



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JOSÉ MANUEL RUIZ GALINDO

DIRECTOR DE TESIS

ING. CARLOS M. CHAVARRI MALDONADO



MÉXICO D.F.

2012

¡Vive!

"Ya perdoné errores casi imperdonables.
Trate de sustituir personas insustituibles,
de olvidar personas inolvidables.

Ya hice cosas por impulso.
Ya me decepcioné con algunas personas,
mas también yo decepcioné a alguien.

Ya abracé para proteger.
Ya me reí cuando no podía.
Ya hice amigos eternos.
Ya amé y fui amado pero también fui rechazado.
Ya fui amado y no supe amar.
Ya grité y salté de felicidad.
Ya viví de amor e hice juramentos eternos,
pero también los he roto y muchos.

Ya lloré escuchando música y viendo fotos.
Ya llamé sólo para escuchar una voz.
Ya me enamoré por una sonrisa.
Ya pensé que iba a morir de tanta nostalgia y...

Tuve miedo de perder a alguien especial
y termine perdiéndolo
¡pero sobreviví!
¡Y todavía vivo!
No paso por la vida.
Y tú tampoco deberías sólo pasar...

¡Vive!

Bueno es ir a la lucha con determinación
abrazar la vida y vivir con pasión.
Perder con clase y vencer con osadía,
por que el mundo pertenece a quien se atreve
y la vida es mucho más para ser insignificante."

Charles Chaplin.

*A MIS PADRES
A MI HERMANA
GRACIAS*

“EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN MÉXICO”

I.	ANTECEDENTES DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN MÉXICO.....	1
	I.1 EL PASADO.....	1
	I.2 TÚNELES PARA MINERÍA.....	7
	I.3 PROYECTOS SUBTERRÁNEOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE.....	10
II.	CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS.....	27
	II.1 EN SUELOS BLANDOS.....	28
	II.2 EN SUELOS FIRMES.....	42
III.	PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN EN SUELOS BLANDOS.....	48
	III.1 ESTUDIOS PRELIMINARES.....	48
	III.2 ESCUDOS CON FRENTE ABIERTO.....	54
	III.3 ESCUDOS CON AIRE COMPRIMIDO.....	63
	III.4 ESCUDOS CON FRENTE PRESURIZADO.....	69
	III.5 ESCUDOS CON PRESIÓN BALANCEADA.....	76
	III.6 COLOCACIÓN DE ANILLOS Y PROCEDIMIENTO.....	80
IV.	PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN EN SUELOS DUROS.....	109
	IV.1 ESTUDIOS PRELIMINARES.....	109
	IV.2 MÉTODO DE EXCAVCIÓN CON EXPLOSIVOS.....	114
	IV.3 MÉTODO DE EXCAVACIÓN CON ESCUDO TBM.....	118
	IV.4 MÉTODO AUSTRIACO.....	125
V.	CONCLUSIONES.....	131
VI.	BIBLIOGRAFIA.....	135

I. ANTECEDENTES DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN MÉXICO.

I.1 EL PASADO

Época prehispánica.

“La mar” que vieron los primeros españoles que llegaron al Valle de México era el lago de Texcoco, cuyas aguas eran saladas por el contenido de salitre de su lecho, y el lago de Chalco.

En aquella época, estos lagos formaban parte de una gran planicie rodeada de montañas cubiertas de pinos, encinos, robles y numerosos ríos pequeños. Como los lagos estaban a diferente altura, el agua de Chalco se desbordaba con frecuencia sobre el de Texcoco.

Desde entonces comenzó la lucha de los habitantes del Valle con el agua, ya que aunque no ocurrieran tormentas extraordinarias, bastaba con que durante varios años se presentaran veranos lluviosos para que el nivel de los lagos se elevara peligrosamente, ya que no existían desagües.

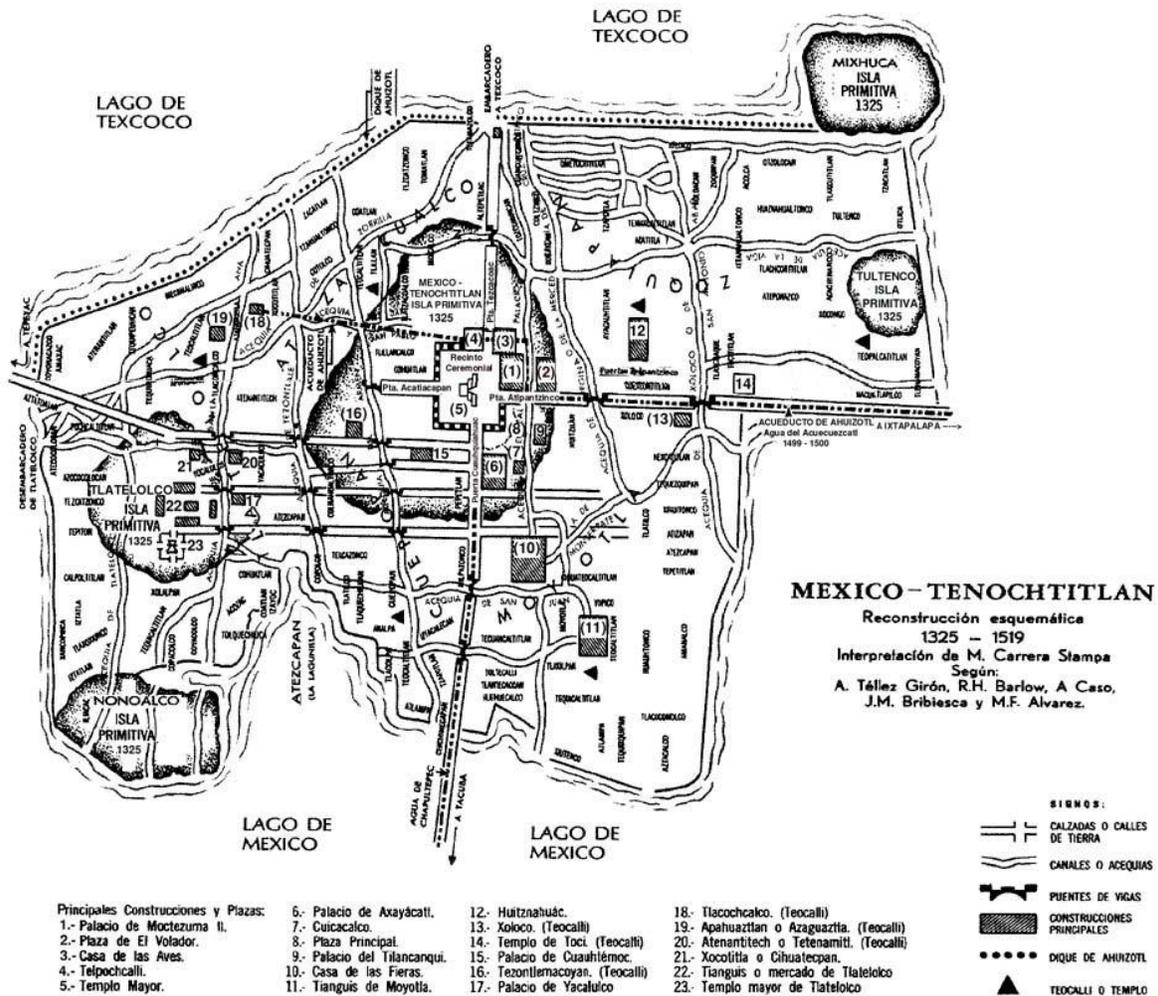
Los primeros asentamientos indígenas se localizaron en los islotes y riberas de los lagos, pero conforme se acentuó el predominio de los Aztecas. Tenochtitlan se extendió hacia las superficies que ganaban al agua. Entonces el aumento de los niveles de los lagos comenzó a ocasionar daños cuantiosos.

Ante este problema se construyeron bordos y diques de contención. En 1450 Netzahualcóyotl, Rey de Texcoco, por encargo del Rey Azteca Moctezuma, diseño y dirigió la construcción de un albarradón (dique) de más de doce kilómetros de longitud y cuatro metros de ancho para proteger a la gran Tenochtitlan del azote de las inundaciones. El dique dividió desde entonces el lago de Texcoco y a la parte occidental se le dio el nombre de laguna de México. Ésta obra también contribuyó a disminuir la salinidad del agua que rodeaba a la ciudad, beneficiando a los cultivos.

Tenochtitlan era una ciudad lacustre cuyos habitantes aceptaban esas circunstancias naturales, por lo que sólo pensaron en contener las aguas, sin crear ningún sistema para desalojarlas del Valle.



Pero todo cambió al iniciarse la conquista. Durante el asedio de la ciudad por Hernán Cortes en 1521, se abrieron varios boquetes en el albaradón de Netzahualcóyotl para permitir el paso de las embarcaciones españolas.



Posteriormente, las lluvias torrenciales alertaron a las autoridades coloniales sobre el grave problema de inundaciones que afectaban la ciudad de México, por lo que en 1555 el Virrey Velasco ordenó la construcción del albaradón de San Lázaro y se hizo un primer proyecto para el desagüe de la ciudad.

Sin embargo, en 1604 y 1607 ocurrieron graves inundaciones, provocadas principalmente por los escurrimientos del río Cuautitlán, que ocasionaron numerosas muertes y cuantiosos daños materiales. Alarmado el Virrey envió una proposición al Cabildo para que se procediera a construir un desagüe de la ciudad.

Enrico Martínez propuso a las autoridades un proyecto consistente en la construcción de un túnel en la zona de Nochistongo, a noroeste del Valle de México. El plan fue aceptado y el 29 de

Noviembre de 1607 el Virrey dio la primera azadonada de esta gran obra, que fue terminada en menos de un año. Así, el Valle dejó de ser una cuenca cerrada para contar con su primer salida artificial de agua. Pero por falta de revestimiento, poco tiempo después ocurrieron derrumbes que inutilizaron con el túnel. Entonces se decidió sustituirlo por un tajo por un tajo o zanja, que pudo ser terminado después de 160 años de trabajo, interrumpido por frecuentes derrumbes, inundaciones y problemas.

Finalmente, a partir de 1789 se dio salida permanente a las aguas de la cuenca de México, para seguridad de sus habitantes.

En 1803 y 1804, Humboldt, luego de inspeccionar las obras hidráulicas llegó a la conclusión de que había que completar el plan de Enrico Martínez para drenar el Valle con un gran canal de desagüe. Pero la lucha de la Independencia retrasó este ambicioso proyecto casi un siglo.

El siglo XIX.

La salida de la cuenca por el tajo de Nochistongo empezó a alterar la ecología del Valle e inició un nuevo proceso: el nivel de los lagos ya no crecía como antes, los diques crearon áreas seguras para que la calidad se extendiera sobre las planicies lacustres y la población se concentró aún más en las orillas de los antiguos lagos. Estas zonas sufrían cuantiosos daños cuando los ríos que atravesaban la ciudad se desbordaban.

Hacia 1856 las inundaciones eran cada vez más alarmantes; en algunas zonas su nivel alcanzaban hasta tres metros de altura. A principio de ese año se abrió un concurso para el proyecto de las obras del desagüe, ofreciéndose un premio de doce mil pesos oro al vencedor. El plan más completo y calificado fue el del ingeniero Francisco de Garay, que comprendía el Gran Canal del Desagüe y el primer Túnel de Tequisquiac. Ambas obras se inauguraron en 1900. Se trataba de un esfuerzo colosal, pero de ninguna manera se había logrado la solución total.

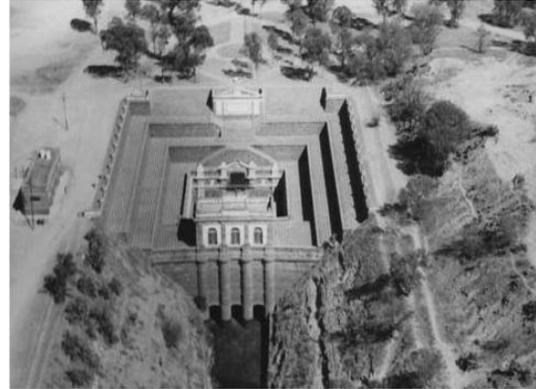
La historia reciente.

En 1930 se terminó la primera red de drenaje por gravedad, consistente en un sistema de tuberías que descargaban al Gran Canal y en el lago de Texcoco.

Pero como consecuencia del crecimiento demográfico y de la expansión urbana este sistema se volvió insuficiente para una población que se había duplicado en diez años y que en 1940 era de casi dos millones de habitantes. En esa época hubo varias inundaciones graves en las partes bajas de la ciudad, ya que además otro problema se había añadido: el hundimiento cada vez más acelerado del suelo, ocasionado por la sobre explotación de los recursos acuíferos, que deterioró el sistema u disminuyó su capacidad para desalojar las aguas del Valle, lo que motivó la ampliación del Gran Canal y la construcción del segundo Túnel de Tequisquiac.



Caja colectora del Túnel de Tequiquiac, se observa parte de la entrada a la boca del túnel. Tequiquiac, Estado de México, 1973.
 Archivo Histórico del Agua, Colección Fotográfica, expediente 13311



Vista general de la caja colectora del Túnel de Tequiquiac, se observa el cuarto de máquinas, las compuertas y parte del Gran Canal. A la izquierda se encuentra la antigua estación del tren. Tequiquiac, Estado de México, 1973.
 Archivo Histórico del Agua, Colección Fotográfica, expediente 4442



51-5-8.R.H.-OBRAS DBL V DE MEXICO-TUNEL NUEVO DE TEQUIQUIAC
 ADENE ZONA AGRIETADA CRUCERO AGUAS ARRIBA, ENERO 12 DE 1951
 Fot. A. Ameneyro

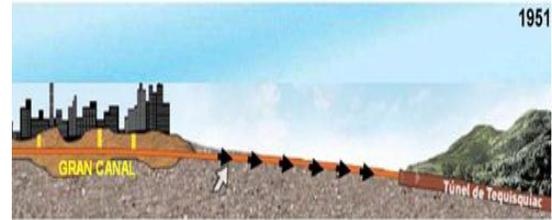


Partal de entrada de uno de los túneles que componen el Interceptor del Pañete, aún en construcción. Tequesquahuac, Estado de México, 1951
 Archivo Histórico del Agua, Colección Fotográfica, expediente 8181

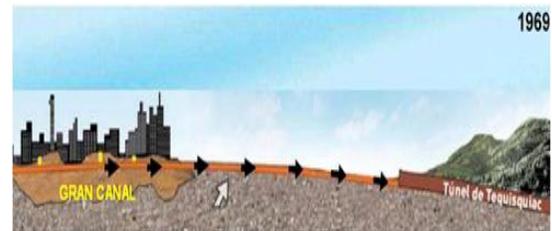
El hundimiento de la ciudad.

Desde principios de siglo hasta 1936 los hundimientos de la ciudad de México se mantuvieron en el orden de cinco centímetros por año. Al aumentar la demanda de agua, se inició la perforación de pozos profundos, y entre 1938 y 1948, el hundimiento en el centro del Distrito Federal se incrementó a 18 cm/año, para llegar después a 30 y 50 cm anuales. Como consecuencia, el drenaje proyectado para trabajar por gravedad requirió de bombeo para elevar las aguas hasta el nivel del Gran Canal, con un gran incremento en los costos de operación y mantenimiento. En 1960 se construyeron el Interceptor y el Emisor del Poniente, con objeto de recibir y desalojar las aguas del oeste de la cuenca, descargándolas a través del tajo de Nochistongo.

No obstante, el desmesurado crecimiento de la ciudad volvió insuficientes las capacidades de drenaje del Gran Canal y del Emisor del Poniente en 1970; ya el hundimiento había tal que el nivel del Lago de Texcoco, que en 1910 se hallaba 1.90 metros por debajo del centro de la ciudad, se encontraba 5.50 metros más arriba. Se requería de un sistema de drenaje que no fuera afectado por los asentamientos del terreno, que no necesitara bombeo y que expulsara las aguas por una cuarta salida artificial: era necesario construir el Sistema de Drenaje Profundo de la ciudad de México.



Pendiente de 12 cm por Km



Pendiente de 10 cm por Km



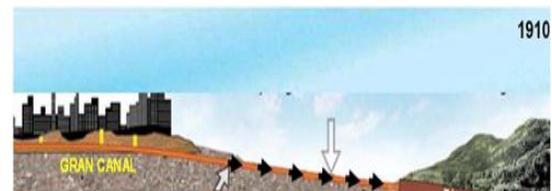
Necesidad de equipo de bombeo

Su capacidad de desalojo se redujo a solo 15 de los 80m³/s



Km 18 + 500
Planta de bombeo Gran Canal
Planta de bombeo Canal de Sales
P.B. 11+600

Contrapendiente



Su capacidad de desalojo se redujo a solo 15 de los 80 m³/s

EN EL MUNDO

Se dice que los túneles son pasajes subterráneos construidos para comunicar directamente dos puntos, pasando por debajo de obstáculos tales como una ciudad, una montaña, un río, el propio mar, etc.

En general una obra subterránea es un espacio ganado al subsuelo mediante la excavación y remoción sistemática de la roca o suelos encontrados, para alojar alguna instalación de uso civil o militar.

La historia del tuneleo y de las obras subterráneas parece remontarse hasta los tiempos prehistóricos, cuando los hombres primitivos hacían excavaciones para protegerse del clima y de sus enemigos.

El túnel más antiguo de que se tenga noticia, parece haber sido construido por la reina Semiramis bajo el río Éufrates en Babilonia, hace 4000 años, el cual tenía una longitud de casi 1 km y sección transversal rectangular de 3.6 x 4.5 m. era un túnel que servía de comunicación entre el palacio real y el templo de Jová. Probablemente fue construido como túnel falso, formándose sus paredes con ladrillos unidos con mortero y cubriéndolas con un arco abovedado.

En el año 700 AC, Hezekiah excavó los 528 m del túnel Shilao, atacando simultáneamente sus dos frentes.

En el año 600 AC, se excavó un túnel de 1.6 km de longitud y 2.5 m de diámetro, para conducir agua desde el manantial a la ciudad griega de Samos; Herodoto menciona que el constructor fue Eupalinos de Megara, quien años después construiría en Atenas un sistema para su abastecimiento de agua potable, mediante tubos de arcilla (Hammond 1963).

En las civilizaciones antiguas, los túneles fueron la solución mas frecuente para la conducción práctica del agua, a fin de evitar los obstáculos topográficos que se oponían a la conducción por gravedad del agua. Los Romanos construían túneles para sus caminos ubicados en terrenos montañosos, como es el caso del famoso túnel de la Vía Flaminia construido por el Emperador Vespasiano y del túnel Pausilippo entre Nápoles y Pozzouli, construido por Cocceius en el año 36 AC, el cual parece haber sido el mas grande de su época, con 7.6 m de ancho, 9.2 , de altura y 1.5 km de longitud (Beaver 1973).

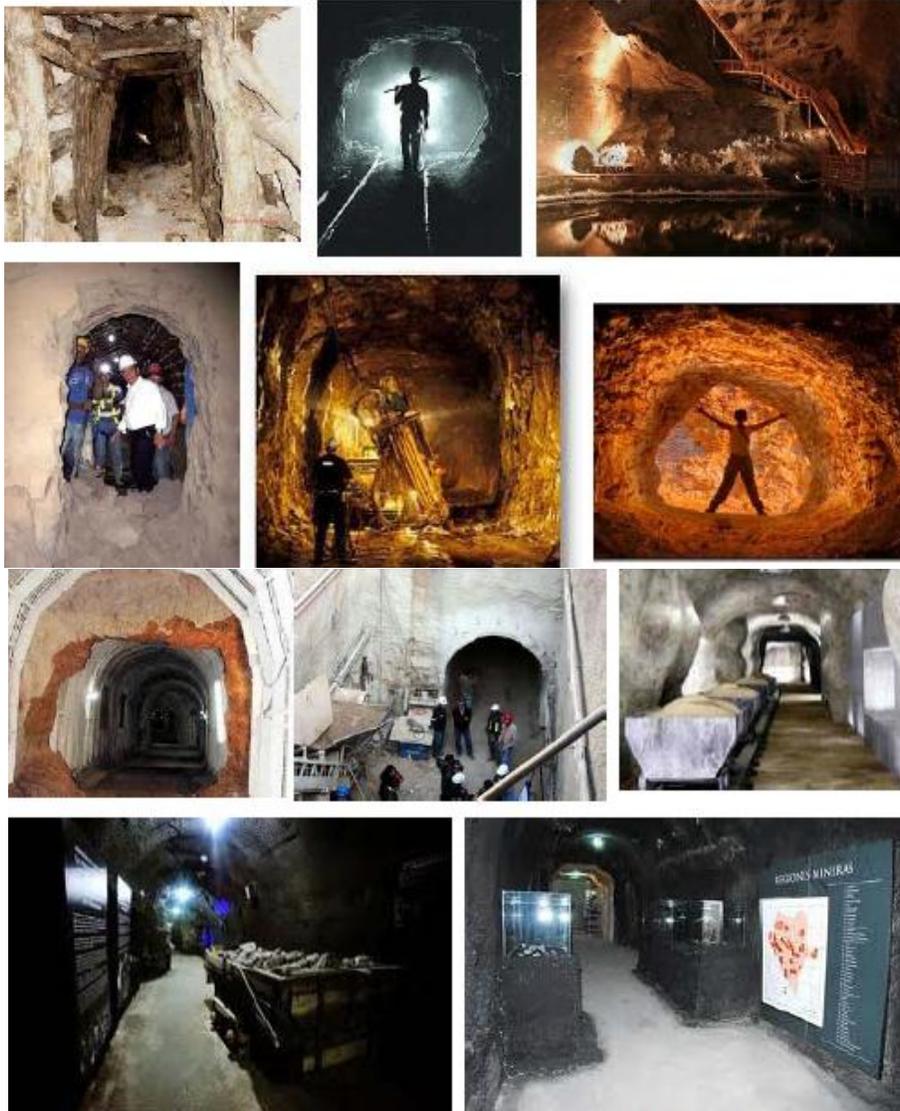
Los túneles construidos por las civilizaciones antiguas, tuvieron principalmente un propósito económico aunque no son pocos los ejemplos de uso religioso y militar. Las tumbas de la civilización Egipcia fueron excavadas en roca y comunicadas con la superficie mediante túneles. Las ciudades amuralladas fueron asaltadas mediante la construcción de túneles bajo sus muros, por lo cuales se enviaron las tropas para tomar desprevenidos a los defensores, como ocurrió en Jericó, destruyendo a su vez los muros mediante la ampliación de los túneles subyacentes y la destrucción posterior de sus ademes de madera (Sandsfrom, 1963).

Otro ejemplo del uso de túneles en el pasado, son los acueductos denominados “ganats” aun en uso en Irán. Algunos de los cuales tienen casi 3000 años de antigüedad y han sido excavados manualmente a profundidades de 4 a 275 m (Wulff, 1968)

I.2 TÚNELES PARA MINERÍA

México es uno de los países de Latinoamérica que se encuentra localizado en una región volcánica rica en minerales. La tradición minera se remonta a la época prehispánica, como lo muestra la explotación de yacimientos ubicados principalmente en las zonas de Taxco, Pachuca, Guanajuato y la sierra Gorda, en Querétaro, donde se encontraron vestigios de bocaminas.

A nivel mundial, el auge de la minería mexicana se tradujo en un importante flujo de metales preciosos, especialmente plata.



El oro que a raíz de la Conquista cayó en manos de los españoles provenía de placeres auríferos y no de minas propiamente dichas. El mismo Cortés recibió como obsequio de Moctezuma Xocoyotzin una porción de oro nativo con valor de 162000 pesos, de los cuales tenía que entregar una quinta parte a la Corona de España, según la información que proporcionó el barón de

Humboldt, aunque de acuerdo con los datos de Bernal Díaz del Castillo, la cantidad fue sensiblemente mayor.

Es probable que además del oro, los indígenas antiguos, particularmente los toltecas, conocieron también la plata a la que llamaban iztac-teoquitlatl, mientras que el oro le aplicaban el nombre de coztic-teoquitlatl. Con el uso de estos términos, que para el europeo resultaban algo extraños (significaban excremento de los dioses, amarillo y blanco respectivamente), quedó demostrado que los nativos conocían tales metales únicamente en estado puro. La plata existía en muy pocas cantidades y quizá la palabra iztac-teoquitlatl se originó hasta después de conocer en la Nueva España la plata española.

Los mismos indígenas conocían la mica: mezquitlatl o excremento de la luna y el cobre: tepuchitl o hinchazón de la piedra (en lengua azteca), metal que usaban en la fabricación de sus armas, vasijas, herramientas de labranza, objetos de adorno e idolillos. Tenían especial habilidad en endurecer el metal rojo (amartillándolo) para fines especiales y es indudable que les era conocido el procedimiento de fundición y hasta el de liga con el estaño.

El mismo Alejandro Humboldt menciona en sus escritos:

“La explotación de minas fue totalmente desconocida por los aztecas; y si acaso emprendieron algunos trabajos en las vetas, éstos fueron de muy poca profundidad e insignificantes”.

Se limitaban pues, a obtener oro y la plata de los placeres de ríos y arroyos, o en forma nativa en los crestones o afloramientos de las vetas.

Con la repentina llegada de los españoles, la cultura de los indígenas mexicanos experimentó un profundo cambio. Los conquistadores, amaestrado en su patria para los trabajos de la minería, establecieron nuevos lugares de explotación de minerales. A medida que progresaban en la conquista y en la exploración de nuevos territorios, seguían descubriendo nuevas y ricas vetas, las cuales daban origen al fomento y desarrollo de florecientes empresas mineras.

En todas partes el territorio conquistado fue explorado, se descubrieron yacimientos minerales más o menos importantes, lo que el barón de Humboldt aprovechó para aprender más a cerca del pasado histórico de estas minas, para lo cual no dejó de tomar debida nota de ello, por lo que gracias a la inquietud de este hombre de ciencia, se pudo recopilar datos importantes con relación a una serie de antiguos distritos mineros localizados dentro del territorio nacional.

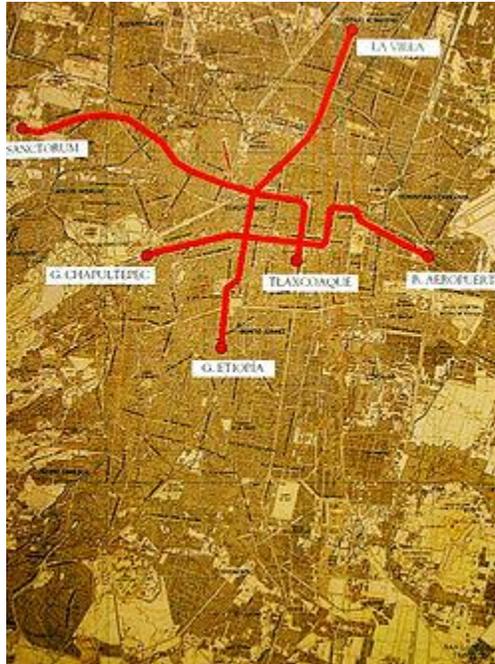
A continuación se presentan los datos de Humboldt, junto con aportaciones y suplementos que han llegado hasta nuestra época.

Breve desarrollo cronológico de la minería en México.

Año

- 800 La orfebrería florece durante el periodo clásico en Monte Albán, Oaxaca, posiblemente con oro de placer de Tepeucila.
- 1000 Minado precolombino de mercurio en Soyatal, Qro., probablemente para usarlo como pigmento.
- 1500 Posible minado precolombino de plata en las regiones de Taxco, Real del Monte, Zimapán, Tlalpujahua y Sultepec.
- 1519 Establecimiento de la primera fundición de fierro en la Villa Rica de la Veracruz, por Hernán Martín para la fabricación de armas del conquistador Hernán Cortés.
- 1521 Año inicial de la minería en México, en el cual, Hernán Cortés abre las minas de Taxco, Gro., con el socavón del Rey. Ésta es la primera mina en México y en Américas, operada por europeos.
- 1558 Empiezan los trabajos los trabajos subterráneos de la mina de Mellado, en Guanajuato.
- 1632 Comienza la explotación de las vetas argentíferas de la mina Nevada en Batopilas, Chihuahua.
- 1700-1730 Nuevo auge en Zacatecas y Guanajuato. Se abren nuevas minas: La Asturiana, Nueva Granada, San Pascual, Cabrestante y Tecolotes en el distrito y Veta Grande; Refugio, Rayas, Rondanera, Peregrina, San Clemente y Guadalupe en el distrito de San Bernabé. Estas minas fueron explotadas por Gregorio Zumialde, Juan de Dios de la Campa e Ignacio Arrieta.
- 1749 Don Pedro Romero de Terrenos, antiguo comerciante de Santander, España, descubre los ricos filones de Real del Monte, en es estado de Hidalgo, asociado con José Bustamante, empiezan a trabajar las minas.
- 1783 Fundación del Real Seminario de Minería (Escuela de Minas) en la Ciudad de México. Joaquín Velázquez de León es su primer director.
- 1797 Se inician los trabajos de construcción del Palacio de Minería, donde se reubicará el Real Seminario de Minería. El proyecto se le encarga al arquitecto Manuel Tolsá.
- 1811 El Real Seminario de Minería es transferido al Palacio de Minería, a pesar de que el edificio no está totalmente terminado.
- 1813 Se termina de construir el Palacio de Minería.

extensión total de la red es de 201.388 kilómetros y posee un total de 175 estaciones de las cuales: 112 son de paso, 41 de transbordo y 22 terminales (11 de las terminales son de transbordo). El metro está construido de forma subterránea, superficial y viaducto elevado: 106 estaciones son subterráneas, 53 superficiales y 16 en viaducto elevado. 164 estaciones se encuentran en la Ciudad de México y 11 en el Estado de México.



Propuesta de la etapa 1 del metro elaborada en 1967

Las grandes ciudades se caracterizan por conflictos viales debidos a la elevada demanda de transporte e intensa actividad económica. El Distrito Federal inició el siglo XX con aproximadamente 540 mil habitantes y 800 vehículos para satisfacer su demanda de transporte. Para 1953 la población se había incrementado a 3.5 millones y en 1960 la cifra superaba los 4.5 millones. Para 1964 había una fuerte tendencia hacia los 5 millones de habitantes en contraste con las 7 200 unidades de transporte público que circulaban por la capital (casi un 40% de los viajes totales se hacían en el centro de la ciudad).

Existen antecedentes poco documentados sobre las propuestas de trenes metropolitanos en la Ciudad de México: estudiantes de la Universidad Nacional Autónoma de México, en 1958, presentaron el proyecto de un monorraíl para la Ciudad de México como tema de tesis; en 1960 Vicente S. Pedrero y Ramón C. Aguado presentaron al Departamento del Distrito Federal estudios de factibilidad para la construcción de un monorraíl; y en 1965 José María Fernández desarrolló un proyecto para la construcción de un sistema de transporte elevado y subterráneo.

El ingeniero Bernardo Quintana Arriola (1919-1984), fundador de la empresa mexicana Ingenieros Civiles y Asociados, SA de CV, hoy Empresas ICA, elaboró estudios que permitieron la creación de un anteproyecto, y posteriormente un proyecto, para la construcción de un sistema de transporte masivo en la Ciudad de México. La propuesta del proyecto se presentó en 1958 a Ernesto P. Uruchurtu, Regente de la Ciudad de México de 1952 a 1966, quien la rechazó al considerarla económicamente costosa. Además, el 28 de julio de 1957, un sismo de 7.7 grados en la

I.3 PROYECTOS SUBTERRÁNEOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE.

Desarrollo de la obra metro.

La ciudad de México es una urbe de casi 1250 Km² de superficie en la que vive una población superior a los 20 millones de habitantes, y es probablemente una de las concentraciones demográficas más grandes del mundo con graves problemas de vivienda, de equipamiento y de servicios, entre éstos, la transportación urbana. A partir de 1940 el crecimiento de la ciudad adquirió proporciones significativas en todos los órdenes: la población llegó a 3.1 millones en 1950; a 5.36 millones en 1960; a 9 millones en 1970; y a 14.9 millones de personas en 1980. La mancha urbana alcanzó los 242 Km² en 1950 y creció a 390, a 650 y a 988 Km² en los años 1960, 1970 y 1980, respectivamente. Por otro lado, la evolución del transporte se realizó de manera importante, en particular a partir de la posguerra de acuerdo a los índices que se presentan a continuación.

Evolución del transporte.

(Autobuses, automóviles de alquiler y automóviles particulares)

Año No. de unidades

(Estimado)

1945	51517
1950	63466
1960	74000
1970	248000
1980	718000
1986	2596500

La distribución de vehículos automotores que circulaban hasta 1986 es 6 500, autobuses de Ruta 100, 90 mil automóviles de alquiler y aproximadamente 2.5 millones de vehículos particulares.

El Metro de la Ciudad de México es un sistema de transporte público tipo tren pesado que sirve a extensas áreas del Distrito Federal y parte del Estado. Su operación y explotación está a cargo del organismo público descentralizado denominado Sistema de Transporte Colectivo (STC), y su construcción esta a cargo del Proyecto Metro del Distrito Federal, un organismo desconcentrado perteneciente a la Secretaría de Obras y Servicios del Distrito Federal. Se conoce coloquialmente como Metro, por la contracción del término tren metropolitano.

En el 2006 ocupó el tercer lugar a nivel mundial en captación de usuarios, al transportar a un promedio de 3.9 millones de pasajeros al día (en ocasiones superado por los metros de Nueva York, Moscú y Tokio). También en ese año obtuvo el quinto lugar a nivel mundial por la extensión de su red.

El Metro de la Ciudad de México cuenta con 11 líneas. Cada línea tiene asignado un número y un color distintivo (números del 1 al 9 y las letras A, B). El parque vehicular está formado por trenes de rodadura neumática, a excepción de la línea A, que emplea trenes de rodadura férrea. La

escala Richter dañó diversos edificios del centro de la ciudad, hecho que provocó la desconfianza entre las autoridades para construir proyectos de grandes dimensiones como el presentado por Quintana.

Quintana presentó nuevamente su proyecto de transporte en el sexenio de Gustavo Díaz Ordaz, Presidente de México de 1964 a 1970. De nueva cuenta el obstáculo resultó el costo elevado de la obra. Gustavo Díaz Ordaz decidió aprovechar el acercamiento del presidente francés Charles de Gaulle hacia Latinoamérica. Alex Berger, empresario francés, entonces esposo de la actriz María Félix, amigo de Quintana, fungió como mediador entre los gobiernos francés y mexicano para la obtención del crédito. Como resultado de la negociación el gobierno mexicano cubrió el costo de la obra civil, estudios de geotecnia, diseño de estaciones, entre otros, y el gobierno francés la obra electromecánica. La obra tuvo un costo total de MXP\$ 2 530 millones, de los cuales, MXP\$ 1 630 millones provinieron del crédito francés y MXP\$ 900 millones por parte del Departamento del Distrito Federal.

El 29 de abril de 1967 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el decreto presidencial que crea el Sistema de Transporte Colectivo, organismo público descentralizado, para construir, operar y explotar un tren rápido subterráneo como parte del transporte público del Distrito Federal.

En el cruce de Av. Chapultepec con la calle Bucareli, el 19 de junio de 1967, se realizó la ceremonia de inicio de obra para construir la línea 1 del Sistema de Transporte Colectivo.

