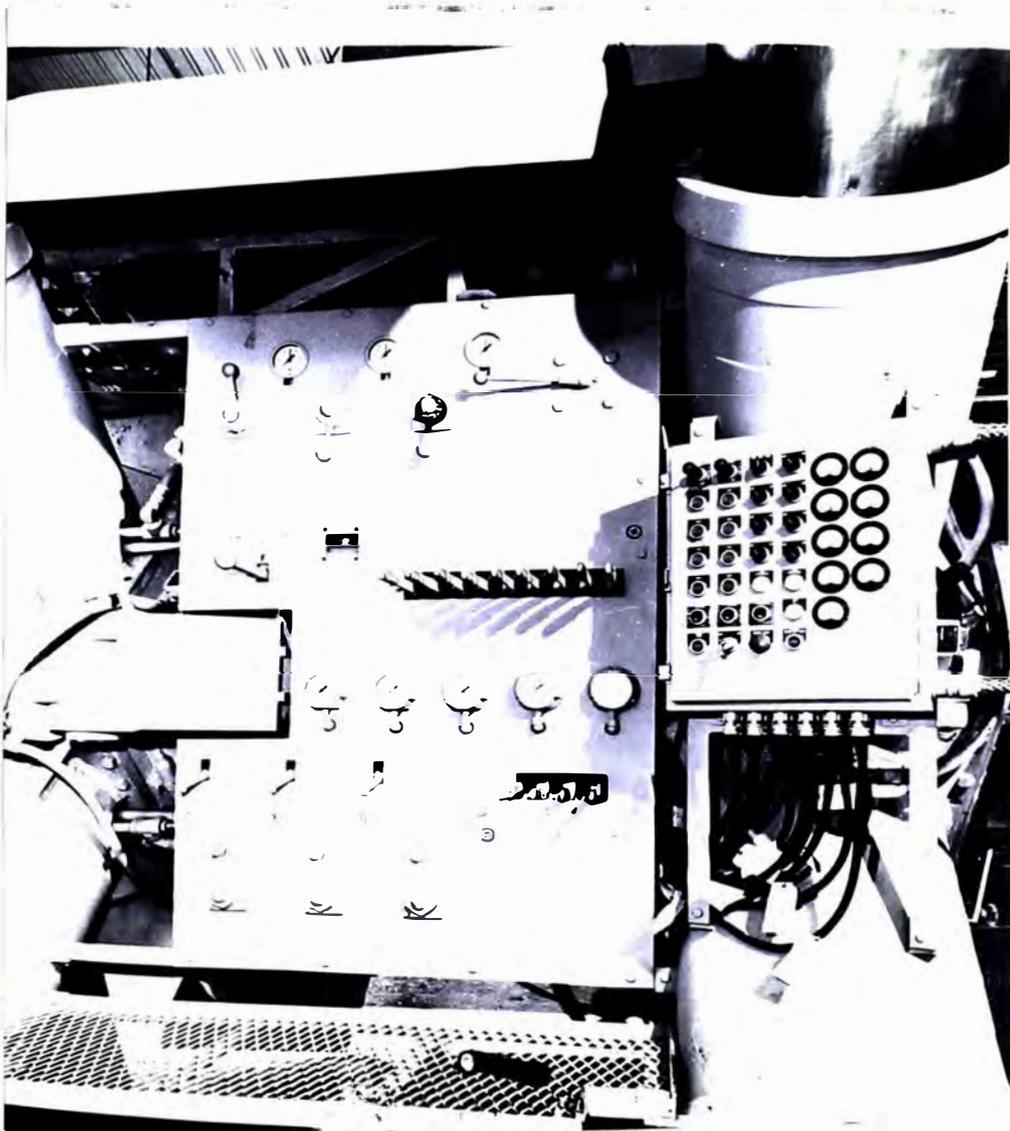
Se observa la cabeza taladrante de 13 pies de diámetro, los cajones recolectores de desmorte, el sistema de estacamiento, los elementos cortadores.



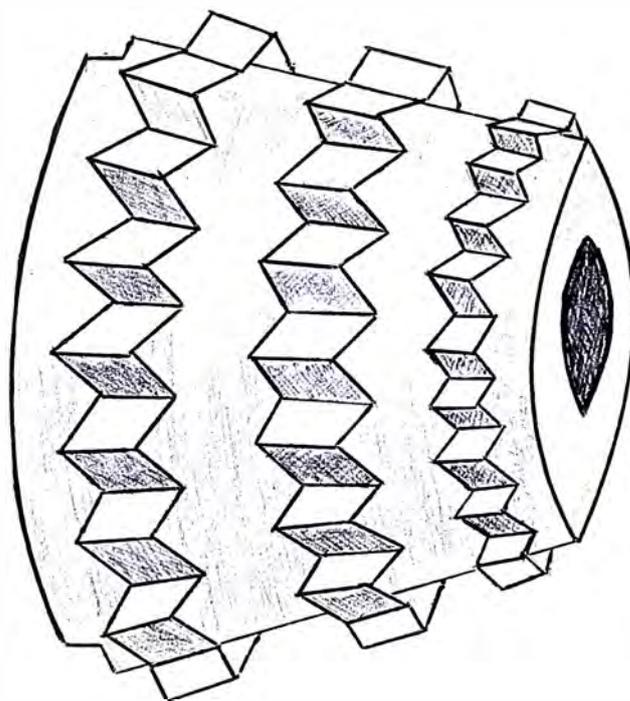
Vista general del lado posterior izquierdo, se aprecia el sistema transportador de desmorte.



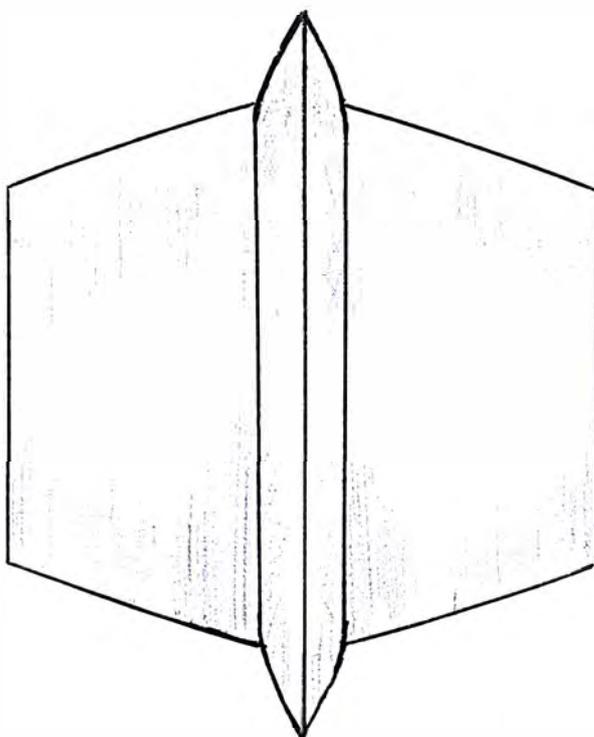
Vista que muestra la unidad electro-hidráulica de avance, el reservorio de aceite.



