

Universidad Autónoma de Querétaro

ESCUELA DE INGENIERIA

**DIFERENTES METODOS DE CONSTRUCCION  
DE TUNELES**

*Biblioteca Central*  
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
**P R E S E N T A**

**CARLOS RAMIREZ FUENTES**

QUERETARO, QRO.

1979

No. Pag. 1894

Cont. TS

Clas. 624.19

R173d

LIBRARY OF THE  
CONGRESS

REPRODUCTION OF  
THE ORIGINAL

...

...

...

...



EDUCO EN LA VERDAD Y EN EL HONOR

OFICIO NUM: 186

ASUNTO: SE APRUEBA TE  
MA DE TESIS.-

FEBRERO 11 DE 1976.-

SR. PASANTE CARLOS RAMIREZ FUENTES.-  
P R E S E N T E.-

En respuesta a su atenta Solicitud, relativa al Tema de Tesis Profesional, me permito comunicarle a Ud., el que para -- tal efecto fué propuesto por el SR. ING. ANGEL TREJO MOEDANO. El título de Tesis será:

DIFERENTES METODOS DE CONSTRUCCION DE TUNELES.

1. ANTECEDENTES.- ✓
2. DESARROLLO DE LOS TRABAJOS SUBTERRANEOS.- ✓
3. VIAS DE PENETRACION EN EL SUELO.- ✓
4. ESTUDIO GEOLOGICO.- ✓
5. CARACTERISTICAS TECNICAS DE LOS TUNELES.- ✓
6. METODO DE EXCAVACION EN LA CONSTRUCCION DE TUNELES.- ✓
7. CARGA Y DETONACION DE LOS EXPLOSIVOS.- ✓
8. VENTILACION Y REMOCION DEL POLVO DESPUES DE UNA EXPLOSION.- ✓
9. CARGA Y ACARREO DE LOS ESCOMBROS.- ✓
10. REMOCION DEL AGUA FREATICA.- ✓
11. ESTADO DE ESFUERZO.- ✓
12. SOPORTE TEMPORAL.- ✓
13. COLOCACION DEL REVESTIMIENTO.- ✓
14. INYECCION DE CONTACTO.- ✓
15. COMPORTAMIENTO.- ✓

\*\*



Escuela de Ingeniería

EDUCO EN LA VERDAD Y EN EL HONOR

hoja núm. 2

- 16. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.- ✓
- 17. BIBLIOGRAFIA.-

También hago de su conocimiento las disposiciones de nuestra Escuela, en el sentido de que antes de su Examen Profesional deberá cumplir el requisito del Servicio Social y de que el presente Oficio se imprime en todos los Ejemplares de su Tesis.-

ATENTAMENTE

"EDUCO EN LA VERDAD Y EN EL HONOR".



ING. JUAN JOSE MARTINEZ PEÑA.  
DIRECTOR.

- C.c.p.- Mesa de Profesiones de la U.A.Q. - Centro Universitario.-
- C.c.p.- Archivo Escuela de Ingeniería Civil.- Centro Universitario.
- C.c.p.- Ing. Angel Trejo Moedano.- Presente.-

*Cachibol  
Original  
14-507-76  
[Signature]*

EN MEMORIA DE MI PADRE.  
SR. RAMON RAMIREZ DURAN

A LA SRA. JOSEFINA FUENTES VDA. DE RAMIREZ

A MIS ABUELOS.

A MI HIJO CARLOS OMAR RAMIREZ GARDUÑO

A MIS HERMANOS; TIOS, PRIMOS.

A MIS MAESTROS.

A MIS COMPAÑEROS, AMIGOS.

A MI ESCUELA.

Remontándonos a la antigüedad los túneles más antiguos que han sido descubiertos son los pertenecientes al último período de la Edad de Piedra, que eran usados para el drenado de las minas y transporte del mineral siguen a estos los hechos por los romanos antes de la Era Cristiana.

En 1556 Jorge Agrícola escribió su DE RE METALICA que era un compendio de minería, túneles y metalurgia. El método descrito en dicho libro consistía en prender una hoguera en el frente y luego rociar este con agua y vinagre estrellándose así la roca caliente y removiéndose a continuación la roca quebrada por medio de barras y palos el ademe era parecido al actual. Los túneles como nosotros los conocemos sin relación alguna con las minas, empezaron probablemente en el túnel Malpas de 155 Mt. de longitud y hecho en Francia de 1679 a 1681.

El túnel Ironquoy en el Canal de San Quintín construido en 1803 -- fué el primero en ademarce y se hizo con revestimiento de piedra labrada a todo lo largo de él.

En Inglaterra durante la era de los canales se construyeron muchos tuneles, posteriormente también se hicieron para los ferrocarriles con el advenimiento de estos.

Entre los más antiguos merecen citarse el Heretastle de 2400 Mt. -- y de 2.7 Mt. X 3.6 Mt. de sección hecha en 1766-1777.

Entre los tuneles hechos para ferrocarriles puede nombrarse el Box Hill de 3.2 Km. de largo y el Kilaby de 2.4 Km.

En América el primer túnel fué hecho para el Canal Schuylkill en Auburn Pa. E.U.A. con una longitud de 246 Mt. y sección circular de 6 X 5.4 Mt. fué construido en 1820.

El segundo se hizo en Pensylvania en el Canal Unión en Lebanon. Se construyó en 1827 y tuvo una longitud de 216 Mt. para uso en los ferrocarriles el primer túnel hecho en América se construyó en 1831 un Allegheny su largo fué de 270 Mt. en la construcción de estos tuneles y los que lo siguieron se fué cambiando paulatinamente el uso de la pólvora al de la dinamita y del barreno a mano al empleo de este fin del vapor y el aire comprimido.

En México los primeros tuneles fueron hechos para servir a las vías ferreas, actualmente hay gran número de ellos.

Se han construido en México tuneles muy importantes y que han realizado obras de desagüe a profundidades que varían entre 35 y 220 Mt. -- con longitud de hasta 25 Km.

Se construyó en particular un túnel (Emisor Central) cuya longitud es de 50 Km. su área transversal de 33.2 Mt. cuadrados con pendiente geométrica de 0.00196 Mt. profundidad media de 120 Mt. y que puede proporcionar un gasto máximo de 200 Mt. cúbicos por segundo.

## DESARROLLO DE LOS TRABAJOS SUBTERRANEOS.

Es normal que la civilización moderna busque desarrollar o facilitar los medios de comunicación entre los pueblos, el dominio subterráneo no debe escapar a esta tendencia.

A la hora de suprimir fronteras era evidente que la construcción de túneles que unicen los diferentes países, pasando bajo las barreras naturales que constituyen las montañas iba a desarrollarse después de la era de los túneles ferroviarios la de los túneles de carretera para facilitar la circulación automovilística, las carreteras que franquean las montañas hacen perder un tiempo considerable a los transportes, en estas condiciones los túneles de carretera han llegado a ser un imperativo en el mundo entero la construcción de túneles bajo montañas, brazos de mar, ríos anchos, etc.

Nuestro país motivado por su desigual reparto de los recursos hidráulicos requiere la construcción de túneles, necesarios para el aprovechamiento hidroeléctrico, para abastecimiento de aguas, energía eléctrica o riego., paralelamente la minería nos a familiarizado con la construcción de galerías y pozos a veces de notables dimensiones sean para extraer el mineral, ventilar o evacuar las aguas además en grandes ciudades las obras urbanas ofrecen numerosos ejemplos de túneles muy importantes de construcción muy delicada por la gran rigidez a que se ven sometidos en materia de trazado y mantenimiento de los servicios públicos, los ciudadanos se encuentran así quizás sin saber lo rodeado de túneles para los más diversos usos de más.

Algunos países consideran que la construcción de ciudades subterráneas a prueba de peligro atómico constituye una imperiosa organización defensiva no se puede ignorar también las considerables instalaciones hundidas en las profundidades de la tierra que son las bases de lanzamientos de los misiles balísticos intercontinentales.

Extenciones a las regiones polares. En regiones hasta ahora inexplorables la protección del subsuelo permite a grupos de individuos de la importancia de poblaciones urbanas del poder vivir es así como bajo el casquete glacial que recubre Groenlandia se ha podido llegar a vivir en condiciones normales a unas decenas de metros bajo el hielo, en un ambiente eufórico a +18°C los habitantes no corren el riesgo de las primeras expediciones polares que soportan temperaturas de -50°C. las casas prefabricadas eran alimentadas abundantemente en agua obtenida por inyección de vapor en el hielo, al recibir toda la energía útil de centrales atómicas algunas de estas ciudades estan ya unidas entre sí.

Son vías subterráneas de varias centenas de kilómetros las que están de este modo en vías de construcción, en lo que concierne a este abastecimiento la conservación de los alimentos es practicamente eterno bajo el hielo, especimenes de la raza de los mamut extinguida al comienzo de la era cuaternaria en la época de los grandes cataclismos.

Han sido encontradas intactas estas instalaciones frigoríficas naturales e ilimitada que constituye Groelandia será sin duda un día la reserva mundial de alimentos almacenados para el caso de hambre en el mundo.

#### RELACION CON PROBLEMA DEL ESPACIO.

De forma muy inesperada la conquista del espacio debe llevar consigo la construcción de instalaciones profundas, la luna alcanzada ya está a nuestro alcance, convenimos en admitir que la estancia de los humanos en la luna no será posible mas que en instalaciones enterradas en el suelo lunar, una excavación rápida estará asegurada por unos cohetes que limen el suelo lunar a su paso y cuyo principio se ha experimentado ya en tierra, como en las instalaciones bajo las zonas glaciales, la permanencia en casas prefabricadas profundas se habrá hecho posible se constata considerable tomada por los trabajos de subsuelo y las posibilidades que habra en un porvenir cercano, las técnicas de excavación y dirección han tenido que adaptarse evidentemente a consecuencias en evolución constante.

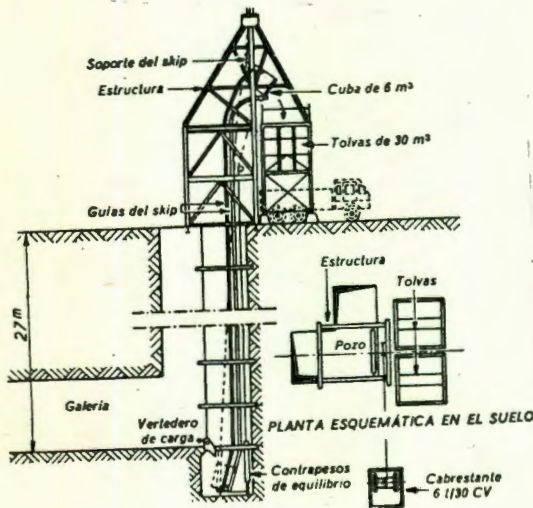


VIAS DE PENETRACION EN EL SUELO.

Fuera de las grietas y cavernas cuyo estudio constituye la espeleología las vías de acceso en el subsuelo pueden dividirse en cuatro categorías pozos, galerías, minas y túneles.

Pozos son excavaciones más o menos anchas y profundas excavadas en el suelo generalmente para la explotación de un yacimiento para permitir establecer dos frentes de ataque, los pozos constituyen a menudo la única comunicación entre el exterior y el interior su importancia es pues capital son generalmente cilíndricas y verticales.

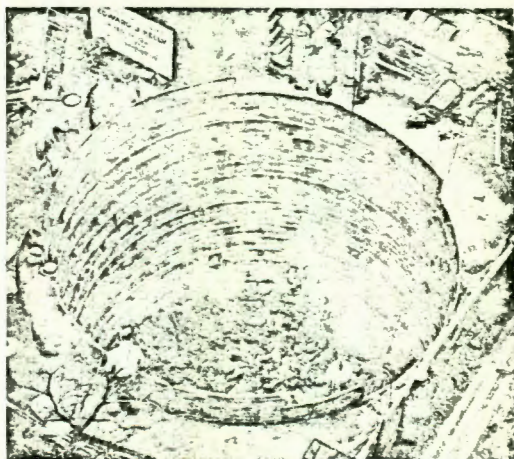
En esta foto se observa la estructura metálica colocada en superficie para extraer el producto de la excavación en el túnel, abastecer de material para la excavación y el soporte temporal.



FORMA.—La forma circular es la más corriente es la que representa la resistencia máxima a las presiones de los terrenos el diámetro varía de 1 a 2 Mts. para los pozos de servicio hasta 8 Mts. para los pozos de extracción en minas importantes, la forma rectangular se encuentra también con frecuencia su coeficiente de utilización es mucho más ventajoso la sección corriente es 5 Mts. por 4 Mts. pero el lado mayor del rectángulo puede alcanzar los 12 Mt. en las explotaciones muy modernas se encuentran a veces formas cuadrangulares y elípticas pero se salen de las normas clásicas.

**PROFUNDIDAD.**- Los pozos de mina alcanzan frecuentemente varias centenas de metros de profundidad como las perforaciones que descienden ahora más de 7000 Mts. en la prospección petrolífera los pozos tienden a hacerse cada vez más profundos para alcanzar yacimientos hasta ahora inexplorados.

**REVESTIMIENTO.**-Si los pozos tienen que ser utilizados durante numerosos años lo que es caso general deben recibir un revestimiento llamado entibación esta entibación puede estar constituida por materiales clásicos como la madera, el ladrillo o el concreto se emplean igualmente dovelas prefabricadas o tramos de cilindro o de acero sobre esta entibación se apoyan las guías de madera o metálicas constituida por un ensamblado de piezas que sirven para guiar las jaulas estas jaulas sirven indistintamente para el descenso o subida del personal, del material, para evacuación del mineral y el envío al fondo de materiales de relleno, algunos pozos modernos estan equipados de jaulas especiales de gran velocidad llamadas Skips de las cuales una sube cuando la otra baja.



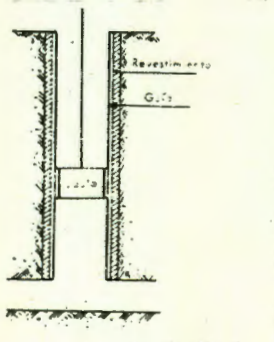
Entibación a base de tramos de cilindros de acero

## EXCAVACION DE LOS POZOS.

Los métodos de excavación difieren según que se encuentren en terreno más o menos consistente acuífero o no etc., se emplean procedimientos muy variados para la perforación desde la excavación a mano hasta la limpieza del fondo con ayuda de Scrapers de dragas de cuchara, por explosivos etc.

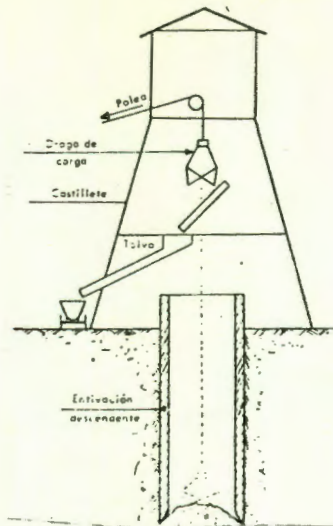
En terrenos acuíferos se opera por achique, congelación, aire comprimido.

La Fig. muestra una cámara de trabajo provista en su base de un anillo cortante y coronado por una cámara de equilibrio que sirve de esclusa para el descenso del personal la operación es a menudo muy delicada pues los riesgos aumentan con la profundidad en razón de la presión de los terrenos en general se coloca sucesivamente una entibación provisional y otra definitiva, el procedimiento más clásico consiste en disponer un entibado de dobelas de chapa contra el terreno se vierte concreto entre este entibado y otro entibado desmontable.



Corte de un pozo.

Otro método que da todas las garantías de seguridad consiste en dejar - descender por su propio peso un entibado circular cuya base de bordes cortantes descansa sobre el fondo mismo del pozo pero en razón del roce de los terrenos sobre la pared externa del entibado que crece con el cuadrado de la profundidad este método nos permite la perforación mas que de unos 150 Mts.- como máximo la Fig. esquematiza la operación que es necesaria como todos - los métodos de perforación.

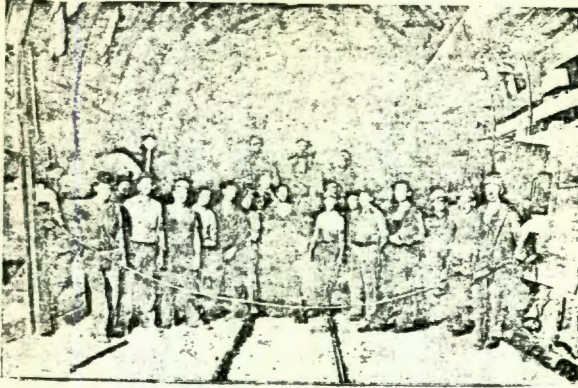


### Excavación de un pozo por entibado circular

La construcción de un carillete donde va un cabrestante para extracción de escombros.

**GALERIAS.**—Las galerías son pasos subterráneos que permiten el acceso del personal a los frentes, el transporte del material del equipo necesario para efectuar operaciones de maquinaria etc., se instalan en ellos vías, conducciones, cables eléctricos etc., Las galerías están generalmente provistas de soportes metálicos.

Es así como las galerías principales que deben ser conservadas durante toda la vida en una mina, están enmarcadas por hierros perfilados colocados a pocos metros los marcos están a veces enbebidos en concreto los arcos superiores o coronas están empuñados sobre los pies del marco, la evacuación de las aguas está asegurado por un canal semicircular, su pendiente debe ser muy regular la Fig. muestra una galería provista de vías.

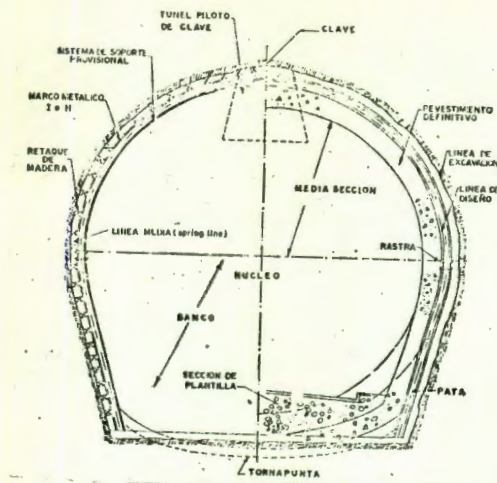


Galería provista de soporte metalico.

TUNEL.-Término general empleado para designar pasos subterráneos la definición de túnel según Kszechy son pasajes subterráneos construidos sin remo — ver la roca sobreyacente.

Los métodos de excavación de un túnel varían según el caracter del material que ha de ser removido, los tuneles a través de roca requieren el uso de explosivos si la roca es estructuralmente debil muchas veces hay que colocar — soportes bajo el techo del túnel o bien marcos de apoyo a medida que se va — — construyendo el túnel, los tuneles construidos a través de tierra no requieren explosivos pero los marcos de apoyo son casi siempre necesarios, los túneles bajo los ríos a través de arcilla blanda se construyen a menudo con la ayuda — de un corto cilindro denominado escudo que se empuja a través de la arcilla al frente de la excavación para asegurar un soporte anticipado de los marcos — por lo general después de haberse completado la excavación se reviste con concreto la pared expuesta del túnel en la Fig. se ilustran los diferentes términos empleados en túneles es una sección de herradura donde en la mitad izquierda se ha representado el sistema de soporte provisional o temporal también — —

llamado revestimiento primario y en la derecha al revestimiento definitivo o secundario.



#### Nomeclatura en túneles.

La porción más alta se denomina clave y la inferior plantilla en los arranques del arco que termina en la clave se tiene la línea media o spring line la porción central se denomina núcleo, la mitad superior media sección y la porción inferior banco.

Cuando el sistema de soporte temporal es a base de viguetas metálicas de sección H o I es necesario colocar un retaque de madera para transmitir los esfuerzos del terreno al marco.

El arco superior del marco si el túnel se escava a media sección se apoya en rastras y estos a la vez se soportan en patas.

Si las patas de los marcos tienden a cerrarse por efecto del empuje laterales es necesario entonces colocar tornapuntas.