El 4 de septiembre de 1969 Gustavo Díaz Ordaz y Alfonso Corona del Rosal, Regente del Distrito Federal de 1966 a 1970, inauguraron formalmente el servicio entre las estaciones Chapultepec y Zaragoza. Un tren construido por la compañía francesa Alsthom, modelo MP-68, decorado con franjas tricolores y el escudo nacional mexicano a sus costados, realizó el recorrido inaugural entre las estaciones Insurgentes y Zaragoza. Plan Maestro del Metro.



Plan Maestro del Metro elaborado en 1985 por COVITUR

Es un instrumento utilizado para determinar metas de movilidad a cubrir por el Sistema de Transporte Colectivo en diferentes horizontes a futuro. Estas metas representan las ampliaciones óptimas del servicio de acuerdo a políticas de desarrollo urbano y posibilidades de ejecución.

Bernardo Quintana Arrijoja funda y preside, en 1977, el consejo de administración de Constructora Metro, SA de CV, el cual, en colaboración con el Departamento crean el Plan Maestro del Metro ese mismo año. El proyecto consideraba la construcción de 5 líneas nuevas y la ampliación de las 3 líneas construidas hasta ese año (líneas 1, 2 y 3). En total, se construirían 15 líneas con una longitud total de vía de 315 kilómetros.

En 1985 la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal presentó a través de la Comisión Vialidad de Transporte Urbano el Programa Maestro del Metro versión 1985 horizonte 2010. En este programa se estableció una longitud total del sistema de 306,285 kilómetros que incluía: 15 líneas principales de rodadura neumática; 8 líneas alimentadoras con características de tren suburbano de rodadura férrea y una línea de tren ligero. La línea B es la última ruta construida basándose en el plan de 1985; su trazo representa la unificación de los trazos de las líneas 10 y B presentadas en ese plan.

La Comisión de Vialidad y Transporte Urbano transfirió a la Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal la coordinación del Plan Maestro del Metro y Trenes Ligeros el 1 de enero de 1995. El 1 de septiembre de 1995 ésta coordinación fue transferida al Sistema de Transporte Colectivo.

Como parte del Programa Integral del Transporte y Vialidad 1995-2000 del Distrito Federal, en agosto de 1996, se dio a conocer el Plan Maestro del Metro y Trenes Ligeros versión 1996. Esta versión incluyó tres horizontes de expansión del sistema para los años 2003, 2009 y 2020, además, propuso una red de 483 kilómetros compuesta por 14 líneas de rodadura neumática, 3 de rodadura férrea y 10 líneas de tren ligero.

Etapas de construcción

El Sistema de Transporte Colectivo divide en etapas su proceso de construcción. Cada etapa está constituida por la construcción de nuevas líneas, ampliaciones e inauguraciones. Hasta el año 2000 se tienen cuantificadas 6 etapas constructivas en los siguientes intervalos: 1967-1972, 1977-1982, 1983-1985, 1985-1987, 1988-1994 y 1994-2000.

Línea 1 del Metro de la Ciudad de México



Estación terminal Observatorio de la línea 1

Primera línea en construirse e inaugurarse. Está integrada por 20 estaciones y su color distintivo es el rosa. Se localiza al centro de la Ciudad de México con dirección oriente-poniente. Tiene una

longitud total de vía de 18.828 kilómetros, de los cuales 16.654 kilómetros son utilizados para servicio de pasajeros y el restante para maniobras.

El primer tramo de 16 estaciones y 12.660 kilómetros de longitud, Zaragoza-Chapultepec, fue inaugurado el 4 de septiembre de 1969 por Gustavo Díaz Ordaz, Presidente de México de 1964 a 1970 y por Alfonso Corona del Rosal, Regente del Distrito Federal de 1966 a 1970. En 1970 se inauguran dos tramos más del sistema: el 11 de abril de 1970 (con 1.046 kilómetros) el tramo Chapultepec-Juanacatlán y el 20 de noviembre el tramo Juanacatlán-Tacubaya. Dos años después, en 1972, se suman 1.705 kilómetros a la línea con el tramo Tacubaya-Observatorio. Finalmente el 22 de agosto de 1984 se construye el tramo Zaragoza-Pantitlán (de 2.277 kilómetros).

Tiene correspondencia con otras líneas del sistema: líneas 7 y 9 en Tacubaya; línea 3 en Balderas; línea 8 en Salto del Agua; línea 2 en Suárez; línea en Candelaria; línea B en San Lázaro y líneas 5, 9 y A en Pantitlán. A diferencia de los demás transbordos del sistema, si se desea transbordar a la línea A desde las líneas 1, 5 ó 9, o viceversa, se debe comprar un boleto más o cubrir el costo equivalente con la tarjeta recargable del Sistema de Transporte Colectivo.

El tipo de construcción es subterránea a excepción de la estación Observatorio que es superficial. Está construida bajo las siguientes avenidas: Camino a Belén, Arq. C. Lazo, Av. Jalisco, Gral. Pedro Antonio de los Santos, Avenida Chapultepec, Arcos de Belén, José María Izazaga, San Pablo, Carretones, Esteban Martín, Juan Pablo II, Gral. Emiliano Zapata, Av. Ing. Eduardo Molina, Calz. Ignacio Zaragoza y Río Churubusco.

Estaciones: Observatorio, Tacubaya, Juanacatlán, Chapultepec, Sevilla, Insurgentes, Cuauhtémoc, Balderas, Salto del Agua, Isabel la Católica, Pino Suárez, Merced, Candelaria, Lázaro, Moctezuma, Balbuena, Blvd. Puerto Aéreo, Gómez Farías, Zaragoza y Pantitlán.

Línea 2

Línea 2 del Metro de la Ciudad de México



Interior de un tren modelo NM-02 en su recorrido por la línea 2

Segunda línea del sistema en inaugurarse. Está integrada por 24 estaciones y su color distintivo es el azul. Está construida al centro de la Ciudad con dirección sur-norte de Tasqueña a Zócalo y dirección oriente-poniente de Allende a Cuatro Caminos. Tiene una longitud total de vía de 23.432 kilómetros, de los cuales 20.713 son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante para maniobras o mantenimiento.

La línea en su tramo Zócalo-Tasqueña fue construida en el derecho de vía del antiguo tranvía, que corría del Zócalo de la Ciudad de México hacia el Centro, al sur de la ciudad. El primer tramo de 11

estaciones y 11.321 kilómetros de longitud, Tasqueña-Pino Suárez, fue inaugurado el 1 de agosto de 1970 por Gustavo Díaz Ordaz, Presidente de México de 1964 a 1970 y por Alfonso Corona del Rosal, Regente del Distrito Federal de 1966 a 1970. Un mes después, el 14 de septiembre de 1970, se inauguraron 11 estaciones más en el tramo Pino Suárez-Tacuba (de 8.101 kilómetros de longitud). El 22 de agosto de 1984 se inauguró el tramo final de Tacuba a Cuatro Caminos, con 2 estaciones y 4.009 kilómetros de longitud.

Tiene correspondencia con otras líneas del sistema: línea 7 en Tacuba; línea 3 en Hidalgo; línea 8 en Bellas Artes; línea 1 en Pino Suárez y líneas 8 y 9 en Chabacano.

El 20 de octubre de 1975 ocurrió un choque de trenes en la estación Viaducto: un tren que se encontraba estacionado fue alcanzado por otro en movimiento. El fuerte impacto ocasionó 27 muertos y varios heridos. En consecuencia el Sistema de Transporte Colectivo implementó un sistema de piloto automático; puestos de mando central; y semáforos para controlar la velocidad y posición de los trenes en todo el sistema. Además, se incluyó en cada tren una caja negra para registrar cualquier incidente.

La construcción de la línea es superficial de Tasqueña a San Antonio Abad y subterránea de Pino Suárez a Cuatro Caminos. Está construida en las avenidas: Calz. San Bartolo Naucalpan, Calzada México-Tacuba, Ribera de San Cosme, Puente de Alvarado, Av. Hidalgo, Tacuba, República de Guatemala, Seminario, Calz. Pino Suárez, San Antonio Abad, Calz. de Tlalpan y Puerto Rico.

Estaciones: Cuatro Caminos, Panteones, Tacuba, Cuitláhuac, Popotla, Colegio Militar, Normal, San Cosme, Revolución, Hidalgo, Bellas Artes, Allende, Zócalo, Pino Suárez, San Antonio Abad, Chabacano, Viaducto, Xola, Villa de Cortés, Nativitas, Portales, Ermita, General Anaya y Tasqueña.

Línea 3

Línea 3 del Metro de la Ciudad de México



Señalamiento usual para indicar la existencia de una estación

Tercera línea del sistema en inaugurarse. Pose 21 estaciones y su color distintivo es el verde olivo. Se localiza al centro de la Ciudad de México con dirección norte-sur. Su longitud total de vía es de

23.609 kilómetros, de los cuales 21.278 kilómetros se utilizan para para transporte de pasajeros y el restante para maniobras o mantenimiento.

El primer tramo de 5.441 kilómetros de longitud y 7 estaciones, Tlatelolco-Hospital General, fue inaugurado el 20 de noviembre de 1970 por Gustavo Díaz Ordaz, Presidente de México de 1964 a 1970 y por Alfonso Corona del Rosal, Regente del Distrito Federal de 1966 a 1970. Entre 1978 y 1980, durante la presidencia de José López Portillo y Pacheco y la regencia de Carlos Hank González, la línea tuvo 4 expansiones: Tlatelolco-La Raza (25 de agosto de 1978) con 1.389 kilómetros y 1 estación; La Raza-Indios Verdes (1 de diciembre de 1979) con 4.901 kilómetros y 3 estaciones; Hospital General-Centro Médico (7 de junio de 1980) con 0.823 kilómetros y 1 estación y Centro Médico-Zapata (25 de agosto de 1980) con 4.504 kilómetros y 4 estaciones. Finalmente, el 30 de agosto de 1983, Miguel de la Madrid Hurtado, Presidente de México de 1982 a 1988, inaugura el tramo Zapata-Universidad de 6.551 kilómetros con 5 estaciones.

Tiene correspondencia con las siguientes líneas: línea 6 en Deportivo 18 de marzo; línea 5 en La Raza; línea B en Guerrero; línea 2 en Hidalgo; línea 1 en Balderas y línea 9 en Centro Médico.

El tipo de construcción de la línea es superficial en el tramo Indios Verdes-Potrero y la estación Universidad. El resto de la línea es subterránea. Está construida en el trazo de las avenidas: Avenida de los Insurgentes Norte, Calz. Vallejo, Zoltán Kodály, Zarco, Balderas, Niños Héroes, Dr. Pasteur, Av. Cuauhtémoc, Av. Universidad, Av. Copilco, Pedro Henríquez Ureña y Av. Antonio Delfín Madrigal.

Estaciones: Indios Verdes, Deportivo 18 de marzo, Potrero, La Raza, Tlatelolco, Guerrero, Hidalgo, Juárez, Balderas, Niños Héroes, General, Centro, Etiopía-Plaza de la Transparencia, Eugenia, División del Norte, Zapata, Coyoacán, Viveros-Derechos humanos, Miguel Ángel de Quevedo, Copilco y Universidad.

Línea 4

Línea 4 del Metro de la Ciudad de México



Estación Fray Servando

Cuarta línea del sistema en inaugurarse. La integran 10 estaciones y su identidad gráfica utiliza el color cian. Su trazo recorre el centro de la Ciudad con dirección norte-sur. Posee una longitud total

de vía de 10.747 kilómetros de los cuales 9.363 kilómetros se emplean para el servicio de pasajeros, el restante se emplea para maniobras.

Fue inaugurada en dos tramos por José López Portillo y Pacheco, Presidente de México de 1976 a 1982: Martín Carrera-Candelaria el 29 de agosto de 1981 (7.499 kilómetros y 7 estaciones) y Candelaria-Santa Anita el 26 de mayo de 1982 (3.248 kilómetros y 3 estaciones).

Tiene correspondencias con las siguientes líneas: línea 6 en Martín Carrera; línea 5 en Consulado; línea B en Morelos; línea 1 en Candelaria; línea 9 en Jamaica y línea 8 en Santa Anita.

De acuerdo a estadísticas del Sistema de Transporte Colectivo es considerada una línea de baja afluencia de pasajeros, por ese motivo se emplean trenes de 6 carros.

Fue la primera línea en emplear la solución de viaducto elevado. Únicamente las estaciones Martín Carrera y Candelaria son de tipo superficial. Está construida sobre las avenidas: Ferrocarril Hidalgo y Av. Congreso de la Unión.

Estaciones: Martín Carrera, Talismán, Bondojito, Consulado, Canal del Norte, Morelos, Candelaria, Fray Servando, Jamaica y Santa Anita.

Línea 5 del Metro de la Ciudad de México

Quinta línea en inaugurarse. Está integrada por 13 estaciones y su color distintivo es el amarillo. Su trazo recorre el oriente y norponiente de la Ciudad de México. Tiene una longitud total de vía de 15.675 kilómetros, de los cuales 14.435 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

El primer tramo inaugurado fue Pantitlán-Consulado, el 19 de diciembre de 1981; tenía una longitud de 9.154 kilómetros y 7 estaciones. Fue inaugurado durante el sexenio presidencial (1976 a 1982) de José López Portillo y Pacheco. Las obras de ampliación continuaron hacia el norponiente de la Ciudad de México y siete meses después, el 1 de julio de 1982, se inauguró el tramo entre las estaciones La Raza y Consulado acumulando así 12.242 kilómetros de vía y 10 estaciones. Finalmente, el 30 de agosto de 1982 se inauguró el tramo, con una longitud de 3.433 kilómetros, La Raza-Politécnico.

Tiene correspondencia con otras líneas en: línea 6 en Instituto del Petróleo; línea 3 en La Raza; línea 4 en Consulado; línea B en Oceanía y con las líneas 1, 9 y A en Pantitlán. A diferencia de los demás transbordos en el sistema, si se desea transbordar a la línea A desde las líneas 1, 5 ó 9, o viceversa, se debe comprar un boleto más o cubrir el costo equivalente con la tarjeta recargable del Sistema de Transporte Colectivo.

El tipo de construcción es superficial entre las estaciones Politécnico a La Raza, Consulado a Oceanía y la estación Pantitlán; es subterránea de Misterios a Valle Gómez y Terminal Aérea a Hangares. La línea está construida en las avenidas: Eje Central Lázaro Cárdenas, Av. 100 Metros, Paganini, Av. Río Consulado, Blvr. Puerto Aéreo, Fuerza Aérea Mexicana, Manuel Lebrija y Talleres Gráficos.

Estaciones: Politécnico, Instituto del Petróleo, Autobuses del Norte, La Raza, Misterios, Valle Gómez, Consulado, Eduardo Molina, Aragón, Oceanía, Terminal Aérea, Hangares y Pantitlán.²⁷

Línea 6 del Metro de la Ciudad de México

Sexta línea en ser construida. La integran 11 estaciones y su color distintivo es el rojo. Está ubicada al norte de la Ciudad de México con dirección oriente-poniente. Su longitud total de vía es de 13.947 kilómetros, de los cuales 11.434 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

El tramo El Rosario-Instituto del Petróleo, de 9.264 kilómetros y 7 estaciones, fue inaugurado el 21 de diciembre de 1983 por Miguel de la Madrid Hurtado, Presidente de México de 1982 a 1988. Finalmente, el 8 de julio de 1986 se inauguran 4.683 kilómetros y 4 estaciones más (de Instituto del Petróleo a Martín Carrera) hacia el oriente de la ciudad.

Tiene correspondencia con otras líneas: línea 7 en El Rosario; línea 5 en Instituto del Petróleo; línea 3 en Deportivo 18 de marzo y línea 4 en Martín Carrera.

De acuerdo a estadísticas del Sistema de Transporte Colectivo es considerada una línea de baja afluencia de pasajeros, por ese motivo se emplean trenes de 6 carros.

El tipo de construcción es superficial para la estación El Rosario; es subterránea el resto de la línea. Está construida en las avenidas: Tierra Colorada, Av Aquiles Serdán, Av. Ahuehuetes, Avenida Esperanza, Refinería Azcapotzalco, Antigua Calz. de Guadalupe, Calz. Azcapotzalco La Villa, Poniente 134, Ricarte, Colector 13, Ricarte y Alberto Herrera.

Estaciones: El Rosario, Tezozómoc, Azcapotzalco, Ferrería, Norte 45, Vallejo, Instituto del Petróleo, Lindavista, Deportivo 18 de marzo, La Villa-Basílica y Martín Carrera.²⁸

Línea 7

Línea 7 del Metro de la Ciudad de México



Interior de la estación Camarones, línea 7

Fue la séptima línea del sistema en ser inaugurada. Está integrada por 14 estaciones y su color distintivo es el naranja. Su trazo se encuentra al poniente de la Ciudad de México con dirección norte-sur. Tiene una longitud total de vía de 18.784 kilómetros, de los cuales 17.011 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

La línea fue inaugurada en 4 tramos durante el sexenio presidencial (1982-1988) de Miguel de la Madrid Hurtado: Tacuba-Auditorio, el diciembre de 1984, con 5.424 kilómetros y 4 estaciones; Auditorio-Tacubaya, el 22 de agosto de 1985, con 2.730 kilómetros y 2 estaciones; Tacubaya-Barranca del Muerto, el 19 de diciembre de 1985, con 5.040 kilómetros y 4 estaciones; Tacuba-El Rosario, el 29 de noviembre de 1988, con 5.590 kilómetros y 4 estaciones.

Tiene correspondencia con otras líneas: línea 6 en El Rosario, línea 2 en Tacuba y con las líneas 1, 9 en Tacubaya.

El trazo de la línea se proyectó al pie de las estribaciones de la Sierra de las Cruces, una zona que se encuentra a mayor altitud que la Ciudad de México. Para compensar la variación de altitudes, se decidió construir la línea a 35 metros bajo la superficie mediante dos técnicas: método austriaco y escudo. La técnica requiere el empleo de dovelas de concreto prefabricadas para estabilizar el túnel (las dovelas inferiores soportan los rieles y la barra alimentadora de tensión). Debido al uso de estas técnicas se prescindió del uso de balasto.

La estación terminal El Rosario es la única de tipo superficial en toda la línea. La línea está construida bajo las avenidas: Tierra Colorada, Av. Aquiles Serdán, Av. Ferrocarriles Nacionales, Golfo de Adén, Lago Chiem, Lago Helmar, Av. Río San Joaquín, Lago Onega, Arquímedes, Calz. Chivatito, Calz. Molino del Rey, Av. Parque Lira, Puente de la Morena y Av. Revolución.

Estaciones: El Rosario, Aquiles Serdán, Camarones, Refinería, Tacuba, San Joaquín, Polanco, Auditorio, Constituyentes, Tacubaya, San Pedro de los Pinos, San Antonio, Mixcoac y Barranca del Muerto.²⁹

Línea 8

Línea 8 del Metro de la Ciudad de México



Señalamiento usual con iluminación LED y recarga de baterías mediante celdas solares.

Fue la décima ruta de la red en ser inaugurada. Está integrada por 19 estaciones y su color distintivo es el verde. Su trazo se encuentra localizado al centro y suroriente de la Ciudad de México. Tiene dirección oriente-poniente entre las estaciones Constitución de 1917 y Atlalilco, y dirección norte-sur entre Escuadrón 201 y Garibaldi-Lagunilla. Tiene una longitud total de vía de 20.078 kilómetros, de los cuales 17.679 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

El Sistema de Transporte Colectivo denomina Quinta Etapa del Metro al intervalo entre los años 1988 y 1994. Durante esta etapa se planeó el trazo de la ruta de la estación Indios Verdes a la colonia Ejército Constitucionalista, pasando por el Centro Histórico de la Ciudad de México. Bajo el argumento del posible daño que sufrirían edificios coloniales y prehispánicos, presentes en el primer cuadro de la ciudad, el trazo y fecha de inicio de la obra fueron modificados.

El 20 de julio de 1994 fue inaugurada por Carlos Salinas de Gortari, Presidente de México de 1988 a 1994, y Manuel Aguilera Gómez, Regente del Distrito Federal de 1993 a 1994.

Tiene correspondencia con otras líneas en: línea 4 en Santa Anita; líneas 2 y 9 en Chabacano; línea 1 en Salto del Agua; línea 2 en Bellas Artes y línea B en Garibaldi-Lagunilla.

El tipo de construcción es superficial en el tramo Aculco-Coyuya y la estación Constitución de 1917; el resto de la línea es de tipo subterránea. La línea está construida en las siguientes avenidas: Av. Paseo de la Reforma (solo estación Garibaldi-Lagunilla), Eje Central Lázaro Cárdenas, Juan A. Mateos, Prol. José Tomás Cuellar, Calz. de la Viga, Viaducto, Coyuya, Hidalgo, Centeno, Violeta, Francisco del Paso y Troncoso, Avenida 5 y Av. Ermita Iztapalapa.

Estaciones: Garibaldi-Lagunilla, Bellas Artes, San Juan de Letrán, Salto del Agua, Doctores, Obrera, Chabacano, La Viga, Santa Anita, Coyuya, Iztacalco, Apatlaco, Aculco, Escuadrón 201, Atlalilco, Iztapalapa, Cerro de la Estrella, UAM-I y Constitución de 1917.

Línea 9

Línea 9 del Metro de la Ciudad de México



Póster informativo usual que incluye nombre, iconografía y transbordos de las estaciones. En la fotografía se observa un póster alusivo a la línea 9 en el interior de un carro.

Octava línea en inaugurarse. Está integrada por 12 estaciones y su color distintivo es el café. Su trazo se localiza al centro de la Ciudad de México con dirección oriente-poniente. Tiene una longitud de vía de 15.375 kilómetros, de los cuales 13.033 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

El primer tramo inaugurado, Pantitlán-Centro Médico, el 26 de agosto de 1987 contaba con una longitud de 11.669 kilómetros y 9 estaciones; se inauguró durante el sexenio presidencial (1982-

1988) de Miguel de la Madrid Hurtado. El segundo tramo fue inaugurado el 29 de agosto de 1988, de Centro a Tacubaya, con una longitud de 3.706 kilómetros y 3 estaciones.

Tiene correspondencia con otras líneas: líneas 1 y 7 en Tacubaya; línea 3 en Centro Médico; líneas 2 y 8 en Chabacano; línea 4 en Jamaica y líneas 1,5 y A en Pantitlán.³⁶ A diferencia de los demás transbordos en el sistema, si se desea transbordar a la línea A desde las líneas 1, 5 ó 9, o viceversa, se debe comprar un boleto más o cubrir el costo equivalente con la tarjeta recargable del Sistema de Transporte Colectivo.

El tipo de construcción es subterráneo en el tramo Tacubaya-Mixiuhca. De Velódromo a Pantitlán es viaducto elevado. La línea está construida en las avenidas: José Martí, Gral. Francisco Murguía, Benjamin Franklin, Av. Baja California, Av. Dr. Ignacio Morones Prieto, José Peón Contreras, Calzada Chabacano, Av. Morelos, Viaducto y Río Churubusco.

Estaciones: Tacubaya, Patriotismo, Chilpancingo, Centro Médico, Lázaro Cárdenas, Chabacano, Jamaica, Mixiuhca, Velódromo, Deportiva, Puebla y Pantitlán.

Línea A

Línea A del Metro de la Ciudad de México



Estación terminal La Paz

Novena línea del sistema en ser inaugurada. Está integrada por 10 estaciones y su color distintivo es el morado. Su trazo se localiza al suroriente de la Ciudad de México con dirección predominante oriente-poniente. Tiene una longitud de vía de 17.192 kilómetros, de los cuales 14.893 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras. Se distingue del resto de las líneas por tener trenes de 6 carros de rodadura férrea alimentados por catenaria. Por ese motivo también se le conoce como metro férreo o metro ligero.

Fue inaugurada por Carlos Salinas de Gortari, Presidente de México de 1988 a 1994, Ignacio Pichardo Pagaza, Gobernador del Estado de México de 1989 a 1993 y Manuel Camacho Solís, Regente del Distrito Federal de 1988 a 1993, el 12 de agosto de 1991. Tiene correspondencia con las líneas 1, 5 y 9 en la estación Pantitlán. A diferencia de los demás transbordos en el sistema, si se desea transbordar a las líneas 1, 5 ó 9 desde la línea A, o viceversa, se debe comprar un boleto más o cubrir el costo equivalente con la tarjeta recargable del Sistema de Transporte Colectivo.

En 1985 la desaparecida Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR), dependiente de la Secretaría General de Obras del Distrito Federal, dio a conocer el Programa Maestro del Metro Horizonte 2010. En esta versión se determinó construir 8 líneas alimentadoras que tendrían como característica particular ser una transición entre el Metro convencional y un ferrocarril suburbano.³⁹ La transición consistiría en: diseñar trenes de rodadura férrea de seis vagones (con posibilidad de aumentar hasta nueve); de dimensiones similares a los de rodadura neumática empleados en el sistema desde 1969; tomarían por medio de un pantógrafo la tensión suministrada por una catenaria; dada su función de línea alimentadora, al extenderse hacia zonas suburbanas en el Estado de México, se debería comprar un boleto más para abordar a las líneas principales (líneas del Metro con trazo predominante en el centro de la Ciudad de México) y para distinguirlas de las principales se emplearía nomenclatura por letras.

Del proyecto de líneas alimentadoras únicamente se logró construir la línea A (con una modificación en su trazo oriente). En posteriores revisiones del Plan Maestro del Metro se consideró sustituir las líneas alimentadoras por líneas de tren ligero o por expansiones de las líneas de rodadura neumática existentes.

La estación terminal Pantitlán es subterránea, el resto de la línea es superficial. La línea está construida en las siguientes avenidas: Río Churubusco, Calz. Ignacio Zaragoza, Av. Puebla, Generalísimo Morelos y Vías Férreas del Sur.

Estaciones: Pantitlán, Agrícola Oriental, Canal de San Juan, Tepalcates, Guelatao, Peñón Viejo, Acatitla, Santa Marta, Los Reyes y La Paz.

Línea B del Metro de la Ciudad de México

Undécima línea en inaugurarse. Está integrada por 21 estaciones y es la única del sistema en utilizar en su identidad gráfica dos colores: verde y gris. Su trazo se localiza en el centro y nororiente de la Ciudad de México con dirección oriente-poniente de Buenavista a San Lázaro y dirección sur-norte de Ricardo Flores Magón a Ciudad Azteca. Tiene una longitud total de vía de 23.722 kilómetros, de los cuales 20.278 kilómetros son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante se emplea para maniobras.

La línea fue inaugurada en 2 tramos: el primer tramo inaugurado por Ernesto Zedillo Ponce de León, Presidente de México de 1994 a 2000, y Rosario Robles Berlanga, Jefe de Gobierno del Distrito Federal de 1999-2000 fue Buenavista-Villa de Aragón, el 15 de diciembre de 1999 (de 12.139 kilómetros y 13 estaciones). El segundo tramo, Villa de Aragón-Ciudad Azteca, inaugurado el 30 de noviembre de 2000 sumó a la línea 11.583 kilómetros y 8 estaciones.

Tiene correspondencia con otras líneas en: línea 3 en Guerrero, línea 8 en Garibaldi-Lagunilla, línea 4 en Morelos, línea 1 en San Lázaro y línea 5 en Oceanía.

En 1985 el Programa Maestro del Metro Horizonte 2010 propuso el trazo de la línea 10 desde la colonia Irrigación, en la delegación Miguel Hidalgo, hasta la colonia Villa de Aragón en los límites de la delegación y el municipio de Nezahualcóyotl (Estado de México). Para alimentar esta línea sería necesario construir una línea alimentadora similar a la línea A que partiría desde la colonia Villa de Aragón hacia la colonia Ciudad Azteca (en el Estado de México).

La línea B representa la unificación de ambas líneas, con modificaciones en su trazo poniente.

De la terminal Buenavista a la estación Morelos la línea es subterránea. La línea viaja a través de viaducto elevado de San Lázaro a Oceanía. De Deportivo Oceanía a la terminal Ciudad Azteca la línea es superficial. La línea está construida en las avenidas: Mosqueta, Rayón, Héroe de Granaditas, Av. del Trabajo, Albañiles, Av. Ing. Eduardo Molina, Artilleros, Oceanía, Av. 608 y Av. Central.

Estaciones: Buenavista, Guerrero, Garibaldi-Lagunilla, Lagunilla, Tepito, Morelos, San Lázaro, Ricardo Flores Magón, Romero Rubio, Oceanía, Deportivo Oceanía, Bosque de Aragón, Aragón, Nezahualcóyotl, Impulsora, Río de los Remedios, Múzquiz, Ecatepec, Olímpica, Plaza Aragón y Ciudad Azteca.

Línea 12 del Metro de la Ciudad de México

En diciembre de 2006 se anunció la posible construcción de una nueva línea del metro, para atender la demanda de servicio de transporte público al sur de la Ciudad de México. El julio de 2007 se aplicó una encuesta denominada Consulta Verde a través de la cual se preguntó a la población, de la Ciudad de México, su opinión sobre transporte público; manejo del agua; medio ambiente y definir el trazo de la línea 12 del Metro. La encuesta propuso dos posibles rutas: Iztapalapa-Acoxta e Iztapalapa-Tláhuac. El 7 de agosto de 2007 se dieron a conocer los resultados de la encuesta en donde la ruta Iztapalapa-Tláhuac resultó elegida. El 8 de agosto de 2007 se presentó el proyecto de manera oficial ante la población con el nombre de Línea 12: línea dorada, línea del Bicentenario.

El consorcio ganador que construye la línea está formado por las empresas: Empresas ICA, SA de CV; Carso Infraestructura y Construcción, SA de CV; Alstom Transport, SA y Alstom Mexicana, SA de CV.

El proyecto final considera la construcción de una vía de longitud total de 24 km (20.278 km para servicio de pasajeros) al sur de la Ciudad de México con dirección predominante oriente-poniente. Propone el color oro como identidad gráfica para celebrar el Bicentenario de la Independencia de México y el Centenario de la Revolución mexicana; el uso de trenes (de 8 vagones) de rodadura férrea alimentados por catenaria, y 20 estaciones: Tlahuac, Tlaltenco, Zapotitlán, Nopalera, Olivos, Tezonco, Periférico Oriente, Calle 11, Lomas Estrella, San Andrés Tomatlán, Culhuacán, Atlalilco, Mexicaltzingo, Ermita, Eje Central, Parque de los Venados, Zapata, 20 de Noviembre, Insurgentes Sur y Mixcoac.^{50 49 51} El 15 de noviembre de 2008 Marcelo Ebrard Casaubón anunció una posible expansión del proyecto en 1,5 kilómetros hacia el poniente. Esta expansión llegaría hasta la Av. Alta Tensión. También incluye conexión con otras líneas del sistema: línea 7 en Mixcoac, línea 3 en Zapata, línea 2 en Ermita y línea 8 en Atlalilco.



Cambios en el proyecto

Proyecto Línea 12: línea dorada, línea del Bicentenario

Construcción del tramo Periférico-San Lorenzo Tezonco (6 de marzo de 2010)

Desde la presentación oficial (8 de agosto de 2007), por parte de las autoridades del Gobierno del Distrito Federal y el Sistema de Transporte Colectivo, se han realizado diversas modificaciones al proyecto que incluyen: ruta; cantidad y nombre de estaciones; inicio y terminación de la obra civil; y tipo de construcción.

Ruta. Inicialmente se anunció la trayectoria siguiente: iniciaría en territorio de la delegación Tláhuac en los terrenos localizados en el predio denominado Llanos de Tláhuac, ubicado entre la Av. San Rafael Atlixco y la calle Luis Delgado. Se incorporaría a la Av. Tláhuac en dirección poniente. Seguiría por Calzada de la Virgen, las calles Canal Nacional, Cafetales hasta entroncar con el Eje 3 Oriente (Av. Carlota Armero) hasta el cruce con la Calzada Ermita-Iztapalapa. En ese punto giraría hacia el poniente hasta llegar al cruce con la Av. División del Norte, lugar donde viraría hacia el norte hasta el Eje 7 Sur donde viraría nuevamente hacia el poniente hasta la estación Mixcoac. El proyecto final considera el trazo de la línea a través de la Av. Tláhuac desde la Calzada Ermita-Iztapalapa hasta el predio Llanos de Tláhuac.

Cantidad de estaciones. El proyecto inicial consideró 23 estaciones: Tláhuac, Tlaltenco, Zapotitlán, Francisco Villa, Olivos, Tezonco, Periférico Oriente, Calle 11, La Virgen, ESIME Culhuacán, Canal Nacional, Ganaderos, Del Paso, Mexicaltzingo, Vía Láctea, Sur 69, Ermita, Eje Central, Parque de los Venados, Zapata, 20 de noviembre, Insurgentes Sur y Mixcoac. El 6 de enero de 2008 el Sistema de Transporte Colectivo dio a conocer la cancelación de la estación Sur 69 por oposición vecinal. El 11 de septiembre de 2008 autoridades del Sistema de Transporte Colectivo anunciaron la cancelación de las estaciones Vía Láctea y Ganaderos debido a una serie de recomendaciones por parte del Instituto Nacional de Antropología e Historia. En el cruce de la Calzada Ermita-Iztapalapa y la Av. Arneses se planeó construir la estación Axomulco (originalmente llamada Del Paso). La estación funcionaría como transbordo hacia la línea 8, para lo cual, también se tendría que construir una estación sobre el trazo de esta última línea. Francisco Bojórquez Hernández, director del Sistema de Transporte Colectivo, reconoció que la construcción de una estación sobre el trazo de la línea 8 implicaría el cierre de la línea por casi 6 meses, por tal motivo, se procedió a cancelar la estación Axomulco y únicamente construir una sola estación para efectuar el transbordo hacia la estación Atlalilco, la cual ya existe.

Nombre de estaciones. 6 estaciones han sido renombradas por autoridades del Sistema de Transporte Colectivo. Solo una de manera definitiva y las 5 restantes se identifican con dos o más nombres en diversos documentos del organismo. Francisco Villa se renombró de manera definitiva a Nopalera. Las estaciones restantes con dos o más nombres son: Canal Nacional (Barrio Tula o Pueblo Culhuacán), Tezonco (San Lorenzo), La Virgen (Tomatlán o Santa María Tomatlán), ESIME Culhuacán (San Andrés Tomatlán), Calle 11 (Tomatlán), Insurgentes Sur (Parque hundido).

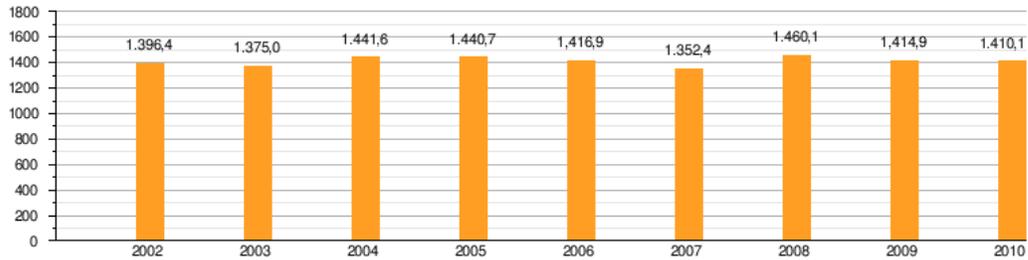
Inicio y terminación de la obra civil. La licitación publicada el 21 de enero de 2008 indicó las siguientes fechas: 10 de junio de 2008 para inicio y 31 de diciembre de 2010 para terminación del tramo Tláhuac-Axomulco; y 31 de diciembre de 2011 para terminación del tramo Axomulco-Mixcoac. Posteriormente, se anunciaron tres fechas más para el inicio de la obra: 3 de julio, 15 de septiembre y 22 de septiembre de 2008. Las fechas de terminación de la obra también sufrieron cambios: Tláhuac-Atlalilco en abril de 2011 y Atlalilco-Mixcoac en abril de 2012. Finalmente, el 23

de septiembre de 2008 sobre la calzada Ermita-Iztapalapa, en el tramo comprendido entre calzada de La Viga y el Eje 3 Oriente inició la construcción del tramo Tláhuac-Atlalilco.