Vista de la estación del operador, a la izquierda las válvulas de control hidráulico, a la derecha las llaves de control de los motores eléctricos.



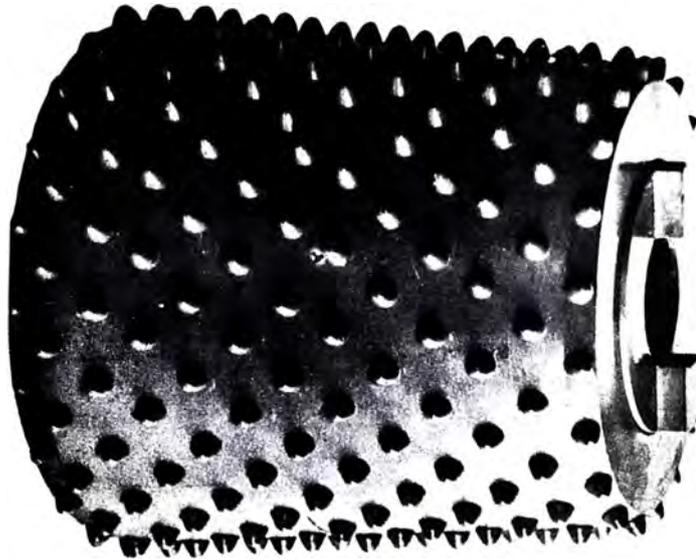
Rodillo Tipo Engranaje



Rodillo Tipo Disco

Figura No. 3 Diferentes tipos de Elementos Cortadores o Rodillos.

(continúa)



Rodillo Tipo Botón



Rodillo Tipo Sierra

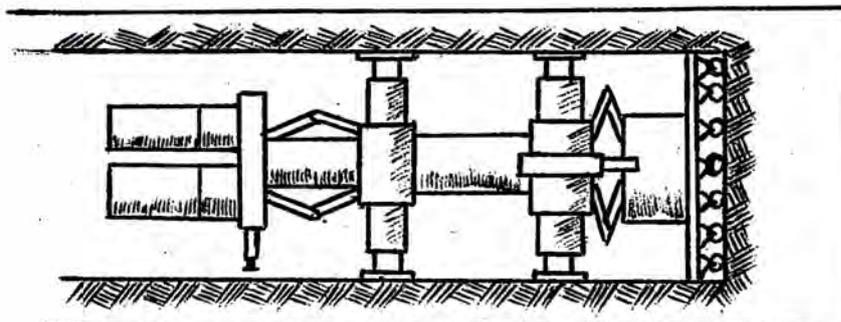
arrancada a la unidad transportadora que es generalmente una faja sin fin que recorre desde la cabeza cortante hasta la parte posterior de la máquina. La cabeza taladrante es accionada mediante motores eléctricos a una velocidad aproximada de 10 rpm., para un diámetro de 10 á 13 pies.

b) El cuerpo de la máquina.- Que tiene las siguientes funciones: sostener la cabeza taladrante, conectar los principales componentes y alojar los motores propulsores, los equipos eléctrico e hidráulico y el equipo auxiliar de la unidad direccional que guía a la máquina.

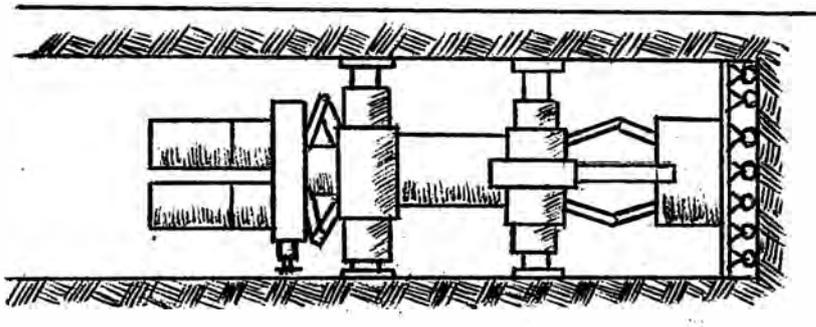
c) La unidad Propulsora.- Todas estas máquinas tienen un sistema de propulsión intermitente que utiliza cilindros y pistones de doble acción movidos hidráulicamente y que van instalados sobre una unidad de soporte que se traba o ancla contra las paredes del túnel.

d) La unidad Direccional.- Muchas máquinas utilizan un rayo laser como guía. Algunas combinan la unidad direccional con el sistema propulsor de tal modo que disminuye la probabilidad de alterar el alineamiento de la máquina durante una reubicación de la cabeza taladrante. Aparte de estos principales componentes la mayoría de las máquinas tuneladoras están equipadas con sistemas extractores de polvo, techos protectores de diferentes tipos, etc., el funcionamiento de la máquina es como sigue (fig. 4):

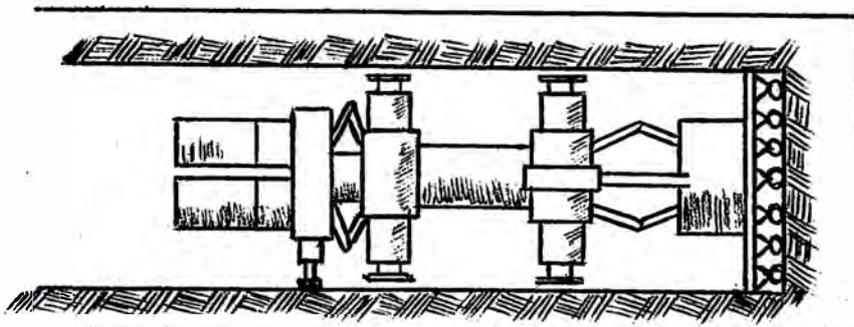
La cabeza taladrante es ubicada entre sus soportes y alineada en la dirección de avance deseada. La máquina se autoimpulsa hacia adelante por autoestacamiento contra las paredes del túnel y empujando la cabeza taladrante hacia



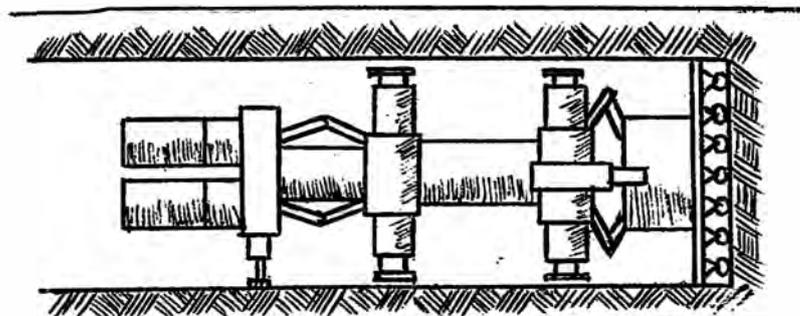
1. Comienzo de la Acción Taladrante, Máquina anclada, soportes traseros retraídos;



2. Fin de la Acción Taladrante, Máquina anclada, soportes traseros retraídos;



3. Comienzo de la Reubicación de la Máquina, Máquina sin anclar, soportes traseros extendidos;



4. Fin de la Reubicación, Máquina sin anclaje, la Cabeza Taladrante sin apoyar, ahora la Máquina esta lista para ser anclada y recomenzar la Acción Taladrante.