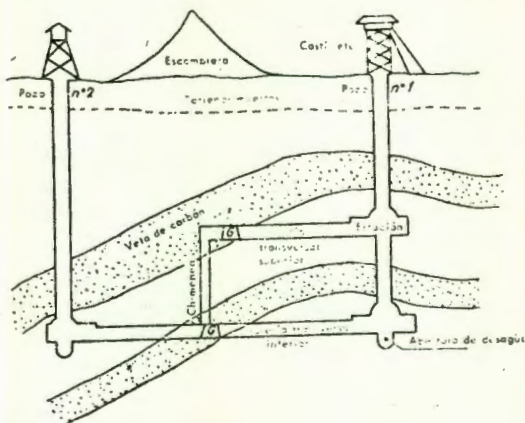
En ocasiones la excavación se inicia a través de túneles pilotos que se ubique en la clave como se indica o en algún otro lugar.

**MINAS.**—Son explotaciones de yacimientos de hulla o minerales el yacimiento esta habitualmente unido a la superficie por varios pozos, en efecto, un solo pozo o acceso puede ser inutilizado a causa de un derrumbamiento y es indispensable poder disponer de más de una entrada en las minas de carbón en particular es una obligación legal el prever pozos gemelos uno ventilado y otro en el retorno, la superficie de la mina constituye el lugar de asiento del conjunto de las instalaciones.

En general no se puede explotar el yacimiento en toda su altura y se opera entonces por plantas.

En la base de cada planta se excava una galería transversal que llega al pozo por medio del espacio llamado estación, cuando se ha penetrado en el yacimiento a explotar se excavan unas galerías centrales G o vías de arrestre principal de donde parten otras galerías que conducen a los frentes de producción. Las galerías G permiten transportar vagonetas hasta las galerías transversales y después hasta las estaciones, las vagonetas son agrupadas a veces en varias plantas en la jaula de un ascensor o vertidas en un Skip que se puede subir a gran velocidad hasta la estación exterior.

Las jaulas o los Skips son guiados mediante correderas estas piezas están fijadas en la entibación que limita las filtraciones, pero las avenidas de agua son inevitables se les concentra en una abertura de desagüe en la parte inferior del pozo. El frente de corte avanza por tramos longitudinales en la veta. El techo del frente se apuntala mediante apoyos metálicos, pilares o puntales que se van retirando a medida que se avanza, se deja que los terrenos hundan por sí mismos y se rellenan con arena hidráulica.



### CORTE DE UNA MINA DE CARBÓN

En general las estructuras subterráneas se pueden clasificar en cuatro categorías.

a.-La más antigua se relaciona con la minería y comprende tanto galerías para la explotación de las vetas de mineral como la red de conductos para extraer y llevar a la superficie el producto excavado.

b.-La segunda categoría abarca a los túneles propiamente dichos cuya misión principal es comunicar dos puntos.

c.-La tercer categoría comprende refugios contra ataques militares.

d.-La cuarta categoría se refiere a la construcción de grandes cavidades en la roca para alojar plantas hidroeléctricas o bien en las ciudades para alojar grandes estaciones de vehículos.

La segunda categoría la consideramos como la obra subterránea más importante y es la que trataremos con más énfasis.

Se comentan brevemente las bases teóricas para el análisis de estado de esfuerzo alrededor de túneles y los procedimientos constructivos que incluyen la tecnología más reciente.

Atendiendo a su utilización los túneles pueden clasificarse en dos grupos.

a.-Túneles para conducción.

b.-Túneles para tránsito.

En el primer grupo se incluyen, acueductos, emisores e interceptores de aguas negras, tubería y fuerza para plantas hidroeléctricas, etc.

En el segundo grupo se incluyen túneles para peatones, autopistas, ferrocarriles, trenes urbanos, navegación, etc.



## PRINCIPALES TIPOS DE ROCA.

Las rocas que se encuentran en las operaciones de excavación de tneles -- pueden dividirse en tres grupos principales ígneas, sedimentarias y metamórficas, cada uno de los grupos anteriores pueden dividirse de acuerdo con su origen contenido mineralógico, condición física, etc.

El grado mínimo de dureza que caracteriza a una roca se ha fijado como la resistencia a compresión de 14 Kg/cm.2.

Puede encontrarse intacta, quebrada o descompuesta y dependiendo en cual de dicho estado se encuentra ejercen presiones que se deben a defectos mecánicos o químicos de la roca y sus efectos varían con los distintos tipos de estas y por lo tanto es necesario conocer la naturaleza y los efectos usuales en cada tipo de roca como un requisito para el adecuado diseño de los tneles.

**ROCAS IGNEAS.** -- Son el resultado del enfriamiento de masas derretidas -- que emergieron del interior de la tierra a través de fisuras, las rocas ígneas pueden ser extrusivas o intrusivas, si la masa derretida se enfrió antes de llegar a la superficie de la tierra la roca se define como intrusiva con ejemplos de rocas ígneas intrusivas el granito y el gabro, si la masa derretida se enfrió después de haber llegado a la superficie de la tierra la roca se define como extrusiva son ejemplo de rocas extrusivas la riolita y el basalto la andesita.

**ROCAS SEDIMENTARIAS.** -- Son con las que tienen contacto el Ingeniero incluyendo las que fueron depositadas por corrientes de aguas tales como los conglomerados areniscas, pizarras y arcillas y las que fueron depositadas por organismos marinos como las calizas y las dolomitas. Las rocas sedimentarias de tipo clásico, es la que se ha erosionado transportado y depositado contiene material grueso arena y grava, material fino (limo y arcilla) con cementante en los intersticios la arena y la grava originan gradualmente las areniscas y el conglomerado la componente principal de la dolomita y las calizas se originan "In situ" pero siempre se mezclan con arena, limo o arcilla que han sido depositados y transportados, como la velocidad de transporte y sedimentación varía con la época generalmente las rocas sedimentarias se encuentran estratificadas las calizas están casi siempre separadas por pizarras y las areniscas de grano grueso alternan con las de grano fino. La grava y la arena se transforman en roca gracias al cementante que se encuentra entre sus partículas al que se haya en solución acuosa, -- para las calizas dicho cementante es carbonato de calcio.

Las rocas de consolidación compuestas de limo arcillas se llaman pizarras, la transformación de ellas no es debida a un cementante como cuando las partículas son gruesas sino por la acción mutua de las partículas entre sí, estos cambios necesitan de alta temperatura y presión durante un largo periodo de tiempo variando por lo tanto el grado de transformación -- con la profundidad para poder llamar pizarra a un producto que ha sufrido

la transformación anterior se necesita que un martillo al golpear dé un sonido claro y que al ser introducido una muestra de agua el volumen no varía si no será solamente sedimento compacto pero no roca como se comprende dada la alta temperatura y la presión necesaria para la transformación de una pizarra el material original (arcillas y limo) deberán estar enterrado por lo menos temporalmente a varios miles de metros.

**ROCAS METAMORFICAS.**—Son las rocas sedimentarias o ígneas que han sufrido cambios en su estructura y textura cuando han sido sujetas a altas presiones y altas temperaturas bajo la influencia de presiones y temperaturas moderadas las arcillas y el barro se transforman en esquistos y pizarras que son rocas metamórficas de mala calidad cuando se sujetan a altas presiones y temperaturas de pizarras y los esquistos se metamorfizan para formar el duro y denso Gneiss la piedra caliza al metamorfizarse forma el marmol y la arenisca se transforma en cuarcita las rocas metamórficas derivadas del limo y arcilla son las que con más frecuencia causan dificultades en la construcción de un túnel casi todos los esquistos derivan de pizarra durante la transformación, el por ciento de minerales de mica aumentan el tamaño también aumenta y practicamente todas las partículas en forma de laminillas de orientan según un plano como resultado de esto las rocas esquistosas se separan facilmente en capas y pedazos por lo que cualquier deformación en las paredes de un túnel hecho en este material causa la disgregación de esta pues su capacidad de carga es muy pequeño más difícil aún y más caro es el perforar en esquistos que tengan capas de cuarzo en forma continua en el Gneiss los cristales están orientados paralelamente a un plano pero el por ciento de laminillas es mucho menor que en los esquistos que le da al primero estando sano una resistencia semejante a la roca ígnea la composición mineral lógica del Gneiss es generalmente similar a la del granito, por lo que cuenta tiene buena resistencia y pocas líneas de falla se le llama granito Gneiss.

**Deformación física de las rocas:** todas las rocas independientes de su tipo tienen defectos físicos o estructurales que ejercen una considerable influencia en las operaciones de perforación de túneles estos defectos consisten en fracturas cuyas magnitudes varían considerablemente, las fracturas simples se definen como juntas mientras que las fracturas mayores asociadas con desplazamientos relativamente grandes se definen como fallas.

**GRIETAS:** Las grietas son las superficies de fallas físicas o separaciones con muy poco o ningún desplazamiento entre las componentes de la roca, en lados opuestos de la grieta. Al Perforar un túnel en una formación rocosa la existencia de juntas afectará la cantidad de ademe que tenga que ponerse al domo durante las operaciones de perforación del túnel también las juntas proporcionan un pasaje por donde pueda filtrarse el agua subterránea al túnel.

**FALLAS:** Una falla es una zona en una formación en donde ha ocurrido un gran desplazamiento a lo largo del plano de falla el desplazamiento puede ser horizontal, vertical o una combinación de los dos por lo general una falla constituye un peligro indeseable en la perforación de un túnel debido a las enormes fzas, que producen la falla la formación de —

roca en la zona de la falla está muy quebrada el material triturado puede variar en tamaño desde arenas finas hasta grandes bloques que tienden a caer hacia adentro del túnel al estarlo perforando a través de la zona de falla si existe agua freática en la formación el material triturado dentro de la zona de falla proporcionará un excelente pasaje por el cual podrá fluir el agua al túnel al no ser que se tomen pasos correctivos antes de excavar en esa zona. Podrá llegar a ser necesario inyectarle concreto a la formación antes de perforar el túnel para eliminar el peligro de agua subterránea. Las formaciones pueden incluir escombros no consolidados, arena, gravas o arcillas con o sin agua freática pueden haber rocas solida o quebrada o pueden existir fallas o pliegues.

#### RESISTENCIA A LA COMPRESION.

La resistencia de las rocas a la compresión (al aplastamiento) se mide en Kg/cm<sup>2</sup>. y vienen definidos por el esfuerzo a compresión requerido para romper una muestra con los lados libres las rocas ígneas no meteorizadas especialmente los basaltos algunas cuarcitas y los areniscos de cemento selico son las rocas de mayor resistencia a la compresión.

En las rocas sedimentarias la resistencia a la compresión depende generalmente de la calidad de su cemento o matriz (una matriz arcillosa confiere poca resistencia) y de la cantidad de agua contenida en la roca (generalmente los altos contenidos hacen disminuir la resistencia) la existencia de fisuras y grietas en las rocas perjudican su resistencia a la compresión especialmente si la dirección de la fisuras coincide con los planos de ruptura, tal resistencia depende también de la dirección del esfuerzo de compresión actuante en relación con la estratificación, es decir que la mayor resistencia se logra si dicho esfuerzo es normal a la estratificación.

Prueba de compresión sin presión envolvente A) ruptura por efecto de cortadura o cizalladura en que se ven los planos de ruptura.

B) ruptura por efecto de tensión.

Cortadura o cizalladura en las rocas.- Los esfuerzos cortantes o cizallantes tienden a separar porciones de la masa rocosa (o de tierra) los fallos o los pliegues muestran ejemplos naturales de rupturas producidos por tales esfuerzos.

#### TENSIONES RESIDUALES.

Este tipo de fuerza en rocas confinadas es realmente energía potencial creada por antiguas fuerzas naturales, por reciente actividad sísmica o por perturbaciones artificiales próximas.

La tensión residual o almacenada puede persistir en las rocas largo tiempo y después de haberse cerrado la causa originaria, una excavación tal como un túnel hará cerrar tales tensiones internas de las rocas al permitir ciertas traslaciones y convertir así la energía potencial en energía cinética, en los tuneles a veces resultan de ello movimientos violentos de las rocas, de las paredes techos y fondo.

La transmisión de sobrecarga a ambos lados de un túnel especialmente en los no revestidos puede ser explicado por el fenómeno conocido con el

nombre de arqueo (Fig. 2) de esta manera la naturaleza al desarrollar sistemas auto equilibrados, de esfuerzos cortantes va establecido un nuevo estado de equilibrio en los materiales que rodean la cavidad.

La excavación de la capacidad de arqueo de las rocas en torno a un túnel proyectado, constituye un aspecto importante del estudio previo a su construcción, las rocas ígneas macizas ofrecen generalmente, favorables posibilidades de arqueo, en los túneles revestidos, el revestimiento absorbe una parte de la sobrecarga.

SUPERFICIE DEL TERRENO.

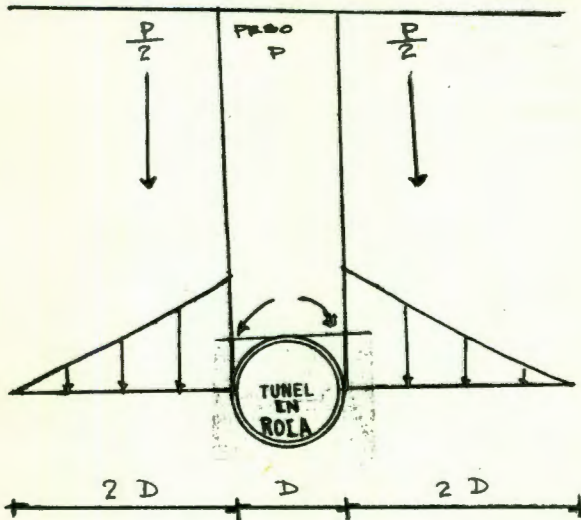


FIG. 2

Arqueo producido alrededor de una abertura en la roca. El peso  $P$  de los terrenos suprayantes se transmite a las paredes de la abertura.

La mitad de este peso  $P/2$  se distribuye en una distancia variable a ambos lados de la abertura.

En la práctica esta distancia suele ser aproximadamente a  $2D$  siendo  $D$  el diámetro de dicha abertura.

CLASIFICACION DE LOS TERRENOS PARA EL EMPLEO DE LOS METODOS DE PERFORACION.

Según la naturaleza del terreno puede atacarse la perforación con una sección más o menos grande de ciertos macizos rocos puede atacarse a plena sección en los terrenos sin cohesión (arenas secas gravas) será necesario por el contrario limitarse a una galería elemental de 4 a 5 m<sup>2</sup> para poder avanzar con una entibación (ademe) adecuada, si se trata de arenas finas saturadas de agua a presión (arenas fluidas) de lodos, arcillas o terrenos

en los que se presentan importantes afloraciones de agua, será necesario recurrir a procedimientos especiales como el escudo de aire comprimido o las inyecciones de avance si el terreno contiene anhídrido en ciertos casos los empujes pueden ser considerables cuando este material está saturado de agua debiendo utilizarse en tal caso durante la construcción una robusta antitensión metálica.

#### CLASIFICACION DE LOS TERRENOS EN CUANTO AL EMPLEO DE LOS METODOS DE PERFORACION.

Roca que exige el empleo de explosivos, roca dura e intacta que permite el ataque a gran sección sin entibación a la roca inestable que hace necesaria el ademe, después de haber efectuado la tronada pueden caer del techo -- trozos sueltos de roca o de los muros placas de esta, estos trozos de roca -- son causa de gran número de accidentes, buen terreno extraído sin explosivos que permiten la ejecución del 1 a 3 mt. de galería de sección adecuada sin entibación (ademe) las arcillas duras, las tierras compactas, las areniscas, la arena y grava aglomeradas y ciertas rocas dislocadas.

#### TERRENO MEDIO O MEDIOCRE.

Terreno medio o mediocre en el que el techo de una galería de sección -- adecuada puede mantenerse algunos minutos y los laterales y el frente de ata que una hora aproximadamente tal es el caso de las arcillas consistentes, la tierra seca, la arena y grava aglomeradas y ciertas rocas dislocadas, mal te rreno en el que el techo de las galerías de sección adecuada deben apuntarse a medida que se avanza resistiendo los laterales algunos minutos, tal es el caso de las arcillas blandas las arenas húmedas, las gravas o tierras vegeta les sin gran cohesión roca descompuesta y gravas, terrenos sueltos, como arg nas o gravas secas en las que se pueden progresar en sección pequeña más que al abrigo de blindaje continuo tanto en el frente como en el techo y muros -- laterales, cuando se trata de arenas finas saturadas de agua, de arcillas -- blandas o de venidas de agua importantes, se imponen métodos especiales (es- cu dos, inyecciones) las condiciones imprevistas en la roca pueden ser presig nes de la roca sumamente elevadas transiciones abruptas de zonas que permi ten disponer de mucho tiempo antes de ademar o zonas que requieren ademado inmediato, filtraciones de agua y gases venenosos.

#### C A L I Z A S.

Las calizas y las areniscas estando arriba del nivel de las aguas los -- riesgos son insignificantes abajo de él puede encontrarse que las calizas -- tienen canales subterráneos o depósitos también puede haber cursos de agua ya sea que esta se encuentre limpia o con arena en suspensión, en las arenis cas es pozo probable encontrar estas condiciones en las zonas formadas de -- areniscas o caliza quebrada débe trabajarse con ademe.

#### P I Z A R R A S.

En este tipo de terrenos las condiciones de trabajo dependen del tipo -- de las formaciones que pueden variar de las características de una roca sana

a las de una arcilla de considerable expansión sin embargo y ya sean las — cargas en el túnel altas o bajas a una vez encontrado un tipo de pizarra ge neralmente las características de esta se conservan la cantidad de agua que entra al túnel proveniente de las pizarras generalmente es baja a menos que sobre estas apoye una formación con gran contenido de agua las pizarras están asociadas algunas veces con mantos de carbón en cuyo caso fácilmente se encuentra el explosivo gas metano si las perforaciones afectan alguna capa de anhidrita el agua se escurre por las grietas de esta, gradualmente la — transforma en yeso y debido a la expansión se produce una presión muy alta, el agua corre por los extractos de anhidrita así el túnel contiene sulfato de calcio el cuál ataca al concreto también puede contener H-25 el cual es venenoso.

### LOS ESQUISTOS.

Si el terreno esta inalterado la presión de este es moderada o nula el inevitable desbordamiento y las filtraciones de agua pueden ser importantes los peligros debido a un esquisto sin alterar son muy leves por otro lado — lo usual en los esquistos es que se encuentran alterados en tales condiciones puede haber movimiento de la expansión de la partícula, estas expansiones van asociadas con presiones excesivas del terreno y grandes escurri — mientos de agua.

### LAS ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS.

Aunque muchos tuneles de gran longitud hechos en granito se han cons — truido sin requerir ninguna defensa y sin fugas de agua ocasionalmente se encuentran estas así como terreno que expande. En general las probabilidades de encontrar muchas dificultades inesperadas en este tipo de roca son pocas pero como cuando se encuentran estas son de magnitud muy grande siempre deben tomarse precauciones.

### ROCAS IGNEAS EXTRUSIVAS.

Estas rocas tales como las riolitas están asociadas frecuentemente a — turba volcanica las cuales frecuentemente se haya en un estado adelantado de descomposición aún más la turba volcanica puede estar aún sin consolidar grandes cantidades de agua pueden entrar al túnel desde las zonas defectu<sup>o</sup> sas y en las rocas volcánicas nuevas.

### METODOS GEOFISICOS DE EXPLORACION.

La exploración geofísica es una forma de investigación de campo, en la que los medio físicos o las medidas físicas se hacen generalmente desde la — superficie del terreno,

Se aprovechan las diferentes propiedades físicas de las rocas para de — terminar sus posiciones relativas en el subsuelo.

Las variaciones sistemáticas de las propiedades de las formaciones del subsuelo son las que evidencian la existencia de estructuras o contactos a — profundidades. Tales evidencias son llamadas anomalías.

Para poder analizar correctamente las anomalías en la determinación de la geología del subsuelo es necesario contar con un criterio geológico y un conocimiento de la geología superficial y regional.

**GRAVIMETRICO.**—Es empleado para detectar las variaciones de la atracción de la gravedad producidas por rocas que yacen hasta varios kilómetros debajo de la superficie terrestre.

Las elevaciones estructurales tales como anticlinales sepultados frecuentemente están formados por rocas más densas lo que provoca un incremento de gravedad directamente sobre su cima.