Tipo de construcción. El trazo de más de 24 km que originalmente se planteó subterráneo fue modificado para construir 2.8 km en modo superficial, 12 km en viaducto elevado, 2.8 km en cajón subterráneo y 7.8 km en túnel profundo.

Afluencia de pasajeros

Afluencia anual de pasajeros, total de la red (en millones de pasajeros por año)



Estaciones de mayor y menor afluencia

Estaciones de mayor afluencia de pasajeros, promedio en día laborable entre enero y marzo de 2011:

Estación	Línea	Delegación o municipio	Colonia	Pasajeros diarios
Cuatro caminos	2	Naucalpan de Juárez	Argentina Poniente	128 936
Indios Verdes	3	Gustavo A. Madero	Lindavista	122.284
Constitución de 1917	8	Iztapalapa	Constitución de 1917	109 199
Pantitlán	A	Iztacalco.	Agrícola Pantitlán	97 843
Pantitlán	5	Venustiano Carranza	Agrícola Pantitlán	97 307

Estaciones de menor afluencia de pasajeros, promedio en día laborable entre enero y marzo de 2011:

Estación	Línea	Delegación o municipio	Colonia	Pasajeros diarios
Santa Anita	4	Iztacalco	Santa Anita	1 943
Deportivo 18 de marzo	6	Gustavo A. Madero	Tepeyac Insurgentes	1 230
Vallejo	6	Azcapotzalco	Vallejo	2 515

Tezozómoc	6	Azcapotzalco	Pasteros	2 567
Chabacano	8	Cuauhtémoc	Vista Alegre	2 894

Conexión con otros sistemas de transporte público

Algunas estaciones del Metro de la Ciudad de México tienen conexión con otros sistemas de transporte público:

Los Centros de Transferencia Modal, conocidos coloquialmente como paraderos, son espacios en donde confluyen diversos tipos y rutas de transporte de pasajeros. Su objetivo es facilitar el movimiento de pasajeros entre los sistemas de transporte que allí convergen. En la mayoría de los CETRAM las líneas de autobuses provienen de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. De los 45 CETRAM existentes en la Ciudad de México, 37 están ubicados en estaciones terminales y de mayor afluencia de pasajeros del Metro de la Ciudad de México.

La estación Tasqueña enlaza con el Tren Ligero de la Ciudad de México. Para acceder al tren ligero se necesita comprar un boleto diferente propio de éste sistema.

Las líneas 1, 2 y 3 del servicio de Metrobús enlazan con varias estaciones del Metro de la Ciudad de México. Para acceder a este servicio es necesaria la compra de una tarjeta inteligente llamada tarjeta electrónica Metrobús.

El sistema 1 del Ferrocarril Suburbano de la Zona Metropolitana del Valle de México, tiene comunicación con el Metro de la Ciudad de México en las estaciones Buenavista (línea B) y Ferrería(línea 6). Para acceder es necesario comprar una tarjeta inteligente propia de este transporte.

II. CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS.

PROLOGO

Debido a la longitud y profundidad de los Túneles, hay necesidad de proyectar, para su ataque, accesos verticales por medio de los cuales sea posible y costeable la ejecución de la obra. Es obvio pensar que la única forma de construir un túnel, por ejemplo, de 50 Km es por tramos. La longitud de estos tramos, es decir, la distancia entre lumbreras, es motivo de un exhaustivo estudio técnico-económico. Dicho estudio consiste en analizar el costo promedio por lumbreira y el tramo económico de acarreo de túnel, y es óptimo separar las lumbreras entre sí por una distancia de 2 a 3 Km. Además, deben considerarse las condiciones geológicas.

Estos accesos denominados lumbreras, sirven para que a través de ellos se realicen todas las operaciones necesarias para la construcción del túnel: barrenación, poblado, tronada, ventilación, bombeo, rezaga, amacice, ademe, revestimiento, instalaciones eléctricas y de aire comprimido, traslado de equipo y acceso de personal.

En general, se puede decir que los procedimientos de construcción para el ataque de lumbreras, se diferencian según el tipo de terreno donde están construidas. Se podrían subdividir en dos grandes grupos, abarcando uno de ellos, las lumbreras construidas en arcillas y limos, (en suelos blandos). El otro grupo lo formarían las lumbreras construidas en estratos más resistentes o roca, (en suelos duros).



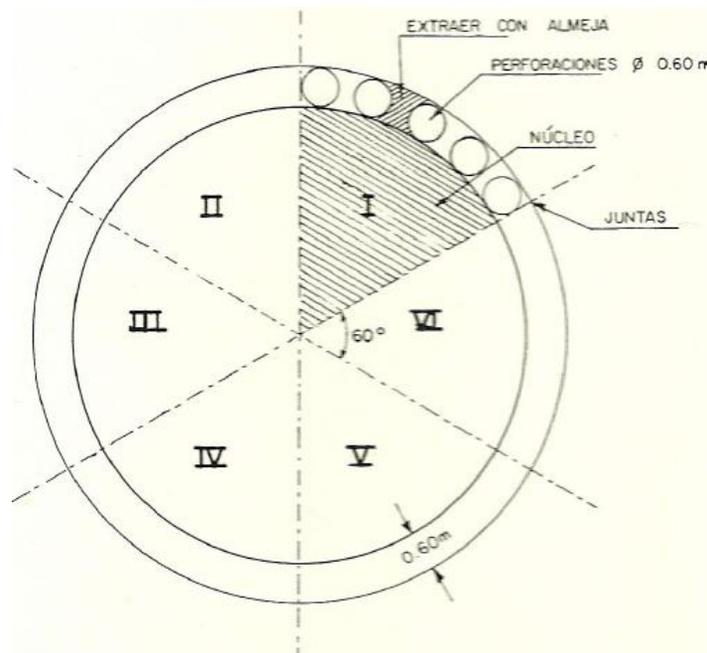
II.1 EN SUELOS BLANDOS.

Este grupo se puede subdividir en seis diferentes técnicas:

a) Técnica Solum.

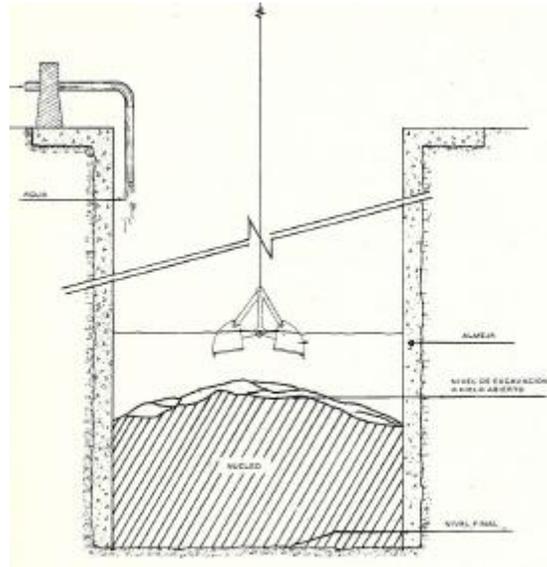
La técnica Solum consiste esencialmente en tres pasos:

- A. Una vez marcado en el terreno el centro de la lumbrera y las fronteras del revestimiento, se subdivide el área en seis partes iguales, cada una teniendo un ángulo de 60° , y se procede a hacer perforaciones de 0.60 m de diámetro hasta la profundidad requerida, en un sector anular. Las perforaciones están separadas entre sí aproximadamente 0.60 m es decir, siempre dejando una parte del terreno de este sector sin perforar. Todo se estabiliza por medio de bentonita, y una vez terminada la perforación, se procede a la extracción del material remanente por medio de una almeja, siempre reemplazando el material extraído por partes iguales de bentonita. Una vez terminado de excavar este primer sector anular, se procede a colar y se continúa el procedimiento de excavación y colado con el sector No. III y después con el No. V y así sucesivamente hasta terminar con la excavación y revestimiento de las paredes de la lumbrera.

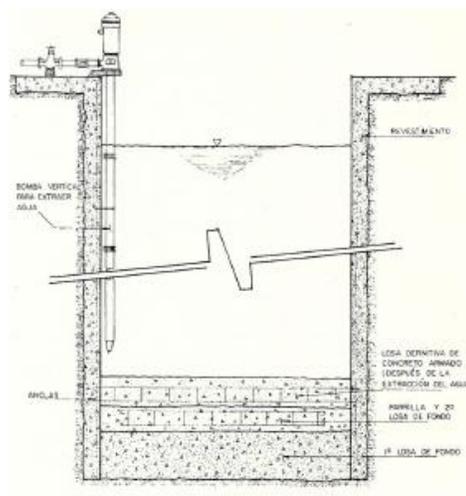


- B. Para proceder al colado de los sectores anulares, previamente excavados, se baja el armado e inyecta concreto desde el fondo a través de un tubo tremie, el cual desplaza la bentonita por

diferencia de densidades; posteriormente se excava el núcleo con almeja hasta la profundidad que de acuerdo con los cálculos de Mecánica de Suelos no se presentarán expansiones en el fondo, debido a la descarga del suelo. Cuando se llega a este nivel se suspenden los trabajos y se reemplaza el peso del material excavado por un volumen equivalente de agua, para evitar el bufamiento; se continúa la excavación del núcleo de la lumbrera extrayendo el material debajo del agua hasta llegar a la profundidad deseada.



- C. Inmediatamente después de terminar la excavación, se procede a colar un fondo de concreto a forma de tapón o plantilla y se deja fraguar. Posteriormente se limpia el azolve y se baja una parrilla de armado para colar un segundo fondo bajo el agua. Una vez hecho esto, se extrae el agua dentro de la lumbrera y se baja el personal para sellar (calafatear) el tapón de fondo y evitar la entrada de agua o de material. Después se procede a colar el fondo definitivo de concreto armado, perfectamente bien anclado a los muros de revestimiento de la lumbrera.

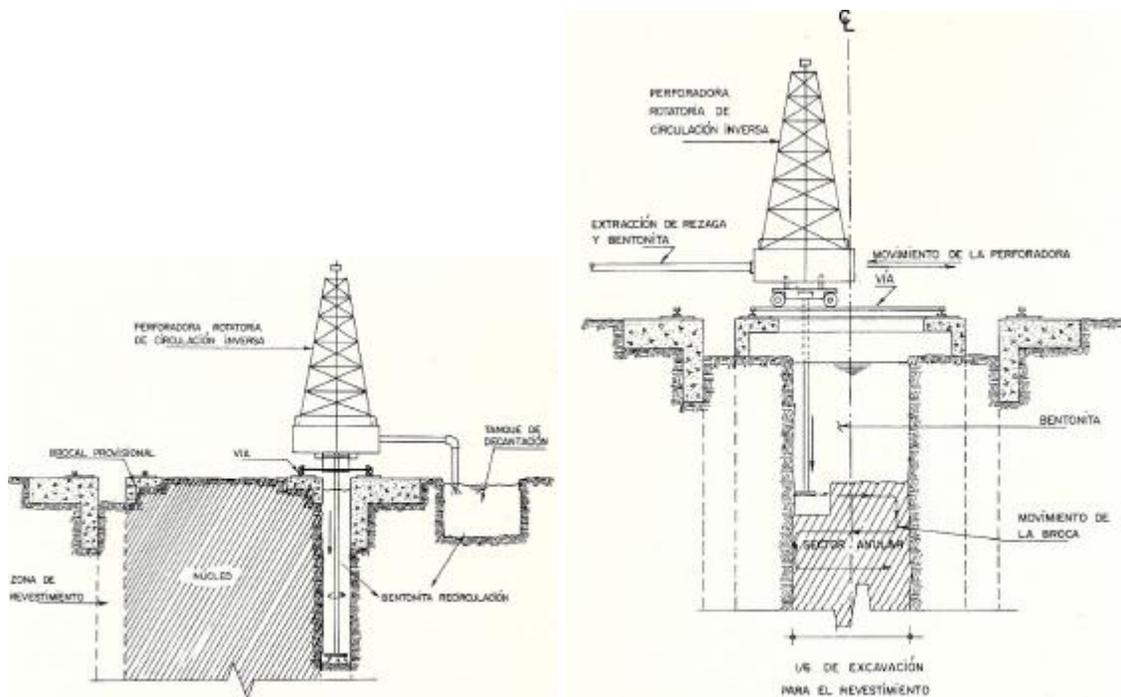


b) Técnica Soletanche.

El procedimiento de construcción de lumbreras en arcillas con esta técnica, es muy similar a la anteriormente expuesta con dos variantes.

1. La excavación del sector es efectuada por un taladro barrenador guiado, colocado en la periferia de la lumbrera y montado sobre una vía; esta maquinaria extrae el material por medio de una broca rotatoria y de percusión.

Una vez comenzada la excavación del material, se inyecta bentonita por el exterior, y la broca, a la vez que licua el material, extrae la mezcla de rezaga y bentonita por medio de una tubería de succión interior a la misma, depositándole material en un tanque sedimentador colocado en la superficie, recuperándose la mayor parte de bentonita para inyectarla nuevamente. La maquinaria además de su movimiento vertical-rotatorio cuenta con movimiento horizontal, y por lo mismo excava todo el sector anular.

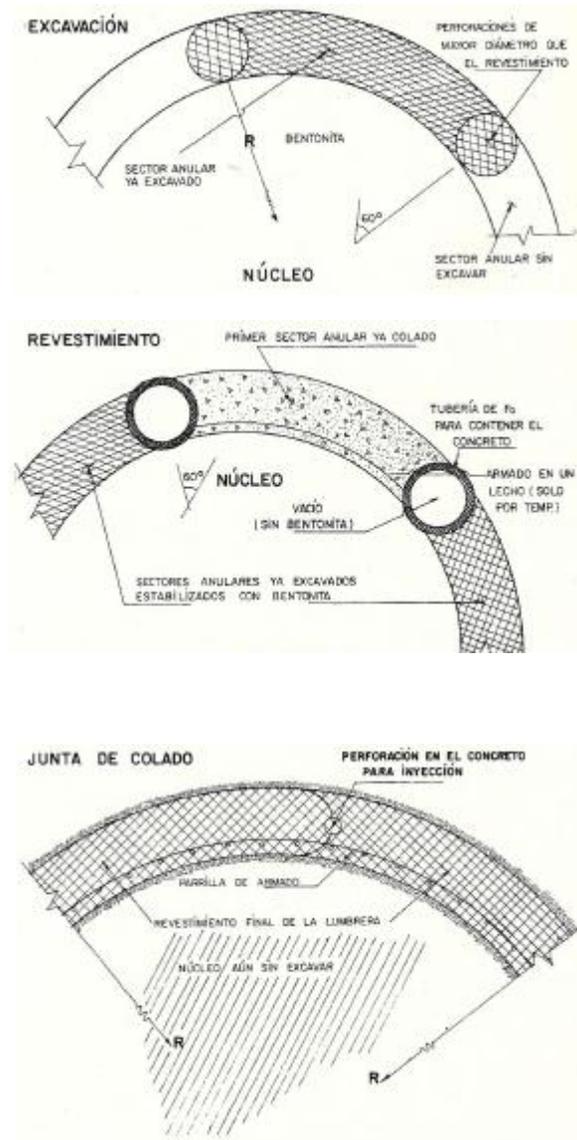


Una vez terminada la excavación de este sector, se bajan las parrillas de armado y se cuela el muro de la lumbrera colocando concreto a través de un tubo tremie, desplazando éste la bentonita por la diferencia de densidades.

2. El mismo taladro hace una perforación de mayor diámetro en los extremos del sector anular, en donde se coloca una tubería, que es la que limita el sector, en ambos extremos para posteriormente, colar con el procedimiento anteriormente expuesto. Una vez que el concreto fragua lo suficiente, se retira la tubería y se procede a la excavación del siguiente sector, quedando la junta de colado.

Después de haber colocado todo el muro de la lumbrera, se excava el núcleo de la misma por medio de una almeja, y no habiéndose registrado ningún bufamiento importante, no es necesario estabilizar el fondo con agua o bentonita.

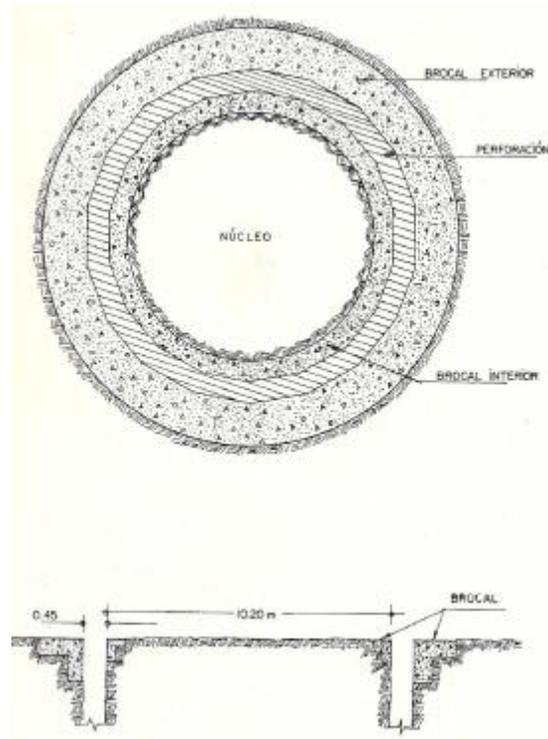
Si a medida que avanza la excavación del núcleo de la lumbrera se encuentran escurrimientos fuertes por las juntas, se procede a hacer barrenos para inyección de lechada taponando perfectamente bien cualquier fuga y llenando los huecos que pudieran existir dentro del revestimiento.



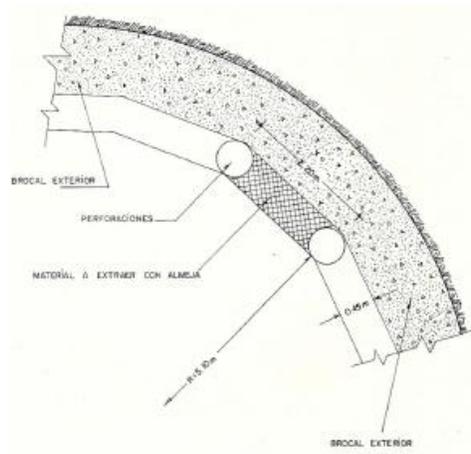
c) Técnica Estrella.

Esta técnica consiste en lo siguiente:

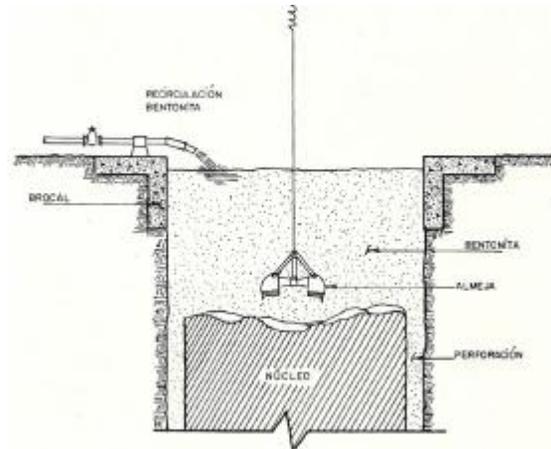
Una vez localizado el centro de la lumbrera se procede a colar dos brocales, uno exterior y el otro interior, de menores dimensiones, formando un polígono de 16 lados.



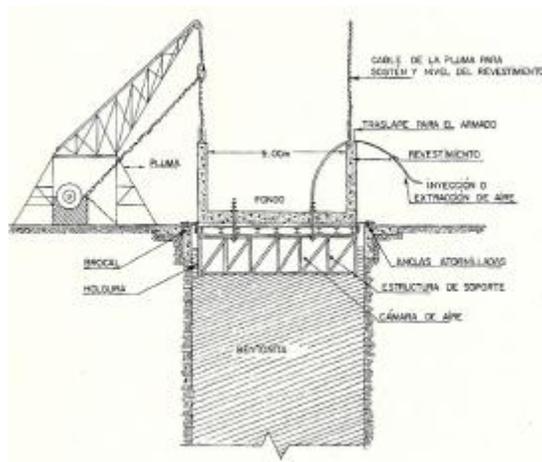
El brocal interior es sólo para marcar los linderos del revestimiento y evitar deslaves del terreno. Posteriormente se perfora el material hasta la profundidad requerida, con un diámetro de 45.7 cm (18 pulg) y solamente en las uniones de los lados de la poligonal, hasta completar el círculo. El material que queda entre una perforación y otra es extraído por medio de una almeja y reemplazado por lodo bentonítico, y así sucesivamente hasta completar la excavación, en donde posteriormente va el revestimiento.



Terminada la excavación perimetral, se rompe el brocal interior para poder extraer el núcleo mediante el uso de una almeja, estabilizando las paredes con bentonita recirculada y con un control muy riguroso de densidad.



Posteriormente, habiendo completado toda la excavación, se coloca una estructura de acero en forma de tanque cilíndrico invertido, el cual queda bien anclado en el brocal de la lumbrera por medio de una ménsula unida con tornillos a ambas partes. Inmediatamente después, se coloca el fondo propiamente dicho de la lumbrera con una forma especial, quedando apoyado el revestimiento sobre la estructura y ésta, a su vez, sobre el brocal. La estructura sirve como cámara de flotación, ya que está perfectamente sellada contra fugas y tiene además, unas preparaciones en donde se habían colocado válvulas para permitir la salida del aire.



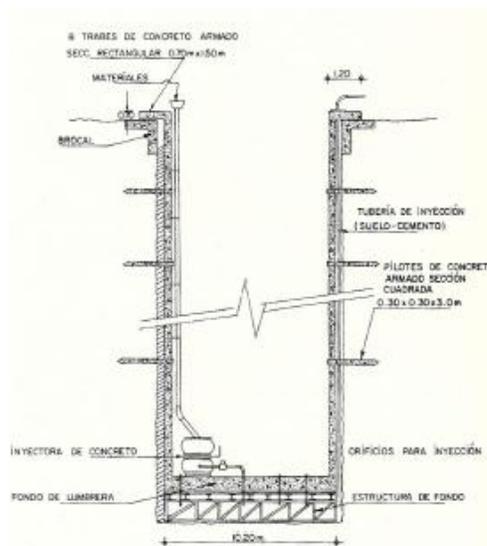
La primera parte del revestimiento se sostiene por la estructura de acero y nivelada por medio de 4 plumas colocadas en el brocal de la lumbrera, en el sentido de los ejes cardinales. Para esto, se

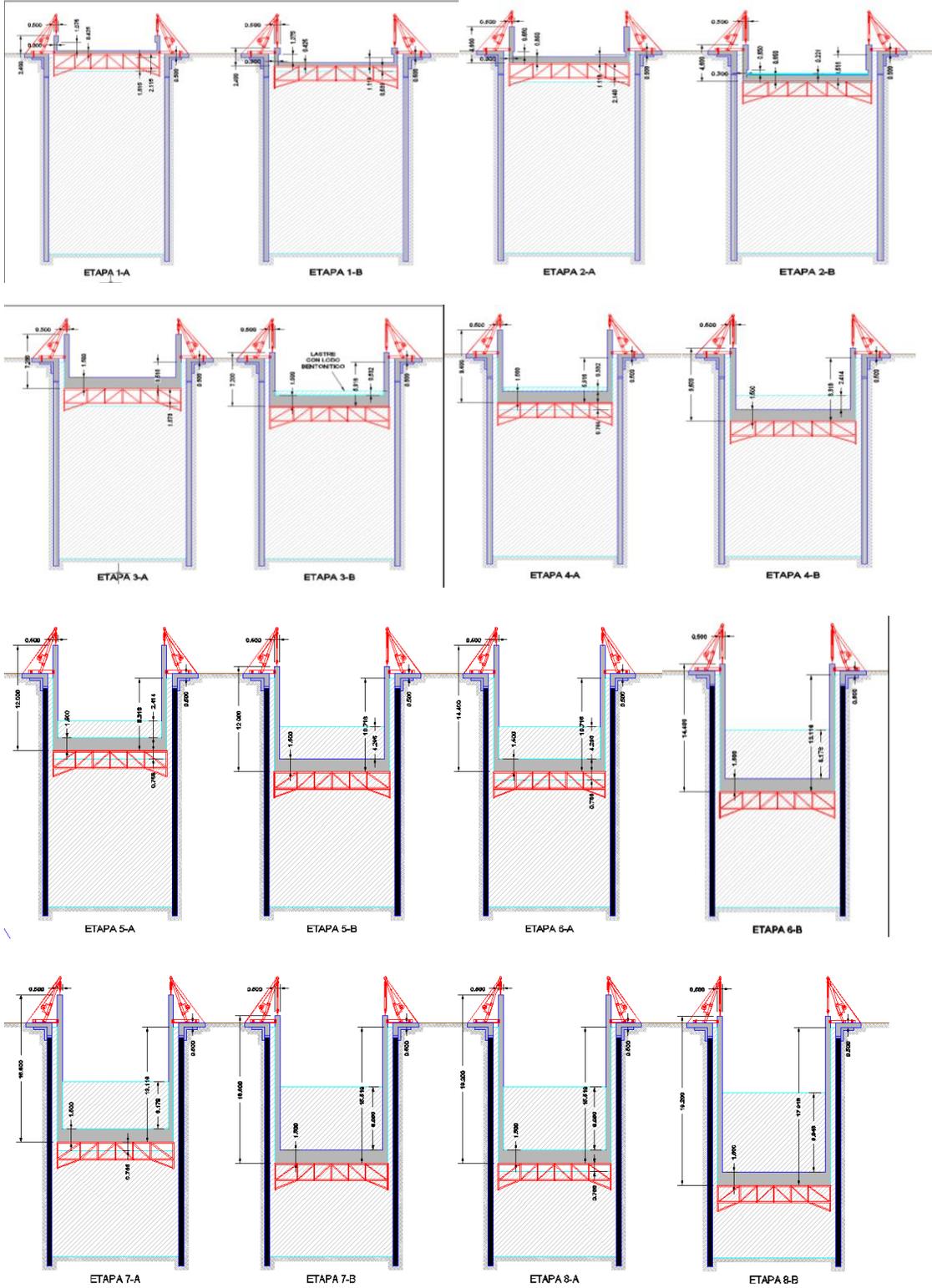
dejan ahogados en el concreto unas anclas de donde se engancha el puntero de la pluma, accionado por medio de un malacate.

El proceso para bajar el revestimiento, se hace de la siguiente manera: una vez que se tiene colada la primera parte inferior del revestimiento, se inyecta aire a presión en la estructura para poder desplazar la lechada de bentonita que se encuentra dentro de la misma y permitir que suba para poder retirar las anclas de soporte, para continuar con el hincado de la estructura y revestimiento, por medio de la adición de los tramos de lumbrera y extracción paulatina del aire en le interior de la estructura. Las plumas tienen la función de evitar un desplazamiento incorrecto del revestimiento, ya que el descenso del mismo deberá ser tal, que este acorde con el fraguado de las formas anteriores.

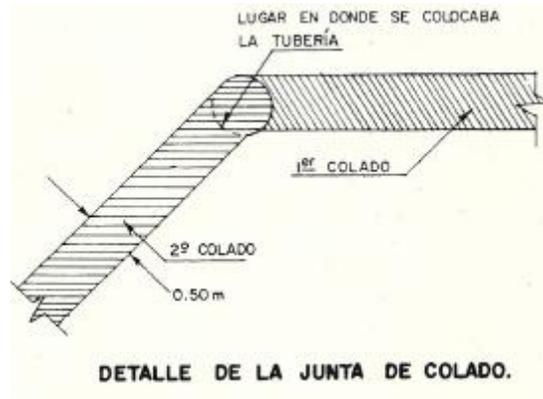
Conforme se baja el revestimiento, la bentonita es desplazada por la holgura que existe entre la pared de la excavación y el paño interior del revestimiento, la que es recolectada por medio de canaletas construidas en el brocal.

Una vez terminado de hincar todo el revestimiento, se inyecta concreto a la estructura por las preparaciones que existen para atracción o inyección de aire, logrando con esto un mejor asentamiento del fondo de la lumbrera. También el revestimiento se liga al terreno por medio de pilotes horizontales de concreto armado terminados en punta de sección cuadrada de 0.30 m * 0.30 m * 3 m de longitud, insertados en unas preparaciones previamente hechas en el revestimiento; además está unido al brocal por medio de 8 traves de concreto armado, de 0.70 m * 1.50 m * 12 m de longitud. En la holgura que queda entre el revestimiento y la pared de la excavación se inyecta suelo-cemento hasta extraer toda la bentonita, y dar así mayor rigidez al conjunto.





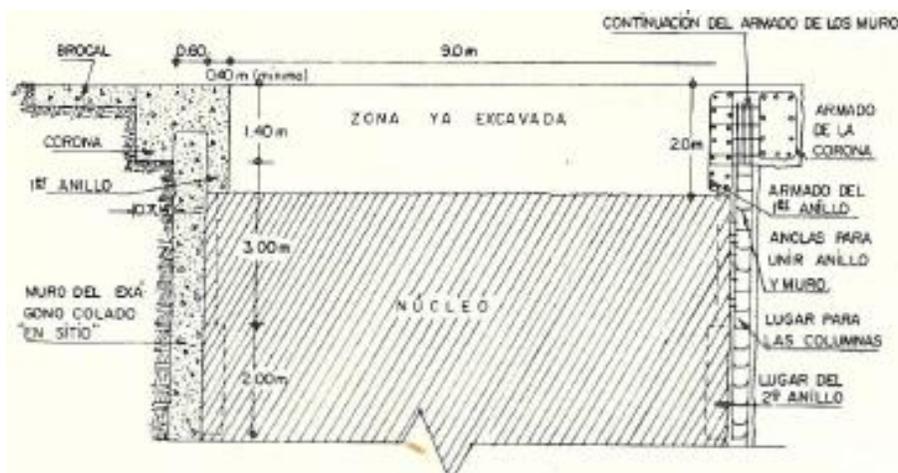
Y así sucesivamente hasta completar con el hexágono. Para las juntas de colado se deja una tubería que impide que el concreto se salga de su lugar, y es extraído una vez que el concreto tenga su fraguado inicial.



Una vez coladas las paredes del hexágono, se procede a excavar a base de pico y pala, una corona circular de 1.40 m de altura para hacer más rígida la parte superior de la lumbrera, colándose monóticamente junto con el primer anillo del revestimiento secundario.

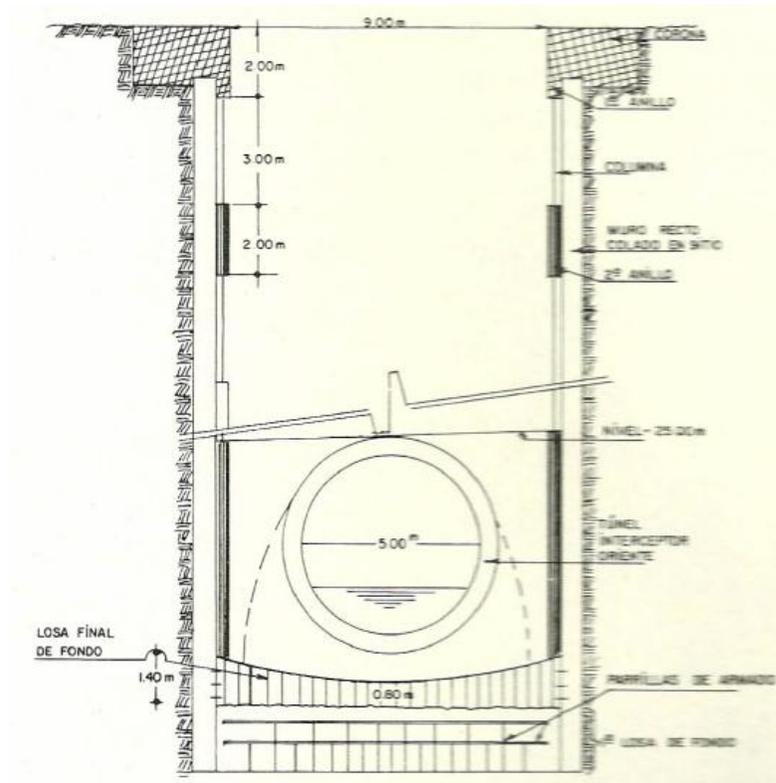
La altura del anillo es aproximadamente 2 m con un espesor mínimo de 0.40 m, su armado se integra al de la corona y se ancla a la pared del hexágono.

Después que el concreto de la corona y del anillo fraguan, se retira la forma metálica que había sido utilizada como cimbra y se excava el núcleo de la lumbrera hasta una profundidad de 3 m medidos a partir del paño inferior del primer anillo. Esto se hace con el fin de colar en las esquinas de las paredes del hexágono, unas pequeñas columnas de concreto armado que son ancladas a las paredes del revestimiento y sirven para disminuir las filtraciones, separar los anillos y dar mayor rigidez a la estructura. Las columnas tienen una altura de 3 m.



El mismo procedimiento anteriormente expuesto es repetido hasta llegar a una profundidad de 25 m., de este nivel en adelante el revestimiento es continuo, es decir, ya no se cuelan columnas en las esquinas sino que los anillos se continúan hasta llegar al fondo.

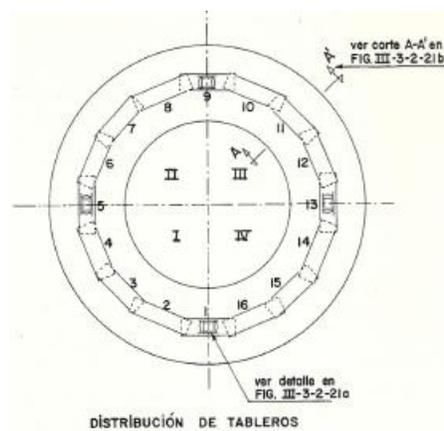
Para colar el fondo, se bombea el agua que queda dentro de la lumbrera y se hace cóncavo para que esté en mejores condiciones de resistir las presiones. Se ancla el armado del revestimiento secundario por medio de soldadura, teniendo un espesor mínimo de 0.80 m.



f) Técnica Ipsa

Esta técnica consiste en lo siguiente:

Localizado el eje de la lumbrera se procede a marcar en el campo un polígono de 16 lados iguales.

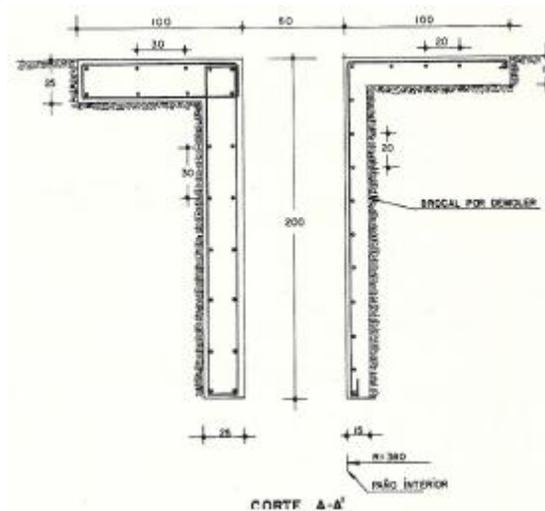
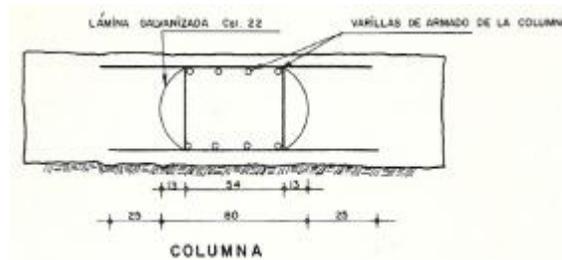


La longitud de cada uno de los lados del polígono es la abertura máxima de la almeja con la que se excavan los muros de la lumbrera, sustituyendo el material, conforme se va excavando, por lodo bentonítico.