Figura No. 4 Operación de la Máquina Tuneladora

adelante apoyada en este anclaje. La cabeza taladrante gira y es al mismo tiempo precionada contra el frente del túnel. Los elementos cortantes (cutters) fragmentan o astillan el frontón y los trozos caen sobre un depósito de donde son recolectados mediante paletas y vaciados sobre la faja transportadora. En la parte posterior de la máquina este material es recogido por otra faja sin fin o por algún otro medio transportador. Al terminar la fase taladrante, la cabeza es sostenida por los soportes delanteros y posteriores que tiene la máquina, se afloja el estacamiento contra las paredes del túnel, se avanza la máquina haciendo funcionar los pistones hidráulicos y luego de reanclar la máquina, se presiona la cabeza taladrante contra el frente del túnel y haciéndola girar empieza un nuevo ciclo de perforación.

El tiempo aproximadamente requerido en cada paso es como sigue:

Taladreo de 2 á 6 pies	:	25 minutos
Remontaje de la máquina	:	2 á 4 minutos
Taladreo de 2 á 6 pies	:	25 minutos
Alineamiento de dirección y pendiente mas mas Proce- dimiento de Mantención	:	15 minutos

Total: 1 hora y 10 minutos para taladrar 4 á 12 pies de túnel dependiendo ^{de} ~~en~~ las características de la roca. ~~de cada máquina.~~ La Tabla No. 3 muestra una lista de máquinas tuneladoras de aproximadamente 13 pies de diámetro y el tipo de elementos cortadores que usa, (Yardley, 1970).

Tabla No. 3

Características de Máquinas Tuneladoras Existentes

Máquina	Diámetro de túnel (pulgs.)	Tipo de Elemento Cortador	Resistencia de la roca*
131/1956 Robbins	129	Discos	9000
1966 Caldwell	136	Discos	8000
836/1966 Habegger	138	Picos	20000
836/1967	138	Picos	18000
HRT /12/ 1964	144	Rod. tipo Botón	16000
MK14 /1965 Jarva	164	Rod. tipo Botón	16000
161/1961 Robbins	193	Discos	15000

* Resistencia a la compresión de las rocas en las cuales fueron usadas las respectivas máquinas tuneladoras.

4. Ventajas y desventajas de ambos métodos de construcción de túneles.-

Indudablemente las máquinas tuneladoras se hallan aún en sus tempranas etapas de desarrollo. Para una disminución de los costos de mano de obra, equipo y repuestos será necesaria una extensa investigación para mejorar las técnicas de construcción de túneles aplicando los principios de la Excavación Continua. Al mismo tiempo el método Convencional (Perforación y Voladura) parece tener un límite en sus futuras velocidades de avance que son posibles de alcanzar (100 pies diarios es el cálculo mas optimista).

Por lo anteriormente mencionado es razonable asumir que la mayoría de progresos en velocidades de avance y costos procederán de nuevos métodos tales como el que usa la máquina tuneladora.

Actualmente y con toda la experiencia adquirida, las opiniones comunes de contratistas, consultores, industriales, etc., a cerca de las ventajas y desventajas de ambos métodos están sumarizadas como sigue:

1. Flexibilidad.- Para el método Convencional no hay límites en lo que se refiere a su capacidad de perforación de cualquier forma y tamaño de sección transversal de túnel, a través de cualquier dureza de roca hasta hoy experimentada y siguiendo cualquier dirección deseada durante el proceso de construcción. Las máquinas tuneladoras son capaces de perforar solamente túneles rectos de diámetro uniforme y a través de rocas cuya dureza varía entre blanda y semidura,

esto si se quiere una operación eficiente.

2. Experiencia.- Bajo condiciones adversas el método de Perforación y Voladura ofrece mayor corrección el el pronóstico de problemas antes de empezar un proyecto. Las máquinas tuneladoras son aún comparativamente nuevas y la relativa falta de experiencia es un inconveniente.

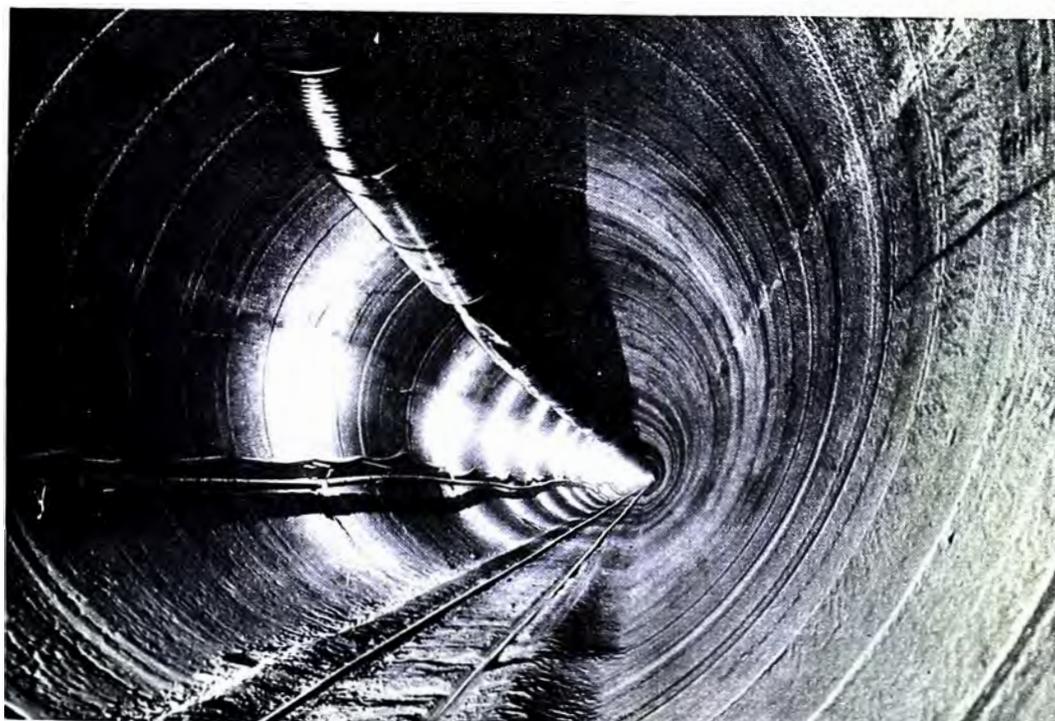
3. Ventilación.- Son mayores los requerimientos de ventilación cuando se usa la máquina tuneladora ya que se utiliza motores de alta potencia que producen altas temperaturas. El control de polvo de roca con estas máquinas demanda sistemas de ventilación mas grandes y mas complejos.

4. Disponibilidad y Entrega.- El periodo de tiempo que toma la fabricación de una máquina tuneladora varía de 9 á 18 meses. Esto puede afectar la programación de un proyecto de túnel desde que sería difícil para un contratista el ordenar la fabricación de una de estas máquinas antes de haber obtenido el respectivo contrato. Por el contrario, la normalización y los bajos costos de maquinaria hacen posible tener en reserva equipo de perforación y extracción. Esta disponibilidad permite mejores programaciones de construcción de túneles cuando se usa el método Convencional.