**MAGNETICO.**— Se buscan variaciones en el campo magnético de la tierra — las cuales son debidas a propiedades magnéticas anormales en rocas de poca profundidad. Puesto que las rocas sedimentarias rara vez se encuentran apreciablemente magnetizadas, el método de exploración magnético se aplica únicamente a rocas ígneas o a depósitos minerales con construyentes magnéticos.

**SISMICO.**— Aprovecha las propiedades elásticas de la roca para determinar las estructuras y los contactos existentes. Por medio de explosiones artificiales se mandan ondas sonoras, las cuales son devueltas a la superficie ya sea por reflexión al llegar a los planos de contacto y por refracción — después de haber recorrido un trecho o lo largo de esa superficie. Partiendo del tiempo que requieren las ondas para llegar a los detectores en varios puntos a lo largo de la superficie, se puede determinar la profundidad de los contactos entre diferentes estratos y las estructuras existentes.

Los métodos sísmicos dan una información muy detallada en las áreas en donde las formaciones muestran contrastes marcados en sus propiedades elásticas.

**ELECTRICO.**—Aprovecha las variaciones eléctricas de la roca o minerales. —Los métodos eléctricos son muy diversos. En el procedimiento de resistividad uno de los más usados, se insertan en el suelo cuatro electrodos a lo largo de un perfil se introducen una corriente eléctrica al terreno por medio de dos de los electrodos y la diferencia de potencial con la corriente que pasa por el subsuelo se mide en los dos primeros electrodos. La naturaleza y profundidad de las anomalías pueden ser estimadas por el análisis de las curvas de resistividad contra separación de electrodos. El método eléctrico se utiliza para determinar la existencia de agua subterránea y su profundidad así como el contacto entre materiales sueltos y la roca firme

#### GEOLOGIA DEL SUELO

El procedimiento más común para hacer investigaciones subterráneas es — es practicar perforaciones en los sitios escogidos para obtener muestras — de roca o de suelo que pueden estudiarse posteriormente.

## CARACTERISTICAS TECNICAS DE LOS TUNELES

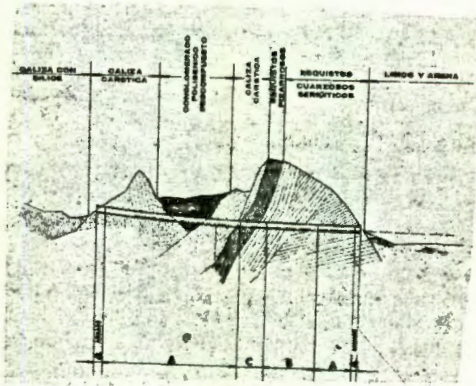
## TRAZADO Y PERFIL LONGITUDINAL

El trazado y el perfil longitudinal son función esencialmente de la topografía del terreno pero depende también de las condiciones de ejecución--- de las obras.

Los tuneles rectilíneos son más fáciles de construir que los curvos en cuanto se refiere a la precisión del replanteo del eje pero esto tiene poca importancia para los tuneles de pequeña longitud.

El trazado de los tuneles cortos puede ser recto o curvo a ser posible de radio constante, en los tuneles largos se adopta preferentemente el trazado en línea recta que es el más económico y exacto en cuanto se refiere a la coincidencia entre ambos ataques.

En cuanto se refiere al perfil longitudinal la solución no depende enteramente del proyecto sino que depende de la configuración del terreno y del papel que ha de desempeñar el túnel.



Perfil Geológico

El perfil longitudinal es la proyección del suelo de un túnel sobre un plano vertical, es habitualmente el plano que pasa por el eje longitudinal.

El perfil longitudinal se obtiene por una nivelación geométrica con nivel y miras, se parte de un punto fijo (a) de la galería o de un pozo cuya altura se ha calculado precedentemente, y se determina de punto en punto -- las diferencias de nivel entre los puntos a, b, c, etc. aproximadamente equidistante, los puntos a nivelar están distantes de 4 a 8 mt. en general.

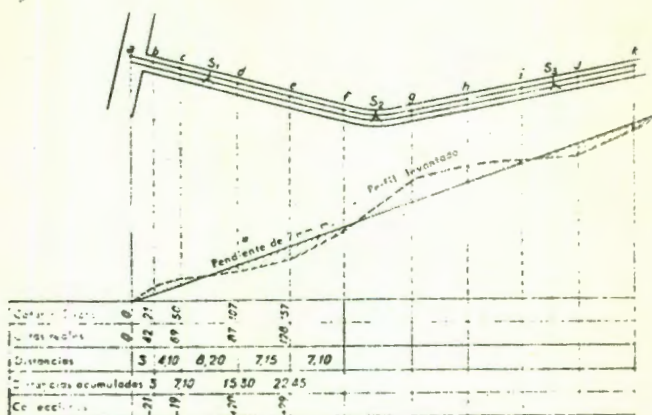
También se hacen posiciones normales visando desde la misma estación -- varios puntos delante y atrás. Es así como a, b, c, d, e, han sido visados desde S, y e, f, g, h, S<sub>2</sub> etc.

El levantamiento del perfil longitudinal se traduce por una gráfica --



que lleva las cotas teoricas y reales de los diferentes puntos trazados con sus distancias.

La siguiente fig. da un ejemplo de tal gráfica.



#### Perfil longitudinal de una galería.

Se ve claramente en la fig. las partes demasiado bajas de la galería - que son para rellenar y las demasiado altas que son para rebajar.

Los topógrafos tienen que trazar regularmente los perfiles longitudinales de la galería y túneles, la pendiente se altera en efecto rápidamente - en razón de los hundimientos.

Si el perfil longitudinal de una galería accidentada y estrecha debe ser - trazado, la nivelación geométrica no es útil se recurre entonces a una nivelación trigonométrica.

Se emplean aparatos poco aparatosos como los instrumentos colgados al conjunto de las operaciones lleva el nombre de dispensación. La dispensación se traduce en un perfil que representa a la vez el suelo y el techo del túnel o galería.

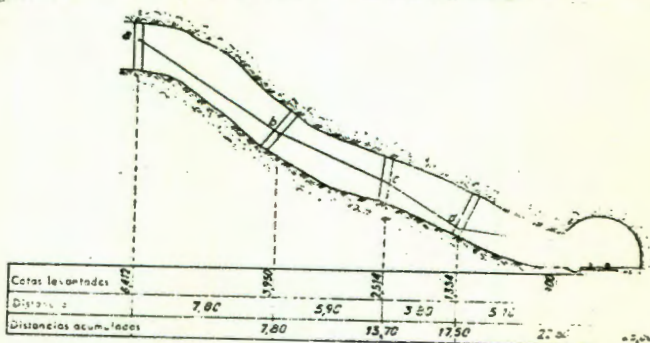


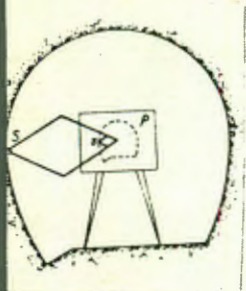
Fig. Dispensación.

## TRAZADO DE PERFILES TRANSVERSALES.

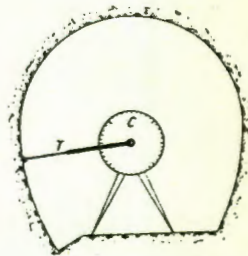
Los procedimientos clásicos para el trazado de perfiles transversales de túneles y galerías son los siguientes.

Trazado con pantógrafo.- El aparato constituido por una tablilla vertical (P) provista de un sistema de barras articuladas (S) da una fig. homotética de la sección que hay que levantar no es útil mas que en galerías de pequeña sección.

Trazado con vastago telescópico.- Llamado calibre articulado este vastago se maneja a mano, se señala su longitud y dirección sobre un cuadrante graduado C el método exige sumas largas en las galerías anchas o los túneles.

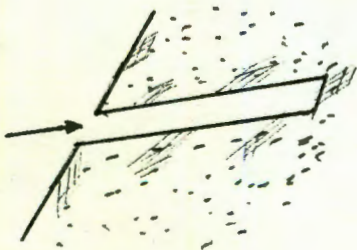


Levantamiento con  
Pantógrafo

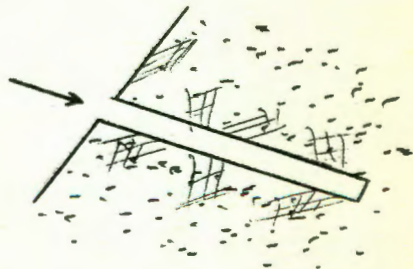


Levantamiento con vastago  
telescopico

La construcción de túneles en pendiente no presenta dificultades particulares si se exceptua la de evacuación de las aguas subterráneas si existen



Ataque Ascendente



Ataque descendente

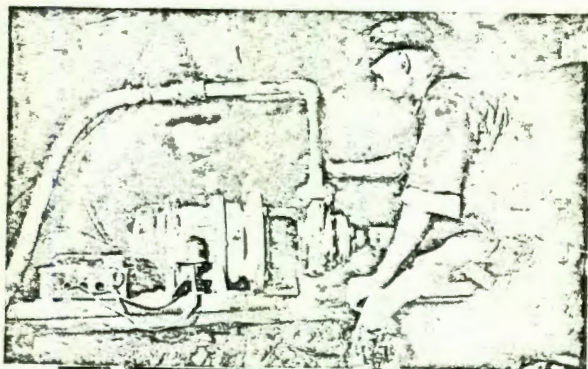
**Ataque en pendiente.**— Desde este punto de vista es preferible construir los tuneles subiendo desde aguas abajo a aguas arriba con una pendiente que permita la libre eliminación de las aguas hacia la boca del tunnel por cunetas dispuestas con este fin.

Sin embargo esta pendiente puede ser tal que haga difícil el empleo de las palas cargadoras o que haga normalmente más costoso el transporte la rezaga.

En el caso contrario de ataque en descenso las aguas se concentran en el avance y es necesario evacuarlas por bombeo lo que es costoso, esto por otra parte puede convertirse en catastrófico si se encuentran bolsas de agua subterráneas que en estas condiciones pueden sumergir la obra.

El ataque horizontal no presenta mayor inconveniente salvo el de imponer la obligación del bombeo para la evacuación de las aguas de filtración, por ello siempre que se pueda se intentará atacar los tuneles subiendo para que la eliminación de las aguas se realice normalmente si no es posible se emplearán bombas en el avance de ataque en contra pendiente.

Esta cuestión de los afloramientos de agua es una de las mayores preocupaciones a tener en cuenta durante la ejecución de tuneles.



Bomba para la evacuación de las aguas en el frente de ataque.

A menudo cuando el túnel es largo hay que prever estaciones intermedias de bombeo en la proximidad del frente de ataque las bombas son generalmente de aire comprimido, cuando el caudal de agua que aparece en el frente de ataque supera ciertos límites no es posible trabajar más que con métodos especiales.

En terreno seco puede atacarse indiferentemente subiendo o bajando.

En los tuneles de carretera y vías ferreas debe conservarse una pendiente generalmente ascendente en el sentido del valle.

En los tuneles cortos se ataca unicamente por el extremo inferior subiendo en los tuneles largos especialmente en los de cumbre es conveniente tener pendientes a ambos lados para poder trabajar por ambos ataques evacuando las aguas por gravedad. Si ambas cabezas están sensiblemente al mismo nivel se adapta una pendiente y una contrapendiente que permita una buena evacuación de las aguas.

## TUNEL DE CUMBRE

Si las dos bocas están a niveles diferentes se prevén dos pendientes diferentes en la boca mas alta se toma la pendiente mínima de 2 - correspondiente a la fluencia crítica de las aguas. Por el contrario en la boca más baja se adopta una pendiente fuerte para equilibrar si es posible la longitud de ambos tramos. Las aguas de filtración se evacuan durante el obra mediante bombeo siendo necesario también prever la evacuación de agua cuando el túnel esta en servicio. Las aguas se reúnen en pozos de obra que cárcamos, galerías, donde se evacuan generalmente por bombeo.

## GALERIAS HIDRAULICAS.

El problema de las galerías hidraulicas es netamente diferente ya que en estos tuneles no existen las limitaciones de curvas y pendientes existentes en los tuneles para carretera y vías ferreas, el trazado de las galerías hidraulicas se componen de alineaciones rectas que combiene sean lo más largas posibles. Se utilizan trazados quebrados o curvos de forma que se aproximan a gargantas convenientemente elegidas en las que es posible establecer ventanas de ataque intermedias.

En cuanto al perfil longitudinal esta constituido también por secciones de inclinaciones variables que pueden llegar hasta la vertical existiendo frecuentemente entre ambos extremos de una galeria hidraulica diferencias de nivel de varios centenares de metros.

### NUMERO DE ENTRADAS

Si un túnel es relativamente corto puede perforarse desde una sola entrada sin embargo a medida que aumenta la longitud al llevar a cabo todas las operaciones una sola entrada puede resultar en distancias de acarreo -- excesivas y en altos costos, junto con una congestión general entre el portal y la cabeza del túnel, esta condición puede aliviarse perforando el túnel desde los dos extremos.

En tuneles largos puede ser ventajoso proporcionar aberturas intermedias tales como pozos verticales o lumbreras para facilitar el movimiento de la rezaga y del agua, suministros de materiales, herramienta, aire, etc. Las lumbreras intermedias permiten la realización de las operaciones en un mayor número de cabezas haciendo posible así un aumento en la velocidad de construcción del túnel.

### ALCANTARILLAS.

En las alcantarillas que tienen siempre pequeñas pendientes y deben ser visitables se adopta un perfil ovoidal con cuneta circular en la parte inferior para aumentar la velocidad del agua la altura debe ser como mínimo 1.80 mt. con una anchura de 1.30 mt. a la altura de los hombros.

### ACUEDUCTOS Y GALERIAS HIDRAULICAS.

Para los acueductos y las galerías hidráulicas se adopta a menudo la forma circular que a igualdad de sección recta da el máximo de agua, es --

también la forma que da una resistencia optima a los empujes del terreno - con el revestimiento mas delgado, a menudo se adopta la forma de herradura por cuestión de comodidad de ejecución.

#### VIAS FERREAS.

Para las vías ferreas pueden utilizarse numerosos perfiles según el tipo de vía y el terreno, los perfiles transversales difieren según el terreno, en buen terreno se utilizan generalmente muros verticales y clave de medio punto, en terrenos menos resistentes se utiliza secciones mas - - aproximadas a la forma ovoidal ensanchandolas, inclinando los muros y añadiendo un soporte interior, en otros casos se realiza la clave dandole una forma ojival.

#### TUNEL DE CARRETERA.

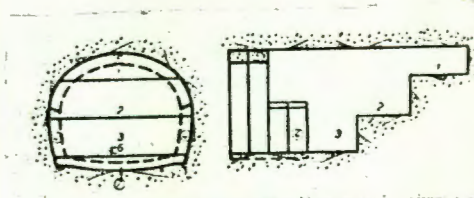
Los tuneles de carretera normales son un poco mayor que los tuneles - de vía ferrea, para vía doble pero cuando deben dar paso a mas de dos vías de circulación es necesario ensancharlas dandoles un perfil transversal -- aplanado.

#### TUNEL DE NAVEGACION INTERIOR.

Los tuneles de navegación interior que permiten el paso de canales ge - neralmente son de grandes secciones.

MÉTODOS DE ATAQUE EN LA CONSTRUCCION DE TUNELES.

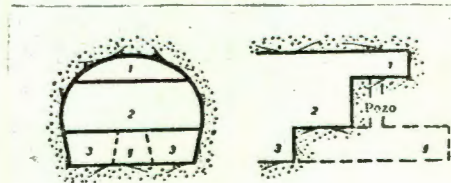
Ataque a plena sección o método inglés.- En los tuneles de pequeña -- sección son los que más a menudo se atacan a plena sección. Se puede perfo -- rar usando columnas verticales como apoyo en cuyo caso se alternan en su -- trabajo los perforadores y las rezagadoras. Si el túnel tiene de 2.40 Mt. a 3.0 Mt. de alto la perforadora se apoya en una barra horizontal, si es -- así inmediatamente después de la tronada los perforistas van al frente y aprovechando el montón de rezaga y subidos en el montan la barra para perfo -- rar los barrenos de la parte superior, usando así la rezaga como plata -- forma al mismo tiempo los rezagadores empiezan a limpiar y si el personal y equipo están bien balanceados en ambos trabajos el montón de rezaga que haya en cualquier momento será el necesario para que los perforistas apo -- yen para perforar a la altura deseada, en ciertos casos los tuneles exca -- vados en terrenos de buena categoría se pueden atacar a plena sección pero con varios escalones de ataque.



Ataque a plena sección con varios pisos.

- 1.-Escalón superior 2.-Escalón intermedio 3.- Escalón inferior

La excavación se efectua por franjas horizontales comenzando por la -- parte superior lo que presenta el inconveniente de que la vía de evacuación definitiva al nivel del piso inferior exige varias actuaciones, puede evi -- tarse esto haciendo avanzar en el eje del túnel del escalón inferior por de -- lante del escalón superior una galería de base ( túnel piloto) que sirve -- para la evacuación por pozos de la rezaga producidos en los escalones supe -- riores.



Ataque a plena sección variante con galería de base.

- g)galería de base. 1.-Escalón superior. 2.-Escalón intermedio. 3.-Escalón -- inferior.

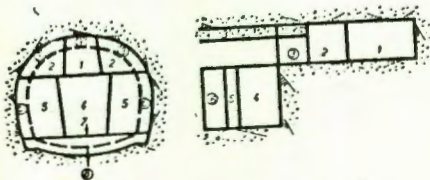
En cambio el ataque a plena sección presenta la ventaja de permitir las voladuras en una sección que da a los obreros más espacio que las galerías estrechas de otros métodos.

Ataque de la galería de clave o método belga.- a) caso de terreno bueno

La característica del método es ejecutar rápidamente la sección superior para proteger la obra por encima terminando después el revestimiento por los muros.

Se ataca el túnel en galería de avance de pequeña sección en el eje -- del túnel y en la parte superior, la anchura de esta galería varía de 2.50 a 3.00 mt. su altura de 2 a 4 mt. y su sección de 5 a 12 mt<sup>2</sup> se construye esta galería a nivel de los arranques de la media sección ensanchando después a derecha e izquierda para dejar al descubierto la media sección, estos ensanches se realizan con un rendimiento de excavación muy superior al de la galería de avance pues se trabaja por los costados y no de frente.

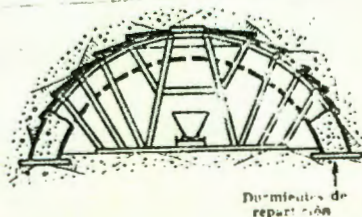
A medida que se avanza se apuntala la media sección mediante marcos metálicos I o H radiales que se apoyan sobre el banco y al final de esta fase la obra tiene la forma de una excavación en semicírculo correspondiente a la parte superior del túnel.



método de galería de clave

- 1.- Galería de clave
- 2.- Excavación de la media sección
- 3.- Media sección --
- 4.- Banco
- 5.- Zona de los muros
- 6.- Muros
- 7.- Tornapunta.

Después se construye la media sección haciéndola descansar directamente sobre el terreno si es resistente o sobre rastras longitudinales juntas que reparten las presiones si el terreno es menos bueno, también es posible utilizar apoyos de concreto armado.



Ademado y construcción de la media sección.

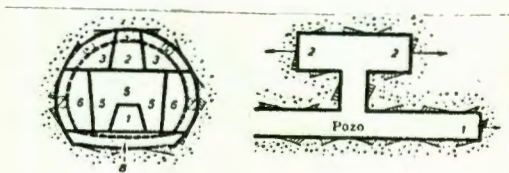
El vacío que existe entre el terreno y el soporte provisional es retacado con madera. La excavación se continúa en la parte inferior del túnel excavado en la parte inferior una cuneta central después se realiza la excavación de los muros partiendo de la cuneta hacia los lados realizando excavaciones de pequeña longitud ( 4 a 6 mt. ) que se ejecutan alternativamente a derecha e izquierda, después se colocan los ademes metálicos subiendo bajo la media sección ya construida operando de esta forma por elementos de pequeña longitud no se compromete la seguridad de la media sección que descansa siempre sobre el banco no excavado o sobre los ademes metálicos ya construídos, se termina con la construcción de la plantilla.