Al igual que todas las lumbreras, también se excava a mano el brocal, el cual sirve como guía a la herramienta de excavación para sostener cualquier desprendimiento de sus paredes.

El procedimiento de excavación de los tableros de la lumbrera es el siguiente:

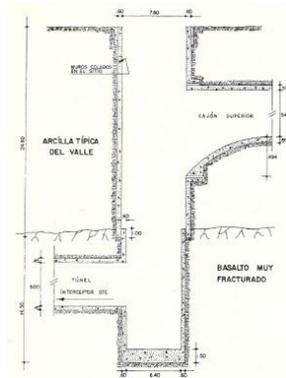
1. Excavación del tablero no. 1
2. Colocación del armado de acero de refuerzo de la columna A.
3. Colado bajo lodo bentonítico, con tubo tremie de la columna A.
4. Excavación del tablero no. 5
5. Colocación del armado de acero de refuerzo de la columna B.
6. Excavación del tablero no. 2
7. Excavación del tablero no. 4
8. Excavación del tablero no. 3
9. Colado bajo lodo bentonítico de los tableros 2, 3 y 4.



La misma secuencia mencionada anteriormente se sigue para los tres cuadrantes restantes.

Todos los muros de la lumbrera son colados hasta la profundidad, dejando las preparaciones necesarias en los tableros correspondientes, para recibir la conexión de un cajón superficial.

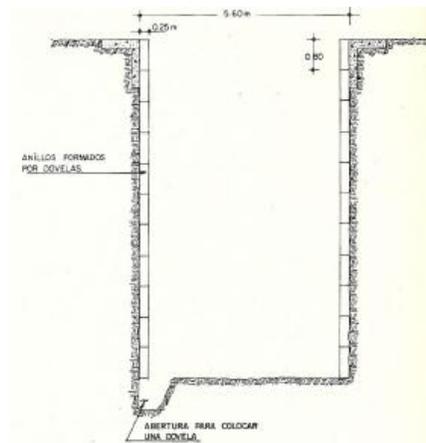
Colados los muros de la lumbrera se procede a excavar el núcleo hasta, mediante una almeja, posteriormente se cambia el procedimiento de excavación, usando explosivos hasta llegar a la profundidad necesaria.



g) Técnica Túnel

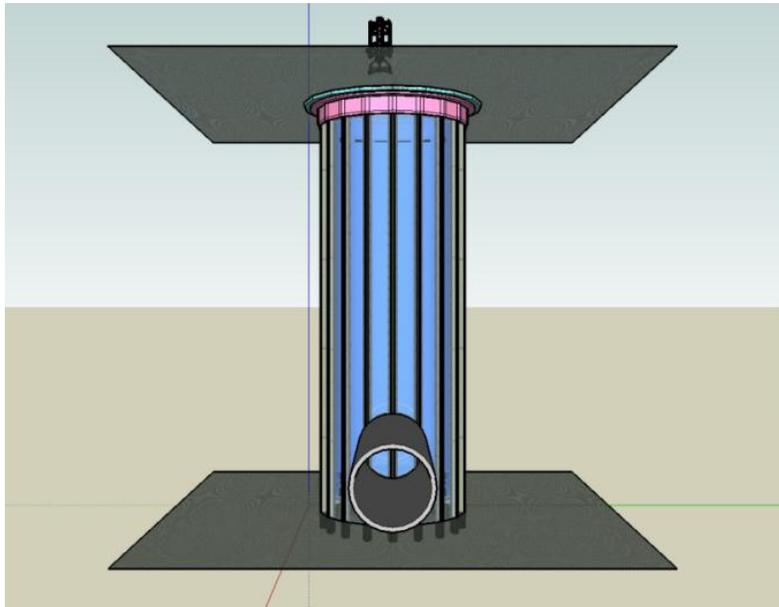
Este procedimiento es ejecutado en limos y arcillas en los cuales no se presenta la falla de fondo. Localizado y trazado el eje y el radio de la lumbrera se excava a mano, hasta una profundidad de 2 m, procediéndose a armar y colar el brocal de una pieza.

De los 2 m en adelante se excava con martillos neumáticos (rompedoras), del tipo Tex 10 ó CP-111 de 10 kg de peso, los cuales llevan como herramienta de ataque pulsetas anchas del tipo pala. Con esta herramienta se abre el espacio necesario para que entre una dovela y así sucesivamente hasta completar el anillo que forma el ademe de la lumbrera. Al mismo tiempo que se cuelan los anillos, éstos se van anclando al terreno, y a cada 3 anillos se cuelan un tapón en el fondo para proceder a la inyección de lechada de cemento y acelerante, llenando las cavidades que existían entre dovela y terreno.



Para la extracción de rezaga, la bajada y colocación de las dovelas, se utiliza una grúa situada en la proximidad del brocal, la cual con un bote de aproximadamente 0.8 m³ saca el material producto de la excavación.

Previamente al inicio de la excavación de la lumbrera, se perforan exteriormente a ésta, pozos para el abatimiento del nivel freático y control de filtraciones, logrando con ello una excavación en seco. Estos pozos se dejan funcionando durante toda la etapa de excavación de la lumbrera.

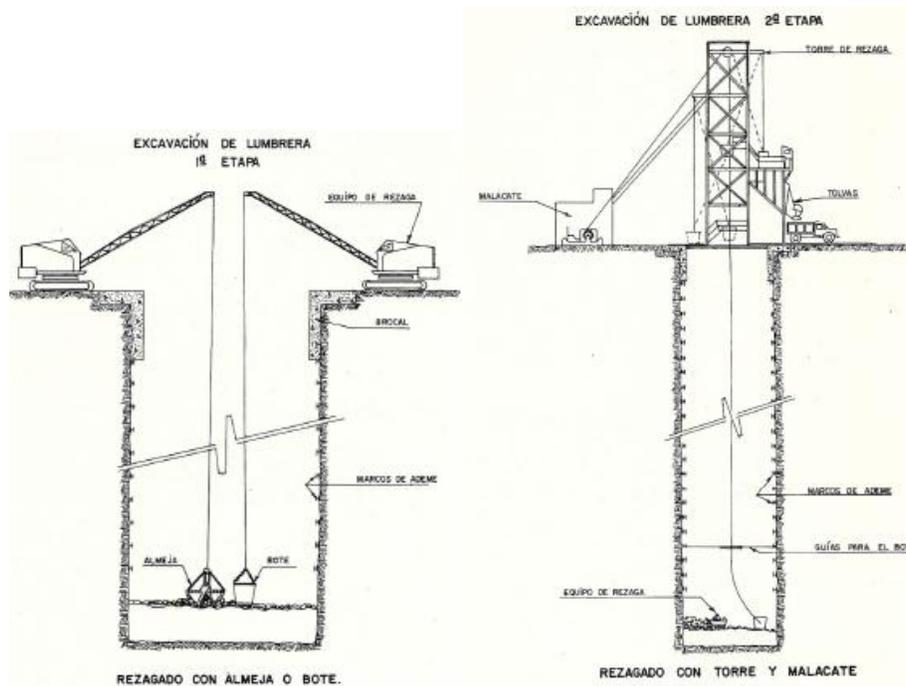


II.2 EN SUELOS FIRMES.

Excavación en tobas

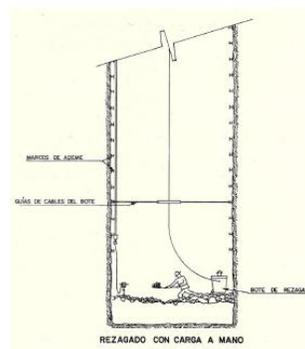
Para dicha excavación en tobas y conglomerado, el procedimiento constructivo usado es similar, pues son materiales que son atacados en su mayoría con martillos neumáticos (rompedoras) y en algunas ocasiones se usan explosivos en pequeñas cantidades, esto cuando se encuentran estratos muy duros.

La extracción de rezaga es hecha en los primeros 25 m con una grúa y un bote de 0.8 m³ de capacidad o una almeja partir de esta profundidad se instala una torre de manto, incluyendo tolvas, guías de cable para el bote, malacate de rezaga, etc.

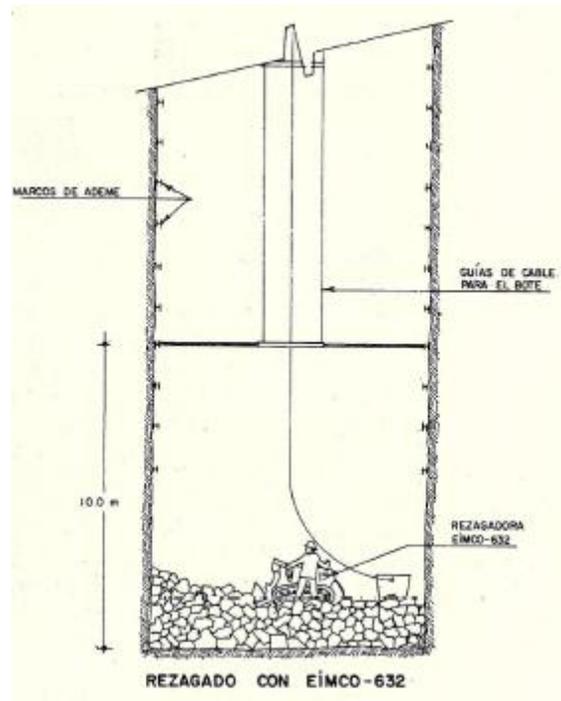


A continuación se mencionan los métodos y equipos que son usados.

1. Carga a mano



2. Carga con rezagadora Eimco 632 o 630



3. Carga con BURMAC,S-180

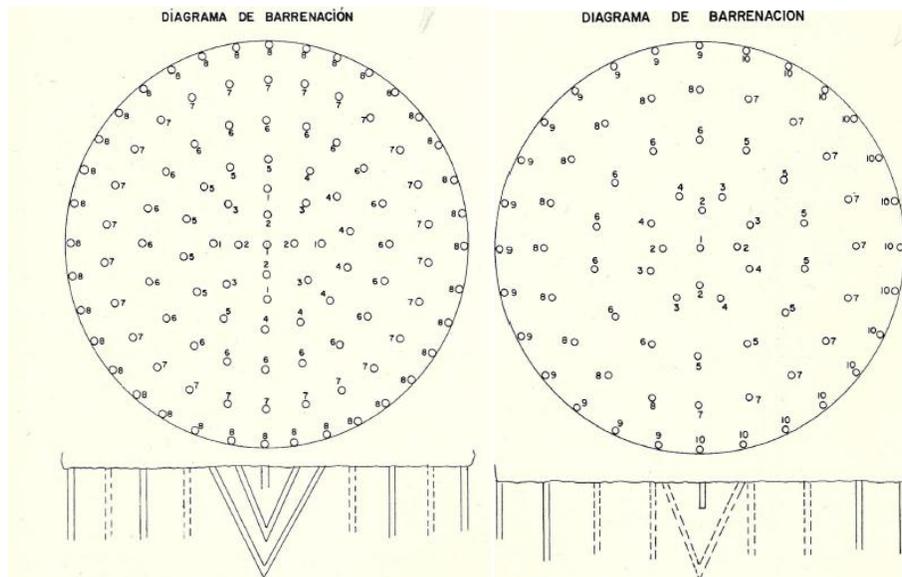


4. Carga con Traxcavo con descarga lateral.

Cuando es necesario usar explosivos, el equipo de rezaga se saca a la superficie en cada ciclo de barrenación, excepto el BURMAC,S-180 el cual por tener guías que van fijas a la pared de la lumbrera se desplaza verticalmente hasta quedar del lado superior de la malla de protección.

Excavación en roca

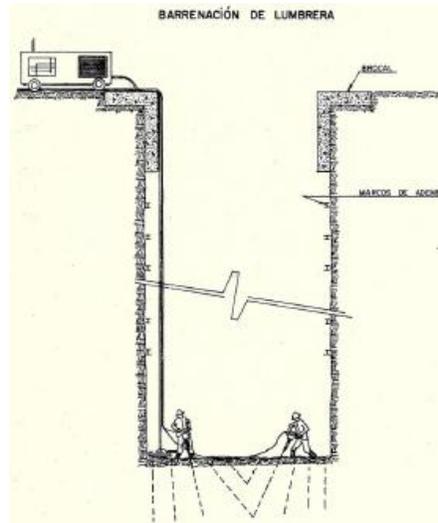
Para la excavación en este material se requiere como rutina el uso de explosivos, usándose varios diagramas de barrenación, dependiendo el grado de fracturación, tipo de fracturas de la roca y dureza de la misma.



El ciclo de trabajo en la excavación de una lumbrera con el uso de explosivos es el siguiente:

- a) Barrenación y limpieza de barrenos
- b) Carga de explosivos y conexión
- c) Retiro de personal, voladura y ventilación
- d) Bajada de equipo de rezaga y rezagado
- e) Retiro de equipo de rezaga
- f) Colocación de ademe

Esta barrenación es hecha con perforadora de piso del tipo ligero (de 12 a 20 kg de peso), usando barras de acero integral de 2.22 cm (7/8 pulg) en sus diferentes escalas (0.80 m, 1.60 m y 2.40 m). Cuando es necesario, por el tipo de cuña en el diagrama, de hacer perforaciones de 5.08 cm (2 pulg) ó 2 1/2", se utiliza acero de extensión de 2.22 cm (7/8 pulg) con cuerda.



En este diagrama la cantidad máxima de estopines de número igual que explotan al mismo tiempo nunca es mayor de 6 pzas. Equivalente según el diagrama, a 2.5 kg de dinamita.

En este diagrama los barrenos quemados se hacen en toda su profundidad de una sola vez, terminado éste, se llena de arena para evitar que se azolve, destapando con aire en cada ciclo la longitud necesaria para el cuele.

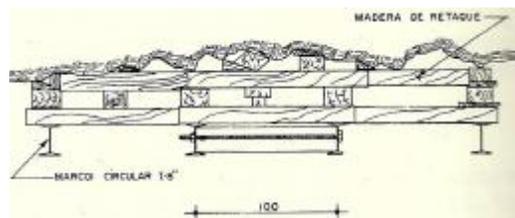
Las cuñas en "V" nunca se utilizan al inicio de la excavación de las lumbreras, pues a pesar de que todas la lumbreras, después de sacar el personal y el equipo son tapadas en el brocal con malla ciclón de 5 x 5 cm, el materia de la cuña es capaz de romper dicha protección, quedando sin control las piedras; en cambio, las cuñas en paralelo no causan estos daños. Para profundidades mayores de 40 m es recomendable el uso de la cuña en "V" por su facilidad de barrenación.

La carga de la rezaga, producto de la excavación, se lleva a cabo siguiendo los métodos ya mencionados en el subcapítulo anterior, a excepción del traxcavo, pues es un equipo muy pesado para estarlo subiendo y bajando en cada ciclo.

Para ademar las lumbreras excavadas con cualquiera de los dos procedimientos anteriores se siguen dos métodos.

A) Marcos de acero y madera de retaque

Consiste en colocar anillos de acero a cada metro, conectados entre sí por tensores, formados por tres piezas de viguetas 1-8" los cuales permiten ademar la pared de la lumbraera colocando el retaque de madera.

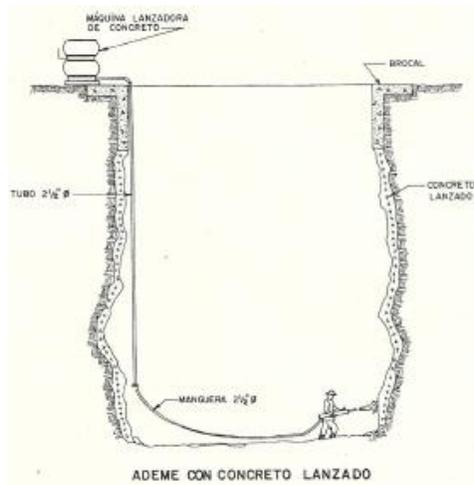


Conforme avanza un ciclo de excavación se coloca el anillo de acero. De cada 10 anillos uno va anclado al terreno, obligando con ello, que los tensores que los unen no fallen.

B) Concreto lanzado y malla electro-forjada

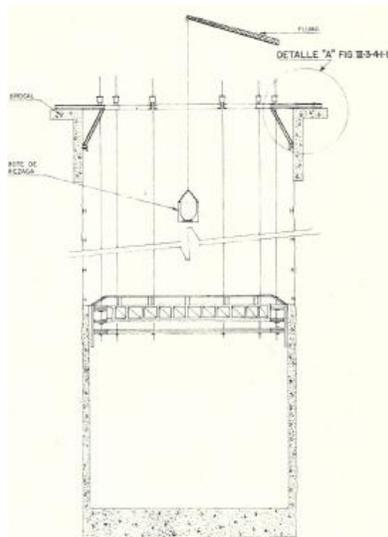
El concreto lanzado utilizado como protección de las excavaciones de lumbreras en combinación con la malla electro-forjada da buen resultado, pues además de servir como ademe protege al material contra la intemperie.

Dicho procedimiento consiste en colocar en cada ciclo de excavación, después de efectuar la rezaga, 15 cm de concreto lanzado en todo el perímetro de la lumbarrera reforzándolo con malla electro-forjada.



Revestimiento de Lumbreras con cimbras deslizantes.

Para colar las lumbreras con este método, se dejan preparaciones en el brocal para colocar las ménsulas que soportan las varillas de sostén de la forma.



El suministro de concreto se hace con una grúa parada en el brocal, la que deja una bacha de 2 m³ de capacidad

Las características del concreto que se utiliza en este revestimiento son las siguientes:

Cemento TIPO V

Tamaño máximo de agregados 1 ½"

Revenimiento 8 cm

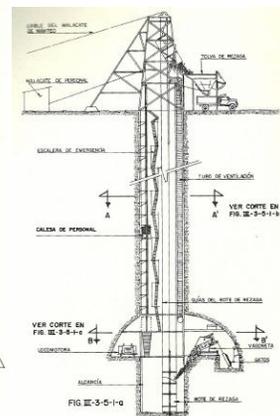
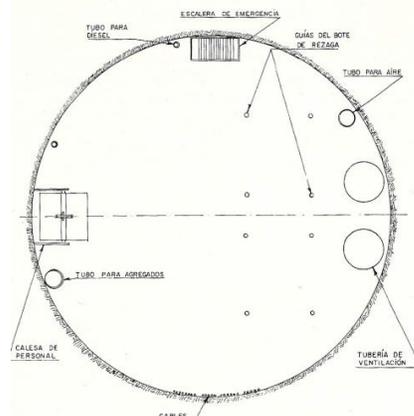
$f'c$ 300 kg/cm²

Cabe hacer notar que en las zonas donde se encuentra el encapillado de los túneles se pasa sin colar la pared de la lumbrera, dado que el procedimiento de colado lo permite, haciendo más fácil el emportalamiento del túnel.

Instalación de Lumbreras.

Las instalaciones colocadas en las lumbreras son:

- a) Tubería para conducción de agua limpia
- b) Tubería para conducción de aire a presión
- c) Tubería para conducción de diesel
- d) Tubería para bajada de agregados o balasto
- e) Tubería para ventilación
- f) Líneas de alimentación de energía eléctrica de 2 300 ó 440 Volts
- g) Torre para manto
- h) Escaleras de emergencia
- i) Elevador para personal
- j) Guías de cable de acero para los botes de rezaga
- k) Guías rígidas y sistema de descarga de los botes de rezaga
- l) Guías para el elevador para personal
- m) Botes para rezaga



III. PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN EN SUELOS BLANDOS.

III.1 ESTUDIOS PRELIMINARES.

El desarrollo actual de la tecnología de túneles en suelos blandos es un tema en el que la ciudad de México ha contribuido notablemente; aquí se han resuelto problemas muchos años antes que en otros países. AMITOS aglutina ingenieros de reconocida experiencia en este campo que han participado en todos los aspectos de su diseño y construcción; los trabajos del Prof. Enrique Tamez, las investigaciones del Prof. Raúl Marsal y los doctores Miguel Romo y Daniel Reséndiz, las obras realizadas por los ingenieros Andrés Moreno y Enrique Farjeat, el ingeniero Raúl Ochoa por su tenacidad y audacia de hacer posible el proceso de la evolución tecnológica entre otros, han hecho posible la extensa red de túneles de los sistemas de drenaje profundo y de las líneas del metro. Las técnicas e ingenio constructivo de las empresas La Estrella, SOLUM (ICA) y de Industria de Hierro son parte importante de la sólida base que sustenta ese desarrollo.

También se puede afirmar que las características y muchos de los detalles de operación de los más modernos escudos, que son construidos en Japón y Europa, responden a las dificultades que se sufrieron en los primeros túneles en la ciudad de México; esto lo lleva a uno imaginar que de haber contado con una base industrial más desarrollada, hoy estaríamos entre los países que han fabricado escudos modernos.

ASPECTOS GEOLÓGICOS DEL SITIO.

GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA.

Las contribuciones de L. Zeevaert, R. Marsal y F. Mooser constituyen el marco de conocimiento del subsuelo de la ciudad de México; Mooser con su permanente inquietud lo sigue ampliando con nuevos y más finos datos, y Zeevaert por su parte nos enseñó el detalle y calidad que debe alcanzar una exploración. De tal suerte que hoy conocer la geología de un sitio del Valle de México significa “comprender hasta sus pequeños detalles geológicos”.

PEQUEÑOS DETALLES GEOLÓGICOS.

Esta frase acuñada por Terzaghi alcanza su mayor significado durante los trabajos de excavación de un túnel, cuando sus constructores se encuentran ante una situación geológica imprevista y exclaman: “apareció”, y puede tratarse de otra roca, o de un manto de agua a presión, o una fractura o hasta de una falla geológica. Ese “apareció” deja de ser un pequeño detalle geológico para transformarse en una pesadilla que afecta a la seguridad de la obra, los costos y programas de construcción.

En un túnel en suelos blandos en la ciudad de México podría creerse que no hay cabida al problema potencial de los pequeños detalles geológicos inadvertidos porque, tratándose de una formación lacustre, la depositación de sedimentos asegura la uniformidad estratigráfica. Pero esa hipótesis simplificatoria soslaya condiciones peculiares que han sido identificadas, como: a) influencia de las formas topográficas sepultadas por los suelos en la cercanía de cerros y a orillas del lago, b) erraticidad de coladas de basalto que incluso pueden estar intercaladas con estratos de arcilla, c) presencia de causas sepultadas a diferentes profundidades, con importantes espesores de aluvión y eventualmente colmados de lava basáltica que fluyó por ellos y d) depositación de materiales hidrotermales de manantiales que brotaban en ciertos lugares.

CORTES ESTRATIGRÁFICOS PECULIARES.

Considerando que el número de sondeos que se realizan para un túnel, al igual que cualquier obra de ingeniería, desgraciadamente se reducen a un mínimo con el empeño de abatir el costo de la exploración, se corre el riesgo de que alguna de las condiciones peculiares que se mencionaron antes pueda confundir la interpretación de la estratigrafía del sitio a veces resulte imposible obtener información confiable para ese túnel.

- TÚNEL EN LA ORILLA DEL LAGO. Para explicar el riesgo de la información confusa, se podría dar una posible situación en donde la topografía abrupta original y la manera como los rellenos aluviales lo suavizaron superficialmente lleva al extremo el caso de túneles en las orillas del lago o en la cercanía de algún cerro, conocido porque sobresale de la situación de los sedimentos, o de un oculto sepultados por los rellenos.
- TÚNEL AL CENTRO DEL LAGO. Alejándose de los cerros la estratigrafía seguramente será muy singular; sin embargo, admitiendo que los futuros túneles serán más profundos, quedan las incertidumbres de las formas del fondo del antiguo lago y de los espesores de las capas duras del suelo tales como las de secado solar, que en algunas áreas podrán ser de mayor espesor y dureza, así como las de arenas volcánicas, y las menos frecuentes y conocidas, pero potencialmente las más problemáticas: los lentes de materiales depositados por aguas hidrotermales, de antiguos manantiales de aguas calientes que formaron estratos cementados con carbonos y sales, los cuales llegan a tener la dureza de una roca blanda que puede generar problemas a un escudo diseñado para atacar materiales blandos.
- TÚNEL QUE CRUZA UNA ANTIGUA ISLA. Los túneles que cruzan lo que fueron islas necesariamente tienen una condición de preconsolidación cambiante a lo largo de su eje, el tramo que corresponda a lo que fue la isla sufrirá menor asentamiento a largo plazo, la magnitud de ese asentamiento diferencial, estimada con información del Centro Histórico, puede ser de hasta 2 m en un tramo de unos 50 m, lo que producirá desajustes y eventualmente roturas. Para captar cualitativamente estas diferencias de preconsolidación, la única herramienta de que disponemos es el cono eléctrico, y para su cuantificación se requiere que la calidad de las muestras inalteradas y pruebas de laboratorio sea excelente, de lo contrario pasará inadvertida o quedará muy incierta su definición.
- TÚNEL QUE SE INTRODUCE EN ROCA. Debido a la diferencia de rigidez entre los suelos blandos y las rocas, que se traducen en un comportamiento completamente diferente ante situaciones similares, la evaluación de los asentamientos diferenciales a mediano y largo plazos de una sección muy corta del túnel en la transición suelo-roca es fundamental para el correcto diseño estructural, que debe evitar la concentración de esfuerzos en la zona de contacto geológico para reducir fracturas o deformaciones excesivas.

COMPORTAMIENTO GEOTECNICO DEL SITIO.

ASENTAMIENTOS REGIONALES.

Este fenómeno del Valle de México fue factor fundamental para definir por los años 60, la profundidad a la que convenía construir la red de túneles del drenaje profundo de la ciudad de México; así, basándose en la información disponible en ese entonces sobre el comportamiento del subsuelo, que definía que la mayor contribución al hundimiento regional se debía a la consolidación de la formación arcillosa superior, la solución lógica fue localizar los túneles en la

parte inferior de la primera formación arcillosa, ligeramente por arriba de la capa dura. Conviene aclarar que por ese entonces la veda en la perforación de pozos disminuyó la velocidad de los hundimientos y condujo a muchos técnicos a declarar que el fenómeno había disminuido en intensidad.

Pero el crecimiento de la ciudad impulsó la apertura de gran número de nuevos pozos en el sur de la ciudad, con la hipótesis de que captarían agua de la sierra del Chichinautzin y que no aumentarían los hundimientos; la información más reciente demuestra que esa hipótesis fue falsa, si bien las enormes velocidades de hundimiento en el centro de la ciudad, de hasta 33 cm/año de los años 40 ya no ocurren, en los últimos 40 años la velocidad es de unos 7 cm/año, valor más que suficiente para inducir daños graves a los edificios e instalaciones del Centro Histórico.

FENÓMENOS DE AGRIETAMIENTO.

La cada vez más frecuente manifestación de grietas en las orillas del lago con transiciones abruptas donde los materiales aluviales se apoyan sobre formaciones de roca o tobas, son causa de inquietud para la estabilidad de muchas construcciones y origen de la falsa idea de que sólo ocurren en las orillas del lago; incluso se sabe que en la época colonial se presentó una gran grieta en Pantitlán.

El continuo abatimiento de los niveles piezométricos, origen de los hundimientos regionales, es también la causa del incremento del fenómeno del agrietamiento, el cual resulta más dramático en las orillas del lago por su correlación con hundimientos diferenciales en distancias cortas.

En conclusión, éste fenómeno ya no puede soslayarse; inevitablemente afectará a muchas construcciones y entre ellas los túneles, por ello deberá estudiarse con mayor dedicación y ensayar las medidas correctivas que obligará a tomar.

METODOLOGÍA DE LA EXPLORACIÓN GEOTECNICA.

ASPECTOS BÁSICOS.

La influencia de la extracción de agua del subsuelo del Valle de México es tan importante que conlleva a que las prioridades de los suelos blandos estén cambiando, y que por ello no pueda afirmarse que se sabe lo suficiente del subsuelo para poder minimizar las campañas de exploración; si además para el proyecto en estudio los pequeños detalles geológicos son significativos, como es el caso de los túneles, la exploración del subsuelo tiene que ser cuidadosamente planeada para obtener por lo menos la información mínima necesaria. La secuencia en la que se propone llevar a cabo la exploración debe contemplar las siguientes acciones:

- ✓ Reconocimiento del sitio. Consiste en una inspección detallada a lo largo de la línea del túnel, para observar todas las peculiaridades que se presenten, tales como asentamientos diferenciales en estructuras y bardas, evidencia de agrietamiento de suelos y pavimentos, cercanía de zonas elevadas y colinas.
- ✓ Recopilación de información. Consiste en reunir todos los datos de información geológicas, curvas de igual hundimiento, datos de piezometría, perfiles de viejos sondeos, fotografías aéreas de distintas fechas, datos históricos del lugar que tengan relación con el subsuelo, comportamiento de antiguas estructuras prehispánicas y coloniales, etc.

- ✓ Sondeos de exploración. Su objetivo es definir confiablemente la estratigrafía del sitio y sus condiciones de frontera y adquirir un conocimiento preliminar de las propiedades mecánicas de los suelos. Las técnicas con que se cuenta actualmente para alcanzar estas metas son: los métodos geofísicos, los sondeos de cono eléctrico y dinámico, y los sondeos de penetración estándar.
- ✓ Sondeos de muestreo inalterado. Su meta es recuperar muestras de excelente calidad para las pruebas de laboratorio. En el proceso del sondeo debe cuidarse meticulosamente la influencia de los estratos duros; en los suelos blandos los muestreadores más adecuados son los tubos de pared delgada y para los lentes duros los tubos de rotación. El mayor cuidado que debe tenerse es que una muestra corresponda a un solo material; esto es, que en una muestra no quede intercalado un lente duro, porque daña sobre todo la parte blanda inferior.
- ✓ Pruebas de laboratorio. Su propósito es definir su variación con la profundidad de las propiedades índice y mecánicas de los suelos; esta labor usualmente se hace de manera rutinaria y por ello se pierde el objetivo original. Es importante tener en mente que la calidad de las pruebas de laboratorio define localidad del estudio geotécnico.
- ✓ Pruebas e instrumentación en campo. Estas técnicas, relativamente poco desarrolladas en nuestro país, van desde la realización de mediciones de los órdenes de magnitud de los módulos de deformación de los suelos, empleando conos eléctricos, dilatómetros y presiómetros, a la medición de las condiciones piezométricas del sitio con piezoconos y piezómetros de distintos tipos, hasta la determinación de la velocidad de propagación de las ondas para modelar con mejor detalle la estratigrafía del lugar.
- ✓ Exploración ecológica. Orientada a obtener muestra inalterada desde el punto de vista químico para determinar la presencia de sustancias que han penetrado al subsuelo, particularmente aquellas que pueden contaminar los mantos acuíferos. Adicionalmente la colocación de pozos para monitoreo de la calidad del agua a diferentes profundidades y el seguimiento de esa calidad con el tiempo.
- ✓ Sondeos de control y verificación. Esta actividad se desarrollará durante los trabajos de excavación del túnel, primordialmente cubren las condiciones imprevistas que siempre se presentan durante la excavación de túneles; consiste en la realización de sondeos adicionales para completar la información que pudiera faltar, así como de sondeos desde el interior del túnel para asegurarse paso a paso que se está controlando el trabajo de construcción.

Programa y costo de la exploración.

Al elaborar el programa de trabajos de exploración y análisis de sus costos se debe tener en cuenta que casi siempre en el diseño y construcción de un túnel se presentan detalles que requieren ser aclarados; por ello en la estrategia de realización se deben considerar recursos adicionales y disponibilidad de equipo para exploración.

Otra importante decisión se debe tomar es la estudiar desde un inicio varias alternativas de solución, con trazos diferentes, pero potencialmente congruentes, para en caso de que ocurran problemas e incluso un accidente en la construcción, se pueda en muy corto plazo implementar una solución a la situación emergente.

SONDEOS DE EXPLORACIÓN.

Exploración geofísica.

Las técnicas más usuales en la ingeniería civil siguen siendo la sísmica de refracción y la geoelectrónica de caídas de potencial y de resistividades: hasta ahora ninguna de ellas se considera verdaderamente confiable, porque la habilidad de la interpretación se mezcla mucho con experiencias previas y conocimientos generales del subsuelo del Valle.

Sondeos con cono eléctrico.

Este dispositivo es capaz de medir las resistencias a la penetración pseudoestática de punta de fricción, aunque esta última en suelos blandos es una medición poco confiable aún para conos de mayor nivel tecnológico que los construidos en nuestro país; sin embargo debe hacerse mayores esfuerzos para superar esta limitación. Así mismo debemos iniciarnos en la operación de conos capaces de medir la presión de poro y las velocidades de propagación de las ondas sísmicas.

Sondeos de cono dinámico.

Esta antigua manera de hacer sondeos con conos perdibles esta resurgiendo como una herramienta que debe mantenerse activa para la exploración, sobre todo es aplicable en las zonas de transición de resistencias altas con mucha arena.

Sondeos de penetración estándar.

Esta técnica tradicional seguirá siendo aplicable; sin embargo deberá admitirse su falta de sensibilidad en suelos blandos y por ello restringir su empleo.

SONDEOS INALTERADOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO.

Muestreo con tubo de pared delgada.

El tubo Shelby es ampliamente utilizado en nuestro país de manera satisfactoria, los errores más usuales en operación son la falta de filo de su punta y descuido en sus dimensiones para satisfacer las restricciones geométricas de J. Hvorslev. Un descuido muy frecuente e inadmisibles es el empleo de tubos oxidados que provocan alteración química a las muestras.

Muestreo con tubo doble de pared delgada.

Este tipo de muestreadores, está aventajado al tubo sencillo tradicional en calidad de muestras y simplificación del manejo y conservación de las mismas, gracias a la disponibilidad actual de tubos interiores de aluminio de espesor reducido. Con esta herramienta se han podido obtener muestras de excelente calidad.

Tubo dentado a rotación.

Este sencillo muestreador desarrollado en México ha demostrado ser de gran utilidad para rescatar muestras de lentes duros; en el caso del subsuelo de la ciudad de México, para los lentes duros, actualmente no tiene rival,

Tubos dobles a rotación.

Se engloban los tubos Denison y Pitcher que son reconocidos como los muestreadores de uso general para suelos duros; la experiencia que se ha tenido con ellos, es que fácilmente alteran la calidad de las muestras, lo cual no siempre es evidentes y por ello se les utiliza con más confianza de las que se le debe tener.

Técnica de perforación.

Un aspecto normalmente descuidado en la ejecución de sondeos, radica en la manera de ejecutar la perforación, en la que influyen la selección del tipo de broca y las características del lodo estabilizador; los errores en este aspecto influyen en la calidad de la muestra, sin importar el tipo de muestreador que se utilice.

Transporte y conservación de muestras.