5. Seguridad y Sobreexcavación.- Aquí las máquinas tuneladoras ofrecen una gran ventaja. Desde que se elimina la voladura de rocas todo tipo de daño o fracturamiento a la roca circundante, como al techo y paredes del túnel, es reducido a un mínimo. La sección circular es extremadamente resistente a las presiones externas y el peligro de caída de rocas es casi no existente (fig. 5). La menor sobrerotura o sobreexcavación en túneles taladrados se traduce en:



Túnel construido mediante el Método Convencional (Perforación y Voladura)



Túnel taladrado con una Máquina Tuneladora

Figura No. 5 Fotografías mostrando la diferencia de Sobreexcavación.

la no necesidad de desatado de rocas, costos mas bajos en limpieza y transporte y tremendos ahorros en sostenimiento y revestimiento especialmente cuando se estiman proyectos de túneles de gran longitud.

6. Velocidad de penetración.- La operación casi continua que ofrece una máquina tuneladora y el tamaño uniforme de la roca rota permiten una mejor utilización del tiempo de trabajo disponible. Impresionantes velocidades de penetración han sido logradas (ej.: 3.8 millas de túnel de 12 pies de diámetro se taladró en 190 días entre Las Vegas y el Lago Mead en Nevada, Estados Unidos) (Anónimo, 1967) y por el constante desarrollo de esta técnica se puede pronosticar que estas altas velocidades de penetración serán también posibles a través de rocas duras.

Los costos de mano de obra y de mantenimiento serán discutidos en el próximo capítulo.

V. ANALISIS COMPARATIVO DE COSTOS

El propósito de esta evaluación económica es el de determinar los estimados de costos preliminares y detallados para un túnel con características similares al túnel proyectado para la irrigación de las Pampas de Olmos.

Desafortunadamente es muy difícil conseguir precios y costos reales particularmente en trabajos de Ingeniería Civil debido al sistema competitivo de licitaciones. Las relaciones de personal y equipo han sido seleccionadas en base a licitaciones reales publicadas en la revista "U.S. Engineering News-Record" para diferentes túneles los precios y costos fueron actualizados por medio de dicha revista y del "Survey of Current Bussines", una publicación del Departamento de Comercio de los Estados Unidos de América.

Tres diferentes máquinas tuneladoras fueron consideradas para calcular los costos de túneles taladrados. Importantes factores tales como las velocidades de penetración están basadas en la experiencia del autor y otros los 42 pies por día asignados al método Convencional proviene del promedio diario de avance durante los 3.5 años que fueron necesarios para completar el túnel Granduc en Canadá (Mamen, 1968). Las velocidades de avance asignadas a las máquinas tuneladoras vienen de la experiencia en el túnel Las Vegas-Mead Lake en Nevada (Anónimo, 1969) y en el túnel Navajo en Colorado (Bennet, 1968), ambos en EE.UU. Al mismo tiempo se ha asumido que el método a ser

seguido para excavar cualquier túnel en particular, será basado en la justificación económica aplicable a dicho trabajo.

El cálculo de costos ha sido dividido, para cada caso, en cuatro áreas básicas:

1. Costo de Equipo.- Debe considerarse las diferencias de inversiones iniciales en cada caso.

2. Costo de Labor o Mano de Obra.- Este factor tiene un gran impacto en la actual economía minera o de construcción y varía para cada método.

3. Costo de Fuerza Motriz.-

4. Costo de Sostenimiento y Revestimiento.- Basados en la experiencia, los costos de recubrimiento para túneles taladrados con las máquinas tuneladoras representan aproximadamente el 50% de los costos para túneles construidos mediante el método Convencional (Perforación y Voladura) en razón de la sobreexcavación que se produce por el uso de explosivos. El estimado de costos ha sido calculado en la base de dólares por yarda cúbica debido a que los modelos de túneles usados difieren en diámetro de sección transversal.

La fig.6 muestra la variación de pesos de las máquinas tuneladoras en función de su diámetro taladrante y la fig.7 da los precios de dichas máquinas en función a sus velocidades de avance. Para estas tablas se plotearon datos obtenidos de diferentes fuentes (Norman, 1967), (Muir y Glossop, 1968), etc.