Este método es adecuado para terrenos resistentes, es seguro con tal que la resistencia del terreno sea suficiente para que la media sección no sufra asentamientos antes de que se hayan colocado los marcos metálicos, sin embargo presenta el inconveniente de exigir vías de evacuación de la rezaga a diferentes niveles,

B) Caso de terreno malo.- Cuando el terreno es poco resistente y exige revestimiento de obra hay que modificar el método de excavación del banco y colocación del ademe metálico ya que si no la media sección sufriría asentamientos durante la ejecución de la plantilla o cubeta y del banco.

En este tipo de terreno las excavaciones se ejecutan alternativamente a derecha e izquierda colocando el ademe metálico inmediatamente después de la excavación, después se excava la sección completa.

Método de dos galerías o método austriaco.- Este método se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje base del túnel, en ella se instala una vía de evacuación que se utiliza durante toda la obra.

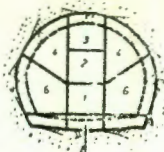


Método de dos galerías

Cuando esta galería ha avanzado cierta longitud se sube verticalmente con un pozo hacia la clave del túnel atacando después una segunda galería por encima de la primera y trabajando hacia adelante y hacia atrás, la rezaga de la galería superior se envía por el pozo a la galería inferior que sirve para evacuar sin transbordo toda la rezaga de los diferentes ataques, por otro lado es posible multiplicar los pozos y los ataques en la galería del eje, una vez perforada la galería de clave se continúa con el método belga.



Puede evitarse la perforación de la segunda galería de clave mediante un corte de clave elevado en dos fases la galería de base.



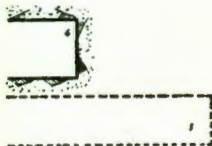
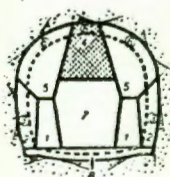
#### Galèria de base con corte de clave.

1.- Galería de avance. 2.- y 3.- Corte de clave 4.-Excavaciones de riñones 5 y 5':- Bóveda 6.- Destroza 7.- Muros 8.- Solera.

El metodo de la galería de base se presta a la evacuación de la rezaga sin desplazamiento de la vía y facilita la eliminación de las aguas de filtración, permite multiplicar los ataques de la galería de clave y de los tajos posteriores lo que se traduce en una aceleración de la ejecución del túnel.

Metodo de tres galerías o metodo alemán.- Este metodo se caracteriza por la conservación del banco hasta la terminación de los muros y de la sección superior el banco sirve de apoyo para el ademado y colocar cimbras y evitar el empleo de andamios de gran luz.

Se atacan dos galerías de base a derecha e izquierda del túnel se ensanchan después y se contruyen los muros, en terrenos malos los muros se apuntalan contra el banco.



#### Metodo de las tres galerías.

1.- Galería de base. 2.- Ensanche de los muros. 3.- Muros 4.- Galeria de clave. 5.-Excavación de la boveda 7.- Banco. 8.- Solera

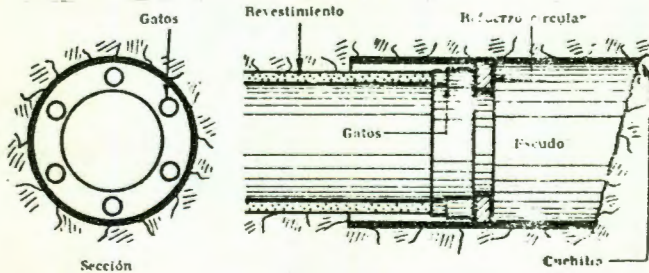
Mas atrás se ataca una galería de coronación que se ensancha construyendo la sección superior haciéndola descansar sobre los muros ya construídos y sobre ademes apoyados en el banco.

Perforación de tuneles con escudo.- Este metodo si se emplea sin aire comprimido es adecuado para la construcción de tuneles en mal terreno sin afloramiento apreciable de agua, el principio conciste en atacar el túnel a plena sección con una forma circular protejiendo el tajo de avance mediante un caparazón metalico de chapa y perfiles en forma de tubo circular que se llama escudo, este tubo tiene una sección ligeramente superior al del túnel propiamente dicho.

El escudo lleva en su zona media un solido esfuerzo disponiendose gatos hidraulicos entre este y la parte delantera del revestimiento del túnel ya construido ,al avanzar se excava bajo la protección del escudo manteniendo esta siempre apoyado contra el terreno mediante los gatos que actuan en su parte trasera.

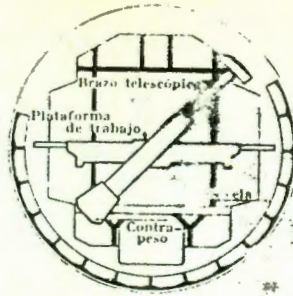
El escudo tiene una cuchilla que se incrusta en el terreno, cuando el escudo se ha desplazado así hacia delante una cierta longitud ( 0.50 a 1.0 mt. ) correspondiente a la carrera de los gatos se construye un elemento de longitud equivalente del revestimiento del túnel quitando los gatos uno tras otro construyendo el revestimiento por dovelas bajo la protección del escudo y volviendo a poner en posición los gatos contra el nuevo revestimiento después de haber reducido su longitud al minimo, de esta forma se ha avanzado una cierta longitud continuandose por el mismo metodo.

El revestimiento del túnel esta constituido por dovelas de fundición o acero atornilladas entre si y cuyas juntas se impermeabilizan mediante materiales plasticos, tambien es posible utilizar dovelas de concreto precomprimido consiguiendose la impermeabilidad del concreto por la precompresión.



Trabajo con escudo

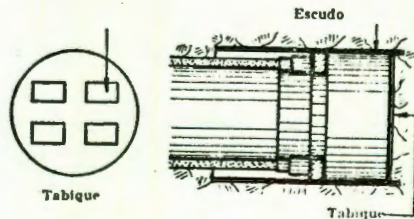
Se puede acelerar la colocación de dovelas con una maquina que tiene un brazo articulado en un punto correspondiente al centro y que toma las dovelas y las coloca exactamente en su posición en el contorno del revestimiento. Se termina la operación mediante inyecciones de cemento tras el revestimiento.



Vista frontal

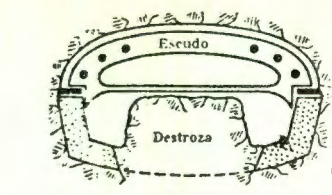
### Máquina para colocar dovelas.

Quando el terreno es particularmente movedizo y la sección del túnel es grande se corre el riesgo de que se produzcan desprendimientos peligrosos en el frente de ataque, para evitar este peligro, se cierra el escudo en la parte delantera mediante un tabique transversal metálico que se apoya contra el terreno y lo sostiene. En ese tabique se practican aberturas que se cierran mediante puertas y que se abren unas tras otras para quitar el terreno, avanzando al mismo tiempo que se empuja el escudo hacia adelante.



### Escudo con cierre delantero.

Este método de trabajo con escudo permite atravesar con completa seguridad terrenos de pequeña cohesión, es costoso pues exige operaciones complicadas de las que más importante es la construcción y puesta en posición del escudo en su posición de partida.

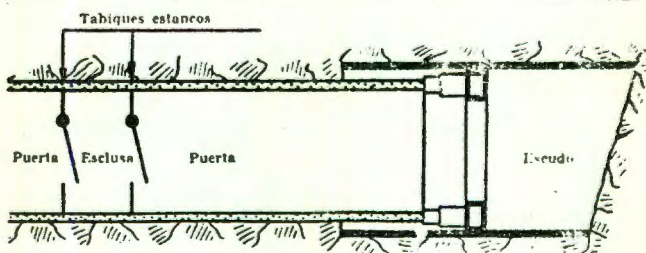


Escudo para galería.

Trabajo con escudo y aire comprimido.- Cuando el frente del túnel es inestable bien sea por arcilla extruible o bien arrastre de arenas no es suficiente el uso de un escudo y se requiere el empleo de aire comprimido para poder contener el agua permitiendo el trabajo en seco.

El principio utilizado en cerrar el túnel mediante una esclusa, enviando aire comprimido a su parte delantera que forma una cámara de trabajo en la que se realiza la excavación en seco bajo la protección del escudo. La esclusa puede estar fija en el túnel ya construido comprendiendo dos tabiques de metal u concreto con puertas impermeables que se abren desde el exterior hacia el interior, el intervalo entre estos tabiques construye la esclusa propiamente dicha que debe ser bastante larga para permitir el paso de las vagonetas con la rezaga.

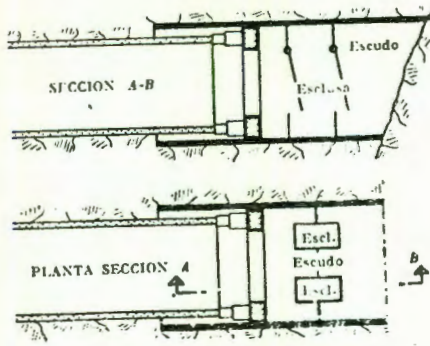
Esta disposición tiene el inconveniente de exigir la ejecución de todas las obras de construcción del túnel en aire comprimido ya que no es posible desplazar continuamente los tabiques para seguir el alargamiento del túnel



Escudo con esclusa fija.

En una solución más frecuente la esclusa está colocada en el escudo del que forma parte encontrándose la sección trasera del túnel a presión normal mientras que en la parte delantera hay una cámara de trabajo que por otro lado si el terreno es muy malo puede estar cerrada en su parte frontal por un tabique transversal con puertas. La esclusa puede estar sustituida por un do

ble tabique con puertas o por un tabique simple que soporta una esclusa de Pequeña dimensión, deben preverse por lo menos dos puertas o dos esclusas - como medida de seguridad.

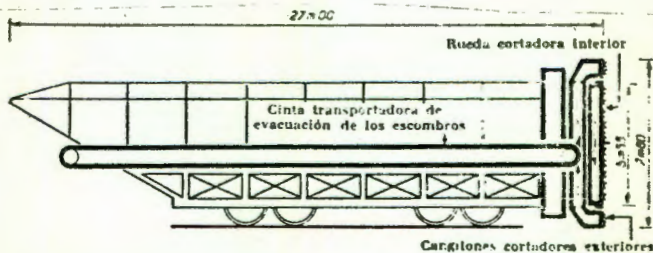


Escudo con esclusa

Máquinas para perforar tuneles a plena sección sin empleo de explosivos estas máquinas pueden utilizarse en rocas blandas, la máquina utilizada llamada topo tiene una longitud aproximada de 27 mt. y pesa 129 ton. en el extremo delantero lleva dos cabezas cortadoras rotativas y concéntricas que recogen la rezaga vertiendolos en la superior sobre una cinta transportadora soportada por la estructura de la máquina, en su extremo esta máquina de transporte va apoyada en una cinta transportadora.

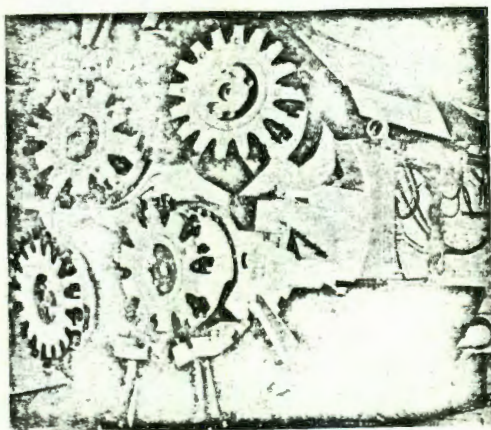
El diametro de perforación es de 7.80 mt. las dos cabezas cortadoras son movidas en sentido de rotación inverso por dos motores eléctricos de 200 CV.

En cada cabeza cortadora alternan los cuchillos de dientes con los de discos, los cuchillos de dientes cortan la roca y los de discos la muelen disgregándola entre los surcos así cortados.



Topo esquema en posición de desplazamiento.

El pliego de condiciones exige la colocación de cerchas espaciadas - 1.20 mt. o según el frente de corte a 2.70 mt. como máximo, la máquina -- lleva para ello tras la cabeza cortadora exterior un soporte de boveda deslizable sobre el cuerpo cilíndrico del topo y después en la parte trasera un dispositivo de mortaje de la cercha que se hacen deslizar desde atrás - hacia adelante sobre carriles soportados también por el cuerpo cilíndrico durante el trabajo el topo es soportado por un patín provisto de gatos unidos a la viga inferior delantera, durante el desplazamiento la máquina -- descansa sobre ruedas que se desplazan sobre carriles de 60 kg. por mt. -- sobre perfiles laminados, este desplazamiento se consigue mediante empujadores hidráulicos.



Cabeza de una máquina excavadora.

BARRENADO, CARGA Y DETONACION DE LOS EXPLOSIVOS.

El método principal de arranque de rocas durante el trazado de tuneles y la extracción de la rezaga son los trabajos de perforación y de voladura.

Las cargas de materias explosivas se colocan en barrenos o perforaciones que son agujeros cilíndricos abiertos en las rocas por máquinas perforadoras.

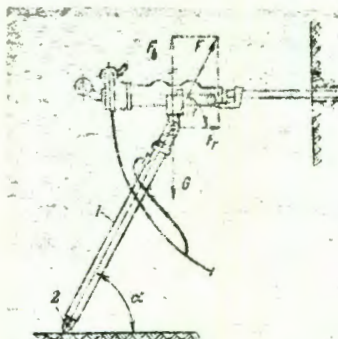
Los barrenos y las perforaciones se disponen en sentido vertical, inclinado u horizontal. Para caracterizar las condiciones de utilización de las perforadoras, todas las variedades de los frentes de ataque pueden dividirse de acuerdo al sentido de su progresión en ascendentes, descendentes y lateral. Los barrenos son perforados con barrenadoras, perforadoras rotopercusiva

PERFORACION DE BARRENOS CON BARRENADORA

Las barrenadoras son máquinas percusivas rotativas accionadas por aire comprimido. De acuerdo a su peso y al modo de instalación en el frente de ataque, las barrenadoras se subdividen en manuales, de columna y telescópicas. Las barrenadoras manuales tienen un peso que oscila entre 12 y 30 a 35 Kg. y se utilizan para la perforación de barrenos de 30 a 50 mm de diámetro y de 2 a 4 mt. de profundidad distribuidos sobre los frentes de ataque laterales o descendentes.

Durante el barrenado, las barrenadoras manuales se colocan sobre soportes neumáticos, para la perforación de barrenos descendentes se prescinde de cualquier soporte. Los detritos de perforación son evacuados del hoyo por el agua inyectada en el mismo a través del tubo de lavado y el conducto de la barrena. El consumo de agua varía entre 3 y 6 lit/min. según la potencia de la barrenadora. En ciertos tipos de martillos perforadores la aspiración y precipitación del polvo son afectadas a través del conducto de la barrena, por medio de captadoras de polvo especiales.

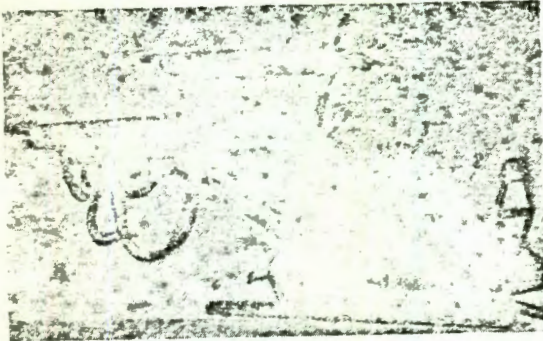
El soporte neumático II-8 tiene un peso de 15 Kg. y una longitud de 1200 mm. en estado comprimido. La carrera máxima del embolo es de 800 mm.



Instalación de la barrenadora de mano sobre soporte neumático.

Las perforadoras de columna cuyo peso es de 30 a 75 Kg. se utilizan — para la perforación de barrenos de voladura de hasta 70 u 80 mm. de diámetro. La notable potencia de las barrenas de columna permite aplicarlas para efectuar perforaciones de hasta 20 ó 25 mt. de profundidad.

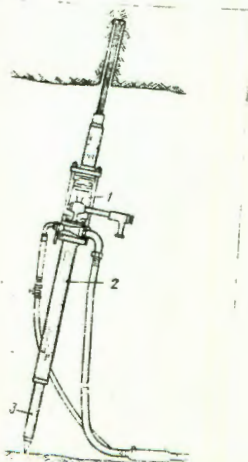
Los carros de perforadoras o carros barrenadores son plataformas montadas sobre un tren de rodaje sobre carriles, orugas o ruedas que llevan montadas de 2 a 10 barrenadoras. El montaje de las barrenadoras sobre carros de perforadoras permiten reducir el tiempo gastado en las operaciones auxiliares y hacen factible el manejo de varias barrenadoras por un sólo operador.



Carro barrenador autopropulsado

Las barrenadoras telescópicas peso de 30 a 50 Kg. sirven para taladrar barrenos de hasta 75 mm. de diámetro en frentes de arranque ascendentes como también perforaciones de hasta 12 o 15 mt. de profundidad.

La columna telescópica va fijada a la cabeza trasera de la barrenadora y consta de dos tubos, el tubo exterior constituye el cilindro y el interior es el vástago, cuyo extremo lleva fijado el émbolo.

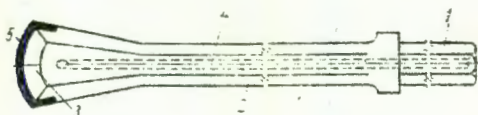


Barrenadora telescópica



Las barrenadoras manuales, las de columna y las telescópicas teniendo el mismo principio de funcionamiento se diferencian en cuanto a potencia, modo de distribución de aire, modo de evacuar los detritos de perforación y otros factores.

Herramientas para las barrenadoras.- La disgregación de las rocas duras durante la perforación con barrenadoras es efectuado por la barrena, que es una varilla de acero de forma hexagonal o redonda.



Elementos de una barrena.- 1.- Espiga. 2.- Vástago. 3.- Cabeza. 4.- Canal para el agua. 5.- Filo.

Se distinguen barrenas de acero enterizas cuya cabeza está reforzada con una plaquita de aleación dura y barrenas compuestas, constituidas por una barra y una corona desmontable también armada con insertos de aleación dura, las barrenas compuestas son de uso más amplio debido al menor consumo de acero y a la mayor facilidad de suministro de las herramientas de perforación a los frentes de ataque. Tienen amplio uso las coronas de perforación removibles de filo cruciforme y en forma de cincél, reforzadas con insertos de aleaciones duras.



Coronas amovibles de filo en cruz y en forma de cincél.

Métodos de voladuras y calculo de las cargas.

Método de voladura.- El método de voladura por barrenos tiene amplia difusión en el trazado de los tuneles, para una fragmentación eficaz dentro de los límites del perfil asignado al túnel, es necesario observar las condiciones siguientes: el número de barrenos debe corresponder a las dimensiones del túnel, y a la dureza de la roca, el esquema de distribución de los barrenos o plan de tiro debe responder a la forma de la sección y las propiedades físico-mecánicas de las rocas, la voladura de los barrenos debe realizar en una sucesión determinada, que depende del plan de tiro adoptado. El número -

de barrenos es determinado en base a la carga total de explosivo por tajo - se puede determinar por la fórmula siguiente.  $Q_t = qSL\eta$  en kg

$q$  = el gasto específico de explosivo en  $kg/m^3$

$S$  = Area de la sección transversal en  $m^2$

$L$  = La profundidad de los barrenos en  $m$ .

$\eta$  = Coeficiente de utilización del barreno.

El gasto específico de explosivos se toma en base a los datos prácticos partiendo del área de la sección transversal, dureza de la roca y potencial del explosivo, en función de estos factores, el valor que oscila entre 1 y 3  $kg/m^3$ .

El coeficiente de utilización del barreno  $\eta$  indica la relación del avance del tajo en una voladura a la profundidad de los barrenos, como regla, el valor de  $\eta$  es inferior a la unidad y es de 0.85 a 0.90 el producto  $SL\eta$  muestra el volumen de la roca arrancada en una explosión. La carga por un barreno ( $Q_b$ ) es determinada multiplicando el volumen de la parte cargada del barreno por la densidad del explosivo, presente en el barreno (densidad de carga).

$$Q_b = 2/3 \cdot \frac{\pi d^2}{4} L \gamma$$

$d$  = diámetro del barreno magnitud dada en decímetros.