Este aspecto siempre se deja en manos de personas que casi nunca entienden la importancia del cuidado que se debe tener, porque hasta dejar un tubo con muestra en su interior al sol directo durante unos minutos, para alterarla grandemente y cambiar irreversiblemente sus propiedades.

Pruebas de laboratorio.

El programa de pruebas de laboratorio se planea y se decide con la información de los perfiles de cono eléctrico, en vez de la solución tradicional de esperar a que las muestras lleguen al laboratorio. Esta manera permite precisar por adelantado la secuencia de muestreo que podrá tener algún cambio en el campo, pero éste siempre será mejor; el más frecuente será la pérdida de alguna muestra o su remoldeo, en ese caso se tomará la siguiente inferior y en alguna situación extrema se requerirá hacer otra perforación.

Usualmente se realizan pruebas índice y las convencionales de resistencia al corte en distintas condiciones de drenaje, así como pruebas de consolidación unidimensional; seguramente en el futuro se desarrollarán pruebas orientadas a reproducir las condiciones de trabajo que se inducen a los suelos durante la excavación de un túnel; así, es posible que una prueba de extrusión sea más adecuada.

III.2 ESCUDOS DE FRENTE ABIERTO

Antecedentes

La idea fundamental del escudo es que el proceso de excavación y el montaje del revestimiento primario (dovelas) deben dividirse en etapas lo más pequeñas posible, de manera que ambas operaciones sean lo más ocurrentes o simultáneas. El escudo, consiste de un cilindro de metal rígido que cubre la sección frontal del túnel y sirve para resistir las presiones del terreno mientras el revestimiento se va construyendo dentro de esta protección. El primer escudo utilizado por Brunel en 1818, bajo el Támesis, estaba previsto de un complicado sistema de plataformas de ademe que sostenían al frente por medio de tornillos, mientras que el escudo se movía hacia delante penetrando en el terreno mediante unos gatos de tornillo apoyados contra el revestimiento final. La teoría era que mediante un mecanismo capaz de moverse hacia delante a través del curso del túnel y provisto con medios para resistir la presión del terreno, tanto en el frente, como en la periferia del túnel, toda o la mayor parte de la madera de retaque utilizada en los procedimientos convencionales, pudiera ser eliminada.

El escudo-moderno de frente abierto, es un cilindro de acero rígido abierto en ambos extremos, provee facilidades a su frente para excavación del terreno y en su parte posterior para la erección del revestimiento prefabricado. El escudo es impulsado hacia delante por pasos manteniendo armonía con el avance de la excavación y el trabajo de erección del ademe primario, de manera que el frente quede bien soportado hasta que se cuele el revestimiento final.

El tuneleo con escudo ofrece las siguientes ventajas esenciales:

1. La excavación del túnel puede hacerse a sección completa.
2. Ofrece un soporte constante al terreno, en todas direcciones
3. Facilita el trabajo de construcción
4. Evita deformaciones excesivas del terreno, reduciendo los asentamientos en la superficie.

Acciones básicas:

- ✚ Estabilizar el frente. Es una acción constructiva básica, mediante la cual se *presuriza* el frente en excavación, para conservar el estado original de esfuerzos existente en el terreno.

La estabilidad puede ser por:

- Rejillas
 - Tableros verticales accionados por gatos hidráulicos.
 - Aire comprimido
 - Lodo a presión
 - y mas recientemente con el propio material
-
- ✚ Estabilizar las paredes. Consiste en colocar con ayuda del escudo, el soporte inicial del túnel, para recibir con *seguridad* los empujes que le induce el terreno vecino.
 - Tradicionalmente, este soporte se ha resuelto con el uso de anillos de dovelas

- ✚ Revestir el túnel: Constituye “*el acabado*” del propio túnel, el cual se coloca sobre su soporte inicial, y tiene la función de *protegerlo* contra las eventuales acciones destructivas derivadas de su uso.

Estructuras y dimensiones de escudos para túneles.

El principal elemento de la estructura del escudo es el forro o camisa, ésta puede dividirse en tres partes principales, en función de su rigidez y del arreglo de acuerdo a su propósito



El extremo delantero de la camisa, donde se efectúa la excavación, es sumamente reforzado, generalmente con piezas fundidas para formar la cara de corte, y su rigidez se incrementa con anillos atiesadores. Su propósito principal es facilitar el avance uniforme y conducción del cuerpo del escudo cortando al frente, además de proporcionar una distribución de las importantes presiones inducidas.

Su segunda tarea es dar una proyección adecuada a los trabajadores ocupados en la excavación, además de proporcionar un soporte continuo al frente.

El diámetro de la cara de corte debe ser ligeramente mayor que el diámetro del escudo, con objeto de disminuir la presión de tierra sobre el escudo.

La parte intermedia o tronco está destinada para el alojamiento de la maquinaria de empuje (gastos hidráulicos, tablero de operación, etc.).

La parte trasera o faldón del escudo está diseñada para soportar el túnel mientras se realiza el montaje de los segmentos del revestimiento. Algunos diseñadores piensan que el faldón debe cubrir el ancho de dos anillos completos más unos pocos centímetros del tercer anillo, sin embargo, debe considerarse que las secciones del faldón largo pueden deformarse fácilmente.

Además, algunos elementos suplementarios importantes son incorporados en el interior del escudo, la mayoría en combinación con elementos rigidizadores, tales como plataformas de trabajo montadas sobre postes atiesadores horizontales, verticales y vigas, o gatos para soportar al frente montadas sobre las paredes divisorias de las plataforma de trabajo, etc.

La adecuada construcción del escudo se complementa con maquinaria especial para la excavación, todo lo indispensable en el tuneleo con escudos.



Equipo del escudo

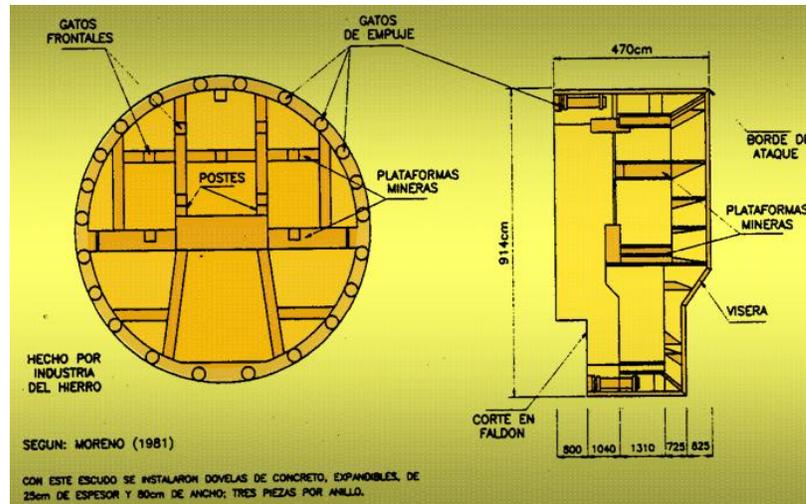
1. Gatos de empuje. El movimiento del escudo se efectúa por medio de gatos hidráulicos, colocados en la estructura, que reaccionan contra los anillos del revestimiento del túnel, previamente erigidos.

Para mover el escudo deben ser tomadas en cuentas las siguientes resistencias:

- a) La fricción del terreno contra la superficie exterior de la camisa del escudo.
- b) La fricción entre el anillo de dovelas y el faldón del escudo.
- c) La resistencia del terreno que no ha sido excavado en el frente del escudo.

La distribución de los gatos de empuje es simétrica con respecto a un eje vertical, pero con respecto a uno horizontal, presenta una mayor concentración en la parte inferior con el objeto de contrarrestar la tendencia de los escudos, a inclinarse hacia delante.

2. Gatos Frontales. Uno de los métodos para soportar el frente mientras el escudo avanza, es mediante gatos frontales que ejerzan una presión constante.



Estos gatos frontales deben llegar más allá de la cara del corte y su carrera debe ser, al menos, igual al ancho de un anillo de dovelas.

3. Plataformas Deslizantes. Son para proveer áreas de trabajo acercándolas al frente de excavación.

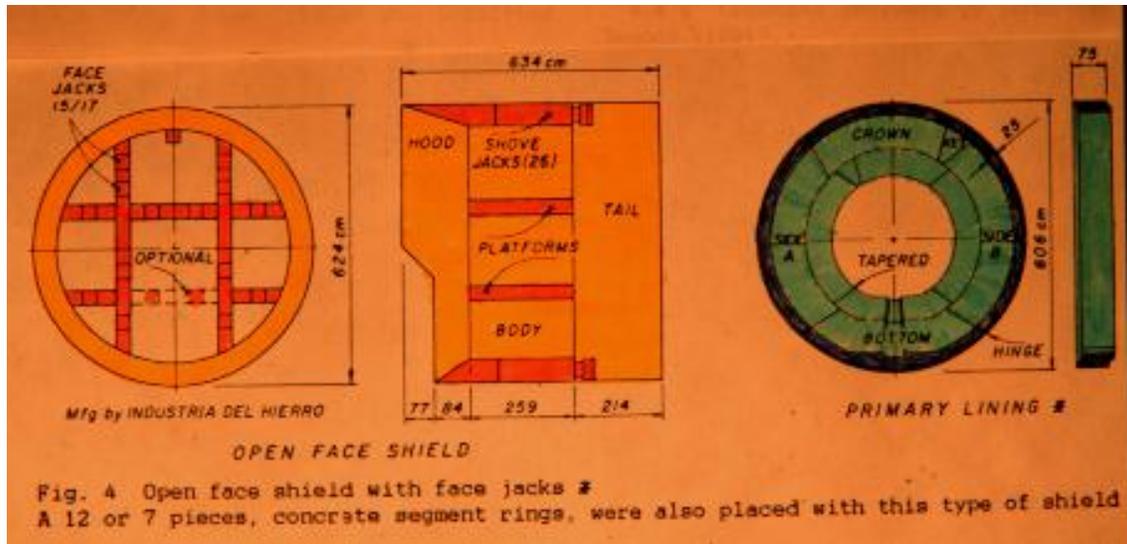
Existe una gran variedad de escudos, pero los escudos circulares son los que ofrecen la mejor resistencia a las presiones externas. La experiencia en el diseño de escudos circulares, indica que para mayor facilidad en el manejo, la relación longitud y diámetro debe ser 0.75 o menor, ya que a menor longitud es mayor la dificultad de mantenerlo alineado, pero es más fácil girarlo. Los escudos más largos requieren presiones más elevadas en sus gatos de empuje. Es experiencia común que los escudos giran alrededor de su eje longitudinal, éstos se debe a la estratificación oblicua, a presiones externas asimétricas, o a una excavación no uniforme. La corrección de este giro se hace mediante el uso de estabilizadores (aletas).

EXCAVACIONES EN TUNELES CON ESCUDO DE FRENTE ABIERTO

Ciclo de operación y rendimientos

El propósito de establecer y anotar el ciclo de operaciones, es el de poder realizar una comparación de costos de una fase de un proyecto y del proyecto completo. Esta información puede entonces ser utilizada para estimar los costos de futuros proyectos.

Los “Registros del Ciclo de Operaciones”, también permiten conocer cada día si la productividad de trabajo está funcionando como se estimó, y a la vez indican cuáles fases del trabajo necesitan de una atención especial.



Dentro de las operaciones del túnel, el ciclo de operación se compone de varias etapas de trabajo:

1. Excavación y rezaga
2. Ademe del frente
3. Levantar compuerta de rezaga
4. Empuje del escudo
5. Limpieza de la plantilla
6. Colocación de segmentos
7. Apretar tornillos entre segmentos
8. Bajar compuerta de rezaga.

La excavación tiene lugar en el frente y, con relación a la seguridad es la actividad más riesgosa en el tuneleo con escudos.

El tuneleo con escudo requiere excavar la sección completa, lo que no es una tarea fácil considerando los escudos que se utilizan en terrenos de baja resistencia y que se requiere estabilizar áreas que exceden los 50 m².

La herramienta empleada para la excavación del frente, depende del grado de dureza del suelo, siendo común el uso de martillo neumático. Esta excavación se inicia al terminar un empuje del escudo y es simultánea a la colocación del último anillo.

La estabilización del frente se logra a base de tableros de madera, que son detenidos por los gatos frontales.

Una mampara en la parte posterior del escudo, que retiene el material producto de la excavación es bajada para permitir el acceso a una máquina rezagadora con banda transportadora. Esta deposita el material en botes o cajas especiales, que posteriormente se llevan con locomotoras a la lumbrera, donde son tomados por un malacate para, en superficie, ser vaciados a una tolva y de ahí a camiones volteo.



Paralelamente a la excavación y rezaga, en el perímetro interior de la camisa del escudo, se hace una “ranura”, para evitar que la camisa encuentre demasiada resistencia del suelo durante el avance.

Una vez terminada la excavación y rezaga y ademado el frente, se levanta la compuerta de rezaga para llevar a cabo el montaje del escudo.

Esta es una operación muy delicada del ciclo, ya que es la que define los alineamientos y pendientes proyectadas, por lo cual es muy importante realizar el avance con los gatos adecuados.

Terminado el avance se limpia la plantilla dentro del faldón del escudo para poder proceder al montaje del revestimiento primario (segmentos prefabricados de concreto reforzado, “dovelas”). Cada una de las piezas se instala por medio de un brazo erecto de accionamiento hidráulico montado en la parte posterior del escudo; dicho brazo erector puede girar alrededor de su eje horizontal a cualquier posición que se requiera y puede extenderse o retraerse (en su extremo tiene un dispositivo especial para sujetar al segmento por instalar).

A medida que el anillo se va ensamblando, los gatos de empuje se van retirando; a continuación se aprieta la tornillería que une los segmentos entre sí y con el anillo anterior. Terminado lo anterior se baja la compuerta de rezaga para iniciar otro ciclo.

Los anillos ya montados tienden a adoptar una forma oval, y no circular como lo pide el proyecto, por lo que se hace necesario colocar un par de puntales dotados con gatos mecánicos para su ajuste; este apuntalamiento se conserva hasta después del inyectado del cual se hablará más adelante.

Es una práctica común en túneles construidos con escudos, para minimizar asentamientos en la superficie y lograr una distribución de presiones del terreno alrededor de la camisa del escudo, el llenar con gravilla el espacio anular alrededor del ademe, ocasionado por el espesor del faldón al avanzar el escudo.

La gravilla es introducida a través de los agujeros de inyección, previstos en los segmentos de ademe.

Las ventajas de la inyección de gravilla son:

- a) La gravilla puede mantenerse hasta el faldón del escudo.
- b) Se puede ir colocando simultáneamente con el avance del escudo.
- c) Es más barata que una inyección de cemento.
- d) Forma un relleno efectivo.

El tamaño de la gravilla debe ser uniforme (4 a 6 mm).

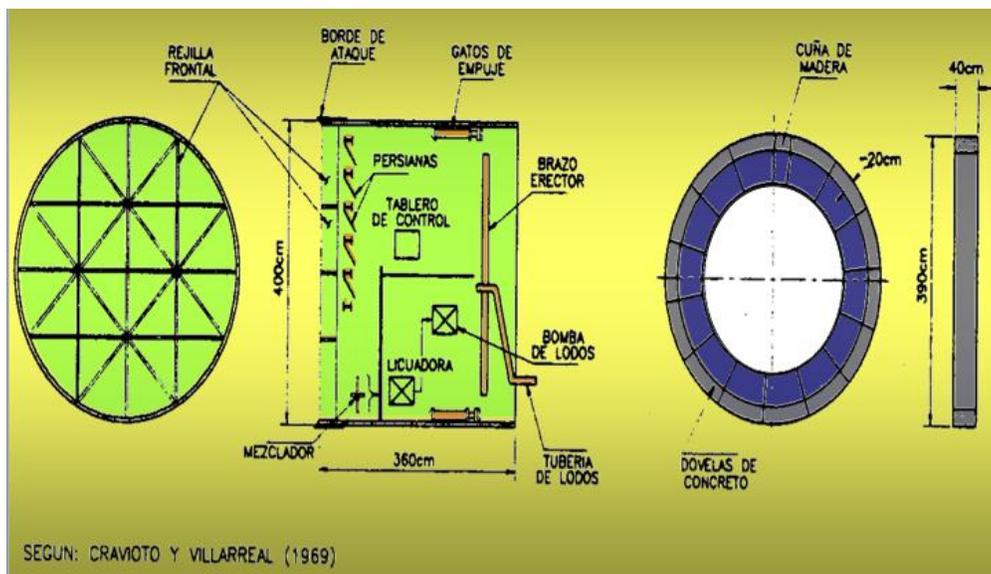
Generalmente, a la gravilla le sigue una inyección de lechada de cemento, que consolida al relleno previo de grava llenando todos los huecos.

La inyección es una operación muy importante, por lo que se requiere de experiencia y criterio para elegir, a la vez, la consistencia y tamaño del grano apropiado y también la mayor presión de inyección permisible que no llegue a causar daños.

Los objetivos de la inyección son:

1. Establecer un relleno compacto.
2. Estabilizar el terreno, circundante, reduciendo la presión del suelo contra el ademe del túnel.
3. Actúa como sello para el agua.

El objetivo inmediato de la inyección primaria es rellenar el espacio anular. Para la inyección secundaria, cuyo objeto es sellar y estabilizar, se requiere esperar a que los movimientos del terreno debidos a la construcción del túnel, finalicen y los asentamientos alcancen su condición de equilibrio.



RENDIMIENTOS

El avance máximo mensual obtenido en excavación con escudos en el Interceptor Central, del Drenaje Profundo, ha sido de 180 m; el máximo es de 9 m diarios y el promedio general de 5.50 m/día.

Abatimiento del nivel freático

En el Interceptor Central, previamente al paso del escudo, fue necesario abatir el nivel freático. Para ello se realizaron perforaciones de 60 cm de Ø espaciadas 15 m y dispuestas al trespelillo sobre dos líneas paralelas al eje del túnel, y a 6 m a cada lado de éste. Las perforaciones se llevaron hasta un nivel bajo la plantilla del túnel, igual a dos veces el diámetro de éste; y en ellas se instalaron bombas sumergibles. Cada línea de perforaciones tuvo 160 m de longitud, repartidas en dos tramos: 60 m atrás del escudo y 100 m adelante de éste.

Las perforaciones se ademan con tubería ranurada en la zona que interesa abatir y tubería lisa en el resto de la perforación. El diámetro del ademe es 273 mm (10 $\frac{3}{4}$ pulg) y entre éste y la pared del pozo se tiene un filtro de arena graduada en la zona permeable. Arriba del filtro se coloca un sello de bentonita y el resto del pozo se rellena con material producto de la perforación.

Para conocer la presencia de cargas hidrostáticas en lentes aisladas que no pueden ser drenadas por los pozos, se instalan piezómetros del tipo abierto o Casagrande, a la profundidad de la plantilla del túnel. Además, con objeto de conocer los movimientos superficiales, se instalan bancos de nivel al eje del túnel y a ambos lados del mismo.

Topografía

El uso de sistemas laser en la construcción de túneles sirve no sólo para reducir costos, sino para mejorar la exactitud, reducir pérdidas y proporcionar mayor seguridad.

En túneles con escudo en suelos blandos, el uso de un laser con tarjetas computadas elimina mucho tiempo de verificación después de cada empuje ayudando a acelerar el ciclo. El escudo puede ser dirigido únicamente por el operador, y el turno de topógrafos debe concentrar su atención a comprobar constantemente la colocación del laser, tarjetas y puntos intermedios (o puntos de control), sin presión de ninguna especie y sin interferir con las actividades del ciclo .

El corazón de un laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) consiste en un tubo de plasma helio-neón que produce una poderosa monocromática viga de luz concentrada. El tubo está sellado de fábrica, protegiéndolo así contra basura, polvo, humedad, vibración y otros problemas asociados con el uso en el túnel. Los lasers pueden operarse normalmente con corriente eléctrica en 12 voltios D.C. ó 120 voltios A.C.

Una gran cantidad de lasers y montajes se consiguen comercialmente, pero la combinación más conveniente proyecta la luz del laser a través del sistema óptico de un teodolito, de manera que ángulos horizontales y verticales puedan girarse convenientemente con precisión.

La combinación laser-teodolito se monta en un soporte especialmente diseñado, fijo al revestimiento primario.

El soporte se diseña de manera que el laser-teodolito se coloque en tres dimensiones y la luz laser precisamente orientada en azimut (dirección) y deflexión (pendiente). La posición del laser-teodolito y la orientación de la luz laser se calculan con equipo de procesamiento electrónico de datos y es registrado en una computadora. La luz laser se dirige continuamente a dos tarjetas fijas en el escudo. En las intersecciones de la luz con las tarjetas, aparecen puntos rojos brillantes. Conforme el escudo se mueve, los puntos rojos trazan trayectorias en las tarjetas.

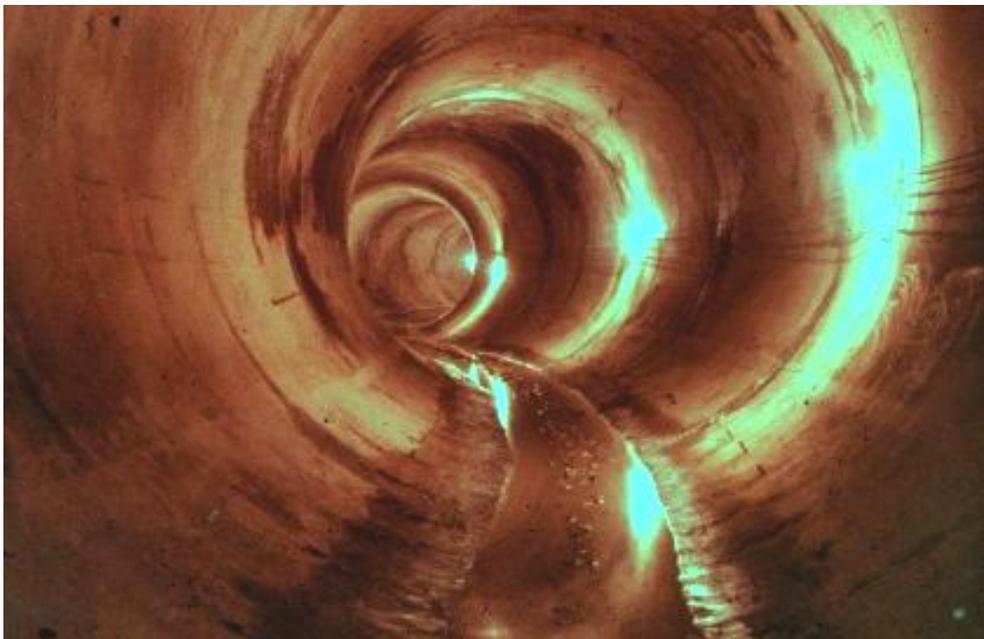
La posición relativa de la trayectoria marcada por el punto comparada con la trayectoria calculada, indica la desviación del escudo de la posición deseada.

En una sección del túnel en tangente, la trayectoria calculada es una línea recta inclinada. En una sección del túnel en curva, la trayectoria calculada, se aproxima a una hipérbola. A lo largo de la trayectoria graficada, se marcan estaciones a ciertos intervalos para referencia.

En el techo del comportamiento del operador del escudo, se montan dos tarjetas, (se usan dos tarjetas, en lugar de una, por la misma razón que un rifle tiene mira trasera y delantera) las tarjetas se colocan en soportes con pasadores y pueden girar hacia arriba o hacia abajo según estén en uso o no. los soportes también pueden moverse lateralmente alrededor del centro del escudo para compensar el giro del escudo. Para una rápida revisión del giro y pendiente del escudo, el operador puede usar una plomada y una placa graduada en grados de giro y porcentaje de pendiente.

Si por alguna razón el laser se mueve, debido al revestimiento o por accidente, la luz no pasa a través de los puntos de control y el operador no verá el punto rojo. Un punto de control es una placa perforada que se coloca entre el laser y el escudo; la luz del rayo debe pasar en todo momento a través del orificio y se colocan normalmente tres puntos de control.

Ocasionalmente la luz puede no alcanzar las tarjetas debido a movimientos de los puntos de control; en cualquier caso, el laser y los puntos de control, deben ser revisados para corregir la adecuada posición y orientación.



III.3 AIRE COMPRIMIDO EN TUNELES

Antecedentes

El empleo de aire comprimido en excavaciones subterráneas, es de antaño conocido. Varios túneles subfluviales y muchas pilas de puentes en Inglaterra, Estados Unidos y otros países industrializados se han realizado bajo aire comprimido. Actualmente, por lo menos tres túneles en Japón se realizan con este sistema y una de las aplicaciones más recientes fue la de la excavación del Metro de San Francisco (BART) a lo largo de una de sus principales avenidas (Market Street).

Cabe mencionar que todas estas experiencias en el extranjero han sido al nivel del mar o cercanos a éste, por lo que hubo de estudiar, con un grupo de médicos expertos en la materia, las consecuencias que podría tener en el trabajador a la altitud de la ciudad de México.

A continuación se describe brevemente el equipo necesario para la construcción del túnel y las medidas de seguridad que fueron tomadas, considerando que ésta es la primera obra de este género que se realiza en México.

Equipo necesario

Por aire a baja presión se entiende aire comprimido a una presión algo mayor que la atmosférica, introducido al túnel y confinado ahí dentro durante la construcción, para contrarrestar la tendencia del agua y del terreno a fluir dentro de la excavación.

La presión a la cual el aire debe ser entregado en el túnel y sostenida en éste, es función de la carga hidrostática en el mismo, las características del terreno y el tamaño del túnel. Si el terreno se cierra y tiene alguna cohesión, la presión utilizada para conservar el túnel seco será aproximadamente igual a la carga de agua sobre la plantilla del túnel. Si el terreno es abierto, esta presión no puede usarse generalmente, pues se tiene el peligro de romper el terreno y causar una salida del aire. Usualmente en este caso, la presión empleada equilibrará la carga de agua tanto en la clave como al nivel medio del túnel; consecuentemente, la parte inferior del túnel no puede conservarse seca con presión de aire. En suelo blando con poca o ninguna cohesión, a través del cual el escudo puede manejarse fácilmente, la presión del aire puede ser menor que la carga hidrostática mientras no se lleve a cabo ningún trabajo adelante del escudo, la presión se aproximará a la combinación de las presiones del agua y el terreno.

Para la excavación y construcción del túnel en aire comprimido, se requieren los siguientes elementos:

- AEquipo para aire comprimido a baja presión y las tuberías para llevarlo a la cámara de trabajo.
- BEquipo para aire comprimido en alta presión necesario para rompedoras, equipo de inyección, bombas, etc.
- CPlanta de potencial del sistema hidráulico.
- DSuministro de agua para limpieza y otros servicios.
- EEquipo de alumbrado en el túnel.

- FSistema de comunicaciones de los servicios desde superficie al túnel.
- GPlanta de bombeo.

HTransportación del equipo.

IEquipo de excavación.

JPlataforma de trabajo inmediatamente después del escudo.

KEquipo utilizado para apretar la tornillería de los segmentos.

LEquipo para inyección de gravilla.

MEquipo para inyección de lechada de cemento.

NMampara y esclusas.

O Los dispositivos de seguridad para usarse en aire comprimido.

Se muestra un esquema de las instalaciones generales en superficie, en la lumbrera 9 y en el interior del túnel. Una mampara estanca a través de la cual se pasa, por intermedio de esclusas, y que separa la cámara de trabajo bajo aire comprimido del resto del túnel. Esta mampara de acero permite, además de soportar la presión de aire comprimido, introducir a través de ella personal, materiales y líneas eléctricas, hidráulicas, de aire a alta presión, de comunicación. Etc.

Una esclusa de personal en donde se realiza la compresión de los trabajadores para poder entrar a la cámara de trabajo y la descompresión para salir de la misma.

Una esclusa de rezaga que sirve para el paso de materiales y equipo a la cámara de trabajo.

Se ha procurado que la cámara de trabajo sea lo más larga posible, con objeto de que las oscilaciones de presión sean insignificantes. El volumen de aire a presión necesario en esta zona puede determinarse a través de fórmulas empíricas, que toman en consideración las condiciones del suelo y el tamaño del túnel. Para este trabajo se requerirá de un volumen aproximado de 5,000 pies cúbicos de aire libre por minuto que será suministrado por cuatro compresores de 2,200 PCM de capacidad cada uno, trabajando a una presión de 30 libras por pulgada cuadrada.

En el suministro de aire existen dos aspectos que deben cuidarse: la temperatura el aire dentro de la cámara de trabajo y zona de esclusas y la concentración de contaminantes en el aire; para lo cual se dispone de enfriadores y separadores de aceite a la salida de los compresores que controlan estos dos aspectos.

Instalaciones médicas

Los estudios realizados por el cuerpo médico para determinar los efectos del aire comprimido a la altitud de la ciudad de México, han culminado en el establecimiento de normas de seguridad e instructivos de operación muy detallados que se están poniendo al alcance del personal, mediante cursos de adiestramiento y capacitación.

El personal aprobado para trabajar en aire comprimido, además de cumplir con estos cursos, deberá haber recibido el visto bueno del cuerpo médico que estará vigilante día y noche durante los trabajos de excavación.

Los requerimientos de buena salud y condición física son especialmente rigurosos, ya que las enfermedades originadas por una mala descompresión pueden poner en peligro la vida del trabajador.

En la lumbrera 9, el personal médico cuenta con las instalaciones necesarias para dar servicio a todo el personal durante el desarrollo de la obra. En el sitio existe una cámara hiperbárica que dará atención a los trabajadores que hayan sufrido algún accidente dentro del túnel.

Normas para descompresión

Los fundamentos para la descompresión de los trabajadores bajo aire comprimido, se encuentran contenidos en las tablas de descompresión promulgadas por el Departamento del Trabajo de los E.U. en 1971. Estas tablas fueron desarrolladas para trabajos al nivel del mar, con presión atmosférica normal. A esta presión se realiza una rápida liberación del nitrógeno disuelto en el cuerpo, que es una de las causas de los malestares de descompresión.

El principio en el que descansa la prevención de los malestares de descompresión, es solamente una descompresión suficientemente lenta, para que el exceso de gas adquirido por los tejidos del cuerpo durante la compresión y trabajo en aire comprimido sea transportado fuera de ellos sin la formación de perjudiciales burbujas.

Se ha demostrado que para la absorción y liberación del gas, una fórmula exponencial describe ambos procesos, la ecuación empleada para el cálculo de la presión en cualquier tejido es una función del tiempo, es:

$$\text{Compresión: } P_t = P_o + (P_a - P_o) (1 - e^{-kt})$$

$$\text{Descompresión: } P_t = P_o + (P_o - P_a) (1 - e^{-kt})$$

Donde: P_t = Presión del tejido (psi)

P_o = Presión atmosférica ambiente (psi)

P_a = Presión ambiente durante la exposición en esclusas

t = Tiempo de la exposición

k = Constante de tiempo

Conocida la constante de tiempo para algún tejido, la presión en el mismo podrá calcularse para un tiempo cualquiera. Las cartas de descompresión generalmente toman en cuenta los tejidos adiposo y medular y han sido derivadas de dicha relación para proveer un decremento seguro de la presión en los tejidos como función del tiempo.

Las tablas desarrolladas permiten una variación lineal de presión o la de una presión ($P - P$) durante el proceso de descompresión.

La presión permisible para descompresión al nivel del mar se ha estimado para ser aproximadamente 16 psi. Se han desarrollado nuevas tablas para su utilización en la ciudad de México, las cuales cambian la presión permisible ya mencionada, así como la cantidad de gas absorbido y liberado durante la compresión y descompresión.

El tiempo total requerido para la descompresión en la ciudad de México, está relacionado a la presión equivalente al nivel del mar. Esta presión es tal que el tiempo de descompresión derivado de tablas estándar para el nivel del mar es el mismo para la cámara de trabajo en la ciudad de México y está expresado por la siguiente fórmula.

$$P_{is} = P_a / P_{atm} \cdot P_{im}$$

$$P_{is} = n \cdot P_{im}$$

Donde: P_{im} = Presión ambiente de trabajo ó exposición (psi)

P_{is} = Presión de trabajo equivalente al nivel del mar (psi)

P_{atm} = Presión atmosférica en la ciudad de México (psi)

P_a = Presión atmosférica al nivel del mar (psi)

n = Relación de presiones atmosféricas.

A la altura de la ciudad de México (2246 m.), se tiene una presión atmosférica de 11.17 psi, al nivel del mar la presión es de 14.7. psi.

$$\text{Por lo tanto: } P_{is} = 17.4 / 11.17 \cdot P_{im}$$

$$= 1.557 \cdot P_{im}$$

$$n = 1.557$$

Las tablas estándar para descompresión al nivel del mar, han sido desarrolladas considerando la reducción de la presión de tal forma que ésta sea una relación aceptable entre la presión absoluta del gas en los tejidos y la presión atmosférica absoluta.

Las reducciones de presión, proceden de una simple variación lineal, tomando en cuenta la presión máxima de aproximadamente 16 psi.

Como se mencionó anteriormente, la presión equivalente se basa en los puntos establecidos por la carta estándar. Para el desarrollo de nuevas tablas, podrá efectuarse una interpolación lineal entre puntos conocidos.

Las tablas de descompresión para periodos de trabajos de 6 a 8 horas, o más fueron encontradas de esta manera. Las etapas de descompresión y tabla de descompresión para exposiciones repetidas, también fueron derivadas de las estándar al nivel del mar.

Estas tablas indican que la presión ambiente en la esclusa de personal, no se reduce en proporción uniforme, sino en una serie de pasos, donde la presión se mantiene constante durante un tiempo específico y entonces se aumenta la velocidad al próximo paso inferior o superior, donde nuevamente es mantenida constante por algún tiempo.

TABLA DE DESCOMPRESIÓN											
Tiempo de la Descompresión en minutos											
PRESIÓN DE TRABAJO KG/CM²	PEROIDO DE LABOR (HORAS)										
	1/2	1	1 1/2	2	3	4	5	6	7	8	+ 8
0.6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
0.7	6	6	6	6	6	6	6	6	12	12	24
0.8	7	7	7	7	7	7	13	21	35	55	61
0.9	8	8	8	8	9	12	33	48	56	61	73
1.0	8	8	10	12	13	28	56	68	77	88	112
1.1	8	8	12	19	24	53	76	86	96	116	125
1.2	11	11	19	25	43	76	102	111	120	133	140
1.3	12	14	25	29	58	96	121	128	134	140	156
1.4	14	17	30	36	76	111	132	145	147	150	171
1.5	16	24	33	45	101	132	149	159	160	172	188
1.6	18	29	39	65	109	147	169	172	164	192	208
1.7	20	36	44	86	128	167	182	197	207	218	231
1.8	22	40	59	99	152	181	197	220	226	236	254
1.9	24	44	64	113	172	200	224	236	244	256	277
2.0	28	49	73	128	180	207	227	244	256	266	281
2.1	32	50	85	142	185	215	235	249	261	272	293
2.2	36	50	99	147	191	218	245	260	265	272	297
2.3	43	65	115	154	200	232	255	258	271	273	297
2.4	44	70	130	164	207	240	262	269	280	285	310
2.5	48	80	146	185	224	256	280	292	-	-	-
2.6	55	89	160	201	244	274	305	319	-	-	-

Operación del sistema

Una vez revisados todos los elementos que forman el sistema de aire comprimido, se desarrolló una etapa de pruebas de acuerdo con un programa que incluía los siguientes puntos:

- aControl de presión.
- bControl de temperatura.
- cArranque del generador de emergencia.
- dArranque de compresores.
- ePérdida de presión en el túnel suspendiendo el suministro de aire.
- fControl de ventilación para la cámara de trabajo.
- gPrueba del sistema contra incendio.
- hPérdida de presión en el túnel sin ventilación.
- iSimulacros.