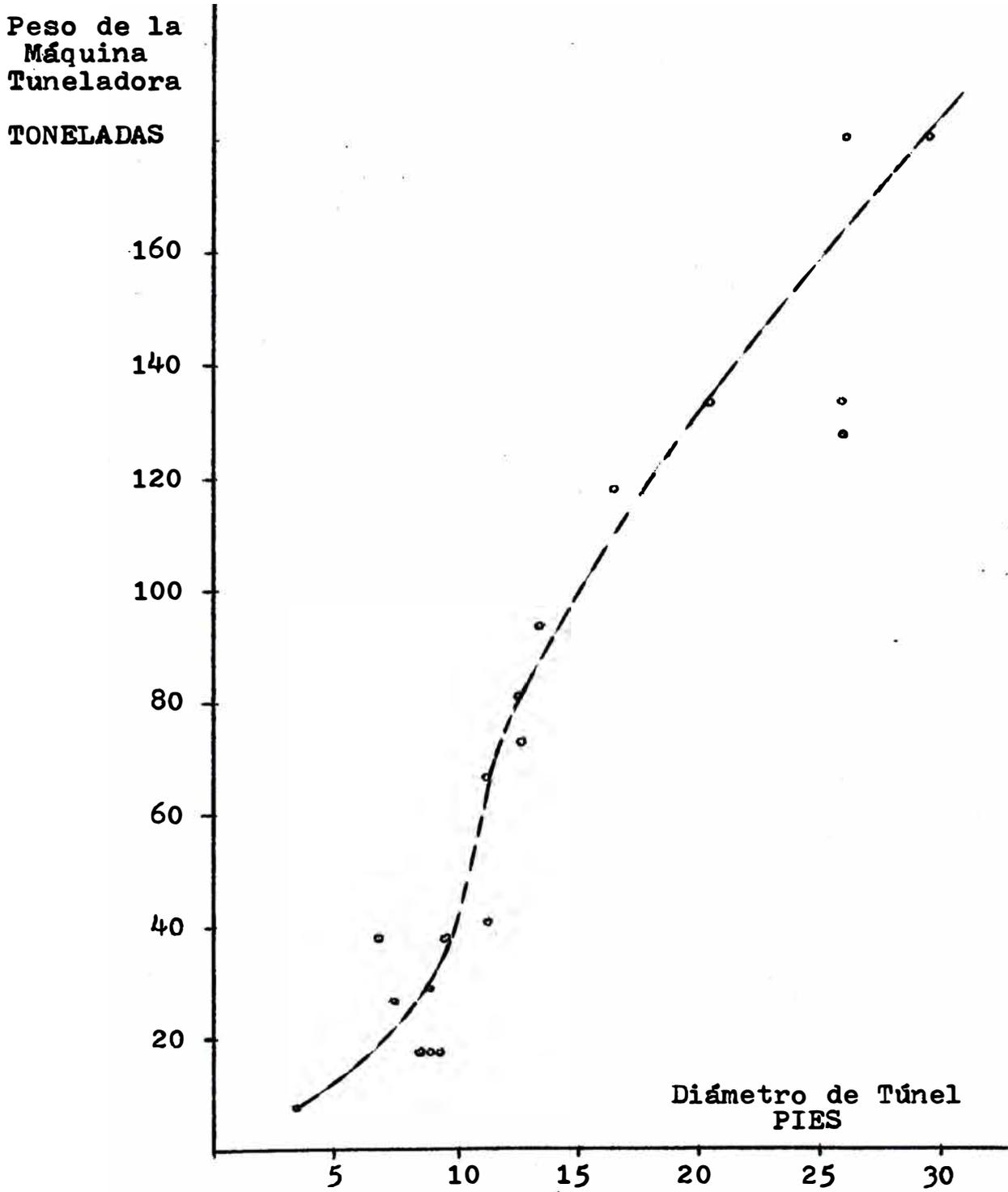


Figura 6 Variación de peso de máquinas tuneladoras de acuerdo al diámetro de túnel que taladran.

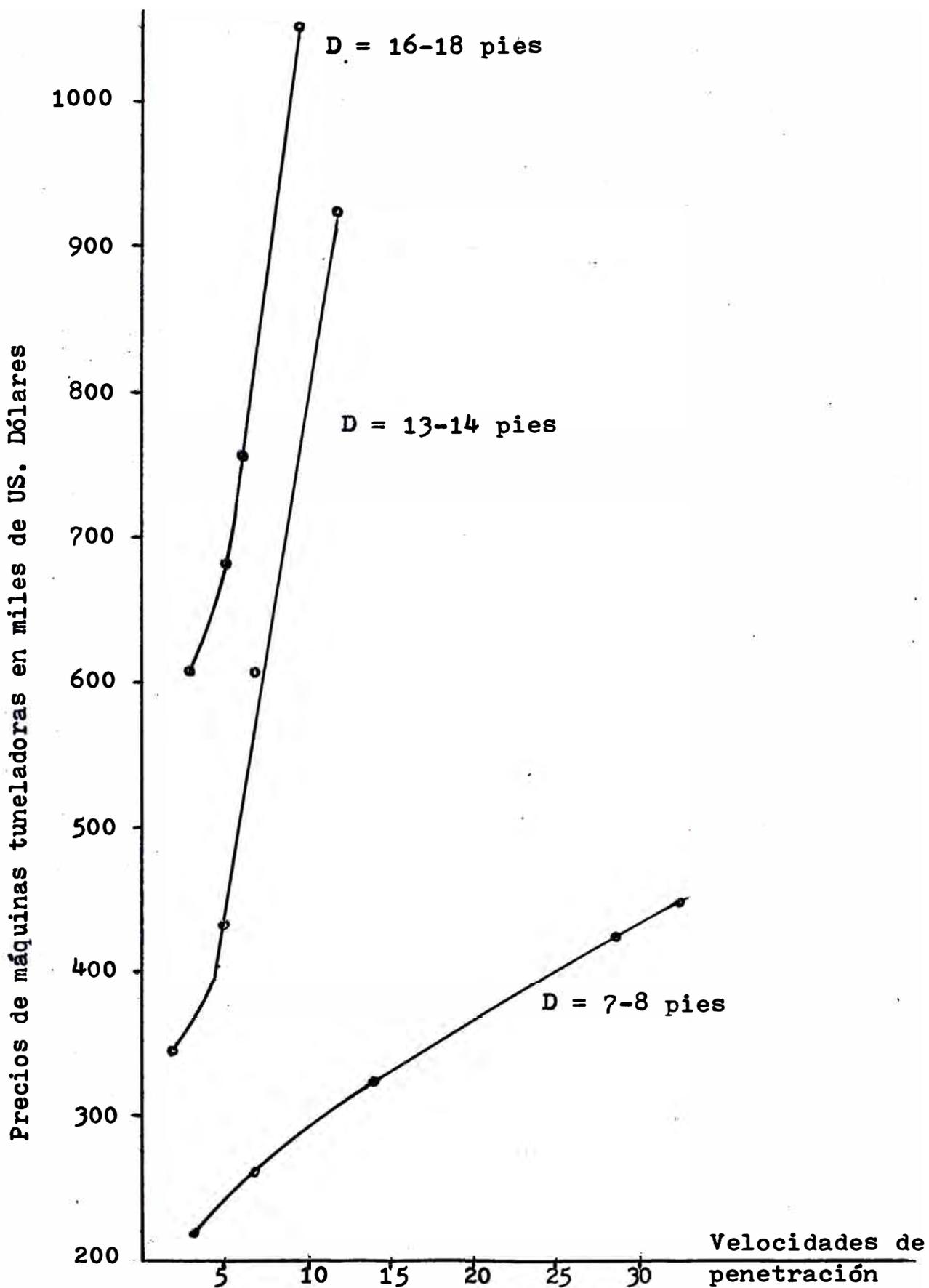


Figura 7. Variación de precio de máquinas tuneladoras de acuerdo a sus velocidades de penetración.

1. Cálculo de Costos para el Método Convencional.-

Características del Túnel:

Largo del Túnel : 12.8 millas = 20.48 km.

Diámetro del Túnel : 13 pies 3 pulg. = 159 pulg.

Velocidad de Avance : 8 pies por guardia, 8 horas por guardia, 3 guardias diarias.

Area de la sección transversal del túnel :

$$(3.14/4) \times (159/36)^2 = 15.33 \text{ yardas cuadradas.}$$

Yardas cúbicas por guardia = 71.5

Volumen total del túnel :

$$15.33 \times 12.8 \times 1760 = 344.110 \text{ yardas cúbicas}$$

Volumen por pie lineal del túnel :

$$15.33 \times 1/3 = 5.11 \text{ yardas cúbicas.}$$

Costos de Equipo (Método Convencional).-

<u>Descripción</u>	<u>Precio Unitario</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Total</u>
Jumbo de perforación			
tipo Gantry	\$ 24000	1	\$ 24000
Barrenos	1770	6	10620
Posicionadores hidráulicos	2530	6	15180
Compresor de aire, de			
1200 pies cub./minuto	28500	2	57000
Pala mecánica Conway-100	56200	1	56200
Locomotoras (a batería)	21000	1	21000
Batería de 56 celdas,			
31 placas Exide	21000	1	21000
Vagones (8 yardas cúbicas)	3870	8	30960
Coches para pasajeros	4310	2	8620
Plataformas	3380	2	6760
Transportador de explosivos	5000	2	10000
Transformadores 3 KVA,			
(4,160V,5KVA exteriores)	100	3	300
Transformador principal	5000	1	5000
Control de circuito	5320	1	5320
Control para el motor	6000	2	12000
Interruptor del circuito de			
aceite (225KVA,3 ϕ ,4160V)	2200	4	8800
Ventilador de 15 HP	2300	4	9200
Bomba para agua			2200
Bomba para drenaje			3300
			\$ 307460

$$\frac{\$ 307,460}{344,110} = \$ 0.89 / \text{yarda cúbica.}$$

Costos de Equipo adicional (Método Convencional).-

Calculado en la base de dólares por pié lineal de túnel.