$\gamma$  = densidad de la carga en  $g/cm^3$

La densidad de la carga es determinada multiplicando la densidad del explosivo por el coeficiente de carga del barreno y que indica la relación del volumen del explosivo al de la parte cargada del barreno. El valor de es de 0.8 a 0.9.

El diámetro del barreno se adopta en función del área de la sección transversal y la dureza de la roca, cuando mayor es la dureza, tanto mayor es el diámetro de los barrenos que se debe adoptar. Empero si se adopta un diámetro grande de los barrenos en una sección transversal pequeña, el número total de barrenos puede resultar insuficiente para el perfilado del túnel.

De un modo aproximado, el número de barrenos puede determinarse por la fórmula:

$$N = \frac{qsB}{5d^2\gamma} \quad \text{o} \quad N = K \sqrt{FS}$$

El valor del coeficiente  $K$  en esta fórmula depende del diámetro del barreno y es de 2 a 2.7.

Se adoptan valores mayores para un diámetro menor de los agujeros. La profundidad de los barrenos " $L$ " depende de la dureza de las rocas y la anchura " $B$ " de la sección transversal del túnel. Se puede adoptar de un modo aproximado.

$$L = (0.5 \dot{\div} 1) B$$

La profundidad de los barrenos se ha de tomar con mayor precisión partiendo de la duración del ciclo de avance.

Atendiendo a la misión que cumplen y la sucesión de los tiros todos los barrenos se dividen en los de tapón, de ensanche o ayuda y de Paramento (des trozo).

Los barrenos de Tapón, se disponen las más de las veces en la parte central del tajo y son volados en primer término. Mediante la voladura de esos barrenos se obtiene una superficie despejada adicional que eleva los índices de explosión de los demás barrenos. Los barrenos de Paramento se disponen por el perimetro de la sección transversal y se hacen volar en último término. Entre los barrenos de tapón y los de paramento se ubican los de ensanche o ayuda. La cantidad de los barrenos de ayuda depende de las dimensiones de la sección y varía entre amplios límites. En los túneles de sección pequeña no se perforan barrenos de ayuda.

Los barrenos de tapón trabajan en las condiciones más pesibles de una sola superficie expuesta por esta razón, su profundidad es de 10 a 15% mayor que los de ayuda o paramento, a la par de que la distancia entre las perforaciones se hace menor.

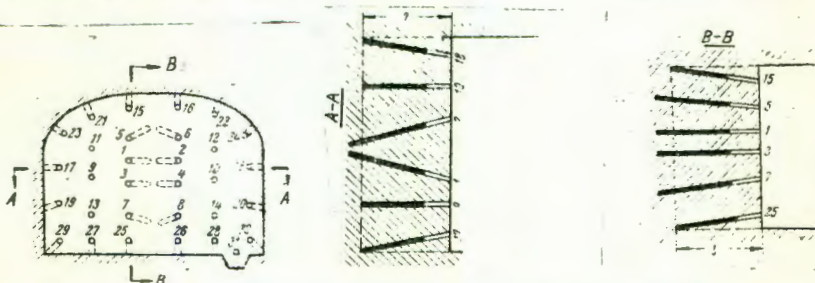
El plan de ubicación de los barrenos de tapón determina en gran parte el efecto de la explosión y debe adaptarse teniendo cuenta numerosos factores (profundidad de los agujeros, dureza de las rocas, forma y dimensiones del túnel).

En la figura siguiente está representado el plan de ubicación de los barrenos para un corte de cuña vertical durante el trazado de un túnel de transporte de forma obovedada. Las cifras indican el orden de voladura de los barrenos para una cantidad moderada de agujeros (hasta 16) este orden se logra mediante el encendido consecutivo de los barrenos. Como la longitud de todos los entopines inflamantes es igual, los barrenos irán estallando en el mismo orden en que han sido encendidos.

Para un número de barrenos mayor ( más de 16 ) se emplean los cartuchos incendiarios en este caso la preparación de los estopines inflamantes antes de su introducción en el cartucho consiste en lo siguiente: el dinamitero una vez determinada la carga de todos los barrenos reúne las mechas en un solo haz de modo que la punta de cada mecha subsiguiente sea 2 o 3 cm. más corta que la precedente.

El haz de mechas así preparado se sujeta al cartucho incendiario, una vez encendido el cuál, se enciende simultáneamente todas las mechas. Ahora bien, los barrenos irán explotando consecutivamente, por ser distinto el largo de las mechas lentas, el largo menor lo tiene el estopin inflamante que entra en el primer barreno y el mayor, el que entra en el último.

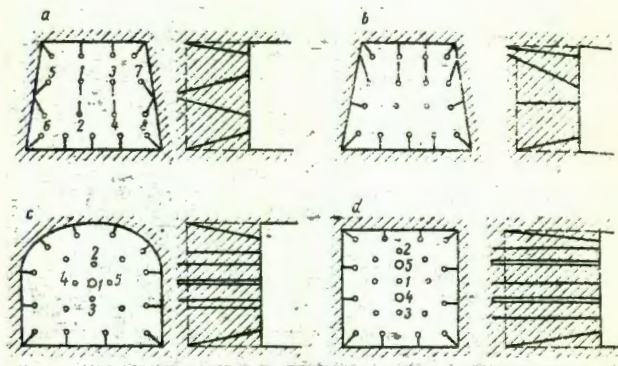
Con el cebado eléctrico, el orden de pega de los barrenos de tapón, de ayuda y de paramento, se obtiene empleando electrodetonadores de efecto retardado, con distintos grados de retardo.



Esquema de disposición de los barrenos para el corte de cuña vertical

a) Preparación de los barrenos para la voladura simultánea.- 1 a 8 barrenos de tapón, 9 a 14 barrenos de ayuda, 15 a 30 barrenos de paramento, - 31 barrenos para la formación de la cuneta de desagüe.

El corte de cuña vertical fig. anterior tiene amplia difusión en las rocas homogéneas o las de estratificación y fisuración vertical.



Esquema de la disposición de los barrenos para diferentes cortes.

El corte de cuña horizontal fig. ( a ) se practica en rocas homogéneas o bien estratificadas y fisuradas horizontalmente, al igual que para el corte vertical, los barrenos de tapón de 1 a 8 se disponen en dos planos mutuamente inclinados en las mismas condiciones se practica el corte a techo fig. ( b ).

El corte central piramidal fig. ( F ) comporta 4 barrenos perforados con una inclinación con respecto al eje de la galería, se practica en rocas homogéneas resistentes.

En rocas tiernas al excavar un túnel trazado a lo largo del contacto entre rocas de diferente dureza fig. ( e ) se practica el corte unilateral que consta de los barrenos de 1 a 4 perforados en un mismo plano, inclinado respecto al plano de contacto.

Ultimamente han cobrado gran difusión los cortes rectos en que los barrenos de tapón están orientados perpendicularmente al plano del tajo.--

En un corte prismático fig. ( c ) el barreno central ( 1 ) no se carga sino que se le asigna la misión de una superficie expuesta suplementaria.

El corte lineal fig. ( d ) consta de 5 a 8 barrenos perforados en un mismo plano, en este corte tampoco se cargan todos los agujeros ( 4, 5 )

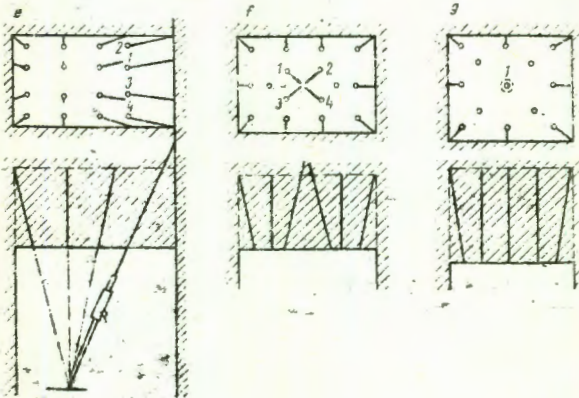
Los cortes rectos se practican en rocas duras generalmente en los túneles de sección reducida.

Una variante del corte recto es la roza de cámara ( g ) que consta de un barreno ( 1 ) ensanchado. Para formar la cámara se hace estallar una pe-

queña cantidad de explosivos en el fondo del agujero, esta operación se llama ensanche del fondo del barreno.

Para formar una cámara granue se hacen dos o tres explosiones en el barreno, la cámara así formada se carga con varios kilogramos de explosivos. La práctica de la roza de cámara permite reducir el número de barrenos de tapón y elevar el coeficiente de utilización del barreno.

En la elección del plan de ubicación de barrenos es necesario tener en cuenta también el modo de instalación de la barredora en el tajo, dando las preferencias a un plan en que el barrenado del tajo sea factible con la menor cantidad posible de traslados de los dispositivos de instalaciones y de las barrenadoras.



Esquema de disposición de los barrenos para diferentes cortes.

VENTILACION DE LOS TUNELES.

La ventilación se impone en todas las obras de construcción de tuneles - por varias razones incluyendo las siguientes:

Proporcionar aire fresco a los obreros, para sacar gases nocivos y vapores producidos por las explosiones para sacar el polvo producido por el taladro, rezagado y otras operaciones.

En los tuneles de gran diámetro y de poca longitud puede ser suficiente la ventilación natural lo mismo que en los tuneles angostos perforados de lado a lado los cuales van a sufrir una ampliación. En todos los demás casos - debe preverse un método mecánico de ventilación.

Los métodos de ventilación son tres: inyección, extracción y una combinación de estos dos sistemas. En la ventilación por inyección se descarga cerca del frente aire puro que a través de una tubería que va desde el portal de entrada o desde la superficie de una lumbrera es forzado por medio de ventiladores. Cuando la longitud del túnel es grande se colocan ventiladores espaciados dependiendo de la capacidad de estos. La ventaja que ofrece este sistema esta en que en el lugar de trabajo se tiene aire fresco, la desventaja es que los gases salen muy lentamente nublando el túnel.

En el método por extracción el aire viciado se saca por medio de una tubería la ventaja que ofrece este sistema es que los gases no invaden el túnel y la desventaja es que el aire puro en su recorrido del portal al frente absorbe humedad y calor molestando a los trabajadores. El sistema más usado actualmente es una combinación de los dos anteriores en que inmediatamente después de tronar se extrae el aire durante 15 o 30 min. para desalojar los gases el resto del tiempo el aire es inyectado.



Ventilador de abanico en una lumbrera.



### Tubos de ventilación.

Volumen de aire requerido.-El volumen de aire requerido para la ventilación de un tunel varia con el número de obreros, con la frecuencia de las detonaciones de las cargas de explosivos, con el método para controlar el polvo.

A cada uno de los obreros debe suministrarse de  $5.66 \text{ m}^3$  por minuto y por trabajador este volumen depende de las condiciones locales como largo y sección del túnel, cantidad y tipo de explosivos usados, frecuencia del trueno, temperatura y humedad.

En el caso muy frecuente de que la temperatura y humedad dentro del -- túnel sean muy altos es indispensable que el aire inyectado este en constante movimiento y sea frio y seco.

Tamaño y capacidad del tubo de ventilación .- Una vez que se ha determinado la cantidad de aire requerido para la ventilación el siguiente paso consiste en determinar el tamaño del tubo y del abanico o abanicos que resulten en el menor costo total.

Si se va a suministrar una cantidad fija de aire en la cara del túnel el empleo de un tubo pequeño requerirá la instalación de un abanico más grande, si se utiliza un tubo de grandes dimensiones el costo del abanico y el de operación serán menores pero el costo del tubo será mayor.

Equipos ventiladores.- Los tres tipos usados en los tuneles son centrifugos de disco y de turbina, algunos modelos son reversibles lo que les permite extraer o inyectar aire indistintamente.

Tuberia.- Hay gran variedad de tipos estando entre otras la tuberia en espiral ya sea con pernos soldados o con abrazaderas, la de juntas rectas -- también soldadas o con pernos en la unión, las uniones entre los tubos también son muy variados estos deben ser faciles de quitar y poner y no deben permitir fugas, la tuberia se lleva generalmente hasta unos 30 mt. del frente, en el extrmo de la tuberia de la tuberia de ventilación se pone una capucha reforzada con objeto de proteger a esta pues de otra manera habría que retirar la tuberia antes de cada tronada.

Control del polvo.- Las operaciones tales como taladrado, dinamitado carga y acarreo de la rezaga ocasionan la acumulación de polvo en el aire de los tuneles en construcción, el polvo constituye un serio peligro para la salud de los trabajadores, esto es especialmente cierto cuando se esta perforando un -

túnel a través de roca que contenga un alto porcentaje de sílice ya que una — exposición prolongada al polvo del sílice puede causar la silicosis que es una enfermedad de los pulmones para la cual no se conoce ningún remedio.— se emplean varios métodos para limitar la cantidad de polvo en el aire de un túnel — incluyendo los siguientes.

a) El empleo de agua en vez de aire para sacar los detritos de los agujeros taladrados.

b) El empleo de un capuchón al vacío que se ajusta alrededor del taladro y pegado a la pared de roca para recibir el polvo que sale del agujero durante la operación de taladrado.

c) Completa ventilación del espacio cercano al frente de trabajo preferiblemente por el método de extracción después de cada tronada.

d) Mantener húmedo el montón de rezaga durante la operación de carga.

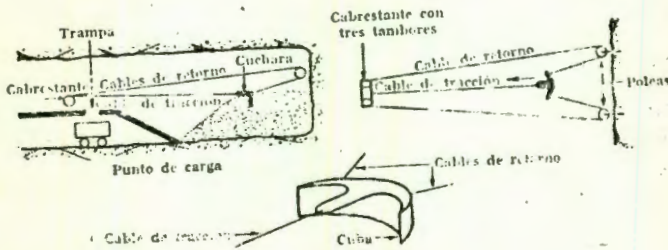


CARGA Y TRANSPORTE DE LA REZAGA

La operación de cargar piedra quebrada o tierra para sacarla de un túnel se denomina rezagado.- Esta operación puede hacerse a mano, con pala mecánica, con máquinas rezagadoras.

El rezagado a mano esta limitado a tuneles pequeños que no son lo suficientemente grandes para permitir el empleo de rezagadoras mecánicas, en los grandes tuneles se han utilizado palas mecánicas especiales con agujones cortos, si la ventilación no es un problema serio puede emplearse una unidad con motor de gasolina o diesel, si son objeccionables los gases de escape debe emplearse una unidad con motor eléctrico o emplearse unidades accionadas por aire comprimido.

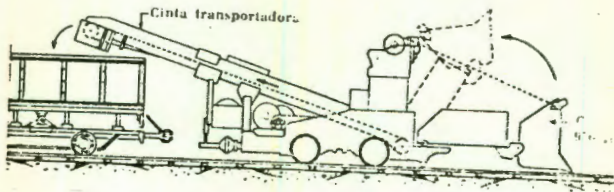
Traila.- La traila es una cuba rascadora accionada por un cabrestante - con tres tambores y tres cables uno de tracción y dos de retorno que pasan sobre poleas unidas a cuñas fijadas en el frente de ataque.



Traila

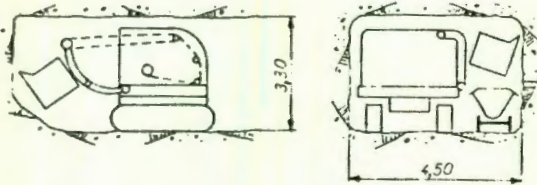
Palas cargadoras.- La pala cargadora de túnel es una máquina de dimensiones reducidas en anchura y altura que carga la rezaga ante si y descargandola por detrás en las vagonetas en un movimiento basculante por lo tanto la pala - no tiene movimiento de rotación lateral que seria imposible dada la estrechez de la galería., sin embargo puede orientarse a derecha e izquierda para servir mejor el frente de la rezaga.

Las palas pueden ser de accionamiento eléctrico o por aire comprimido, se desplazan sobre carriles o sobre orugas, en el caso de las palas que se desplazan sobre carriles los enganches de la parte frontal del primer tren de vagonetas se hace avanzar hacia el frente de ataque después del final de la ventilación y se las retira con el último tren.- Se utilizan palas ligeras de carga directa y palas pesadas en las que el cucharón vierte la rezaga sobre un transportador lo que permite la carga de vagones en largos de gran capacidad.



Pala cargadora con transportador

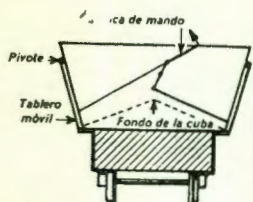
Palas.- En los grandes tuneles pueden utilizarse las palas ordinarias dependiendo únicamente de la sección del túnel.- Las palas ordinarias son preferentemente eléctricas, sin embargo pueden utilizarse palas con motor diesel en el caso de galerías de gran sección bien ventiladas.



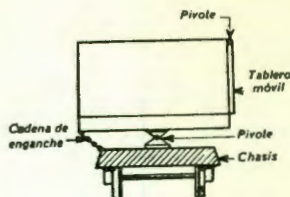
Pala cargadora para túnel

Transporte para la rezaga.- La rezaga se saca de los túneles por medio de vagonetas de vía angosta tirados por locomotoras o en camiones, vagonetas sobre neumáticos, dumpers, etc., para el túnel largo es necesario proporcionar una vía doble para que puedan salir los carros cargados al mismo tiempo que entran los carros vacíos. Como lo ancho de un vagón para rezagar es por lo común el doble del ancho de la vía se limita a una distancia ligeramente menor que la cuarta parte del ancho del túnel. La carga del riel debe ser lo suficientemente pesada para evitar un coqueo objectionable entre los durmientes de apoyo al pasar sobre ellos la locomotora con los vagones cargados así mismo si se va a utilizar los mismos rieles para toda clase de acarreo incluyendo madera, refuerzos, y concreto para cubrir la parte interior se justifican un gasto considerable al colocar los rieles sobre una buena base. Transporte por vía de 60 cm.- La capacidad de los vagones es de 1 a 2  $\text{mt}^3$  para las secciones inferiores al 15  $\text{mt}^3$  y del orden de 2 o 3  $\text{mt}^3$  si se emplea vía de 60 para secci-

ones mayores. Las vagonetas sobre vía de 60 pueden ser.- vagonetas basculantes a mano cuyo defecto es el excesivo tamaño.



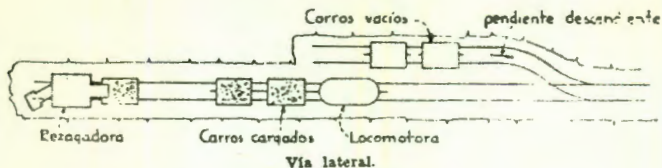
Vagón autodescargador.



Vagón basculante.

Transporte por vía métrica normal.- Con la vía métrica y con mayor razón con vía normal pueden utilizarse vagones de capacidad mucho mayor. La vía se construye con carriles unidos con placas de asiento y tirafondos a traviesa. Los carriles empleados son carriles de patín. Su peso depende del de los vehículos que debe soportar y especialmente de las máquinas de tracción. Las traviesas son de madera a veces de acero. Las traviesas están espaciadas como media de 70 a 75 cm. su anchura sobrepasa a la de la vía en 40 cm. por cada lado (vía de 1.0 mt) o 50 cm. (vía de 1.44) las dimensiones usuales son 1.80 X 0.20 X 0.12 (vía de 1.00 mt.) y 2.50 X 0.22 X 0.14 (vía de 1.44) es conveniente el empleo de balasto para el saneo de la plataforma e impide la rápida putrefacción de las traviesas constituyendo un colchón elástico que suaviza las reacciones sobre el material rodante disminuyendo su desgaste.

Vía lateral.- Este era el método usual empleado para el movimiento de los carros hasta hace pocos años. Consiste de un tramo de doble vía suficientemente larga para alojar un convoy entero tendido cerca del frente el modo de operar es el siguiente. La locomotora empuja los carros hacia el frente dejándolos en una de las vías y llevando un carro vacío hasta la rezagadora para ser lleno la locomotora que ya se ha desenganchado del convoy se llega hasta la vagoneta ya cargada y la retira a la vía opuesta a la de los carros vacíos entre tanto otra vagoneta vacía era empujada hacia el frente para cargarse. Al llenarse este otro carro la locomotora avanza de nuevo y lo retira mandándose entonces otra vagoneta vacía al frente y así sucesivamente. Al estar llenos todos los carros del convoy lo reemplaza otro vacío y mientras tanto el primero lleno de rezaga se lleva al tiradero a descargar. Siempre al retirar un convoy se deja con la rezagadora un carro vacío. Que será el primero del siguiente convoy. La desventaja de este sistema es la dificultad de adelantar el cambio al avanzar el frente.