Esta serie de pruebas sirvió para ajustar el comportamiento de los diferentes elementos, al mismo tiempo que permitió comprobar la validez de los cálculos teóricos efectuados.

La excavación del túnel con aire comprimido se inició a fines del mes de Noviembre de 1973 y después de 3 meses de operación se pueden proporcionar los siguientes datos:

Personal examinado 728

Personal examinado con rayos x 562

Personal analizado clínicamente 587

Personal sometido a prueba de compresión 461

En la esclusa de personal 7144

Trabajadores con molestias durante el trabajo 47

Trabajadores con molestias durante la compresión 144

Trabajadores que por molestias han requerido tratamiento 6

Accidentes promedio de la excavación 11

Avance promedio de la excavación 6 anillos/día = 4.50 m/día

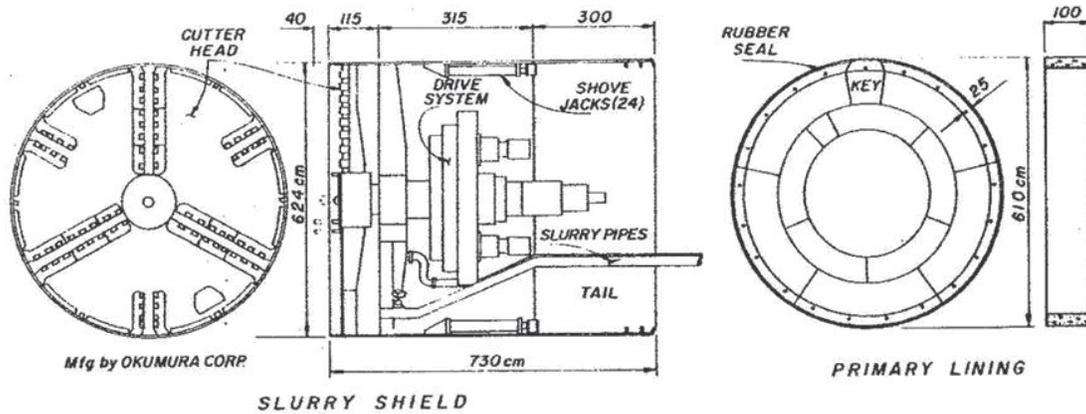
Avance total de la excavación con el sistema 465 anillos = 350 m

Cabe mencionar que el pequeño número de trabajadores que han requerido tratamiento en la cámara hiperbárica revelaron síntomas pertenecientes al grupo de enfermedades respiratorias y en todos los casos de leves consecuencias.

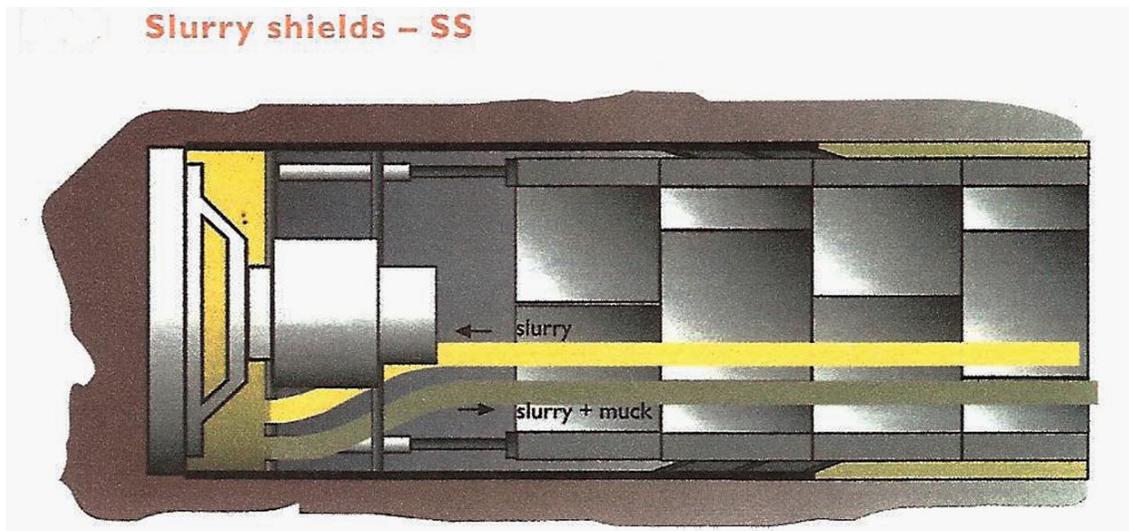
Por otro lado, las condiciones de trabajo en el frente de ataque mejoraron radicalmente con la instalación del sistema de aire comprimido teniéndose a la fecha avances en la excavación comparables a los tramos de los Interceptores que se encuentran en condiciones óptimas.

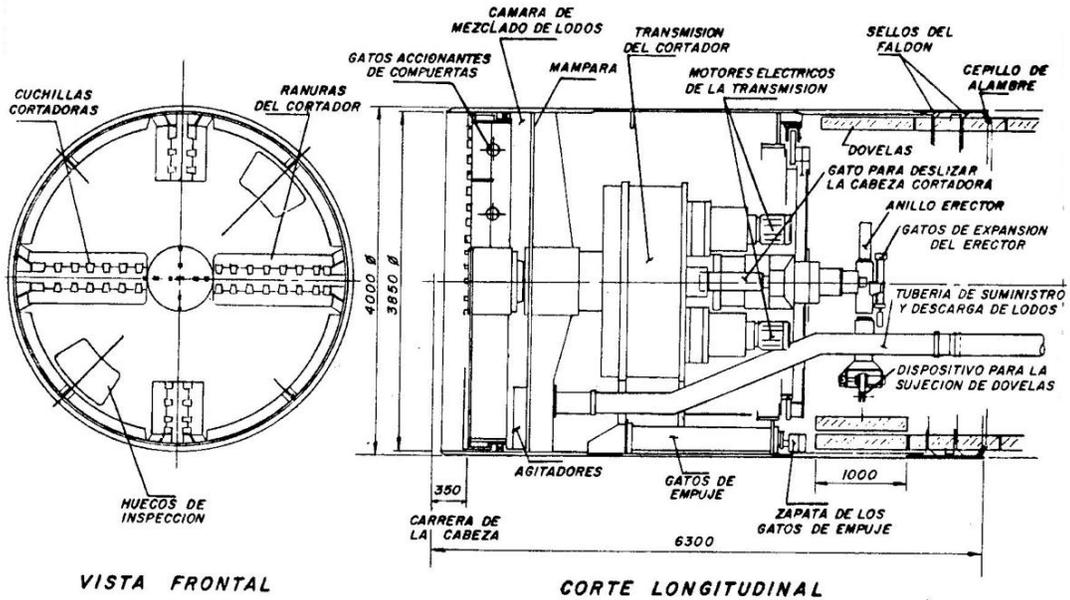
III.4 ESCUDOS CON FRENTE PRESURIZADO

El frente del túnel es soportado por la cabeza cortadora en primera instancia. Adicionalmente es soportado por lodo presurizado que se almacena en la parte frontal del escudo. Una mampara metálica estanca que separa el cuerpo del escudo y la visera sirve para formar la cámara de trabajo, en donde se almacena el lodo y se mezcla con el suelo que va siendo excavado. Adicionalmente, la cabeza cortadora provee soporte mecánico al frente.

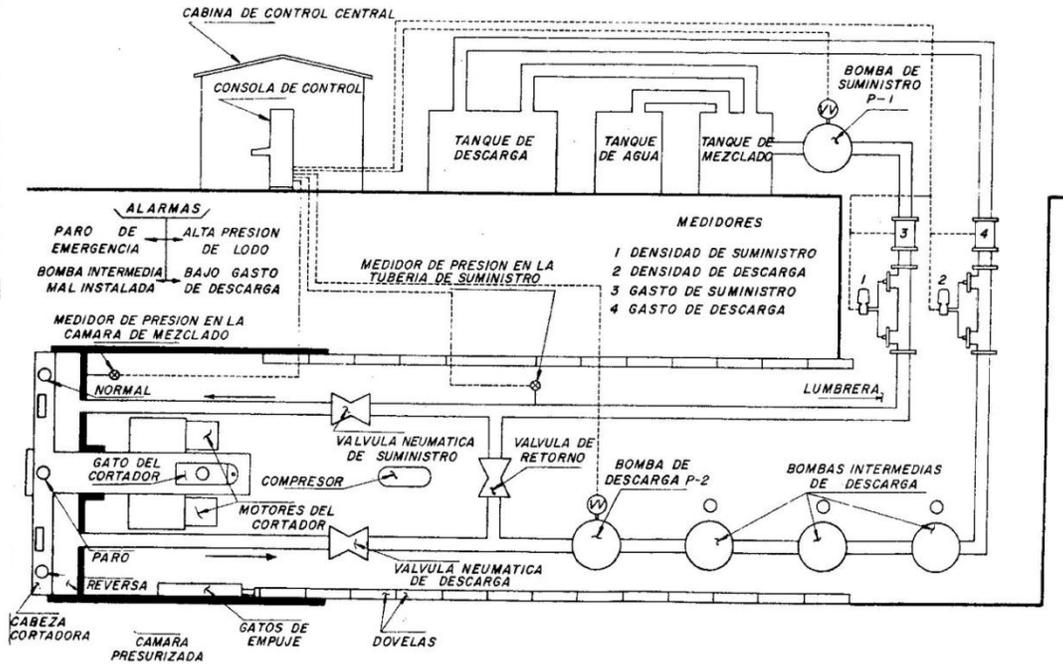


Slurry shield





ACOTACIONES, EN mm



VV = VELOCIDAD VARIABLE

Para realizar la correcta operación del escudo, de manera que se mantenga la presión requerida en el frente en todo momento, estos escudos requieren de un sistema de circulación de lodos controlado por una computadora central, el cual monitorea el suministro de lodo a través de una bomba acoplada a una tubería de alimentación y su extracción respectiva a través de una tubería de descarga, a la que se acoplan las bombas de lodos necesarias para transportar a lo largo del túnel y hasta la superficie, la mezcla de lodo con el suelo excavado generalmente se recupera el lodo separándolo del material excavado por medio de tanques de sedimentación o se procesa por medio de un complejo sistema de separación y secado que permite preservar la ecología de los lugares en los que dicho material es depositado para su desecho final.

La cabeza cortadora realiza la excavación total del frente girando 360 grados, y puede rotar en ambos sentidos, accionada por una gran flecha y transmisión del tipo planetario. El sentido de la rotación se programa en cada avance del escudo y tiene como finalidad contrarrestar la tendencia natural del escudo a girar a causas de fuerzas de fricción del terreno y de la distribución de los pesos de los distintos componentes que lo integran.

Para controlar la admisión del suelo excavado, la cabeza cortadora cuenta con ranuras provistas de compuertas accionadas hidráulicamente, las cuales limitan la apertura en función de las propiedades del subsuelo atravesado.

La velocidad de excavación esta en función de la velocidad de empuje de los gatos de avance del escudo y de la capacidad de transporte del sistema de circulación de lodos.

Este tipo de escudos cuenta con un sistema de sellos perimetrales en el faldón o cola, el cual resulta indispensable para el control de la presión en el frente de la excavación, pues impiden la fuga del lodo contenido en la cámara de trabajo, al mismo tiempo que impiden la fuga de los materiales de inyección que requieren aplicarse en la parte trasera del escudo, con objeto de evitar o reducir los asentamientos del suelo circundante del túnel excavado. Los sellos se fabrican en hule y en alambre de acero y pueden formar un conjunto.

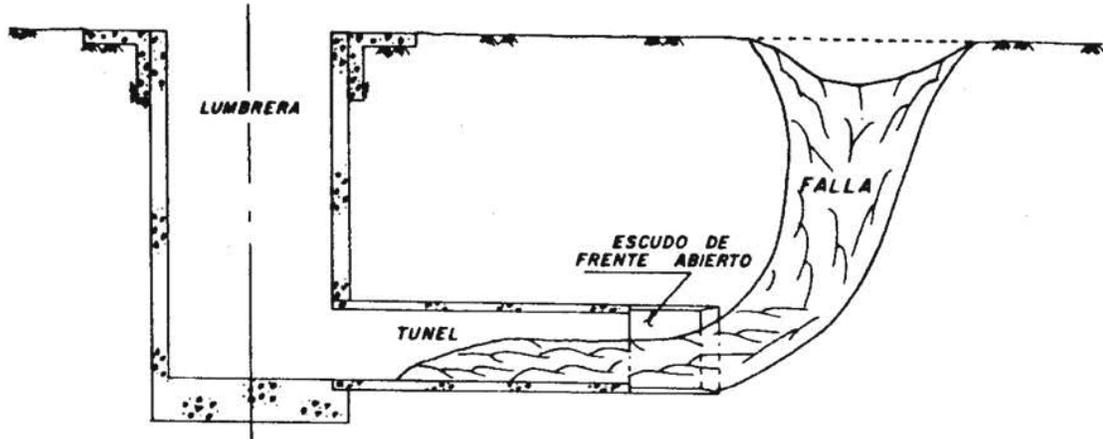
Para la colocación del revestimiento, debido a la localización de las tuberías e instalaciones alojadas en el cuerpo del escudo, se emplean erectores de dovelas del tipo anillo, siendo una tecnología que ha sido desarrollada especialmente para dicha actividad.

Las dovelas que conforman el revestimiento, generalmente se fabrican de concreto reforzado de alta resistencia y tolerancias muy estrictas, pues es de suma importancia que en combinación con sellos perimetrales de neopreno o materiales similares, reduzcan al máximo las posibles filtraciones de agua subterránea. Además, deben garantizar una buena estructura de reacción para los gatos de empuje.

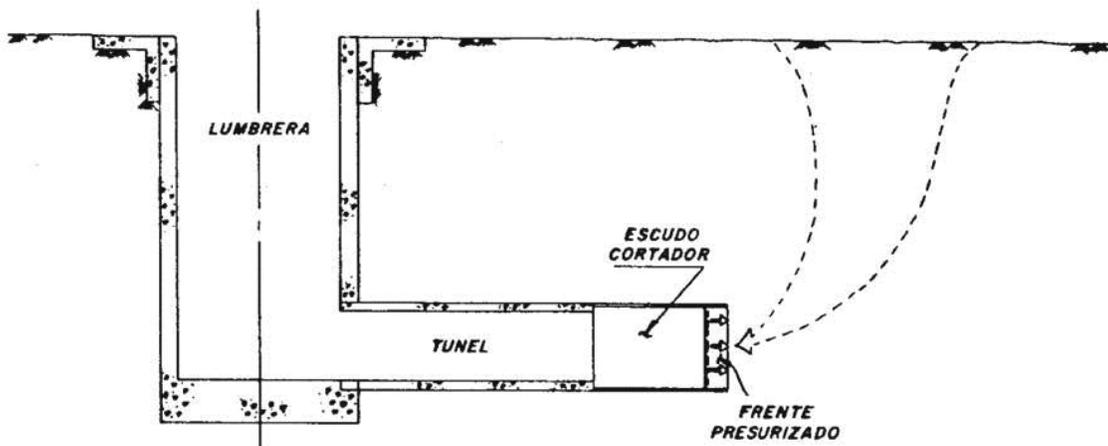
La tecnología de escudos de frente presurizado con lodos antes descrita, fue desarrollada por empresas japonesas. Existe una variante a dicha tecnología que es muy importante de mencionar y que fue desarrollada por empresas alemanas, conocida como Hydroshield. La forma de lograr la presurización del frente en este caso es mediante el empleo de una esclusa o diafragma localizado en la cámara de trabajo, operado con aire comprimido el cual regula la presión necesaria para estabilizar.

Es una practica normal que en los escudos de frente cerrado se instale una esclusa de aire comprimido, que funciona como un sistema adicional para trabajos de mantenimiento a la cabeza cortadora o en casos de emergencia; si por alguna razón se requiere hacer separaciones a la

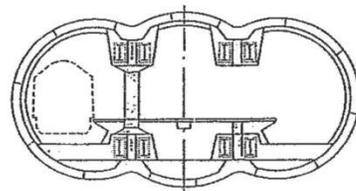
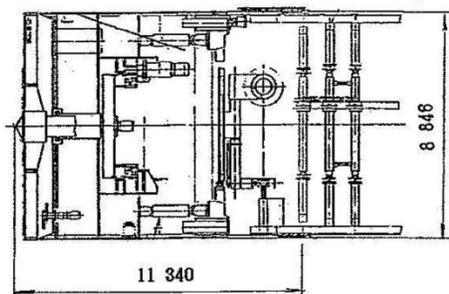
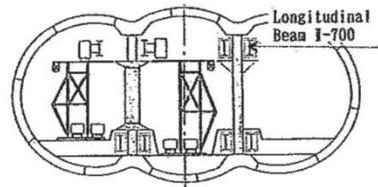
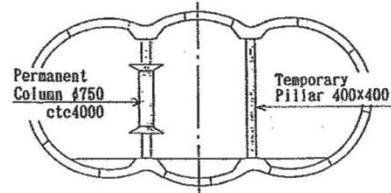
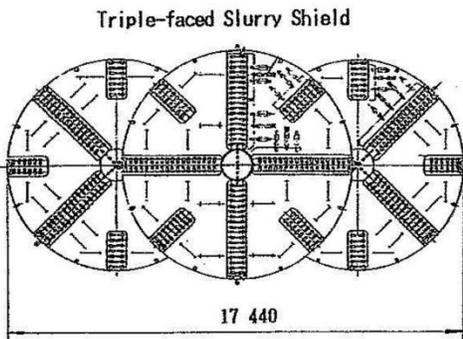
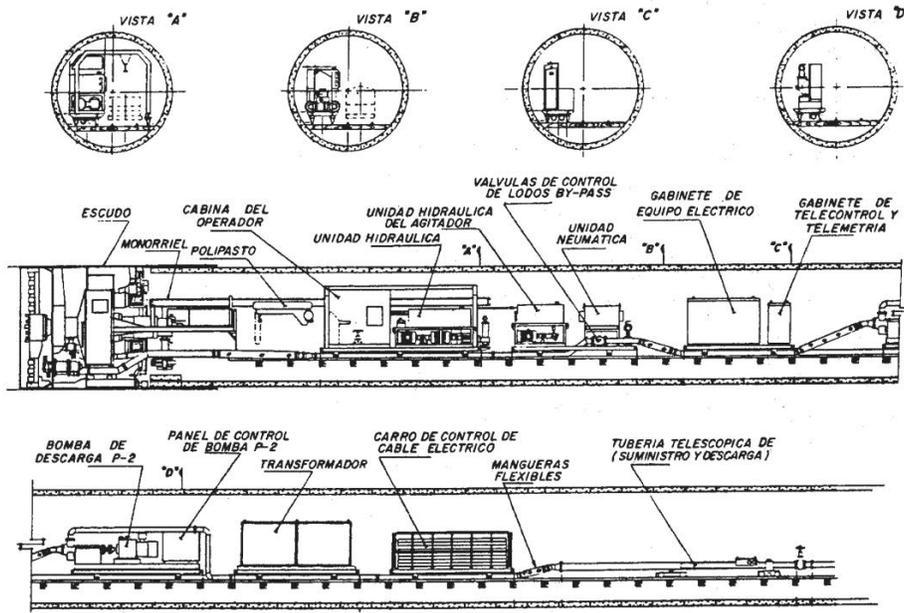
cabeza cortadora y los equipos contenidos en la cámara de trabajo, así como por problemas encontrados en el frente (rocas, pilotes, cavernas, etc), siempre resulta de suma conveniencia dicha instalación.



FALLA POR EXTRUSION AL LIBERAR EL SOPORTE DEL FRENTE DE EXCAVACION

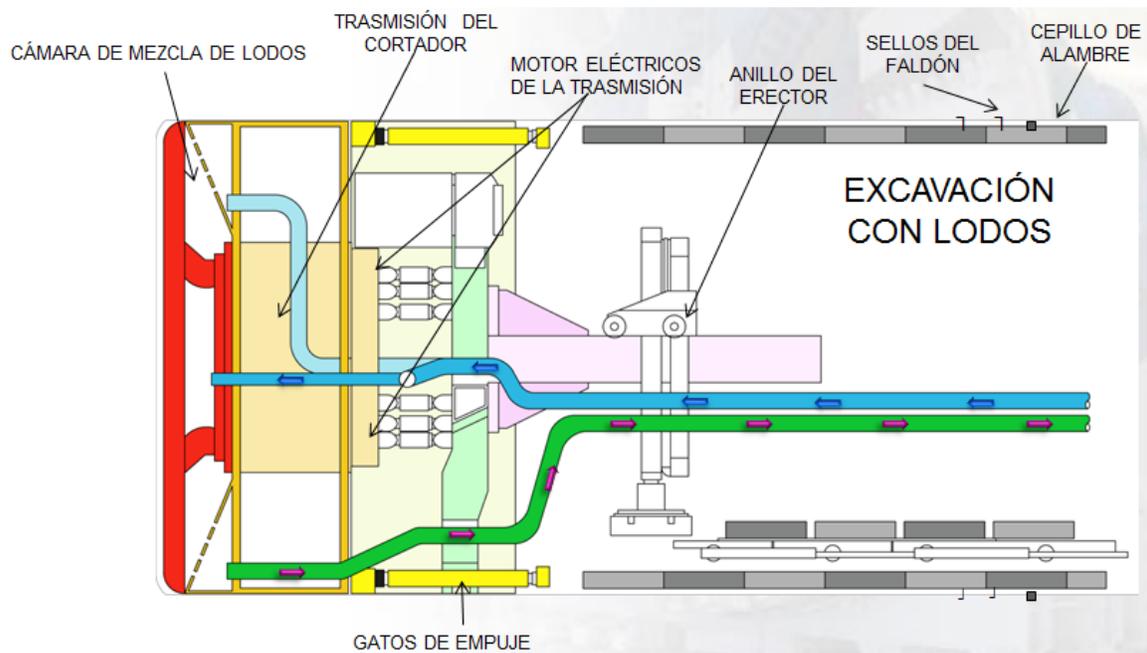


PRESION ESTABILIZADORA FRONTAL A BASE DE LODOS, APLICADA UNICAMENTE EN EL FRENTE DEL TUNEL PARA EVITAR LA FALLA POR EXTRUSION



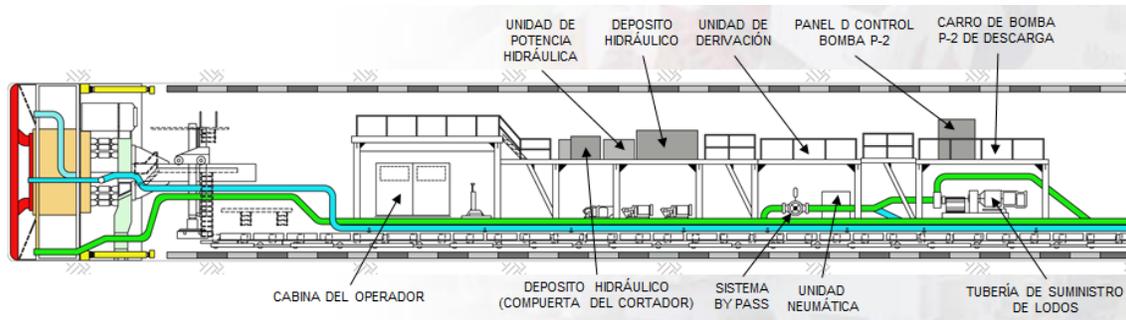
En 1978 nace la necesidad de extender el drenaje profundo hacia el sur de la ciudad de México, en la formación llamada zona del lago, , compuesta principalmente por arcillas muy plásticas y blandas las autoridades del drenaje profundo ordenan llevar a cabo un diseño ejecutivo para la fabricación de un escudo presurizado con lodos capaz de excavar con seguridad y eficiencia en el subsuelo arcilloso blando y muy blando de la ciudad de México y trabajando con presión atmosférica a lo largo del túnel.

El empleo de escudos de frente presurizado permitió excavar túneles en el difícil subsuelo de la ciudad de México en donde el concepto anterior de excavar con escudos de frente abierto y aire comprimido, hubiese resultado difícil de aplicar debido a la baja resistencia al corte y alto contenido de agua de las arcillas.



Control de la presión frontal en un escudo de frente presurizado con lodos durante el proceso de excavación.

- la cabina del operador del escudo forma parte integral del tren de equipo.
- dentro de la cabina, el operador cuenta con un tablero electrónico de medidores, indicadores e interruptores que le permiten controlar la presión frontal.
- los indicadores principales para controlar la presión frontal existentes son: indicador de presión frontal, indicador de velocidad de avance del escudo, indicador de gasto de lodo de descarga, indicador de compuertas hidráulicas en la cabeza cortadora.



Causas que originan un incremento brusco de presión frontal durante el proceso de excavación.

- existe un taponamiento en la salida de descarga en la cámara frontal, estos taponamientos son derivados por la alta densidad del material a extraer debido a un mal mezclado con el lodo bajo en densidad suministrado de superficie.
- la velocidad del escudo durante el proceso de excavación es alta y origina que la aportación del material excavado hacia la cámara frontal sea con una velocidad mayor a la que se tiene en la bomba de extracción.
- por fallas en el equipo de bombeo y rezaga de material.
- por mala operación en el equipo de rezaga.

Solución a un incremento brusco de presión frontal del escudo.

- a) suspender el proceso de excavación de túnel deteniendo el avance del escudo.
- b) mantener operando los equipos de bombeo y extracción o descarga de material de la cámara frontal, con el fin de liberar la presión y nivelar la presión.
- c) mantener la cabeza cortadora girando con las compuertas hidráulicas cerradas.
- d) no reiniciar el proceso de excavación hasta que la presión frontal este normalizada.

Causas que originan un decremento brusco de presión frontal (despresurización)

- existe una falla en la línea de suministro de lodo de baja densidad, combinado con una velocidad lenta de excavación del escudo.

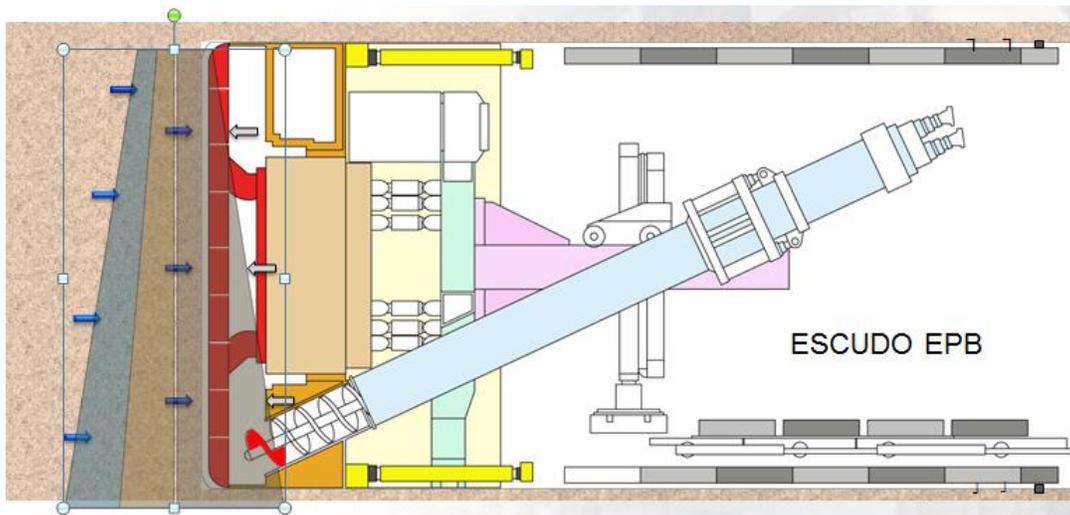
El sistema de bombeo de rezaga (línea de descarga) esta operando a alta capacidad de extracción la aportación del material excavado es lenta debido a baja velocidad del escudo.

- mala operación y falla del equipo de bombeo.

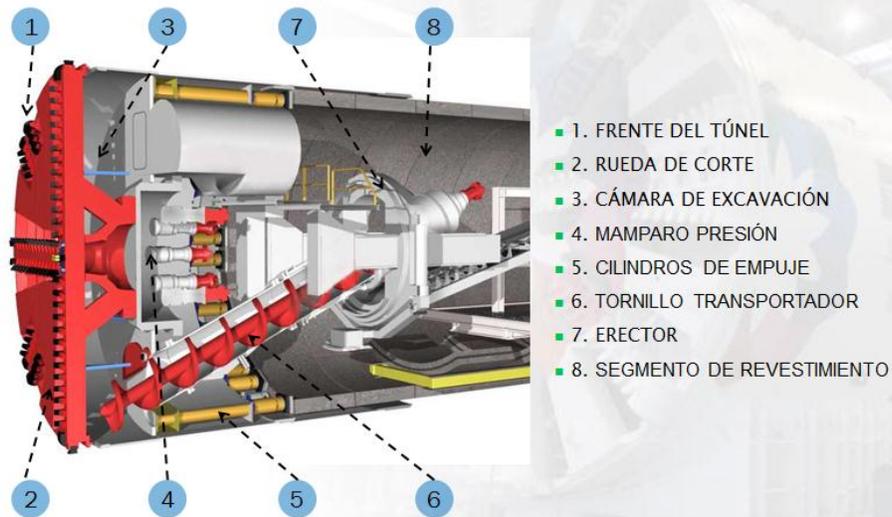
III.5 ESCUDOS CON PRESIÓN BALANCEADA.

A diferencia de los escudos de lodos, los de presión de tierra balanceada realizan el control de la presión en el frente y la extracción del material excavado empleando un transportador encapsulado que contiene un tornillo helicoidal, sellado herméticamente por medio de una compuerta deslizante accionada hidráulicamente.

A medida que el escudo avanza excavando el frente, el suelo excavado es contenido en la cámara de trabajo a la presión requerida para estabilizar el frente. En forma concurrente se permite la salida del material excavado a través de la compuerta de tornillo, regulando en todo momento la presión. Debido a este efecto se los conoce como escudos de tierra balanceada (EPB).



PARTES QUE INTEGRAN LA SECCION FRONTAL DE UN ESCUDO EPB

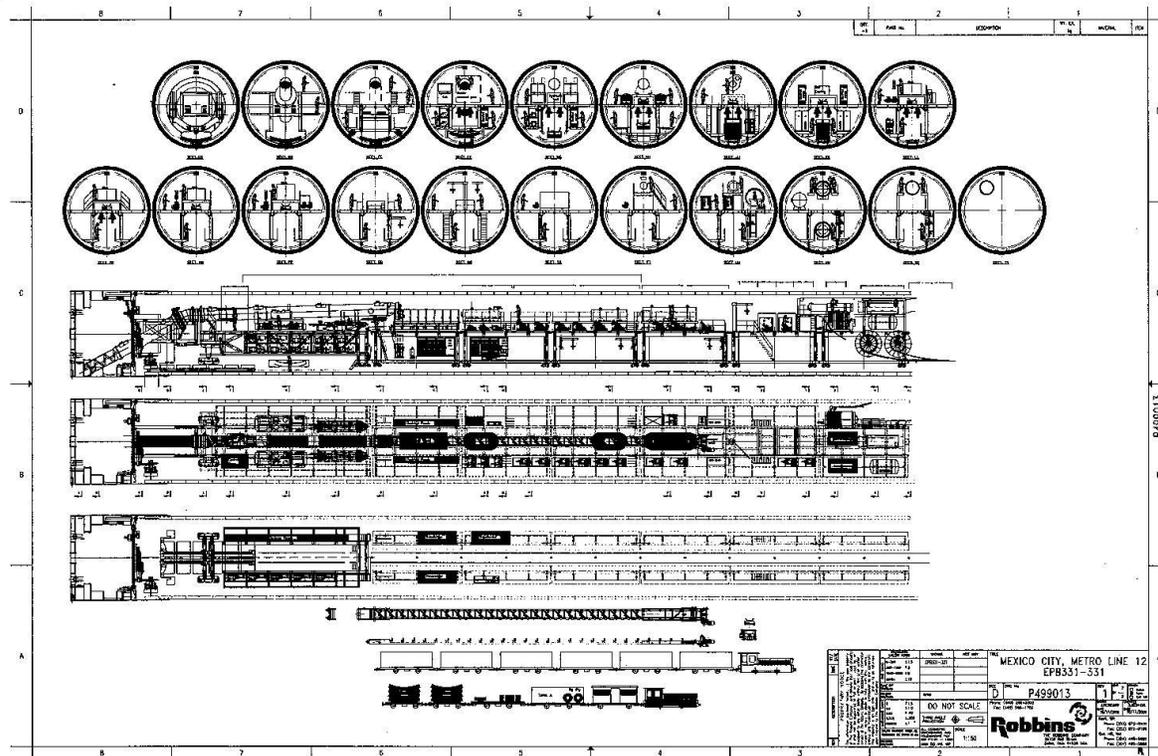
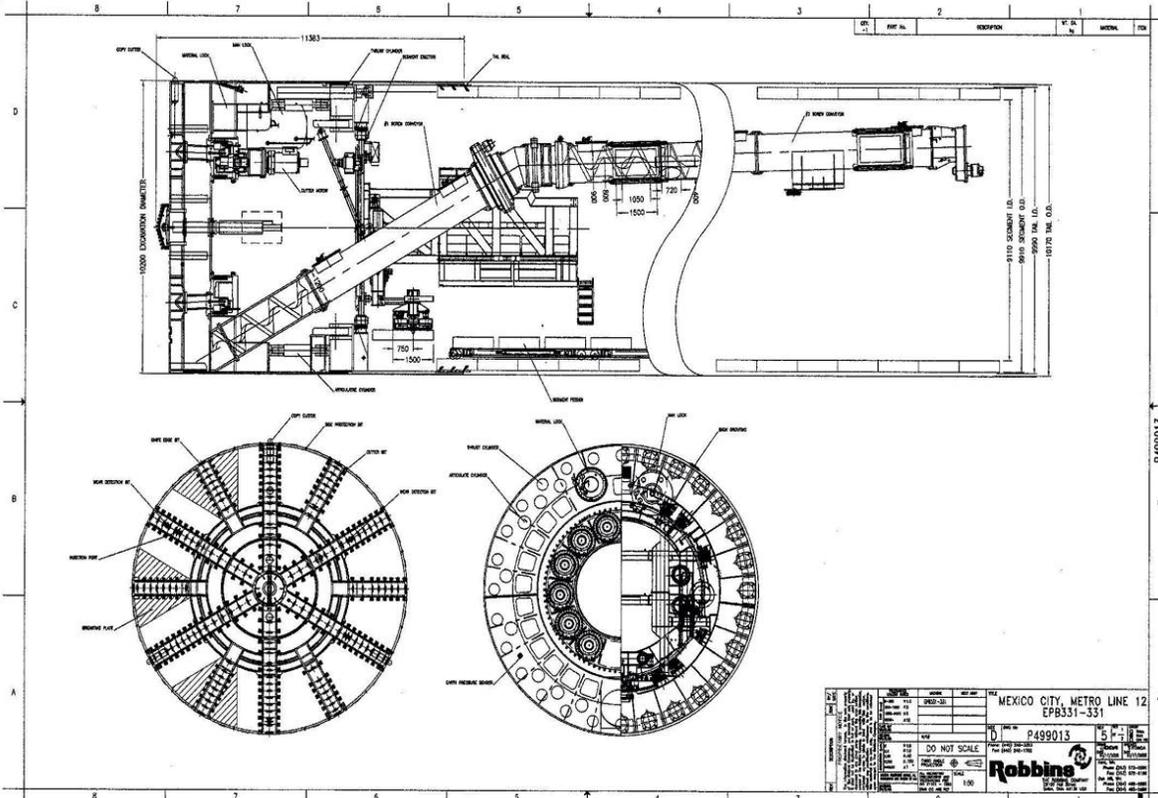




La descarga del transportador de tornillo puede ajustarse variando las revoluciones del tronillo o modificando la abertura de la compuerta deslizante.