<u>Descripción</u>	<u>\$ por pie lineal</u>
Tuberia de agua (2 pulgadas ϕ)	\$ 0.75
Tuberia de aire (6 pulgadas ϕ)	2.15
Barrenos	2.00
Explosivos	12.75
Transporte (rieles, chapas, clavos de riel etc.)	32.30
Tuberia o mangas de Ventilación (30 pulgadas ϕ)	11.35
Cable eléctrico principal	5.50
Cable eléctrico para alumbrado	3.00
	<hr/>
	\$ 69.80

$$\frac{\$ 69.80}{5.11} = \$ 13.66/ \text{ yarda cúbica}$$

Costo total de Equipo: $0.89 + 13.66 = \$ 14.55/\text{yarda cúbica}.$

Costos de Labor (Método Convencional).-

<u>Descripción</u>	Número por <u>guardia</u>	Jornal <u>/hora</u>	Total <u>\$/guardia</u>
Compresorista	1	\$ 3.62	\$ 28.96
Capataz de electricistas	1	5.76	46.08
Electricistas	2	4.82	77.18
Capataz de mecánicos	1	5.50	43.96
Mecánicos	2	4.08	65.28
Lubricador	1	3.81	30.48
Chequeo de herramientas	1	4.32	34.56
Operador de la pala mecánica	1	4.60	36.86
Motorista	3	3.98	95.61
Brequero	3	3.72	89.28
Volquetero	1	3.57	28.60
Capataz de Carrilanos	1	3.91	31.28
Carrilanos	3	3.56	85.53
Cuadrilla de Desatado y tubos	3	3.56	85.53
Chofer	1	3.31	26.50
Perforistas	6	3.90	187.20
Ayudante de perforista	6	3.81	182.88
Bodeguero	1	3.14	25.12
Ayudante de bodeguero	1	2.68	21.50
Carpintero	1/3	4.20	11.20
Herrero	1/3	4.51	12.02
Ayudante de herrero	1/3	4.03	10.75
Aguzador de barrenos	1/3	4.68	12.48
Cargador de explosivos	1	3.91	31.98
Oficina de tiempo	1	3.08	24.67
Tareador	1	5.04	40.32

(continúa)

Oficinista	1	3.14	25.12
Tenedor de libros	2/3	3.29	17.53
Superintendente	1/3	7.92	21.12
Enfermero de primeros auxilios	$\frac{1}{6}$	2.44	$\frac{3.26}{}$
	$46 \frac{1}{2}$		\$ $\frac{1462.25}{}$

Costo de Labor o Mano de obra:

$$\frac{\$ 1462.25}{71.5} = \$ 22.50 / \text{yarda cúbica.}$$

Costos de Fuerza Motriz (Método Convencional).-

Precio : 0.011 por kilowatio-hora, calculado en una base lineal (aproximadamente 4200 kilowatio-horas por guardia):
\$ 5.80 por pie lineal del túnel.

Costo de Fuerza Motriz: $\$ \frac{5.80}{5.11} = \$ 1.14$ por yarda cúbica.

Costos de Revestimiento (Método Convencional).-

	US\$ por <u>pie lineal</u>	US\$ por <u>yarda cúbica</u>
Arcos y soportes de acero	\$ 9.80	\$ 1.92
Madera (entablado sobre los arcos)	16.00	3.13
Enconcretado (mano de obra y materiales)	200.00	39.13
Entrada y salida del túnel	10.00	<u>1.75</u>
		\$ 45.93

Costo de Revestimiento: US\$ 45.93 / yarda cúbica.

Costo Total (Método Convencional).-

Costo de Equipo	\$	14.55
Costo de Labor		22.50
Costo de Fuerza Motriz		1.14
Costo de Recubrimiento		<u>45.93</u>
	\$	<u>84.12</u> =====

\$ 84.12/ yarda cúbica.

2. Cálculo de Costos para el Método de la Máquina Tuneladora.-

Características del Túnel:

Largo del túnel : 12.8 millas = 20.48 km.

Diámetro del Túnel : 14 pies

Area de la sección transversal del túnel :

$$(3.14) \times (7/3)^2 = 17.10 \text{ yardas cuadradas}$$

Volumen por pie lineal del túnel :

$$17.10 \times (1/3) = 5.70 \text{ yardas cúbicas.}$$

Volumen total del túnel :

$$17.10 \times 12.8 \times 1760 = 385,325 \text{ yardas cúbicas.}$$

Para este cálculo se ha considerado tres diferentes modelos de máquinas tuneladoras con diferentes velocidades de avance y desde luego con diferentes potencias.

Se indican las velocidades de avance teóricas pero la experiencia demuestra que el factor de utilización varía entre 0.6 á 0.75 en el mejor de los casos:

	Máquinas Tuneladoras		
	A	B	C
Potencia (en HP)	1400	550	110
Velocidad de avance teórico (en pies/hora)	12.5	5	1
Velocidad de avance eficiente (en pies/hora)	7.5	3	0.6
Velocidad de avance por guardia (en pies /hora)	60	24	5

Costos de Equipo (Método de la máquina Tuneladora).-

<u>Descripción</u>	<u>Precio</u>	<u>Precio por yarda cúbica</u>
Máquina A	\$ 910,000	\$ 2.46
Máquina B	415,000	1.06
Máquina C	330,000	0.86

Faja Transportadora (\$50/

pie) para 6 millas de

túnel \$ 1'600,000.

Compresor 3600 pies cúbicos

por cuanto; 40 lbs/

pulg. cuadrada; 3600 pies

cub. por minuto x 12HP/100

pies cub. estandar por

minuto x \$ 135 por HP. . . 60,000

Transformadores de Fuerza

(1230 Amperios x 4.4 kilowatts=

5410 kilowattio-Amperios

por \$ 100). 17,500

Control exterior de Circuito

de Lubricación (5 kilowattio-

Amperio por \$ 2100 x

1/3 de efecto de tamaño. . . 770,000

Transformadores (3ø, 4160V)

225 kilovoltio-Amperios por

\$ 5000 119,000

Control del Motor 24,000

4 Ventiladores 9,200

.Este precio es solo aplicable a las máquinas A y B. Para la máquina C será de \$ 1'100,000 pues es posible utilizar un sistema de extracción mas barato desde que la velocidad de avance es mucho mas lenta.

Bombas para agua. . . . 2,200

Bombas para desagüe . . . 3,300

\$ 2,605,200...Este precio no incluye el precio de la Máquina Tuneladora.

$\frac{\$ 2,605,200}{385,325} = \$ 6.76/\text{yarda cúbica}$ para las Máquinas Tuneladoras A y B.

$\frac{\$ 2,005,200}{385,325} = \$ 5.20/\text{yarda cúbica}$ para la Máquina Tuneladora C.

Costos de Equipo Adicional (Método con Máquina Tuneladora).-

Calculado en la base de dólares por pie lineal.