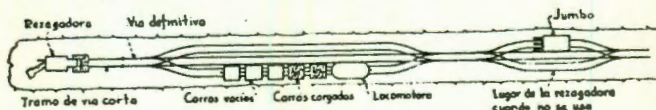
### Vía lateral

#### Cambio californiano.

El cambio de vías californiano es un conjunto simétrico de traviesas y carriles unidos que se colocan sobre la vía central a lo largo de la cual puede desplazarse mediante rodillos.

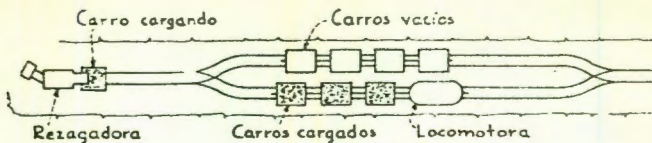
A la rezagadora se le puede montar en la parte de atrás un malacate movido por aire para jalar los carros vacíos hacia ella jalando la locomotora los llenos.- El cambio californiano es desplazado periódicamente hacia el frente por o un tractor especial retirándolo posteriormente hacia atrás durante la voladura y volviéndolo a poner en posición durante la carga de los materiales.

El tren vacío está sobre una de las vías y el lleno sobre la otra, los vagones vacíos pasan a la parte delantera se cargan y se envían hacia atrás por la otra vía.



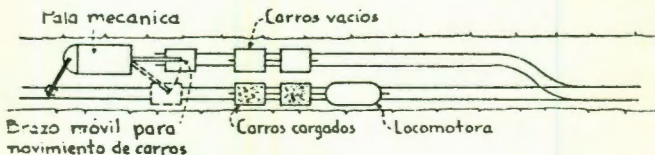
### Cambio californiano

Espuelas.- En los túneles pequeños se utilizan estas vías para guardar los carros vacíos, las espuelas se ponen en alguna ampliación del túnel y tienen el largo necesario para alojar un convoy además se tiene con una pendiente de 2% o ligeramente superior de manera que la altura sea mayor alejándose de la vía troncal. Después que la locomotora a retirado un carro lleno del frente retrocede hasta atrás del cruce de la troncal con la espuela entonces se deja correr un carro vacío hasta la línea principal de donde la locomotora lo empuja hacia la rezagadora para ser llenado.



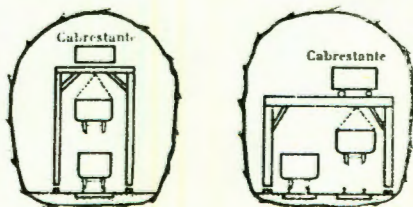
### Espuela

Cherry picker.- Los carros vacíos se colocan en la misma vía de la reza-  
gadora y por medio del cherry picker que es un brazo de grúa son levantados de  
uno en uno y puesto sobre la vía de carga.



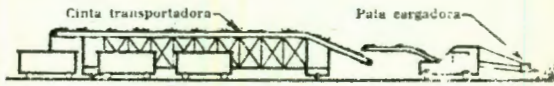
### Cherry picker

Para evacuar hacia atrás un vagón cuya carga acaba de terminarse es posi-  
ble también desenganchar el vagón vacío que esta tras el con un cherry picker  
que es una estructura aporcada situada sobre la vía y con un cabrestante de  
aire comprimido se levanta el vagón vacío para dejar pasar el vagón lleno de-  
jándole de nuevo sobre la vía



### Cherry picker

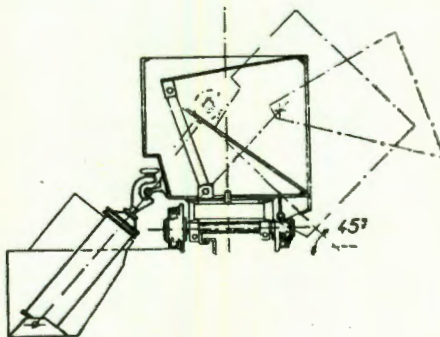
Por último puede utilizarse una banda transportadora dixon para cargar trenes enteros sin desenganchar los vagones, la cinta transportadora vierte la reza sobre una segunda cinta transportadora soportada por una estructura montada sobre ruedas, los vagones del tren que se están llenando pasan bajo la estructura cargandose de forma continua.



### Transportadora dixon

**Vagonetas.**—Se utilizan generalmente vagones de dos ejes y vagones de carrones. Los vagones pueden ser vagones-plataforma para el transporte de piezas pesadas ( maquinaria ) y materiales pesados ( perfiles metalicos )etc. o vagones caja o tolva para el transporte de la reza y materiales a granel .

En los vagones autodescargadores las cajas están provistas en sus caras laterales de compuertas que se manejan desde el exterior, para conseguir el vuelco de los vagones se utilizan generalmente gatos hidráulicos o de aire comprimido, cuando la descarga debe hacerse en un punto fijo el gato se instala en un foso este sistema se emplea en la construcción de tuneles.



Vuelco por gato instalado en un foso.

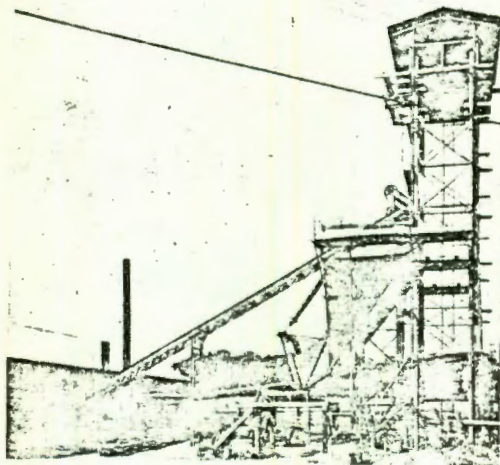
**Locomotoras de motor diesel.**— Las locomotoras de motor diesel tienen varias velocidades lo que permite proporcionar el esfuerzo tractor a la resistencia encontrada. Las locomotoras son adecuadas para el remolque de trenes cuando deben haber arranques frecuentes que producen de esta forma pérdida de tiempo menores. En estas condiciones las locomotoras son adecuadas para el servicio de obras en que los trenes de vagones deben desplazarse frecuentemente en las -

obras de utilización en que los vagones de materiales se utilizan en cargas o - descargas y exigen constantes maniobras.

La locomotora de tipo batería funciona a partir de acumuladores montados directamente sobre la locomotora.

Locomotora de tipo trole.- La locomotora trole es relativamente facil de operar pero requiere un cable de trole sin aislamiento que puede interferir - con otras operaciones y que representa una fuente de peligro en potencial para los obreros, también es necesario conectar a tierra los rieles que funcionan como un circuito de retorno para la corriente eléctrica.

Transporte vertical.- Transporte vertical por ejemplo lumbreras de acceso a un túnel la rezaga se eleva en una jaula por un cabrestante equilibrado por un contrapeso. La jaula recibe la rezaga transportada por las locomotoras que - lo depositan en el vertedero de descarga después es elevado y depositado en una tolva.



Elevación de la rezaga.

## REMOCION DEL AGUA FREATICA

Al perforar un túnel el control del agua consistira en una o dos operaciones que son.

1) Evitar la entrada al túnel de cantidades excesivas de agua y remoción del agua que penetra. La mayor parte del agua que se encuentra en los túneles proviene de dos fuentes.

a) La utilizada para sacar de los detritos de sondeo en los agujeros -- taladrados y la que fluye del terreno a través del cual se esta perforando -- el túnel .

La primera puede estimarse con una precisión razonable pero la segunda esta sujeta a grandes variaciones, por ejemplo la detonación de una carga de explosivos puede abrir fisuras en un deposito de agua freatica permitiendole así la entrada al túnel de una cantidad de agua inesperadamente grande.

Es una buena practica el taladrar agujeros de exploración adelante y a mayor profundidad de los que se taladran para los explosivos a fin de determinar la existencia de roca muy quebrada o de agua freatica, si los agujeros de exploración indican que existe esta condición es posible taponar los grandes flujos de agua y solidificar la formación antes de adelantar el túnel -- hasta la zona defectuosa.

Con respecto al bombeo una predicción sobre las necesidades en este aspecto es casi imposible, un estudio preliminar de una idea de la cantidad de agua que debe preverse sobre la capacidad esperada siempre deberá tenerse -- una reserva amplia de bombas para poder hacer frente a cualquier emergencia esta reserva es muy importante pues cuando se requiere una bomba se requiere de inmediato y las inundaciones ocasionan grandes perdidas y demoras. Las -- condiciones del túnel determinan el método a seguir en el desalojamiento del agua y el equipo a usar puede ser muy variado. Algunas circunstancias que -- afectan el método de desague son si el túnel se excava a nivel o con pendiente descendente toda el agua tendrá que moverse por bombeo hasta el portal si la pendiente es ascendente el desalojamiento del agua será posible hacerlo por gravedad y si el túnel se excava partiendo de una lumbrera el agua tendrá que bombearse hasta la superficie.

Existen muchos tipos y tamaños de bombas para sacar el agua de los túneles, los dos tipos más utilizados son la bomba centrífuga neumatica y la bomba centrífuga de motor eléctrico.

Las dos son unidades compactas con altas capacidades que pueden operar satisfactoriamente con diferentes alturas pizometricas,

Bombas centrífugas.- Las bombas centrífugas operadas con aire son muy -- útiles en los tuneles ya que estan diseñadas para manejar agua limpia o lodosas, aceite, aguas negras, lodo moderadamente espeso ectc.

Bombas centrífugas de etapas multiples.- Si una bomba centrífuga tiene un solo impulsor se describe como de una etapa mientras que si hay dos o mas impulsores y el agua que se descarga de un impulsor fluye a la succión del otro se describe como una bomba de etapas multiples.



Las bombas de etapas multiples son especialmente adecuadas para bombear contra grandes presiones o cargas ya que cada una de las etapas le imparte una presión adicional al agua.-

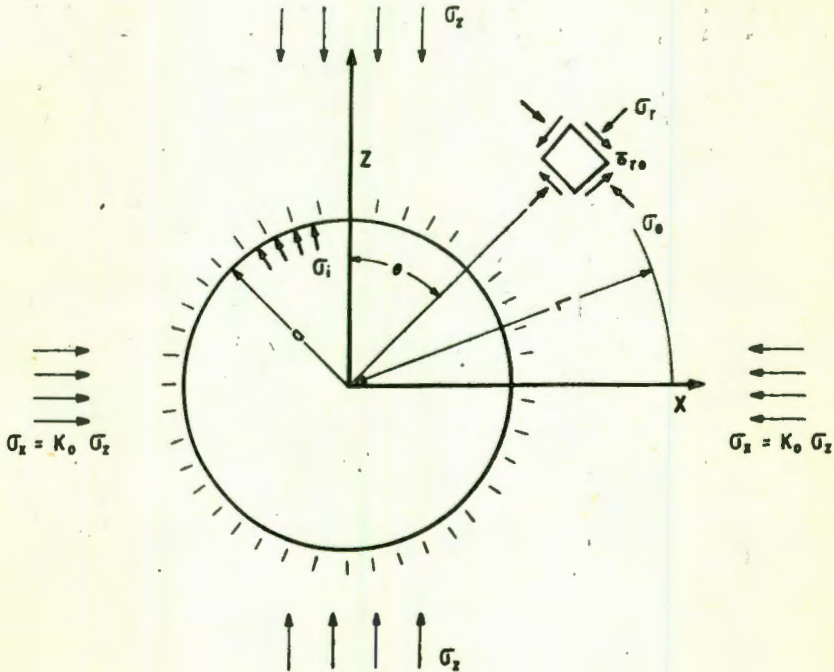
Instalaciones en el frente.- El metodo mas sencillo de acarrear en un frente que tenga pendiente sea en uno o otro sentido es el de zanjas o dren

Si la pendiente es ascendente el agua puede llevarse hasta el portal por gravedad, si es descendente será necesario tener una bomba cerca del frente y desde allí bombear por medio de una tuberfa.- Las zanjas raramente son satisfactorias en la practica pues debe cuidarse de mantenerse limpias y sin obstrucciones y generalmente ocupan un espacio muy necesario para trabajar.- Si las zanjas no se mantienen limpias lo cual es dificil en cualquier túnel se formaran innumerables charcos en el piso.- Un arreglo de bombeo bastante popular consiste en localizar carcamos o resumideros a intervalos de 200 a 300 mts. o en los puntos en donde haya filtraciones, en estos el agua se bombea de un carcamo al siguiente, en este tipo de bombeo las bombas se pueden modificar según las necesidades lo requieran, los tamaños pequeños se adelantan conforme el túnel avanza y como generalmente la cantidad de agua aumenta proporcionalmente al progreso del túnel en las primeras estaciones se requeriran mayores bombas que las instaladas originalmente.

ESTADO DE ESFUERZO

La teoría de la elasticidad permite plantear, los estados de esfuerzo - en torno a una galería circular perforada en el continuo elástico; otra forma de galería desembocan con rapidez en dificultades matemáticas muy grandes que hacen prácticamente imposible la obtención de soluciones precisas, pero la solución para la galería circular constituye aún en estos casos una buena imagen aproximada.

Esta puede obtenerse con consideración de un estado de deformación plana en una galería no adomada, para cualquier combinación de cargas horizontales y verticales.- la siguiente fig. ilustra la nomenclatura usual en el análisis de estos problemas elásticos.



Nomenclatura correspondiente a la solución de Kirsch dentro de la teoría de la elasticidad.

$$\sigma_r = 1/2 \sigma_z \left[ (1 + K_0) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + (1 + K_0) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_\theta = 1/2 \sigma_z \left[ (1 + K_0) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - (1 - K_0) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right]$$

Puede darse el estado de esfuerzo final alrededor del túnel, después de abierto éste.

$$\tau_{r\theta} = -1/2 \sigma_z (1 - K_0) \left(1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta$$

$K_0$  = Coeficiente de presión de tierra en reposo.

En las paredes del túnel, los esfuerzos podrán obtenerse particularizando las ecuaciones anteriores para el caso  $r=a$  llegandose a.

$$\sigma_r = 0 = \tau_{r\theta}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_z \left[ (1 + K_0) - 2(1 - K_0) \cos 2\theta \right]$$

en la clave  $\theta = 0$

$$\sigma_r = 0 = \tau_{r\theta}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_z (3K_0 - 1)$$

Se ve que  $\sigma_\theta$  es nulo para  $K_0 = 1/3$  si  $K_0 < 1/3$  según este análisis se abrirían fisuras en la clave.

Calculo de las deformaciones en torno al túnel, a consecuencia de los anteriores estados de esfuerzos.

A la distancia ( $r$ ) del centro del túnel circular, no ademado, de radio ( $a$ ) El desplazamiento radial hacia dentro producido por la excavación del túnel resulta ser según la teoría de la elasticidad.

$$u = \sigma_z \frac{1 + \mu}{E} \frac{a^2}{r^2} \quad (a)$$

En la pared del túnel donde  $r=a$  será.

$$\mu = \nu_z \frac{1 + \mu}{E} a$$

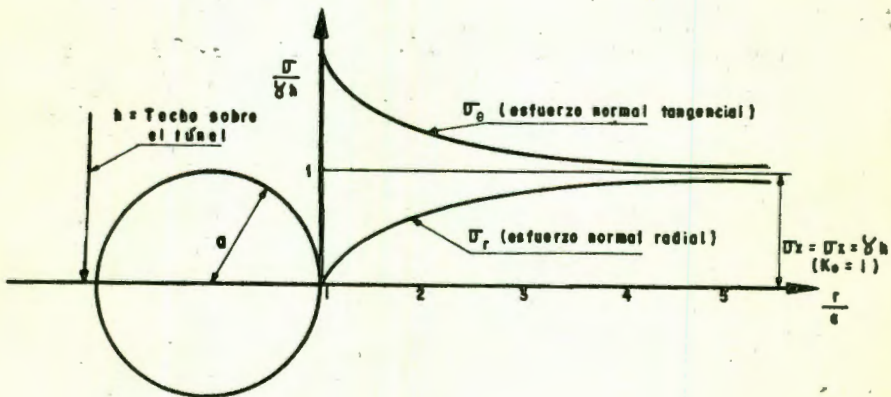
(b)

Los desplazamientos tangenciales son nulos.

Si en el interior del túnel existe contra el techo una presión  $\sqrt{z}$  las formulas ( a y b ) dan los desplazamientos que produce, pues por superposición puede cambiarse  $\sqrt{z}$  por  $-\sqrt{z}$ .

También puede valuar un desplazamiento radial promedio en toda la circunferencia del túnel como.

$$v_m = 1/2 (1 + K_0) \sqrt{z} a \frac{1 + \mu}{E}$$



Distribución de esfuerzos según Kirsch alrededor de un túnel circular en un medio elástico.

La fig. anterior presenta un croquis los tipos de distribución de esfuerzos en torno a la galería circular, representados por las ecuaciones de Kirsch de hecho, la distribución presentada corresponde al caso  $\sigma_z = \sigma_x$  o sea  $K_0 = 1$ .

Las soluciones elasticas pueden usarse muy rara vez en la practica pues ni las rocas, ni los suelos son materiales homogéneos, isotropos y linealmente elásticos.

Sin embargo las soluciones elásticas pueden ser útiles para calcular los desplazamientos casi elásticos, que ocurren inmediatamente después de practi+ cada una excavación en roca o suelos firmes.

Análisis plásticos en materiales cohesivos.

Los túneles son estructuras para las que los análisis plasticos podrían ofrecer campos de aplicación muy prometedores, en ellos abundan los casos en que la presión del subsuelo es tal que produce la falla en una serie de zonas localizadas, de manera que pueden llegar a formarse en torno a la galería una zona plastica limitada en estado de deformación contenida.

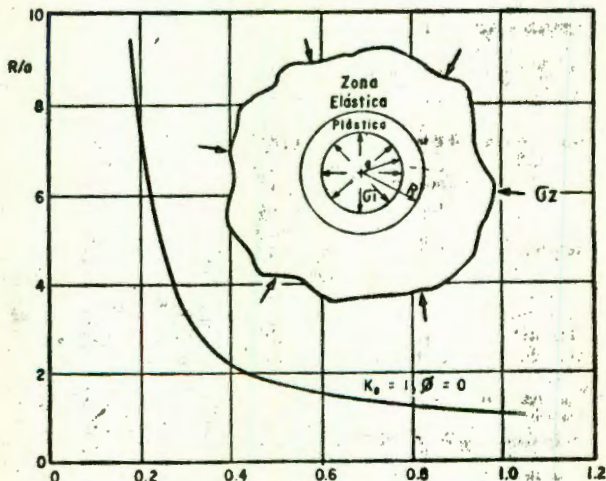
Se considera que ocurre la fluencia plástica cuando  $\sigma_1 - \sigma_3 \geq 2 C_u$  donde  $C_u$  es la resistencia al esfuerzo cortante obtenida en una prueba triaxial, sin consolidación y sin drenaje.

Si la diferencia de los esfuerzos principales es menor que  $2 C_u$  el material se mantiene en el intervalo elástico.

El campo de los esfuerzos actuantes sobre el túnel está formado por una presión vertical ( $\sigma_z$ ) una horizontal ( $\sigma_x$ ) y si por hipótesis  $K_0 = 1$  los esfuerzos  $\sigma_x = \sigma_z$  y una presión interior ( $\sigma_c$ ) aplicada dentro del túnel sobre toda la periferia de la galería circular.

Si  $\sigma_x - \sigma_z \leq C_u$  no se desarrollará ninguna zona plástica en torno al túnel, pero si  $\sigma_x - \sigma_z > C_u$  apareciera una zona plástica que se extiende hasta una distancia ( $R$ ) alejándose del centro del túnel.

$$R = a e^{\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2C_u}} - 1/2$$



Extensión de la zona plastica en torno a un túnel circular suelo puramente plastico.