Dependiendo de la plasticidad y el tipo de suelo atravesado será necesario emplear lodo, agua o espumas ecológicas que se mezclen con el suelo excavado, haciéndolo manejable para su remoción de la cámara de trabajo, particularmente en suelos altamente granulares.

Una de las grandes ventajas de este sistema consiste en que el suelo excavado así transportado a la parte trasera del escudo, puede ser descargado a sistemas convencionales para su retiro al exterior del túnel (camiones, vagonetas montadas sobre vía, bandas transportadoras, etc.) y representan un problema menor para su eliminación desde el punto de vista ecológico. Por esta razón de peso, el futuro de esta tecnología es ilimitado.



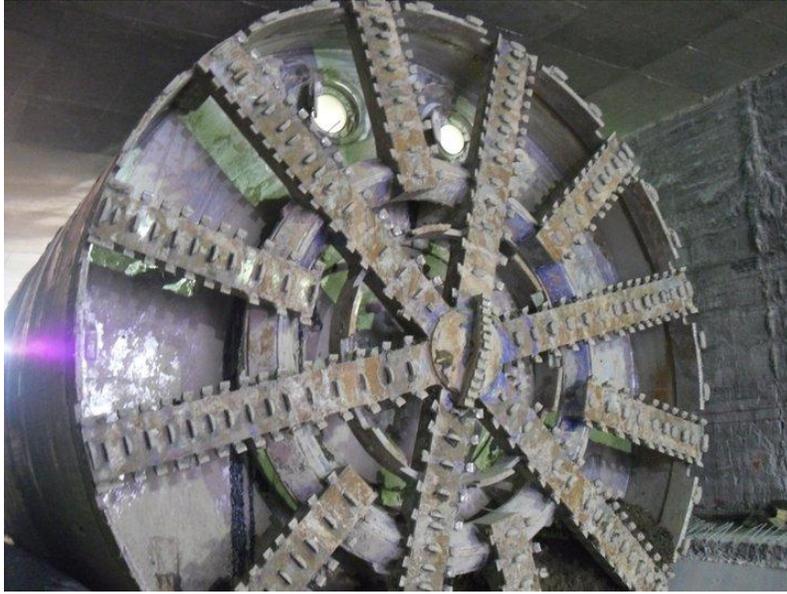
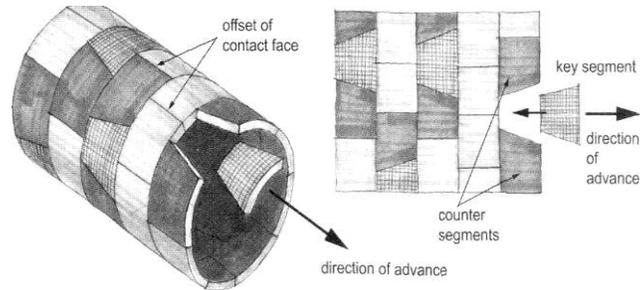


Foto: Yazmin Reyes Guerrero.

III.6 COLOCACIÓN DE LOS ANILLOS Y PROCEDIMIENTO.

1. Montaje de dovelas

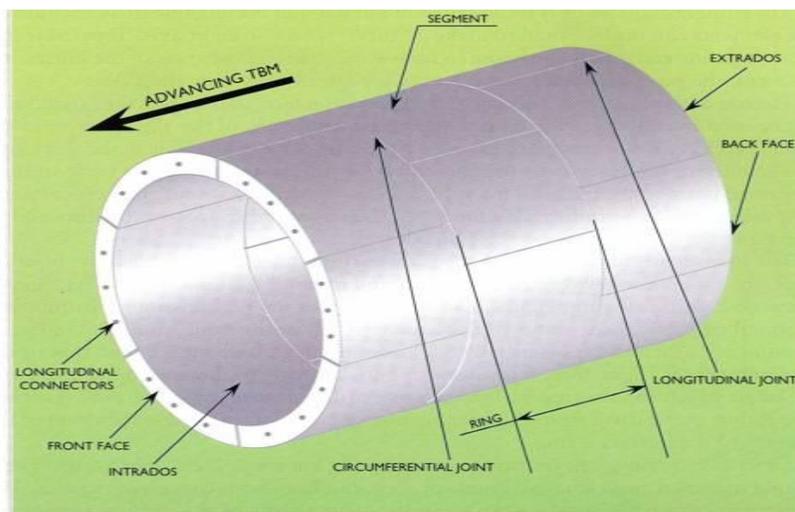
Las dovelas son elementos prefabricados de concreto armado que se atornillan entre si formando un anillo troncocónico. La construcción del túnel con revestimiento por anillos prefabricados permite el trazado de curvas, tanto en planta como en alzado. Esto es debido a que los anillos son troncos de conos, y colocando las caras convergentes contiguas se consigue obtener una alineación curva.



1.1 La geometría de las dovelas de un anillo

Un revestimiento prefabricado montado dentro de un escudo TBM es una secuencia de elementos, conocidos como dovelas, con dimensiones y formas prescritas, a fin de garantizar:

1. La construcción de un revestimiento estable, tanto para el corto y largo plazo, teniendo en cuenta todas las cargas previsibles.
2. Cuidado con la continuidad respecto a la alineación del túnel.
3. Rápido y seguro montaje en la parte posterior de la TBM y bajo la protección del escudo.



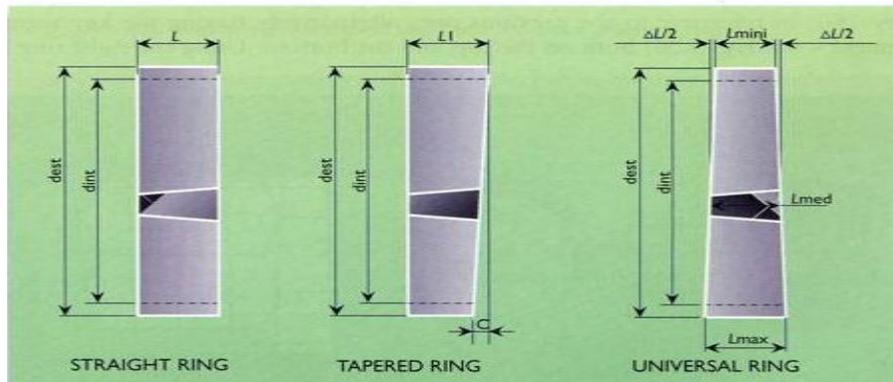
1.2 Tipos de anillos

Desde un punto de vista geométrico, los anillos son parte de cilindros con las superficies que pueden ser paralelas o no paralelas, se identifican a continuación

Superficies Paralelas-----> Recta del anillo

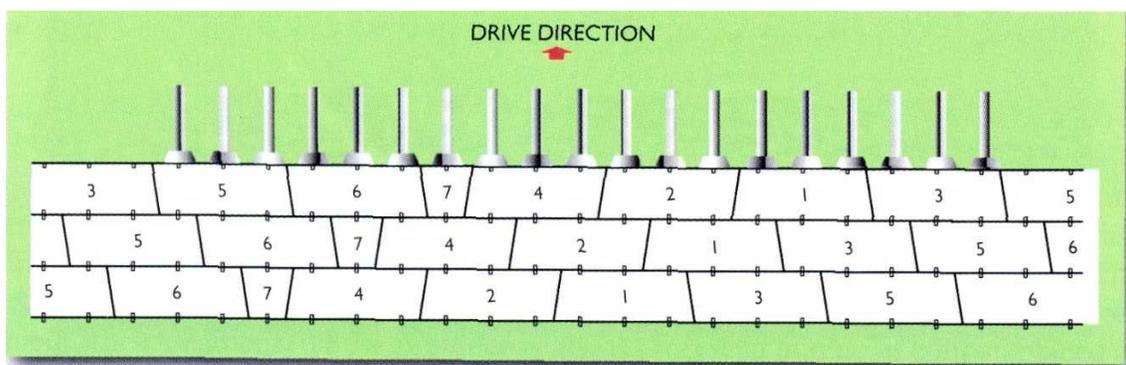
Superficies no Paralelas -----> Anillo cónico Trapezoidal

Anillo cónico Universal



La diferencia entre los dos tipos (recto y cónico) de anillo, simplemente se refiere a la versatilidad en el montaje, pero no afecta a la función del anillo.

La recta del anillo sólo se puede utilizar directamente en las partes de la alineación: como una secuencia, estos elementos se utilizan para hacer un "tubo" con un eje recto. Los anillos cónicos trapezoidales, en cambio, permite que el revestimiento de las curvas predefinidas de la alineación horizontal, el perfil y algunas desviaciones accidentales causados por la TBM. El uso de estos dos tipos de anillo en la cara de excavación, que implica el anillo "derecho" debe ser utilizado en relación a las condiciones geométricas de la alineación o de la TBM. Por lo tanto, es necesario contar con el tipo de anillos en el lugar de trabajo.



La tendencia actual es utilizar el anillo universal sistemáticamente tanto en las partes rectas y curvas del túnel. Este enfoque permite a la tendencia horizontal y vertical de la alineación que se ha de seguir sin el uso de otros elementos especiales y para corregir las desviaciones realizadas por la TBM durante adelanto.

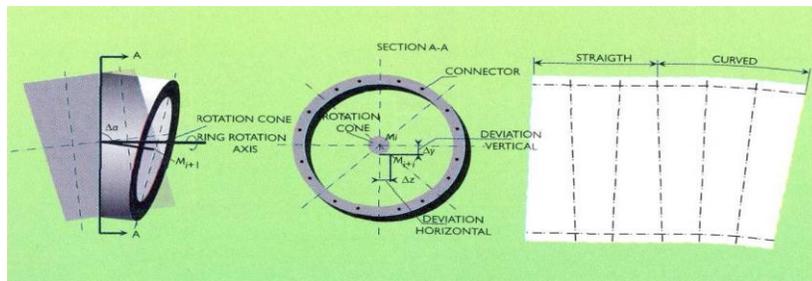
La geometría característica que hace a un anillo universal es su conicidad, en otras palabras, la diferencia entre su máximo y mínimo de longitud. La figura muestra el uso de un anillo universal. Se muestra la posibilidad real de seguir una curva horizontal (R plan) y una curva vertical (R alt) al mismo tiempo. El radio de curvatura de las curvas verticales es generalmente un orden de magnitud superior a la de las curvas horizontales. Por lo tanto, la referencia sólo puede hacerse respecto a la horizontal de radio.

En el caso en el que las dos radios tienen el mismo orden de magnitud, se hace referencia a la radio que se deriva de la composición de las dos curvas para la definición de la geometría del anillo universal.

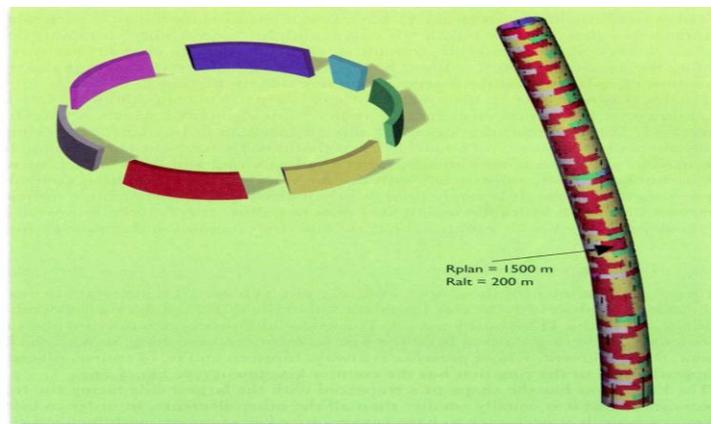
La universalidad de los anillos es una geometría que se conoce como "izquierda-derecha". Estos anillos son verdaderamente universales de todos los puntos de vista, pero se han concebido en parejas.

La geometría es igual para ambos, pero la disposición de los dovelas dentro del anillo "izquierdo" es diametralmente opuesta a la del anillo "derecho", de manera que una alternancia de izquierda-derecha de anillos permite una alineación recta que es seguido con el segmento clave.

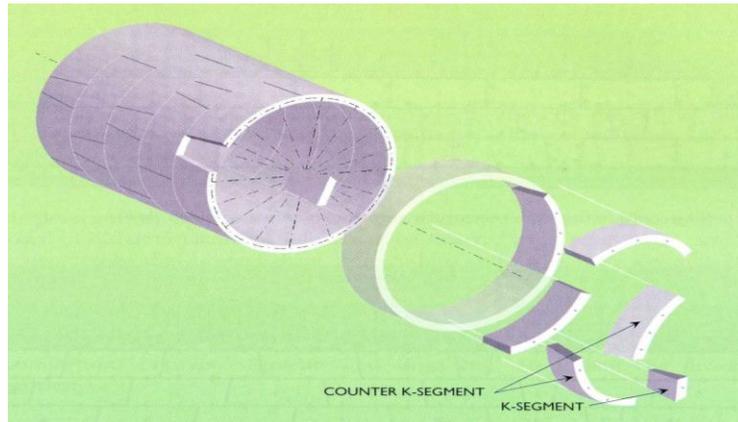
A fin de contar con una línea recta usando anillos universal, es necesario girar el anillo cada 180° en referencia a la anterior, de forma alternativa con la llave de la dovela (segmento k) tanto en la parte superior y la parte inferior.



Concepto de la universalidad del anillo y su posible montaje en una alineación curva.



Arreglo para formar una curva horizontal y una curva vertical



Procedimiento del montaje del anillo

2. Sistema de impermeabilización

En términos generales, la impermeabilización del anillo está garantizada por los siguientes factores, que son igualmente importantes:

- Una óptima calidad del concreto y de la serie de sesiones, lo que el alto nivel de resistencia del concreto que se utiliza junto con un preciso proceso de prefabricación; prestación de asistencia cuando se desplazan los distintos dovelas para evitar la formación de grietas, incluso más latente.
- Colocación de sellos de entre la unión de las dovelas; con dichos se garantiza que una vez que la dovela queda en contacto con el terreno, dichos materiales se expanden creando un sello que impide filtraciones de agua hacia el interior del túnel.



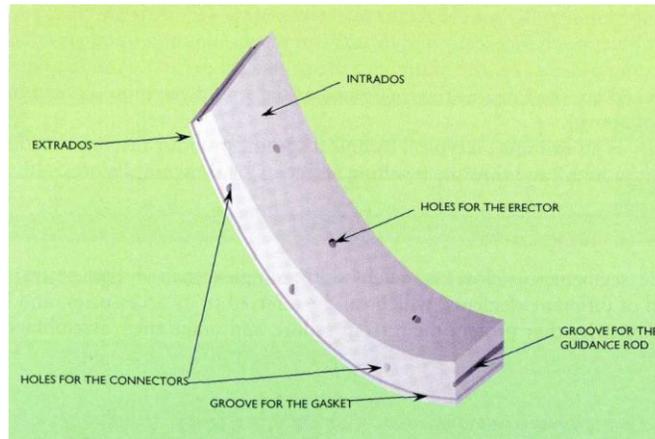
Fig. 6 Colocación de sellos en las dovela

Colocación de sellos en dovelas

3. Las conexiones entre dovelas y anillos

Las conexiones entre dovelas y anillos pueden, en la actualidad, dividirse en 2 categorías:

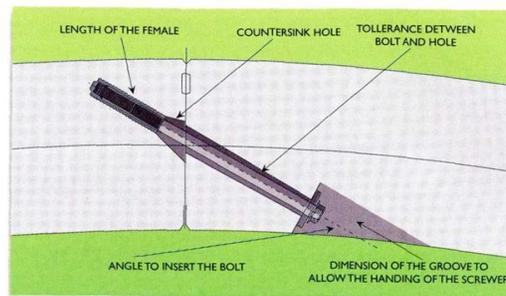
- Articulaciones con tornillos: el segmento es por primera vez en la posición y luego se insertan los tornillos y se aprietan.
- Juntas con clavijas: los conectores, que están completamente cubiertos y ocultos, se insertan en el segmento durante el montaje y se inserta en el segmento de la última junta del anillo.



Componentes de una dovela

La primera categoría, juntas con pernos, requiere más esfuerzo en la construcción del molde, porque es necesario crear "focos" y "surcos" en el que se insertan los tornillos. También es necesario disponer de más personal en el túnel para insertar los tornillos. Este tipo de conexión es tradicionalmente correlacionado con dovelas rectangulares y se utiliza generalmente tanto entre los anillos y entre los sectores, dentro de un anillo.

Los tornillos son metálicos mientras que los incorporados son hilos, y si están presentes, son generalmente de plástico.

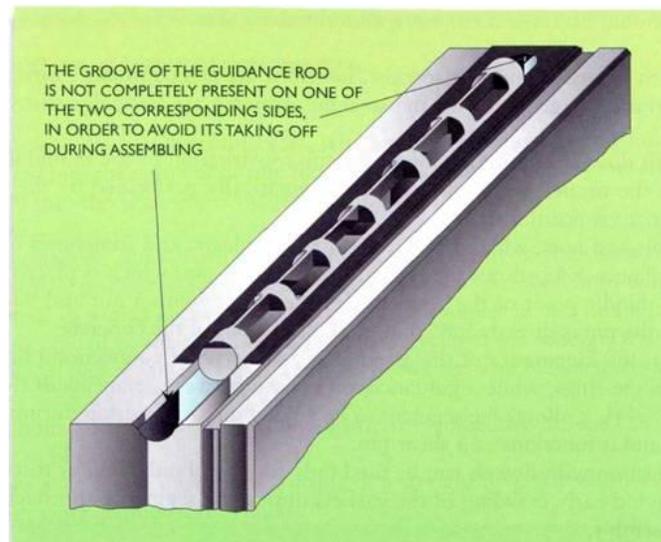


Sección típica de un perno.

En la figura muestra el corte de una sección de un perno recto. Debe prestarse atención a los siguientes datos geométricos:

- Las ranuras deben ser suficientemente grandes para permitir que la cabeza del perno y que la llave neumática se inserten fácilmente, y la distancia mínima desde el tornillo del eje de las paredes de la ranura debe ser de al menos 60 mm.
- La ranura lateral de la bolsa debe tener una conicidad de al menos de 1 “.
- El perno en el segmento debe tener una tuerca conicidad compatible de manera que la inserción de la saeta en el túnel estará bien guiado y rápido.
- El perno eje debe pasar por el centro del segmento.

Debido a la cinemática del montaje, este tipo de conexión sólo interviene entre los anillos, mientras que una varilla de guía se utiliza entre los dovelas del mismo anillo que permite que el segmento a que se guíen en su posición durante la fase de montaje funciona como una cizalla alfiler.



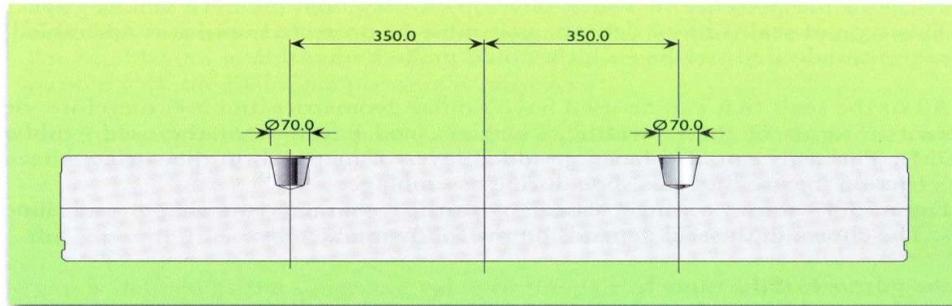
Varilla guía de unión entre dovela

4. Montaje con sistema erector

El método de colocación de dovelas por los sistemas de erectores se puede dividir en dos categorías principales:

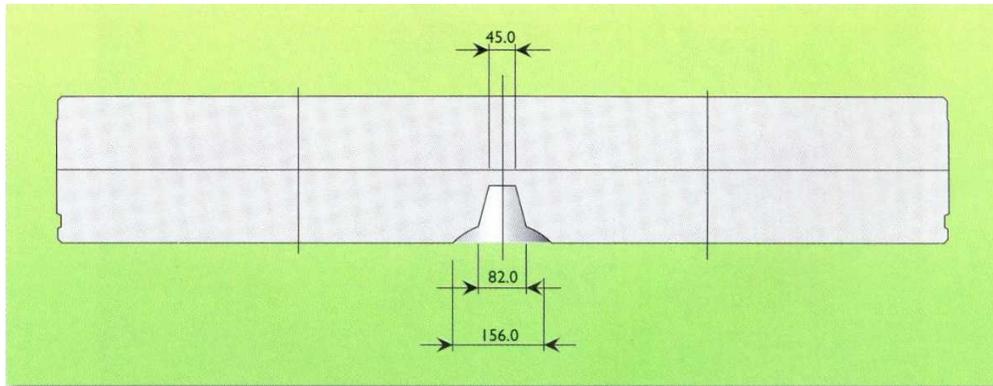
- Tipo Vacío, recogiendo a través de succión, y
- Tipo Mecánico.

El sistema de vacío: Funciona a través de una gran ventosa, dividido en dos o tres secciones por razones de seguridad, que, apoyándose en el intradós, abordan el segmento creado un vacío entre la placa y la superficie de concreto. Dos dispositivos de centrado cónicos en la que se encuentra el sistema se utilizan para una mayor seguridad.

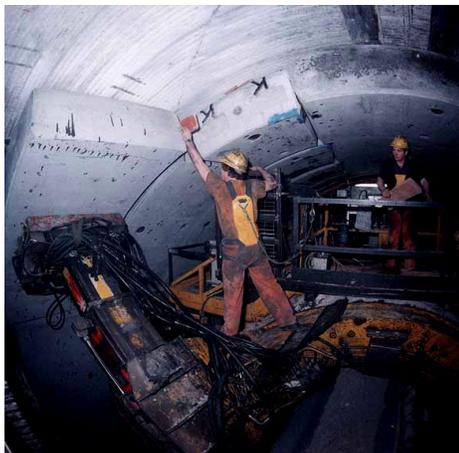


Relleno cónico para el sistema de vacío

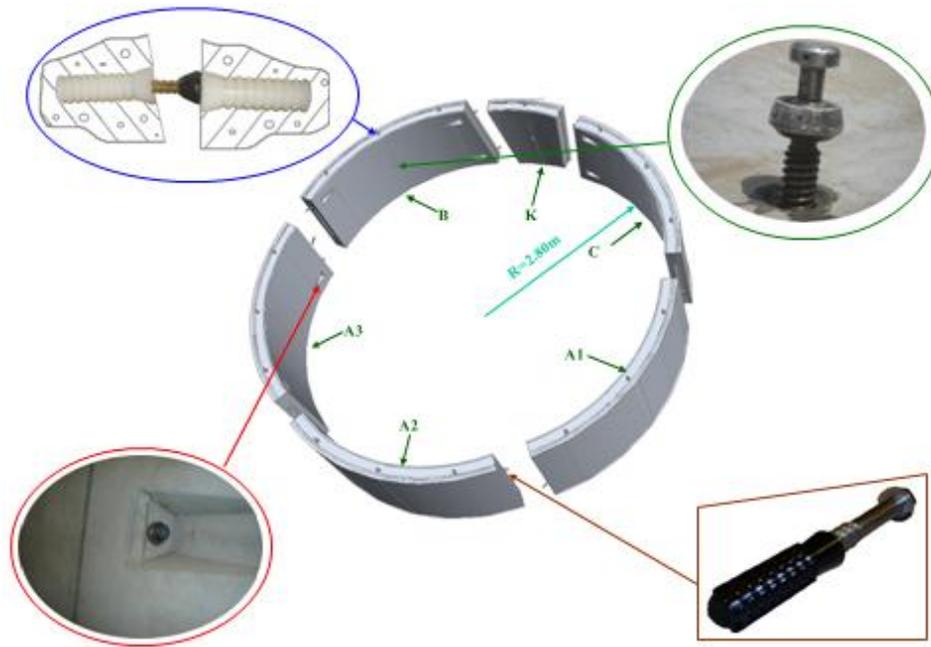
Tipo Mecánico: El sistema consiste en un mecanismo rápido de rosca en el centro de la serie de sesiones en un gran tornillo que se inserta. Este tornillo tiene una cabeza esférica que es lo suficientemente grande para ser sujeta por el erector.



Conexión cónica para sujeción de dovela.



Aspectos de sujeción de dovelas con anillo erector



Conectores para montaje de dovelas

5. Proceso de montaje

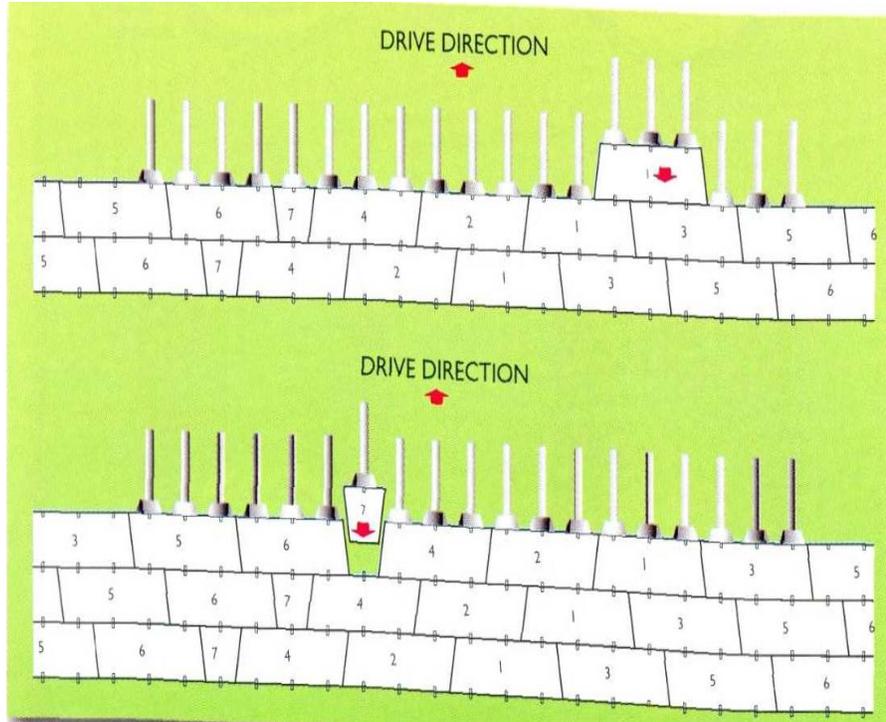
En un sentido amplio, el proceso de montaje se inicia con la entrega de las dovelas en el portal y se termina con la salida de los mismos de la cola de la TBM. Las dovelas son introducidas en el túnel en los vagones que se mueven bien en las ruedas o las orugas. Estos vagones llevan las dovelas hasta llegar a la zona llamada "sección de alimentación", que lleva a la erector y coloca en el interior del escudo.

El orden de llegada de las dovelas a los erectores debe ser programado para respetar la sección de montaje, por lo tanto, las primeras en llegar serán aquellas dovelas con la secuencia de construcción establecida. Para hacer este proceso fácil, las dovelas son marcadas con letras y / o números que siguen claramente la secuencia de montaje.

La figura da una ilustración simplificada de este régimen para el montaje individual de los segmentos para formar el anillo. En resumen, el montaje del primer segmento es seguido por los demás, uno a la derecha y uno a la izquierda hasta llegar a la corona contra los elementos y, a continuación, la corona elemento está instalado. La estabilidad de las dovelas ya colocadas, antes de que el anillo esté completo, las toma los conectores y pernos.

Esta es una etapa potencialmente peligrosa para la seguridad del personal, porque es en esta fase pueden suceder múltiples accidentes. También se puede observar que las juntas entre dos segmentos adyacentes de un anillo no son nunca en la misma posición angular como las juntas entre los anillos anteriores o posteriores.

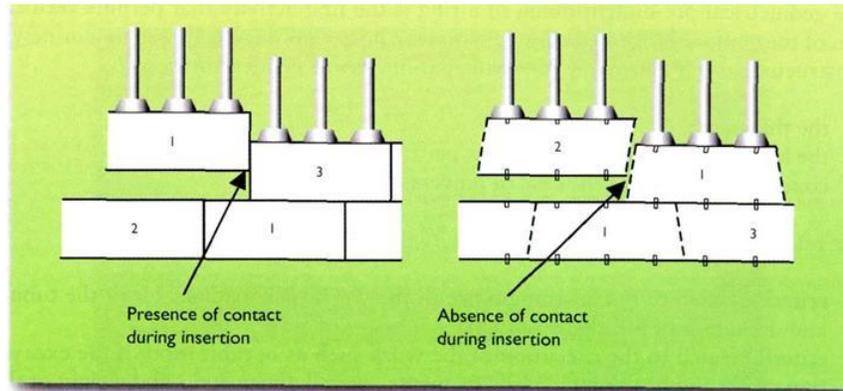
Un revestimiento es como una pared de ladrillo en el que todos los elementos que se escalonan de modo que no hay líneas longitudinales debilidad, que puede ser identificado como otra cosa que depende, si está presente en gran número, sería la estructura débil.



Proceso de montaje (Los números indican el orden de montaje de los segmentos)

5.1 Montaje del segmento normal

La unión con espigas (para perno pasador y conexiones) prevé que el segmento que ya tiene la alineación de los conectores ensamblados se mueve hacia el anillo, es decir, el movimiento final del segmento se ve obligado a seguir la dirección eje del anillo, al menos para el último tramo de 15-20 cm, que corresponde a la longitud de la parte que sobresale de la clavija. En este caso, si se utilizaron los segmentos rectangulares, el sello se arrastraron a lo largo de la parte final y que se destruyan o arrancado. Por lo tanto, los segmentos trapezoidales se usan como la alternativa práctica.



Necesidad de la presencia en el segmento trapezoidal

Si se utilizan tornillos de unión, el movimiento de las dovelas durante el montaje puede ser principalmente circunferencial y sólo se produciría en el último centímetro longitudinal. Por lo tanto, las dovelas rectangulares son suficientes en este caso.

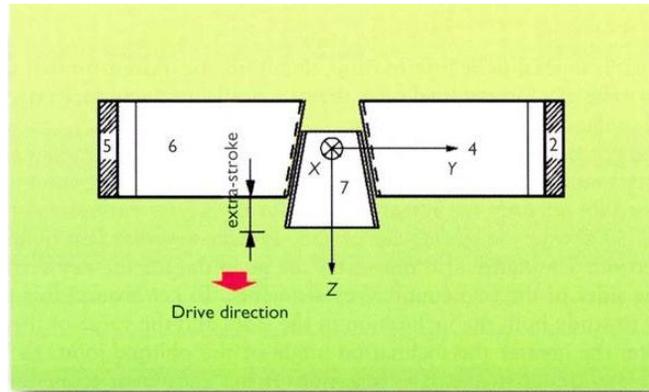
Además, las clavijas no permiten conexiones entre segmentos. Por otro lado, no es muy eficaz utilizar pernos para las conexiones entre los anillos y de utilizar los pernos de las articulaciones entre los segmentos.

5.2 Ensamble de la Dovela "k"

El segmento k es el último que se inserta y, por tanto, el movimiento que lleva en su posición tiene que ser de un tipo longitudinal, es decir, paralelo al eje del túnel, después de que haya sido colocado en la posición radial correcta.

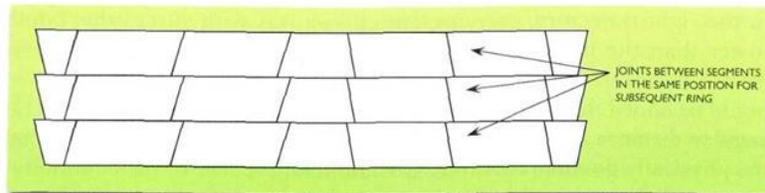
Dado que la geometría de las juntas que separan a los segmentos orientados radialmente, es necesario que el ancho de la dovela sea de una cantidad determinada para permitir el espacio para el ensamble.

La figura muestra el movimiento de los segmentos clave que se requiere para llevar a cabo la inserción. También ilustra el potencial de los principales vértices de colaboración con los lados de los dos segmentos clave. Para solucionar este problema, es necesario estudiar tanto la inclinación de los lados y el valor adicional de la Carrera del pistón: cuanto mayor sea el ángulo de inclinación oblicua del conjunto, menor es el valor de los accidentes adicionales. La inserción del segmento k es obviamente una operación muy delicada y, por tanto, la atención y la capacidad del operador de la erectors son de gran importancia.

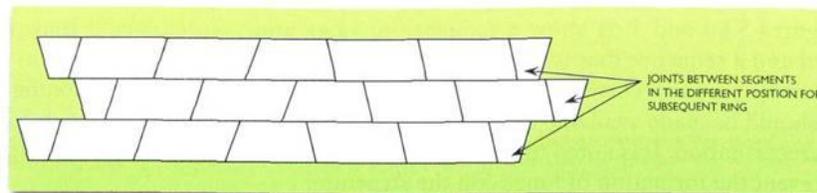


Movimiento radial del segmento K en la inserción

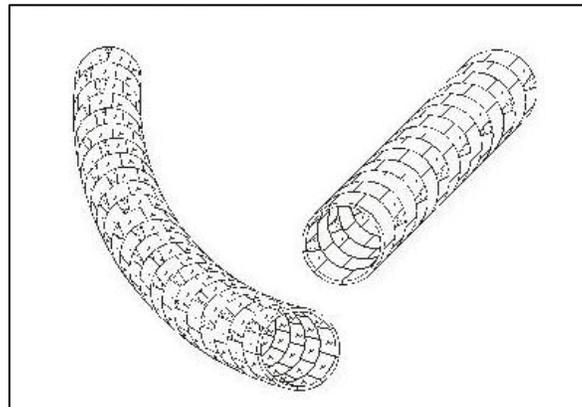
Por otro lado, se debe de respetar la secuencia de montaje de las dovelas con la recomendación de que no existan juntas o alineamiento en dovelas consecutivas. En la Fig. se muestra la secuencia permitida en el montaje. En la fig. se muestra las opciones de armado de anillos



Secuencia no permitida de montaje (ver desplegadas).



Secuencia permitida de montaje de anillos



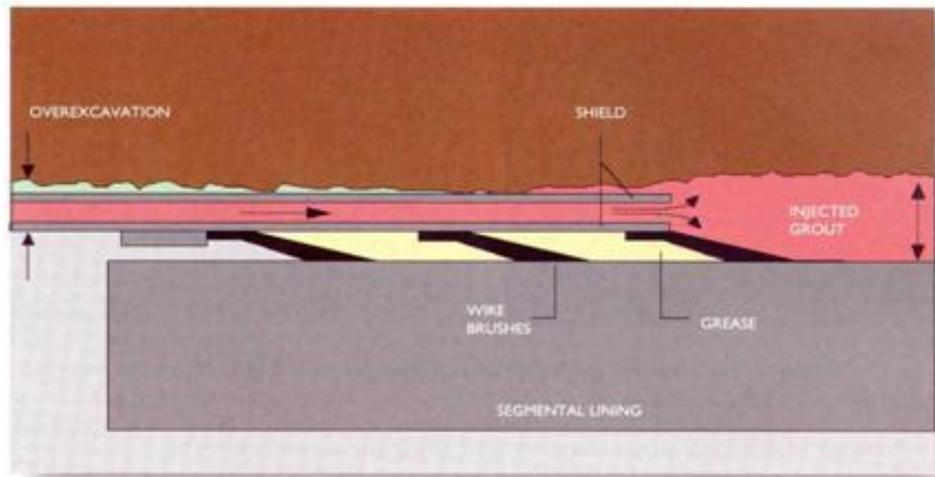
Opciones de armado con anillo de dovelas

5.3 Inyección de mortero

La inyección del espacio que queda entre el GAP de las dovelas y el terreno tiene por objeto controlar el asentamiento producido por la descompresión del terreno, durante la excavación, prevenir los asentamientos adicionales que puedan producirse por sobreexcavaciones no controladas y contribuir a garantizar la impermeabilización del túnel.