<u>Descripción</u>	US\$ por pie <u>lineal de túnel</u>
Tubería de agua (de 2 pulgadas)	\$ 0.75
Tubería de aire (de 6 pulgadas)	2.15
Elementos cortantes (cutters): Reposición y Mantenimiento.	6.90
Tubería de ventilación (30 pulgadas)	11.35
Cable de Alta Tensión (de Energía)	42.00
Cable de alumbrado	3.00
Tubería de drenaje (100-500 galones por minuto)	5.60
	<hr/>
	\$ 71.75

$$\frac{\$ 71.75}{5.7} = \$ 12.80 / \text{yarda cúbica}$$

Costos de Instalación y Mantenimiento.-

<u>Descripción</u>	<u>Precio</u>	US\$ por <u>yarda cúbica</u>
Instalación de la máquina	\$ 25,000	\$ 0.066
Traslado de la máquina	25,000	0.066
Mantenimiento de la máquina	\$ 15/pie	2.63
Mantenimiento del Transportador-extractor	\$ 7/pie	1.23
		<hr/>
		\$ 3.992

$$\frac{\$ 4.00}{1} = \$ 4.00 / \text{yarda cúbica}$$

Costo total de Equipo, Equipo Adicional y de Instalación y
Mantenimiento (Método de la Máquina Tuneladora).-

US\$ por
yarda cúbica

Máquina A: \$ 2.46 + \$ 6.76 + \$ 12.80 + \$ 4.00 = \$ 26.02

Máquina B: \$ 1.06 + \$ 6.76 + \$ 12.80 + \$ 4.00 = \$ 24.62

Máquina C: \$ 0.86 + \$ 5.20 + \$ 12.80 + \$ 4.00 = \$ 22.86

Costos de Labor (Método de la Máquina Tunneladora).-

<u>Descripción</u>	<u>Número por guardia</u>	<u>jornal /hora</u>	<u>Total \$/guardia</u>
Compresorista	1	\$ 3.62	\$ 28.96
Capataz de electricistas	1	5.76	46.08
Electricistas	2	4.82	77.12
Cuadrilla de la Máquina Tunneladora	4	4.80	153.60
Personal del Transportador o Motoristas	3	3.98	95.52
Personal del transportador o Brequeros	3	3.72	89.28
Personal del Transportador o Volquetero	1	3.57	28.60
Personal del transportador o Carrilanos	3	3.56	85.53
Capataz de transportadores o de Carrilanos	1	3.91	31.28
Chequeo de desatado	1	3.56	28.48
Chofer	1	3.31	26.50
Mecánicos	1	4.08	32.64
Carpintero	1/3	4.20	11.20
Bodeguero	1	3.14	25.12
Ayudante de bodeguero	1	2.68	21.50
Oficina de tiempo	1	3.08	24.67
Oficinista	1	3.14	25.12
Tenedor de libros	2/3	3.29	17.53
	1	5.04	40.32

(Continúa)

Superintendente	1/3	7.92	21.12
Enfermero de primeros auxilios	<u>1/6</u>	2.44	<u>3.26</u>
Total:	28 1/2		<u><u>\$ 913.35</u></u>

Costo de Labor en cada caso:

	<u>Volumen por hora</u>	<u>U.S. Dólares por yarda cúbica</u>
Máquina A:	60 x 5.7	913.35/60 x 5.7 = \$ 2.67
Máquina B:	24 x 5.7	913.35/24 x 5.7 = \$ 6.66
Máquina C:	5 x 5.7	913.35/ 5 x 5.7 = \$ 32.04

Costos de Fuerza Motriz (Método con Máquina Tuneladora).-

Precio: \$ 0.011 por kilowatio hora; \$ 0.015 por HP-hora.

Requerimientos en cada caso:

	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>
1. Máquina Tuneladora	1400HP	550HP	110HP
2. Faja Transportadora (0.025HP por pie lineal)	900	900	900
3. Compresor (12HP por 100 pies cúbicos estandard por minuto	<u>435</u>	<u>435</u>	<u>435</u>
	2735	1885	1145

Potencia total requerida por yarda cúbica:

<u>Máquina A</u>	<u>Máquina B</u>	<u>Máquina C</u>
$\frac{2735}{7.5 \times 5.7} = 63.97$	$\frac{1885}{3 \times 5.7} = 110.23$	$\frac{1145}{1 \times 5.7} = 200.85$

Costo total de Fuerza Motriz en dolares por yarda cúbica
(precio del Horsepower-hora = \$ 0.015) :

\$ 0.96/yarda cúbica \$ 1.65/yarda cúbica \$ 3.01/yarda cúbica

Costos de Recubrimiento (Método con Máquina Tunneladora).-

Precios dados en la base de dólares por pie lineal:

Descripción	US\$ por pie lineal	US\$ por yarda cúbica
Soportes y arcos de acero	\$ 9.80	\$ 1.72
Bloques inferiores	0.20	0.03
Entablado	16.00	2.81
Recubrimiento de concreto (40% menos que en el método Conven- cional	120.00	21.00
Construcción de la entrada y salida del túnel	10.00	1.75
		\$ 27.31

Costo de Recubrimiento: \$ 27.31 / yarda cúbica.

Costo total (Método con Máquina Tuneladora).-

<u>Máquina Tuneladora</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>
Costo de Equipo	\$ 26.02	\$ 24.62	\$ 22.86
Costo de Labor	2.67	6.66	32.04
Costo de Fuerza Motriz	0.96	1.65	3.01
Costo de Recubrimiento del túnel	<u>27.30</u>	<u>27.30</u>	<u>27.30</u>
	\$ 56.95	\$ 60.23	\$ 85.21
	=====	=====	=====

3. Discusión.-

La Tabla No. 4 muestra las características principales para cada estimado económico. Se ha asumido para cada caso que el equipo durará tanto como el proceso de construcción del túnel. El equipo que se utilice trabajando con el Método Convencional no durará mas de los 5.4 años requeridos para completar el túnel mediante este método. (Ver Tabla No. 4). Por el contrario la Máquina Tuneladora A aún tendrá un alto valor de salvamento (valor estimado) después de 1.3 años pues, las máquinas de este tipo pueden excavar un mayor número de yardas cúbicas. Esta diferencia disminuirá los costos de equipo si el túnel es taladrado usando la Máquina Tuneladora A.

Inversión Inicial de Capitales.- Se observa mediante este análisis, que las inversiones iniciales para el equipo de la Máquina Tuneladora es de 8 á 11 veces mayor que para el equipo usado para el Método Convencional. Este factor limita el uso de las máquinas tuneladoras solamente a la construcción de túneles largos.

Costos de Labor o mano de obra.- El Método con la Máquina Tuneladora requiere 40% menos de la mano de obra (por guardia) requerida por el Método Convencional.

Costos Totales.- De acuerdo a esto observamos que el Método con Máquinas Tuneladoras ofrecen mayores ahorros (en dos casos: Máquina Tuneladora A \$ 56.95/yarda cúbica y Máquina Tuneladora B \$ 60.23/yarda cúbica) que el Método Convencional (\$ 84.12/yarda cúbica).