En la zona plástica para  $a \leq r \leq R$  los esfuerzos son.

$$\sigma_r = \sigma_c + 2 c_u \ln \frac{r}{a}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r + 2 c_u$$

$$\tau_{r\theta} = 1/2 (\sigma_r + \sigma_\theta)$$

$\sigma_r$  es el esfuerzo normal actuante en la dirección correspondiente al eje del túnel. - La zona plástica se supone de volumen constante ( $\mu = 1/2$ )

El esfuerzo cortante ( $\tau_{r\theta}$ ) es nulo en todos los puntos, por simetría.

En la frontera entre la zona elástica y la plástica  $\sigma_r = \sigma_c - c_u$

Si no hay presión actuando en el interior del túnel ( $\sigma_c = 0$ ) y en tal caso el radio de la zona plástica es.

$$R = a e^{1/2 \left( \frac{\sigma_c}{c_u} - 1 \right)}$$

Los desplazamientos en la frontera entre la zona plástica y la elástica hacia el interior del túnel resultan.

$$u_R = (\sigma_c - \sigma_r) \frac{1 + \mu}{E} R = c_u \frac{1 + \mu}{E} R$$

Por el contrario, si existe la presión ( $\sigma_c$ ) en el interior del túnel que sería el caso de que hubiera un ademe ejerciendo una presión uniforme sobre toda la periferia de la galería, el desplazamiento radial que hacia el centro sufrirían las paredes de dicha galería resulta ser.

$$\frac{u_a}{a} = 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + A}}$$

donde

$$A = 2c_u \frac{1 + \mu}{E} e^{\frac{\sigma_c - \sigma_c}{c_u}} - 1$$

**Análisis plástico en materiales con cohesión y fricción.**

El criterio de fluencia que tradicionalmente se ha considerado en estos casos es el de Mohr-Coulomb que puede escribirse.

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \operatorname{sen} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi} + \frac{2c \operatorname{cos} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi}$$

c = cohesión

También ahora se acepta  $\sigma_z = \sigma_x$  ( $K_0 = 1$ ) y que el material permanece con su volumen constante ( $\mu = 1/3$ ).

La teoría indica que.

$$\sigma_z \leq \frac{\sigma_c + c \operatorname{cos} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi}$$

No hay desarrollo de zona plástica y el material se mantiene en estado elástico.

Para valores mayores de ( $\sigma_z$ ) se desarrolla una zona plástica anular cuyo radio es.

$$R = a \left[ (1 - \operatorname{sen} \phi) \frac{\sigma_z + c \operatorname{cot} \phi}{\sigma_c + c \operatorname{cot} \phi} \right] \frac{1 - \operatorname{sen} \phi}{2 \operatorname{sen} \phi}$$

Dentro de la zona plástica  $a \leq r \leq R$  los esfuerzos son.

$$\sigma_r = -c \operatorname{cot} \phi + (\sigma_c + c \operatorname{cot} \phi) \left( \frac{r}{a} \right)^{\frac{2 \operatorname{sen} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi}}$$

$$\sigma_\theta = -c \operatorname{cot} \phi + (\sigma_c + c \operatorname{cot} \phi) \frac{1 + \operatorname{sen} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi} \left( \frac{r}{a} \right)^{\frac{2 \operatorname{sen} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi}}$$

$$\sigma_y = 1/2 (\sigma_r + \sigma_\theta)$$

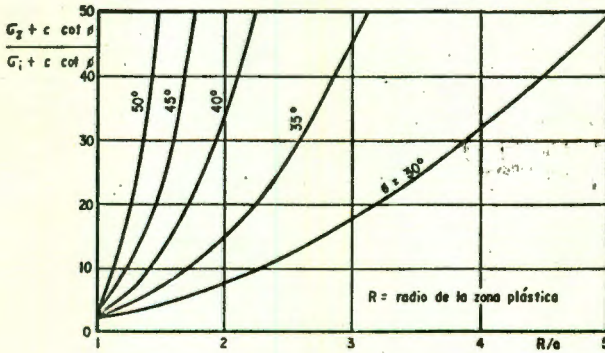
En la frontera entre la zona plástica y elástica los esfuerzos son.

$$\sigma_R = \sigma_z (1 - \operatorname{sen} \phi) - c \operatorname{cos} \phi \quad (\text{radial})$$

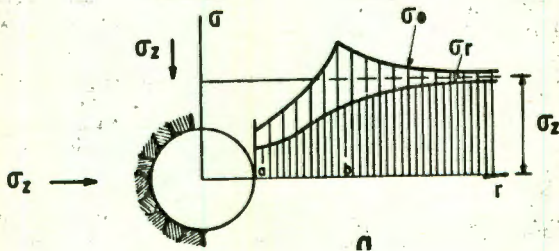
$$\sigma_\theta = \sigma_z (1 + \operatorname{sen} \phi) + c \operatorname{cos} \phi \quad (\text{tangencial})$$

En la zona elástica ( $r \geq R$ ) prevalece el estado elástico.

La siguiente fig. proporciona el radio de la zona plástica para diferentes casos de  $\sqrt{v_z}$ ,  $\sqrt{v_i}$  y valores del ángulo  $\phi$



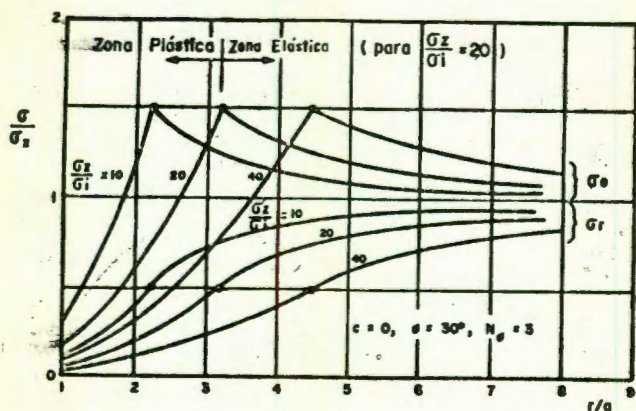
Radio de la zona plástica en función de los valores de  $c$  y  $\phi$  para diferentes combinaciones de valores  $\sqrt{v_i}$  y  $\sqrt{v_z}$



Croquis de distribución de los esfuerzos.



La fig. siguiente proporciona diversas distribuciones de esfuerzos alrededor de un túnel circular; se consideran los esfuerzos radial y tangencial y su variación con la distancia al centro de la galería y se detallan las condiciones particulares de  $c$  y  $\phi$



Distribución de esfuerzos tangenciales  $\sigma_\theta$  y radial  $\sigma_r$ .

Si  $\sqrt{z} = c = 0$  el radio de la zona plástica se hace infinito y la galería se cerrará por sí sola.

Todas las fórmulas anteriores conservan su valor sólo en tanto el suelo mantenga su resistencia durante el periodo de flujo plástico, lo cual esto no puede suceder y lo normal es que la fluencia traiga consigo un debilitamiento estructural, causa de disminución de resistencia, con lo que se desencadena un proceso similar a la falla progresiva.

No hay estudios teóricos que tomen en cuenta una condición diferente que  $K_0 = 1$  o en los que intervenga la influencia del cubrimiento sobre el túnel.

Según la teoría de la plasticidad, el desplazamiento radial hacia el interior del túnel en la frontera entre las zonas plástica y elástica puede establecerse como.

$$v_R = (\sigma_z - \sigma_r) \frac{1 + \mu}{E} R$$

Se supone que el volumen en la zona plástica se mantiene constante.

## SOPORTE TEMPORAL

La necesidad de emplear ademes provisionales, antes de construir el revestimiento definitivo depende de los problemas de asentamiento, y pérdida de material que puedan plantearse en el túnel, del tipo de suelo y de las condiciones económicas del proyecto de que se trate.

En el caso de las arcillas, la experiencia parece indicar que salvo en el caso de materiales expansivos, la construcción rápida de un ademe provisional elimina muchos de los riesgos que provienen del desarrollo de altas presiones y grandes desplazamientos sobre el revestimiento definitivo.

Construido un ademe provisional es fácil obtener de él criterios muy apropiados al caso de que se trate, para erigir un buen revestimiento definitivo por ejemplo, las presiones que actuarán en él pueden estimarse muy razonablemente, a partir de los desplazamientos que se hayan medido en el ademe provisional.- Si el revestimiento se construyera de una vez, según la excavación se fuese completando, tendría que soportar presiones mucho más altas y distorsiones también mayores que las que soportaría si primeramente se construyera un ademe provisional.- Todos los estudios indican que las evoluciones del estado de presiones y los cambios de forma que sufra el ademe provisional ocurren en ventaja de los requerimientos a que estará sujeto el revestimiento definitivo el ideal sería construir éste una vez que el provisional hubiera llegado a la condición de equilibrio.

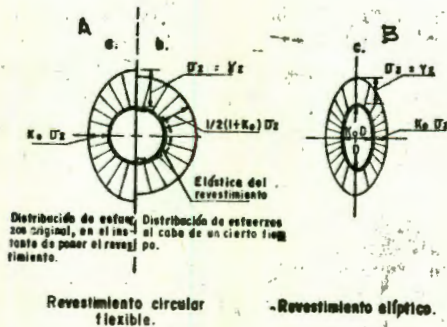
La decisión de posponer la construcción del revestimiento hasta que se produzca mucha relajación de las presiones queda condicionada en su idoneidad a la propia naturaleza del revestimiento; si este es muy rígido, generalmente cuanto más tarde en ponerse resulta más económico, pero si es flexible es mucho menos lo que se gana posponiendo su construcción.

En arcillas expansivas pueden lograrse ahorros muy importantes en ademes y revestimientos construyéndolos después de que haya ocurrido una parte substancial de la expansión, aunque esto no alivie mucho las distorsiones posteriores y si sólo las presiones producidas, aun cuando no se puede asegurar cuando.- El principio operativo del soporte temporal puede explicarse de la siguiente manera.- Imagínese una masa de suelo con superficie horizontal a la profundidad (  $z$  ) el esfuerzo normal vertical será (  $\gamma z$  ) y el horizontal  $K_0 \gamma z$ . si se coloca ahora instantáneamente en el interior de la masa un revestimiento circular, tal como se hace para un túnel, en el preciso momento de la colocación, el estado de esfuerzo en la masa no difiere del que existía previamente.- Se aceptará también que el revestimiento circular es perfectamente flexible, pero capaz de soportar los esfuerzos de compresión producidos por la tierra que lo rodea.- Transcurido cualquier lapso de tiempo, el anillo flexible sólo puede estar en equilibrio si los esfuerzos normales radiales que lo actúan son iguales en todas direcciones; para que esta condición se cumpla, el esfuerzo normal horizontal producido por la tierra debe de crecer se supone que  $K_0 < 1$  en tanto que los esfuerzos normales verticales deben disminuir.- Si el anillo de revestimiento tolera los esfuerzos radiales que se producen, alcanzara una condición uniforme de equilibrio, siempre y cuando el monto de deformación necesaria para ello no exceda límites tolerables de -

acuerdo con consideraciones de toda índole, pero de naturaleza no estructural tales como por ejemplo, que no disminuyan en exceso los galibos necesarios.

La cantidad de deformación que haya de sufrir el anillo antes de alcanzar su condición de equilibrio depende de las características del suelo que lo rodea y de como varíen con el tiempo, así como de las dimensiones del túnel y de la profundidad a que esté colocado.

Si el revestimiento que se colocase fuese elíptico con su eje menor igual a  $K_0$  veces el eje mayor (vertical) esta forma produciría una repartición uniforme del esfuerzo radial en torno al túnel, aún sin ninguna deformación del mismo en los instantes posteriores al inicial las ideas que se han venido exponiendo se resumen en la siguiente fig.



Distribución de esfuerzos radiales en torno a revestimientos o ademes flexibles.

En la parte a) de la fig. se muestra la distribución de esfuerzos sobre un túnel circular, en el momento inicial de colocar el ademe, supuesto que éste se colocase instantáneamente, en la parte b) se ve la distribución uniforme final del esfuerzo radial a que debe llegarse, después de que el túnel se deforme como se muestra.-finalmente la parte c) muestra la sección elíptica a la que se ha hecho referencia.

La distribución favorable a que puede llegar el esfuerzo radial en torno a un túnel circular se logra a expensas del desarrollo de esfuerzos cortantes en la masa que lo rodea.

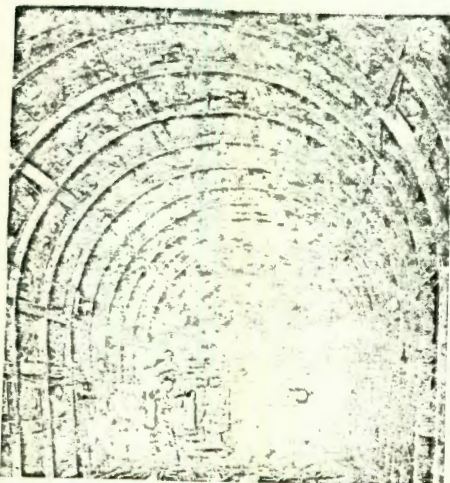
Si estos permanecen esencialmente constantes después de ocurrida la redistribución y con un nivel adecuado, la masa de suelo no sufrirá distorsiones posteriores, pero si ello no es así la masa de suelo actuara sobre el revestimiento y le producirá desplazamientos adicionales, quizá durante muy largo tiempo de esta manera las características del material excavado, la deformabilidad del revestimiento y la interrelación entre ambos conceptos son de

importancia fundamental.—Si el ademe que se hubiese colocado fuera infinitamente rígido, las presiones desarrolladas en el momento inicial de la colocación serian las mismas que el caso de ademe flexible, pero en los momentos posteriores el ademe no podra deformarse y esa distribución inicial de presiones continuaria indefinidamente apareciendo momentos flexionantes en el revestimiento, en correspondencia a estados de esfuerzos que ya no son radiales uniformes.



Esta foto muestra el aspecto de un túnel cuando su soporte temporal esta resuelto a base de marcos metalicos.

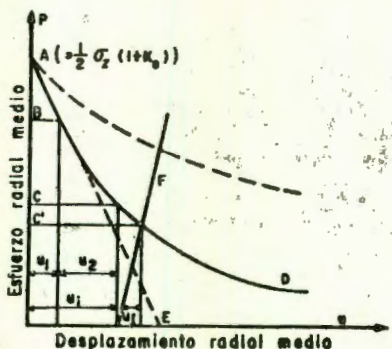
En ocasiones es posible emplear segmentos metálicos (charolas) como soporte temporal.



La fotografia muestra un túnel construido con tal sistema.

El uso del concreto lanzado (método austriaco) ha revolucionado notablemente la técnica de tuneleo ya que constituye un medio eficaz y rapido para colocar el soporte temporal inclusive en algunos casos puede permanecer como revestimiento definitivo.

Cada tipo de terreno tiene un tiempo característico entre la apertura de la excavación y la iniciación de la relajación del contorno por tanto en cada caso será preciso intervenir con el concreto lanzado en plazo más o menos corto.

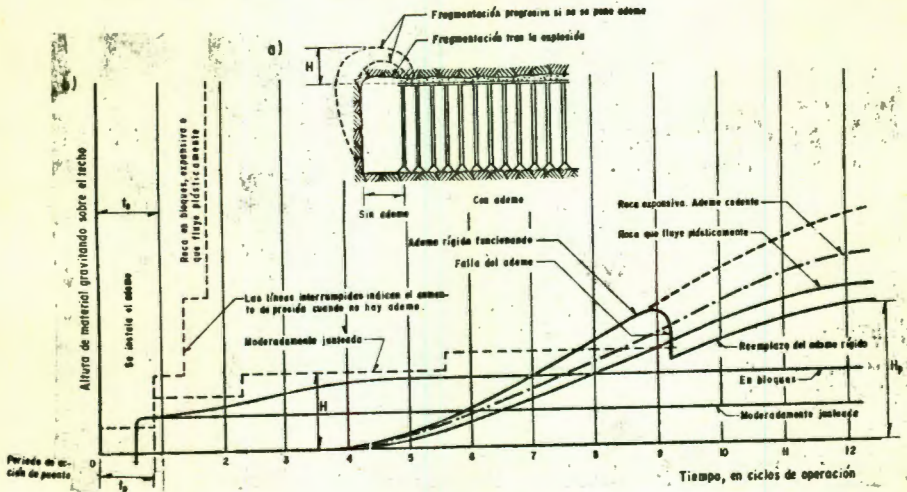


Relación entre los esfuerzos radiales medios sobre un ademe circular y los desplazamientos radiales correspondientes.

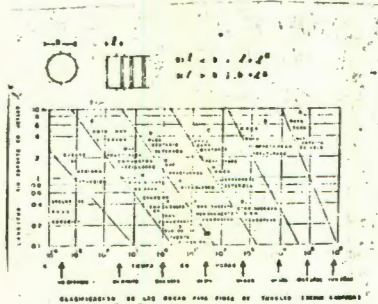
Esta fig. representa la relación entre el esfuerzo radial medio y el desplazamiento radial correspondiente a un túnel circular durante su construcción.- En el eje de las ordenadas se presenta esfuerzo radial medio y en el de las abscisas el desplazamiento radial medio antes de construir el túnel el esfuerzo radial medio vale  $\frac{1}{2} \sqrt{z} (1 + K_0)$  y se presenta en el punto ( A ) en el eje de las ordenadas obviamente en ( A ) el desplazamiento radial vale ( 0 ).

Durante la excavación del núcleo del túnel y hasta que el hueco alcanza la sección de proyecto se presenta un desplazamiento radial medio  $U_1$  que le provoca a su vez un decremento del esfuerzo radial y le coloca en un cierto valor B marcado en el eje de las ordenadas. Toda vez que se ha alcanzado la sección de proyecto y se instala el soporte temporal hay un desplazamiento radial  $U_2$  hasta que el terreno entra en contacto con el ademe.- Esto provoca a su vez otro descenso del esfuerzo radial medio a lo largo de la curva denominada "reacción del terreno" llegando al valor C.- Finalmente el soporte temporal empieza a trabajar siguiendo la línea denominada "reacción del soporte temporal " y ello provoca un nuevo desplazamiento radial medio  $U_3$  el cual se estabiliza en el momento en que se cortan las líneas reacción del soporte temporal para un esfuerzo radial medio C.- Puede suceder con el tiempo en ciertos materiales que la curva reacción del terreno se desplace a la posición de la línea punteada con lo cual el esfuerzo radial medio se incrementara debiendo estar el ademe preparado para ello.- Se concluye de esta gráfica que la magnitud de las deformaciones y consecuentemente de los esfuerzos dependen de la rigidez del ademe y del momento en que este es colocado.

El arte de hacer tuneles consiste en colocar el revestimiento temporal - (adema) justamente en el momento adecuado ya que si se coloca demasiado pronto to estará sujeto a fuertes esfuerzos radiales al no permitir que el material vecino contribuya a autosoportarse por el contrario si se deja demasiado tiempo po el material puede aflojarse, perder su capacidad de soporte y provocar una mayor carga sobre el adema.

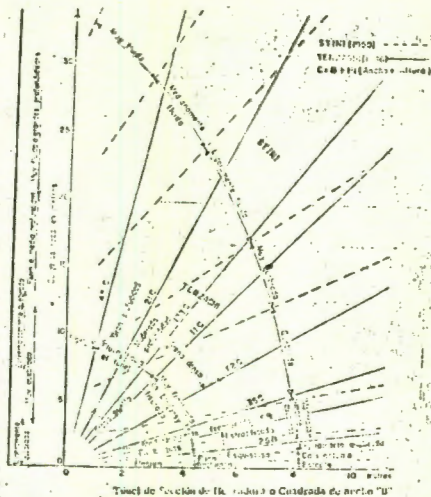


Esta fig. publicada por K. Terzaghi establece una relación entre el tiempo, la sobreexcavación por fracturamiento sucesivo y la carga de roca existe una cierta acción de puente sobre una longitud "L" que es función del tipo de roca. En el principio dicha acción de puente es mayor en rocas intemperizadas que en rocas fracturadas pero con el paso del tiempo el incremento de carga - en las primeras puede llegar a ser mayor que en las segundas.



Esta gráfica construida según el criterio de Lauffer presenta una clasificación de las rocas para fines de construcción de los tuneles en función de

dos parametros a) la longitud libre sin soporte y b) el tiempo que permanece estable. En el extremo superior derecho se clasifican los materiales que ostentan las mejores características y que inclusive no requieren soporte. Por el contrario en el extremo inferior izquierdo se encuentran los los más difíciles de excavar en túnel.



VALOR DE LA CARGA DE ROCA DE ACUERDO A LAS DIMENSIONES DEL TUNEL Y DE LA CALIDAD DE LA ROCA.

Esta gráfica construida con los criterios de K. Terzaghi y Stini muestra el valor de la carga de roca en metros que debe tomarse en cuenta para el diseño del soporte temporal en función de las dimensiones del túnel y de la calidad de la roca, por ejemplo para un túnel de 4 mts. de ancho en roca moderadamente fracturada, hay que considerar del orden de 2 mts. de carga de roca.

## REVESTIMIENTO DEFINITIVO

Descripción de los tipos de revestimientos.- Consideramos poder distinguir los siguientes tipos de revestimiento que difieren entre sí, bien por las modalidades ejecutivas, o bien por su comportamiento estático.

a) Túneles con revestimiento normal de hormigón.  
 b) Túneles con revestimiento de I fase de hormigón lanzado y sucesivo - revestimiento de II FASE de hormigón normal.

a) Túneles con revestimiento de hormigón.- Esos túneles se realizan siguiendo el concepto tradicional de construcción mediante excavación, cimbras metálicas de sostenimiento provisional y hormigonado de revestimiento definitivo.

La comprobación del contacto entre la roca y el revestimiento debe ser - realizado de modo sistemático, ya que la existencia de huecos macroscópicos es muchas veces causa de lesiones que pueden evitarse fácilmente con rápidas inyecciones de relleno y taponado.

b) Túneles con revestimiento de hormigón lanzado y subsiguiente complemento de la estructura con hormigón normal.

Como variante de los túneles realizados mediante cimbras y revestimiento de hormigón normal se ha recurrido con frecuencia a túneles construidos con - revestimiento portante de I fase de hormigón lanzado y subsiguiente hormigonado normal en encofrados o cimbras.

Anclajes.- Los anclajes actúan como un soporte activo distribuyendo una coacción radial que moviliza compresiones tangenciales sobre un anillo de - terreno de espesor bien definido en torno de la excavación.

Los anclajes colaboran con el eventual revestimiento de hormigón lanzado al formar un sistema que impone al terreno la misión de contribuir a su propia sustentación y a la estabilización del perfil de la excavación. por tanto ofrece un interés especial la técnica constructiva que prevé el uso combinado del hormigón lanzado de I fase y la colocación de anclajes.

## METODOS DE CALCULO

El planteamiento del proyecto de un túnel está condicionado no sólo por la sección útil interior requerida y por la entidad del recubrimiento, sino - también por el método previsto para proceder a la excavación y a la ejecución del revestimiento.

Normalmente los revestimientos adoptados, al estar sin armar, no son aptos para soportar esfuerzos de tracción y por consiguiente es necesario adoptar una forma de sección tal que mantenga la curva de las presiones dentro del tercio central de la propia sección.

Cuando las cargas verticales predominan sobre los empujes horizontales ( por ejemplo, fuertes cargas de asiento sobre la bóveda ) se tendría que recurrir a un tipo de sección de forma ojival; por el contrario, cargas que actuarán en dirección radial aconsejarían teóricamente un tipo de sección de forma más bien próxima a la circular.

Para poder plantear un sistema de cálculo que pueda ser válido para cualquier clase de terreno con empujes inclinados de cualquier modo se ha considerado conveniente subdividir, los túneles naturales en dos categorías - comprendiendo en la primera, todos los revestimientos realizados con la tec -



nica del revestimiento de I fase (hormigón lanzado) y en la segunda, todos los revestimientos llevados a cabo mediante la técnica tradicional de la excavación de las cimbras de sostenimiento y del hormigón normal.

En la primera categoría se pretende realizar una contención total y una estabilización segura del equilibrio del contorno de la excavación, en tanto que en la segunda categoría se supone que se inician relajamientos parciales - en el contorno admitiendo acciones sobre los revestimientos por parte de cargas y empujes que pueden ser determinados según los métodos tradicionales.

El revestimiento de I fase con hormigón lanzado poco después de la excavación, realiza una contención elástica continua y ensamblada con el terreno en forma de capas de proporcionar una reacción radial igual a la presión de estabilización necesaria para la mantención del equilibrio plástico al contorno de la excavación, en función de las características geomecánicas del terreno y - compatiblemente a razonables valores de la extensión del anillo plástificado que colabora al sostenimiento.

Si la ejecución es cuidadosa y regular, las cargas de relajación son insignificantes y el ensamblado del hormigón lanzado con el terreno asegura el mantenimiento de las condiciones de carga hidrostática sobre la estructura.

Una vez determinado la presión de estabilización, y fijada la máxima sollicitación admisible en el hormigón, el espesor total del revestimiento viene dado por.

$$S_t = \frac{P_a R_m}{\sqrt{\quad}} = \frac{P_a R_i}{\sqrt{\quad} - \frac{1}{2} P_a}$$

$$R_m = R_e - \frac{S_t}{2}$$

$$R_e = R_i + S_t$$

$$S = \frac{P_a R_m}{\sqrt{\quad}} = \frac{P_a R_e}{\sqrt{\quad} + \frac{1}{2} P_a}$$

#### TUNELES DE HORMIGÓN

Los sistemas tradicionales de sustentación de la excavación mediante cimbras y cerchas permiten, medidas más o menos sensibles la relajación o aflojamiento del terreno de alrededor de la misma; con tales relajaciones se manifiesta el proceso de activación de las cargas sobre las cimbras cuyo valor es función de la anchura y de la altura de la sección, del peso del terreno relajado y de las condiciones del terreno expresadas por el coeficiente de carga

Los túneles ejecutados de acuerdo con las modalidades constructivas pueden subdividirse, según la altura del recubrimiento del terreno, en túneles superficiales y túneles profundos; entran en la primera categoría todos aquellos túneles cuyo recubrimiento de terreno no consiente la formación de una elipse de carga con un razonable margen de seguridad.

En el segundo caso se puede admitir que la carga sobre la bóveda del túnel se manifiesta como un simple peso de una masa parabólica o elíptica desprendida, y a los lados como simples empujes activos y pasivos; o sea respectivamente, como acción directa del terreno sobre el revestimiento y como resistencia del propio terreno a las deformaciones que se le imprimen.

El método de cálculo adoptado para resolver la estructura es usualmente denominada de las deformaciones; la estructura se subdivide en dovelas equiparadas a vástagos rectilíneos con nudos que coinciden con el c.d.g. de la divisoria de las dovelas. el cálculo se efectúa para una profundidad de 1 mt. en el sentido longitudinal del túnel. De cada vástago o barra se determinan las posiciones de los nudos refiriéndolos a dos ejes arbitrarios. Se determinan además, las características estáticas de cada dovela; superficie, momento de inercia, módulos de resistencia.

Las fuerzas concentradas  $X$  que actúan en cada nudo pueden ser expresadas así.

$$X_i = K h_i \sigma$$

$$X = K h_i \sigma_i$$

$K$  es el módulo de reacción del terreno

$h_i$  la proyección vertical de la dovela

$\sigma_i$  el desplazamiento horizontal efectivo del nudo  $1^\circ$ .

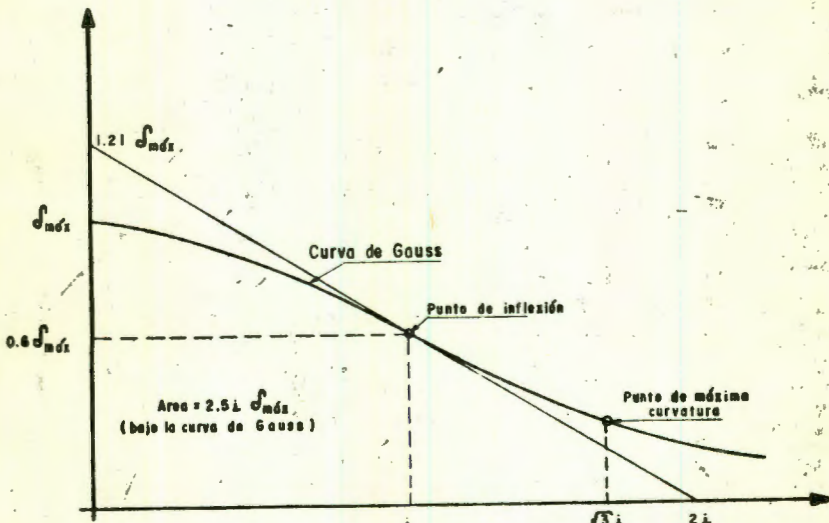
Toda carga externa de cualquier intensidad e inclinación cualquiera puede ser reducida a las condiciones de carga examinadas mediante su descomposición en una carga horizontal y otra vertical.

COMPORTAMIENTO

Es vital conocer el comportamiento de un túnel durante su construcción - tanto lo referente a su propia estabilidad como en la del terreno que lo so - breyase esto último adquiere mayor importancia en zonas urbanas.

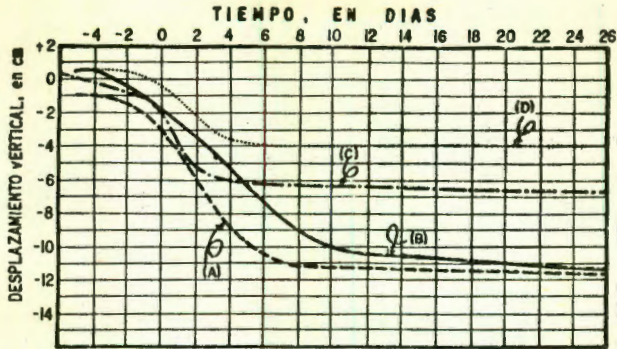
La instrumentación en estos aspectos es insustituible ya que permite.

- a.-Conocer si el soporte temporal es adecuado.
- b.-Conocer bases de diseño más realistas para el revestimiento definitivo.
- c.-Conocer la tendencia de movimientos en la superficie del terreno antes de que se causen daños importantes en las construcciones sobre yacien - tes.



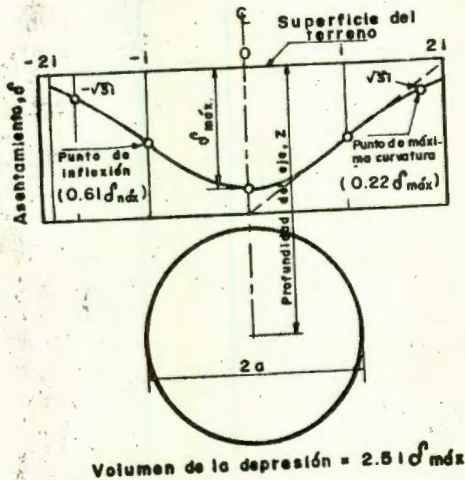
Curva de Gauss y alguna de sus relaciones geométricas.

La depresión que engendra un túnel en la superficie del terreno puede ana - lizarse teóricamente con la campana de Gauss cuyas relaciones geométricas se - muestran en esta gráfica.



El día 0 corresponde al paso del escudo por la vertical del punto Curvas asentamiento-tiempo de bancos de nivel superficiales. Excavaciones en el Metro de la Ciudad de México.

- (A) Sifón Manuel González II
- (B) Sifón Obrero Mundial
- (C) Sifón Dos de Abril
- (D) Túnel Metro



En la gráfica superior de esta fig. pueden observarse las curvas típicas de desplazamiento vertical-tiempo de bancos de nivel superficiales en cuatro túneles. El día 0 corresponde a la llegada del frente del túnel al banco estudiado. En la gráfica inferior se muestran también curvas desplazamiento vertical-tiempo para la clave del túnel y bancos de nivel a diferentes profundidades pero todos situados sobre la misma vertical. El día 0 tiene el significado antes mencionado.

En general puede decirse que un túnel tiene un comportamiento aceptable cuando las deformaciones que engendra se estabilizan con el tiempo y su magnitud no causa daños en las construcciones vecinas.

INYECCION

Por Inyectabilidad se entiende la aptitud a penetrar de líquidos pastosos dentro del medio que se va a inyectar. La lechada de inyección debe estar formada por partículas tan finas que puedan penetrar en los huecos (poros fisuras) rellenándolos sin que sus componentes queden retenidos. Con ello se aumenta la resistencia del terreno y se reduce su permeabilidad. Según el tipo de producto inyectado el suelo resulta predominantemente consolidado o impermeabilizado. Las mezclas empleadas en inyecciones tanto para impermeabilización como para consolidación pueden ser clasificadas en tres categorías principales.

- a) líquidas                      b) suspensiones inestables                      c) suspensiones estables.

Las líquidas están construídas por productos químicos como por ejemplo: silicato de sosa más o menos diluido mezclado con un reactivo, resinas sintéticas o también productos hidrocarbonados puros.

Las suspensiones inestables son simples suspensiones en el agua de cemento o de piedra molida, no son homogéneas mas que en el caso de que se les agite. Cuando cesa la agitación comienza la sedimentación.

Las suspensiones estables son obtenidas por ejemplo diluyendo arcilla en el agua o una combinación cualquiera de arcilla-cemento y arena. La estabilidad se obtiene tanteando la dosificación, agitación o tratamiento a emplear. Este consiste casi unicamente en introducir en la mezcla una pequeña cantidad de una substancia química denominada ingrediente estabilizador. La estabilidad de estas mezclas es relativa, se considera suficientemente satisfactorio, si no presenta ninguna sedimentación en el transcurso de la inyección es decir durante varias horas, las distintas clases de mezclas pueden ser utilizadas tanto para una impermeabilización como para una consolidación sus posibilidades son casi infinitas.

INYECCION DE TUNELES.

En este tipo de trabajo se requiere ejecuciones de perforaciones radiales localizadas en secciones normales al eje del túnel cuya profundidad es variable. El tratamiento de perforación e inyectado dentro del túnel se efectúa con operaciones que tienen por objeto.

- a) El relleno de todos los vacíos que hayan quedado entre el revestimiento de concreto y la roca (inyectado de empaque).  
b) La consolidación de la roca en la zona circundante a los túneles hasta una profundidad pertinente (inyectado en consolidación).  
c) Empacar los vacíos que se tengan entre el revestimiento metálico y el de concreto cuando el túnel es de conducción a presión (inyectado de relleno).

d) Inyectado de contacto entre el revestimiento metálico y el mortero de empaque cuando se trata como en el punto anterior de conducciones a presión - (inyectado de contacto).

El inyectado de empaque entre el recubrimiento de concreto y la roca se hace a lo largo del túnel con perforaciones radiales que tienen como centro el eje del túnel, el inyectado se hace por etapas entre secciones y se inyectan en una sola progresión.

El tratamiento de consolidación de la roca en la zona circundante el túnel se hace a lo largo de este, consistiendo en perforaciones radiales que son la continuación de las efectuadas para hacer el inyectado de empaque, este inyectado se hace también por etapas en tres secciones y de acuerdo con la profundidad que se debe consolidar el procedimiento será en una sola progresión ascendente utilizando empaques.

Para empaclar el vacío que queda entre el revestimiento de concreto y el revestimiento metálico que por lo general se hace con mortero.

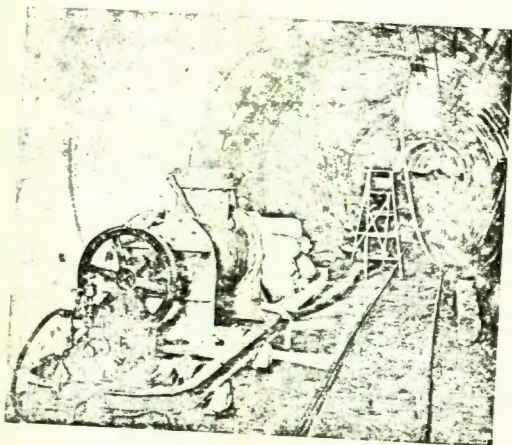
Se utilizan las perforaciones que trae el revestimiento metálico y se inyecta en una sola progresión, debido a deficiencias en el inyectado de relleno y a la contracción que sufre el mortero en su fraguado, el contacto entre el revestimiento metálico y el mortero no es perfecto por lo que hay que reinyectar localizando las zonas defectuosas y colocando boquillas para la colocación del equipo de inyección y para sacar el aire y el agua aprisionados en dicho contacto.

#### PANTALLAS DE IMPERMEABILIZACION.

Estas pantallas se utilizan cuando se presentan problemas de filtraciones en la excavación de una lumbrera o un túnel, etc. Una pantalla puede estar formada por perforaciones profundas inyectadas y estar compuesta de una o varias líneas de pozos. Cuando se trata de una pantalla en rocas, ya sea como fracturas abiertas, fisuras finas en que se requiere la ejecución de perforaciones inyectadas localizadas en uno o varios planos inclinados o -- verticales generalmente se programa la pantalla por el procedimiento de ir perforando e inyectando los barrenos por etapas y progresiones entendiéndose por etapa, el localizar y ejecutar perforaciones adicionales a la mitad entre perforaciones previamente ejecutadas e inyectadas en una etapa anterior y la progresión consiste en perforar, lavar e inyectar un tramo del pozo el cual se determina por las condiciones geológicas de tal manera que hasta -- puede ser toda la profundidad del pozo. En la primera etapa o inicial se -- perforan e inyectan los pozos a una equidistancia en la que se debe tomar en cuenta las características de la roca tratando de que cada perforación rellene el máximo de las grietas, juntas y huecos, aplicando la mayor presión de inyectado permisible sin que se presente comunicación de las mezclas con -- otra perforación adjunta, no inyectada de la misma etapa.

Una vez terminado el tratamiento de la 1ra. etapa ya sea en toda la longitud de la pantalla o en una sección considerable se efectúa la 2a. etapa -- con pozos intermedios a los de la primera con lo cual el tratamiento se reduce en espaciamiento a la mitad tomando en cuenta los consumos de mezclas obtenidos al inyectar la 1a. y 2a. etapa, se programa una 3a. etapa que será --

de pozos intermedios a los de las etapas anteriores, reduciendo la distancia inicial entre pozos a la cuarta parte de una manera semejante se procederá -- con las etapas subsecuentes si el resultado no ha sido satisfactorio. El procedimiento de ir programando las etapas mencionadas anteriormente es aplicable a cada una de las líneas de que se componga la pantalla, cuando esta este formada de ellas.



Máquina utilizada para la inyección.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El túnel se presenta con frecuencia como una solución alternativa de otras a cielo abierto sean a nivel o elevadas, el túnel puede construirse para un transporte relativamente estatico, como tubería de agua, conductores de alta tensión de energía eléctrica, líneas de teléfonos, gasoductos, oleoductos etc. Un primer grado de dificultad se presenta cuando el usuario utiliza ciertos elementos en movimiento dentro del túnel pero sobre estructuras adicionales como cintas transportadoras, ferrocarriles mineros o de mercancía etc. Mayor dificultad representa un usuario que produzca desgaste del propio revestimiento del túnel, tales como aguas potables, aguas negras de poblaciones o industrias etc. Finalmente el túnel puede construirse para el transporte de personas sea en ferrocarril, o sea en automóvil.

Vemos así que los túneles tienen por objeto facilitar los transportes más diversos.

La solución del túnel recomendada debe ser desarrollada dando preferencia a recomendaciones del experto en trazado, del experto en ventilación y del experto en geotecnia y perforación.

La importancia en el trazado es buscar la distancia más corta y crear terraplenes en los accesos para aprovechar la excavación. Para la ventilación es importante buscar un punto favorable para pozo de ventilación para la perforación es imprescindible por una parte no avanzar con la excavación en contrapendiente. La geotecnia es una de las claves del proyecto, la exactitud acerca de la estabilidad mecánica de las rocas a perforar es obligada. La campaña de sondeos y de obtención de testigos debe programarse para que los ensayos de laboratorio puedan facilitar resultados en el momento preciso.



BIBLIOGRAFIA

- Practical Tunnel Driving. RICHARDSON AND MAYO/  
Cimentaciones y Túneles. P. GALABRU.  
Túneles y Obras Subterráneas. EDITORES TECNICOS ASOCIADOS.  
La Ingeniería De Suelos En Las Vías Terrestres. RICO Y DEL CASTILLO  
Topografía Subterránea. ROBERT TATON.  
Labores Mineras. EDITORIAL MIR.  
Geología Aplicada JUAN B. PUIG.  
Inyección De Suelos HENRI CAMBEFORT.  
Tesis.