Tabla No. 4

Costos Finales y Tiempo de Terminación para cada Método

	Método	Método: Mq. Tuneladora		
	Convencional	A	B	C
Costo de Equipo (\$/ yd. cúbica)	14.55	26.02	24.62	22.86
Costo de Labor (\$/ yd. cúbica)	22.50	2.67	6.66	32.04
Costo de Fuerza Motriz (\$/ yd. cúbica)	1.14	0.96	1.65	3.01
Costo de Revestimiento (\$/ yd. cúbica)	45.93	27.30	27.30	27.30
Costo Total (\$/ yd. cúbica)	84.12	56.95	60.23	85.21
Velocidad de Avance diario (pies)	42	180	72	15
Tiempo de Terminación del túnel dado en años (300 días por año)	5.4	1.3	3.1	15

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A la fecha, los métodos convencionales de construcción de túneles son vitalmente importantes y seguirán aun superando a los nuevos métodos, especialmente cuando se tome en cuenta la economía y urgencia de proyectos de túneles cortos. Sin embargo, hay la común opinión de que cualquier mejora significativa en construcción de túneles en roca, se obtendrá a través de mayores investigaciones o desarrollo de las técnicas de Excavación Continua.

El presente trabajo ha desarrollado un detallado cálculo de costos de dos métodos de construcción para un túnel propuesto, desde el río Huancabamba hasta el Reservorio "Mano de León"; el cual es la piedra angular del proyecto de irrigación "Pampa de Olmos" en el departamento de Lambayeque.

Los estimados muestran que el menor costo total de túnel, será obtenido por taladramiento del mismo mediante una máquina tuneladora (con una velocidad de penetración de por lo menos 12 pies por hora, y una potencia de 1400 HP) por las siguientes razones: (Máquina "A")

a) Debido a la gran longitud del túnel, es posible cargar todo el costo inicial al túnel propuesto. Además, en el Perú hay suficiente número de proyectos de túneles como para hacer que el valor de salvamento del equipo alcance un mínimo.

b) La mayor porción de los costos de labor o mano de obra está en función del tiempo total que toma la construcción del túnel, de ahí que este costo de labor, en una base de dólares por yarda cúbica, decrecerá con las mas ra-

pidas velocidades de penetración ofrecidas por las máquinas tuneladoras.

El Perú es un país cuya economía depende básicamente de sus industrias agrícola y minera. Más del 50% de la agricultura y 60% de la industria minera es desarrollada detrás de la Cordillera de los Andes. Es pues una necesidad conectar esos recursos con la Costa, donde se halla el mayor mercado de consumo y los puertos para la exportación de metales y concentrados.

Otro problema es irrigar el desierto como ha sido mencionado y son los túneles los que ofrecen la mejor promesa para desviar los ríos que corren en la Sierra hacia la zona costera árida.

Todas las razones que anteceden apoyan la urgente necesidad de un programa extensivo y bien coordinado de construcción de túneles para propósitos de irrigación, sistema de carreteras y explotación minera. Para desarrollar este programa, el Perú necesita el método más rápido de construcción de túneles ahora disponible de tal modo, que cualquier gran inversión en la adquisición de maquinaria muy costosa, resultará en costos más bajos debido a este proyecto de construcción de túneles de gran longitud.

Algunas selecciones incorrectas en técnicas de excavación tanto en Perforación y Voladura o Máquinas Tuneladoras, para un ambiente en particular, han sido errores muy costosos para contratistas de Estados Unidos, Europa y Africa. El Perú tiene que aprovechar esta experiencia y cuando se decida el uso de máquinas tuneladoras, será necesario tomar en consideración factores importantes

tales como: Personal entrenado, disponibilidad de repuestos, mantenimiento adecuado, etc.

BIBLIOGRAFIA

Libros y Reportes:

1. AIME, Reunión Anual, The New Dimension: Rapid Underground Excavation, reportes de la sesión sobre Excavación Rápida Washington D.C., E.U.A., 1969.
2. Hammond R., Tunnel Engineering, Heywood y Co., Inglaterra 1959.
3. Academia Nacional de Ciencias, Rapid Excavation: Significance, Needs, Oportunities, por el Comité en Excavación Rápida , Washington D.C., E.U.A., 1968.
4. Nichols H. L., Moving the Earth, North Castle Books, Connecticut, Seg. Edición, 1962.
5. OECD Conferencia sobre Construcción de Túneles, Report on Research and Development related to Tunneling, Washington D.C., E.U.A., 1970.
6. _____, Report on Hard Rock Tunneling, Washington D.C. E.U.A. 1970.
7. _____, Report on Tunneling Demand, Washington D.C. E.U.A., 1970.
8. Pequignot C.A., Tunnels and Tunneling, Hutchinson & Co. Inglaterra, 1963.
9. Proctor R.V., y White T.L., Rock Tunneling with Steel Supports, The Commercial Shearing and Stamping Co., Ohio, E.U.A., 1946.
10. Szechy Karoly, The Art of Tunneling, Akademia Kiado Budapest, Hungría, 1967.
11. Yardley D.H., Rapid Excavation: Problems and Progress, Reportes y Actas de la Conferencia sobre Túneles y Piques, Minneapolis, E.U.A., 1968.
12. Zimmerman J.D., Irrigation, John Wiley and Sons, Nueva York, E.U.A., 1966.
13. Richarson H.W., Y Mayo R.S., Practical Tunnel Driving, Mc Graw-Hill Book, Nueva York, E.U.A., 1941.

Revistas:

1. Anónimo, 3.8 miles of Tunnel Boring in 90 days, Engineering Mining Journal, Agosto 1969, pp 98-99.
2. _____, Big Hole, World Mining, Enero 1970, pp 28-31.
3. _____, High Speed Tunneling, Mining Magazine, Marzo 1970, pp197.
4. _____, Large-Diameter Tunnel Boring, Mining Journal, Mayo 1970, pp491.
5. Banks H.O., Tunnel Estimating Improved: Tied to Geology, Engineering News-Record, Diciembre 17, 1959, pp 64.
6. Barendsen P., Mechanised Drifting by the full-face Method, Tunnels and tunneling, parte 1, Julio 1969 pp 90-93, parte 2 , Setiembre 1969, pp 141-144.
7. Bennet N.B., Mole vs. Conventional: A comparison of Two Tunnel Driving Techniques, Reportes y Actas de la 46ava Reunión Anual de la Highway Research Record, Publicado en su revista No. 185.
8. Howard T.E., Rapid Excavation, Scientific American, Setiembre 1967, pp 74-85.
9. Mamen C., Granduc's Tunneling Record, Canadian Mining Journal, Junio 1968, pp 46-48.
10. Muirhead I.R. y Glossop L.G., Hard Rock Tunneling Machines, Transacciones de la Institución de Minas y Metalurgia, Enero 1968, pp A1-A21, Inglaterra.
11. Norman N.E., Economic Factors of Mechanical Rock Tunneling, Mining Engineering, Junio 1967, pp 75-78, E.U.A.
12. Thomson J.C., Horizontal Earth Boring, Reportes de la Institución de Ingenieros Civiles, Londres, Abril 1967.