Esta inyección se realizará en modo EPB a través líneas de inyección integradas en la estructura del escudo. Como barrera se colocan “cepillos” de acero que junto con la aplicación de una grasa impiden regrese la inyección hacia el interior del escudo. El caudal de inyección y la presión específica aplicada para su colocación dependen del tipo de proyecto y varía en cada tipo de tuneledora.

Cuando se trabaje en modo abierto se inyectará mortero de alta resistencia en los 120° grados inferiores de la sección, inyectándose en los demás 240° con mortero normal, a través de los agujeros diseñados en las dovelas para tal fin.



Relleno de espacio anular entre dovela y terreno



Vista de líneas de Inyección y cepillos de acero.

5.3.1 La mezcla de diseño

Hoy en día, desde el punto de vista de la mezcla de lechada de inyección, es posible definir los siguientes términos:

- Inertes de mortero, sin contenido de cemento en la mezcla.
- Mortero, con bajo contenido de cemento en la mezcla.
- Basado en el mortero de cemento.
- Componentes de mortero.

La lechada debe proporcionar un apoyo eficaz para el endovelado, y evitar que se mueva durante el avance de la excavación. En particular, la lechada debe impedir el revestimiento flotante de líquido debido a las presiones ejercidas por sí mismo y la lechada por el agua, si los hubiese. El uso de morteros que pueden lograr este objetivo por su reología es cada vez más común.

El mortero es una mezcla de agua, cemento y árido de tamaño máximo inferior a 0.5 mm, con los aditivos necesarios para limitar la retracción durante el fraguado y conseguir un comportamiento autonivelante que facilite el relleno del hueco existente.

6. Sistema de guiado (SLS-T)

Al construir un túnel es importante conocer constantemente la posición de la máquina tuneladora (TBM) referente al eje nominal (DTA). Sobre todo durante el avance. Únicamente controlando la posición se pueden corregir movimientos no deseados de la máquina de forma constante y continua, evitando así maniobras abruptas de guiado.

La desviación referente al trazado nominal depende de varios factores. Por ejemplo de la condición del terreno a retirar (roca, arena, arcilla, etc.). Una máquina de 100 toneladas reaccionará con material blando de una forma totalmente diferente que con piedra dura.

A una tuneladora trabajando sobre un radio le influye una fuerza radial, igual que a un automóvil en una curva. Esta depende de la masa y no se debe desestimar en máquinas de este peso. En trazados con radios estrechos es necesaria una corrección más fuerte, y por consiguiente más difícil, que en trazados rectos. Una tuneladora con cilindros articulados es más ágil.

Si se utilizan para la construcción anillos cónicos, el párrafo anterior crece en relevancia. Al montar un anillo erróneo, la tuneladora se alejara de forma más rápida del trazado nominal deseado. También la corrección de este movimiento no deseado será más difícil.

El seguimiento exacto del trazado nominal es sumamente importante. Esto garantiza una calidad superior de construcción y un mejor cumplimiento de la planificación. Por ejemplo se evitan movimientos abruptos de corrección, evitando así un retroceso innecesario de la separación en la cola que puede causar fracturas o roturas en las dovelas

6.1 Aplicaciones en el montaje de anillos

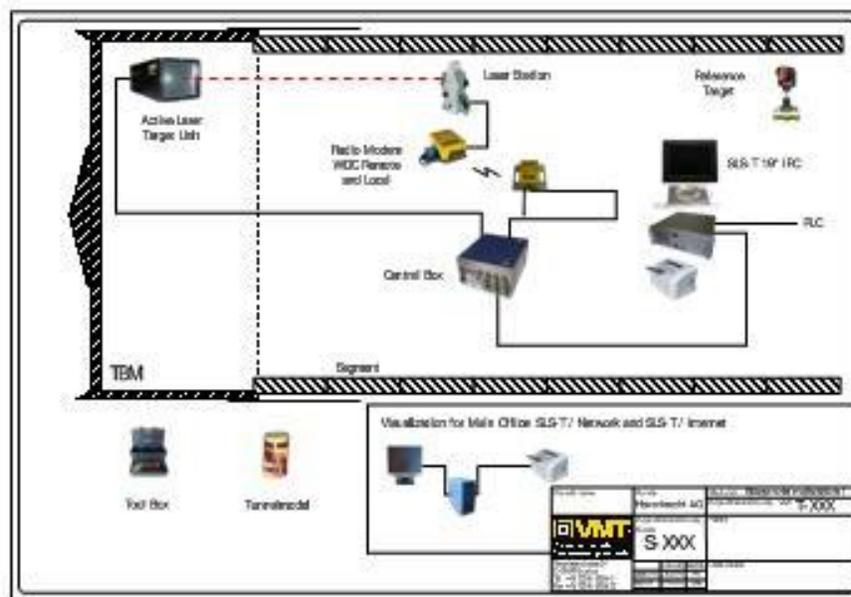
EL SLS-T suministra toda la información necesaria para poder guiar una tuneladora a través de su trazado nominal con una alta precisión. Además se obtiene una documentación completa sobre el trayecto del escudo e información adicional.

Para un funcionamiento correcto, el SLS-T no necesita un complicado sistema de cableado o componentes. Para un empleado capacitado técnicamente, la configuración es muy comprensible. Así es posible conseguir una introducción rápida en el manejo y en la forma de trabajar del

sistema. El ingeniero de turno puede manejar íntegramente el SLS-T. El ingeniero de medición o topógrafo puede limitar su actividad a las mediciones principales de control, quedando así disponible para otras mediciones que acompañan a las obras. Esta posibilidad no es teórica, si no que se aplica en las obras actuales.

Las características de servicio del SLS-T son:

- Determinación e indicación de la posición de la tuneladora con indicación en forma gráfica numérica
- Determinación e indicación de las tendencias de la TBM (diagrama de trazado)
- El apoyo de varios idiomas
- Documentación completa del trayecto del escudo (banco de datos, archivos de protocolos, etc.)
- Manejo de los componentes a través de un ordenador personal
- Trayecto del escudo completamente automatizado
- Control automático de la orientación del láser (control de la dirección)
- Cambio de sitio del láser teodolito con asistencia del programa durante la construcción del anillo
- Tele-mantenimiento a través de conexión por modem
- Visualización de la pantalla en la oficina de la obra o en cualquier otro lugar del mundo (a través del modem)
- Determinación del trazado con los elementos principales conocidos



Esquema de sistema de guiado

6.2 Medición de la TBM durante el avance

La base para la determinación de la posición de la TBM son dos puntos conocidos del sistema de coordenadas global (Y, X, Z). Sobre uno de los puntos, que debe tener contacto visual con la tablilla de mira ELS, se encuentra el teodolito láser. A través del segundo punto conocido (punto de conexión) es orientado el teodolito. Por lo cual queda determinado el sentido al norte.

El rayo láser es dirigido hacia la tablilla de mira ELS. La ELS puede determinar así el ángulo de entrada del láser con respecto al plano de la ELS. Con el ángulo de refracción, medido entre el punto de conexión y la ELS, y el ángulo de incidencia se puede calcular el ángulo horizontal de la TBM.

El giro y la Inclinación longitudinal son medidos directamente por unos inclinómetros incorporados en la ELS. Estos datos son transmitidos al ordenador de mando aproximadamente 2 veces por segundo.

La distancia entre teodolito y ELS se mide directamente con el teodolito o bien calculando la media de los avances del cilindro mas la cantidad de anillos montados. De esta distancia resulta la estación de la TBM sobre el trazado nominal.

Con la iteración de los datos obtenidos se calcula y se determina exactamente la posición de la TBM en el espacio. La definición de la TBM se realiza con dos puntos de referencia sobre el eje de escudo.



Ubicación física de un sistema de guiado

6.3 Medición de los anillos

La medición del último anillo montado se realiza:

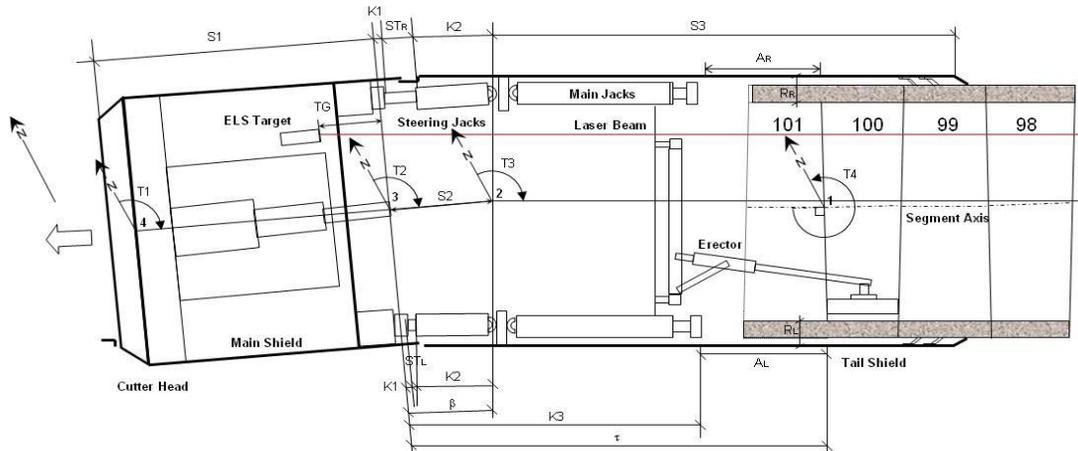
- 1.) a través de la posición conocida de la TBM y
- 2.) por el avance medido de los cilindros de propulsión y de control.

6.4 Pre cálculo de la secuencia de construcción de anillos y del trayecto del escudo

Después de haber determinado las posiciones de la TBM y del último anillo montado, puede ser pre calculado el trayecto siguiente. En el caso de pequeñas desviaciones, puede ser utilizada la curva nominal como siguiente eje de trayecto. Si es necesaria una corrección de varios centímetros, se calcula una curva de corrección. Esta parte del último anillo, retrocediendo por la TBM hasta llegar de forma tangencial a la curva nominal. La curva de corrección calculada influye en las posibilidades de control de la TBM y en la geometría de la dovela.

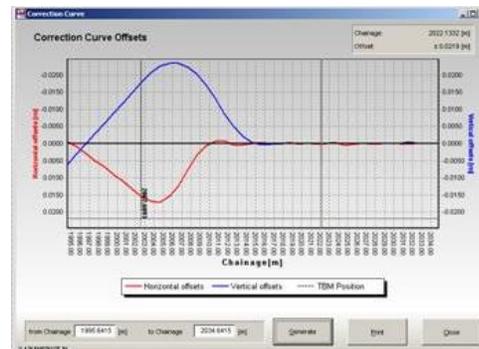
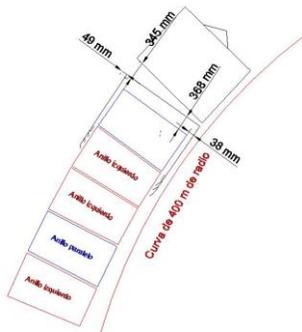
Suponiendo que la TBM sigue el trayecto de la curva de corrección, se calculan los avances nominales de los cilindros. Estos son transmitidos al ordenador de control de la TBM y

transformados por este en las presiones correspondientes para alcanzar el avance de los cilindros. Con estos datos se puede realizar un control completamente automatizado de la TBM. La tarea del conductor de escudo se reduce a supervisar el mismo.



Medición de anillos de acuerdo a la posición de la TBM y al avance medido con los gatos de propulsión

El radio horizontal y vertical de la curva de corrección puede ser determinado por el propio usuario. El radio influye en la rapidez del reencuentro entre la TBM y la curva nominal.



Corrección de curva con el sistema SLS-T

6.5 Generalidades referentes al cálculo de la secuencia de construcción de anillos con el Sistema Guiado.

La idea básica en el cálculo de la secuencia de construcción de anillos se puede describir de la siguiente forma: Referente a la geometría inicial del último anillo construido el la cola de escudo, al ser posible tras un avance, el programa calcula el siguiente tipo de anillo a construir a través de una lista de anillos consecutivos admisibles para el anillo de referencia actual.

Los criterios decisivos para el resultado del cálculo son:

- la posición actual de la máquina tuteadora (TBM) referente al eje nominal, sobre todo respecto a las desviaciones horizontales y verticales y a las tendencias

- los valores actuales de extensión de los cilindros de avance
- la separación real en la cola del escudo
- los valores actuales de extensión de los cilindros de articulación, en el caso de escudos articulados.

Dependiendo de diferentes factores relevantes son calculados por el programa los puntos alcanzados para cada candidato, es decir para cada definición de tipo de anillo consecutivo admisible para el anillo de referencia. El candidato con la cantidad de puntos más pequeña es elegido. El anillo propuesto como anillo óptimo puede ser ahora construido. Si debe ser construido otro anillo al calculado, el programa ofrece la correspondiente función.

Previendo el siguiente avance más probable y siguiendo la curva de corrección calculada de antemano, el programa efectúa el avance teórico.

Con el cálculo previo de los posibles cambios en los factores influyentes explicados anteriormente, lo más plausible es que el programa realice un nuevo cálculo, pero en este caso el anillo de referencia no es un anillo realmente construido, si no el primer anillo consecutivo pendiente de construir. De esta forma es calculado el segundo anillo consecutivo al igual que el primer anillo consecutivo. Esta procedimiento se puede repetir las veces que hayan sido ajustadas previamente en el programa por el usuario, o dado el caso, hasta el final del trazado definido. La mayoría de los segmentos de tubos se componen de anillos de 1m de longitud, con un diámetro de 14 m o más. Cada anillo está compuesto por 9 segmentos. Un anillo completo es igual a un cilindro plano. Los anillos son montados bajo el entorno seguro de una TBM o de un escudo. Tras avanzar la TBM la longitud de un anillo, puede ser construido el siguiente anillo y unido con el anillo anterior. De esta forma va creciendo el túnel según el eje nominal precalculado, llamado Designed Tunnel Axis (DTA).

Existen diferentes conceptos de anillos que pueden ser utilizados y que difieren en algunos detalles. Los conceptos más importantes son:

1. Anillos paralelos (anillos rectos)

2. Anillos con incisión (cónicos):

- anillos con incisión simétrica
- anillos solo con incisión en la parte delantera y posterior
- anillos universales
- anillos izquierdos y derechos

1. anillos de estructura hexagonal.

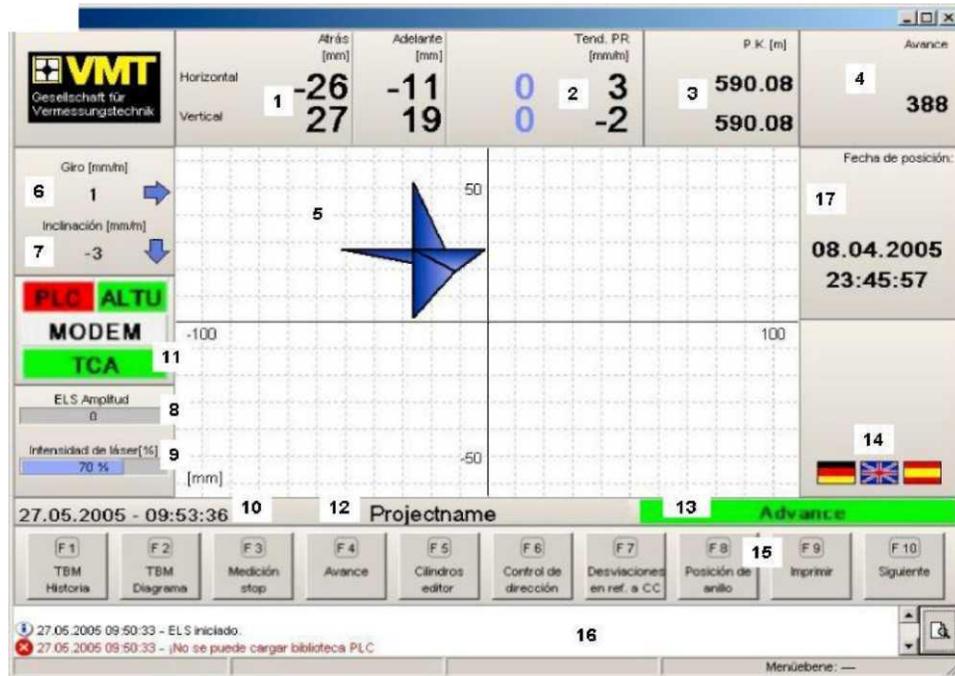
Solamente en trazados de túneles casi rectos, horizontal como vertical, es posible determinar el tipo de anillo de los anillos consecutivos a través de casos prácticos basados en experiencia y respetando las condiciones visuales existentes.

Contra más curvado sea el túnel, más difíciles las condiciones de deriva o más alta la potencia de avance, el constructor de anillos tendrá más dificultades de pre calcular sin ayuda los anillos consecutivos necesarios y sus posiciones de encaje óptimas.

El módulo de construcción de anillos de Edit está basado en muchos años de experiencia en diferentes países del mundo, con diferente tipo de máquina, bajo las condiciones más variadas y utilizando diferentes conceptos de anillos.

6.6 Visión General breve del sistema de guiado.

6.6.1 Pantalla principal



Pantalla principal

Descripción

1. Desviaciones horizontales y verticales [mm].
2. Tendencias horizontales y verticales [mm/m].
3. Posición de la estación y / o metros de túnel del cabezal / punto de referencia delantero [m].
4. Número del avance actual.
5. Representación de la posición TBM como gráfico. La escala está ajustada por defecto con 60mm vertical y 100mm horizontal. En caso de desviaciones mayores, automáticamente cambia a una escala nueva adecuada. El tamaño del gráfico TBM no se cambia.
6. Giro en milímetros por metro. Valor positivo => giro a la izquierda, valor negativo => giro a la derecha.
7. Inclinación longitudinal absoluta en milímetros por metro. Valor positivo => TBM conduce hacia arriba, valor negativo => TBM conduce hacia abajo.

8. La amplitud ELS muestra la intensidad del láser proyectado. Es valor siempre debe estar entre 250 y 1000 (sin unidad). Si esto no es caso, debe comprobarse si la óptica de la tablilla de mira o del láser está sucia. Un ambiente de gran suciedad (p.ej. motores diesel o trabajos de soldadura) también pueden debilitar al láser.
9. La intensidad del láser indica la potencia porcentual de salida del láser. La amplitud ELS y la intensidad del láser están directamente relacionadas.
10. Fecha actual del ordenador y hora.
11. Indicación de los programas de comunicación. Verde significa funcionamiento pleno, amarillo funcionamiento limitado y rojo funcionamiento erróneo. Al hacer clic con el ratón sobre uno de estos símbolos aparece una ventana de monitor. En este se informa sobre el estado actual del aparato correspondiente.
12. Nombre de proyecto
13. Indica el estado (avance, construcción de anillos) del programa.
14. Este campo está previsto para informaciones específicas de proyecto.
15. Las teclas de función pueden ser manejadas con un clic del ratón o directamente con las teclas. Las funciones se explicarán más adelante detalladamente.
16. 6.6.2 Diagrama TBM

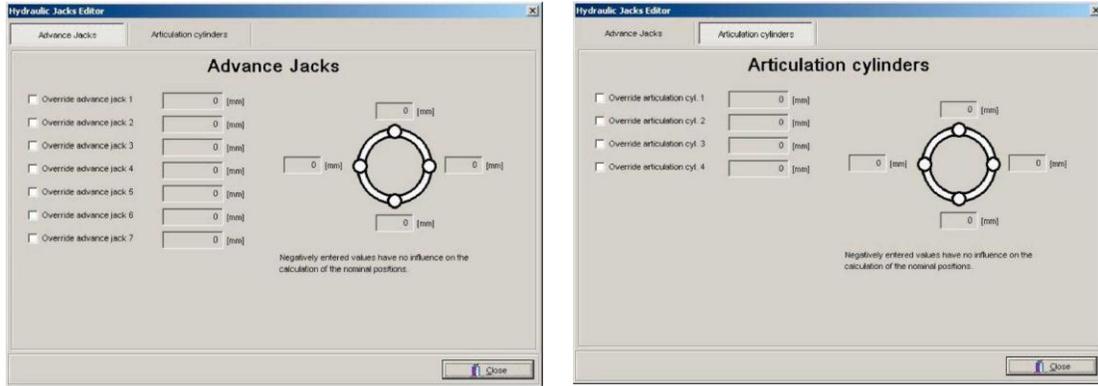


Diagrama TBM, en el gráfico anterior se muestran las desviaciones y tendencias para cada avance realizado por la TBM.

El punto indica la estación del punto de referencia anterior con sus respectivas desviaciones, la flecha señala la tendencia de la máquina. De aquí se puede interpretar el comportamiento de conducción de la máquina (p. ej. si deriva en las curva o si avanza continuamente con la cabeza inclinada).

6.6.3 Editor de cilindros

El editor de cilindros ofrece la posibilidad de captar las salidas de cilindros de los cilindros de avance o cilindros articulados de forma manual o automática (por PCL). En caso de captación manual es necesario seleccionar la casilla en el grupo de prensas deseado.



Editor de cilindros

6.6.4 Desviaciones referentes a curva de corrección

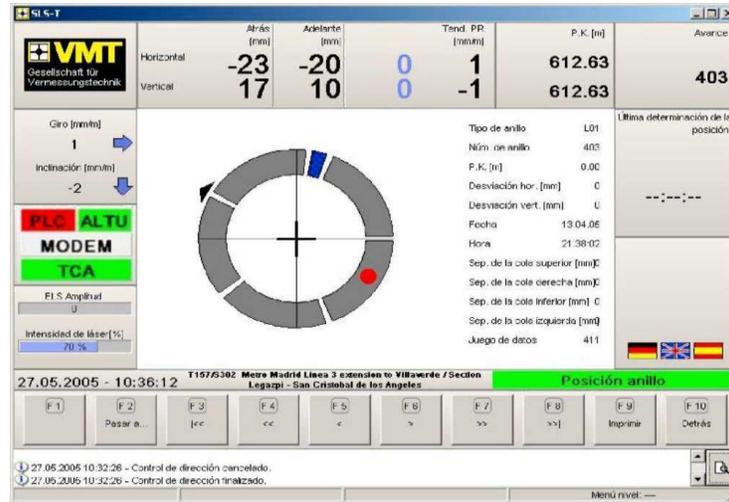
Durante el trabajo real de la TBM, esta presentará siempre diferencias respecto al eje nominal, denominadas desviaciones y tendencias, tanto horizontales como verticales. Por este motivo es calculada una curva de corrección. Es como una curva de transición, que vuelve a guiar suavemente la TBM al eje nominal. También siendo las desviaciones y tendencias pequeñas e insignificantes, automáticamente calculará el programa una curva de corrección, al no ser que los cuatro criterios explicados anteriormente sean exactamente 0,000. Esto es normalmente el caso en cálculos teóricos de secuencia de construcción de anillos, en el cual la posición y dirección de la TBM debe coincidir exactamente con el eje nominal y su tangente.

Pantalla referente a la curva de corrección

6.6.5 Posición de anillo

En el nivel 1 de la pantalla principal se encuentra el botón F8, Pos. anillo. Tras pulsar este botón podrá ver la siguiente imagen, que le muestra toda la información relevante sobre el último anillo construido, así como de sus desviaciones, tipo de anillo, fecha y hora, cuando fue construido el anillo y la separación medida en la cola del escudo.

El triángulo plano y negro indica la dirección en la que construye el anillo, es decir, el lado más estrecho. En frente se puede ver un punto rojo; este marca el lado más ancho del anillo.



Pantalla de posición del anillo

7. Cálculo Secuencia teórica de construcción de anillos

Habitualmente, al comenzar un proyecto, el cliente desea ser informado del tipo de secuencia de construcción de anillos que está previsto y, por consiguiente, al que se debe preparar. Eso no incluye únicamente la cantidad diferente de tipos de anillos que deben ser producidos (izquierdo, derecho, paralelo) si no que también la frecuencia de buen o mal acceso de las posiciones de piedra final, la separación esperada en la cola del escudo, así como los valores de avance y desviaciones del eje nominal.

Los valores iniciales se definen aquí sin diferencia a la posición ideal de la TBM referente al eje nominal. Debe ser para todos comprensible, que posteriormente cambiarán las condiciones durante el avance real y la construcción de anillos referente a las condiciones teóricas.

7.1 Secuencia práctica de construcción de anillos

En un entorno diferente, es necesario un cálculo actual de secuencia de construcción de anillos bajo las condiciones de avance. No sería práctico ejecutar el cálculo para toda la longitud del túnel pendiente en cada cálculo de secuencia de construcción de anillos. Habitualmente son pre calculados en este entorno 2, 5 o como máximo 10 anillos. Contra más alejados estén situados los anillos pre calculados del último anillo construido, más se diferenciarán los anillos reales de los resultados obtenidos en el cálculo de secuencia de construcción de anillos al estar estos influidos por el trayecto real de la TBM y por posibles imprecisiones en la construcción de anillos.

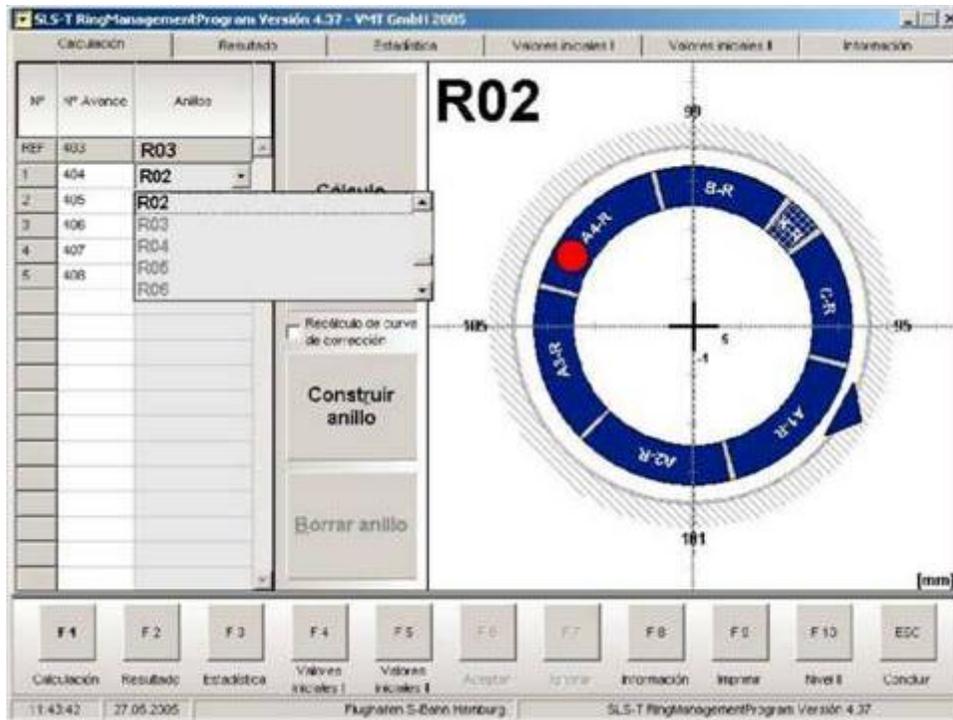
7.2 Construir un anillo

El usuario puede construir teóricamente el anillo número 1 de la lista recientemente calculada como si la TBM hubiera finalizado realmente un avance y se hubiera montado el anillo. A continuación la situación es la misma que la anterior, pero avanzada por un anillo. En realidad es utilizado posteriormente en relación con el sistema de guiado para tuneladoras TBM de VMT. Seguidamente se iniciará una interacción entre el cálculo de secuencia de construcción de anillos / construcción de anillos / avance.

7.3 Disposición obligatoria de anillo

Esta funcionalidad debe ser utilizada con cuidado. Esta pensada para usuarios experimentados, que puedan prever los resultados del módulo de construcción de anillos y quieran construir otro tipo de anillo en un lugar concreto. Este puede ser el siguiente anillo y también uno posterior.

El fondo de esta función podría ser la ponderación de consecuencias de otro tipo de anillo. Un anillo de este tipo puede definir una posición preferida de piedra final o un anillo suministrado erróneamente, etc.



Pantalla disposición obligatoria del anillo

7.4 Valores de inicio I y FS - Valores de inicio II

Los valores de inicio deben ser comprobados antes de cada cálculo de secuencia de construcción de anillo y, dado el caso, ser modificados. Por este motivo se muestra primeramente la pestaña "Valores de inicio I" al iniciar el programa.

Pantalla de valores de incisos

Habitualmente la mayoría de los valores deben ser introducidos en metros o milímetros, pero también es posible adaptar cada valor de entrada individualmente a los deseos del usuario. Las adaptaciones deberían ser realizadas por el personal de VMT in situ al estar familiarizados con el funcionamiento. También puede ser modifica la cantidad de decimales, que igualmente debería ser realizado por el personal de VMT.

Anillo	
Tipo de referencia	R03
Cantidad	10
Intervalo-anillo 1	0
Intervalo-anillo 2	0
Tolerancia anillos paralelos	0.0 [mm]
Pos. de la llave	0

Adaptaciones en el anillo

El tipo de referencia es habitualmente el último anillo montado en el túnel, sobre el cual se apoyan los cilindros de avance. Este tipo de anillo está situado en la base de datos "slst.db" en la penúltima posición. Si se encuentra en la base de datos un tipo de anillo que no existe en la actual definición de anillos, será marcado con '?'. En este caso tiene que asignar el usuario el tipo de referencia. Esta se realiza en el menú desplegable "Valores de inicio I". Al querer realizar un cálculo sin haber seleccionado un anillo de referencia, aparece un mensaje de error del sistema.

7.5 Cantidad

La cantidad de los anillos a calcular para el cálculo actual de secuencia de construcción de anillos. Normalmente tiene sentido un valor de 2 a 5 o como máximo 10. Al introducir un valor muy alto, el sistema comprueba al guardar los valores de inicio, si la cantidad de anillos a calcular no sobrepasa la longitud del DTA. En caso afirmativo aparece un aviso y la entrada se reduce la cantidad máxima.

7.6 Memoria de anillo 1 + 2

Proyectos de túneles con construcción de dovelas son elegidos por sus características de rapidez y seguridad. Después de haber finalizado la máquina tuneladora el avance, no es necesario un tiempo de espera para calcular el próximo anillo a montar. Sobre todo si dependiendo del tipo de anillo, este debe ser suministrado el depósito de segmentos. Esta situación puede ser evitada, si el programa respeta un tipo de anillo anteriormente calculado, que puede estar ya a disposición o sobre el vagón de segmentos. A continuación únicamente tiene que ser determinada la posición de piedra final. El usuario debería comprobar con mucho cuidado en que punto del proceso de producción debe tomarse la decisión de la posición de piedra final de un anillo.

Según los motivos prácticos, esto puede ser ya en el depósito de segmentos, al comenzar el proceso de descarga o finalmente en la construcción real del anillo.

En relación con esto, el usuario tiene las opciones "Memoria de anillo 1" y "Memoria de anillo 2".

Normalmente tiene sentido un valor de 0, 1 o como máximo 2, con excepción de túneles muy largos y condiciones perfectas de producción.

1. "Memoria de anillo 1" se hace cargo de la cantidad de anillos a construir de tipo de anillo fijo y además la posición de piedra final del cálculo de secuencia de construcción de anillo anterior (un anillo / avance anterior).

2. "Memoria de anillo 2" se hace únicamente cargo de la cantidad de anillos a construir de tipo de anillo fijo (es decir, anillo derecho o izquierdo) del cálculo anterior de secuencia de construcción de anillo (un anillo / avance anterior) y calcula de nuevo la posición de piedra final. Es decir, un L01 puede también convertirse en un L03, siempre que vuelva a construir hacia la izquierda (sentido de construcción).

Estas opciones incluyen algunas limitaciones para la secuencia actual de construcción de anillo. El usuario no las debe intentar de aplicarlas en el programa si la TBM presenta un comportamiento irregular. Preferible sería rebajar algunos factores.

Si en ambas memorias se han introducido valores, el programa tratará primeramente la memoria 1 y para los siguientes anillos se aplicará la memoria 2, es decir, si p. ej. la memoria 1 = 2 y la memoria 2 = 1, se escoge como primer y segundo anillo un tipo de anillo fijo Y ADEMÁS la posición de piedra final y para el tercer anillo únicamente se mantiene el sentido de construcción.

7.7 Tolerancia anillos paralelos

Algunos proyectos con anillos DERECHOS e IZQUIERDOS tienen adicionalmente anillos paralelos. Esto es más raro en anillos universales. Aunque puedan ser construidos los túneles rectos perfectamente sin anillos paralelos, no pasa lo mismo en el caso contrario: con anillos paralelos no se pueden trazar curvas, ni siquiera curvas de corrección al no ser que sean muy pequeñas. Pero a veces es el trazado planeado tan recto, que se considera ventajoso insertar anillos paralelos entre los cambios de anillos izquierdos y derechos.

Para indicar al programa de utilizar preferentemente anillos paralelos para el cálculo, en substitución de un cambio continuo entre anillos izquierdos y derechos, el usuario debe indicar en este campo "Tolerancia anillos paralelos". Aquí debe tratarse de valores adecuados, habitualmente la mitad del valor nominal de la separación en la cola del escudo. Contra más se acerque el valor de tolerancia al valor nominal de la separación en la cola del escudo, antes elegirá el programa un anillo paralelo y no un anillo izquierdo o derecho. Se debe tener en cuenta, que el resultado bajo condiciones reales de avance pueden llevar a una separación negativa en la cola del escudo. En este caso debe ser disminuido el valor o incluso retirado del cálculo introduciendo "0.0".

En proyectos en los que la tolerancia de anillos paralelos no tiene importancia, o no debiera tenerla, el campo de entrada debe ser desactivado. Este ajuste tiene que ser realizado por personal de VMT.

Para cálculos teóricos de secuencia de construcción de anillos, la cuestión de relevancia no tiene apenas importancia, ya que los cambios teóricos son muy pequeños.

7.8 Posición de piedra final

En el caso de candidatos una relevancia muy parecida, permite esta posibilidad al usuario de utilizar preferentemente el tipo de anillo con la posición de piedra final más alta.

En proyectos típicos con anillos IZQUIERDOS y DERECHOS los constructores de anillos son algo reacios en elegir anillos con la posición de piedra final por debajo del horizonte. Con otras palabras, contra más alta esté la piedra final, más fácil se considera el montaje.

Pero aquí también existen límites. Contra más esta limitada la posibilidad de elegir un anillo óptimo, uno se arriesga a que el programa obtenga una separación negativa en la cola del escudo y por consiguiente muestre el aviso correspondiente. Habitualmente solo se elegirá una opción de este tipo si el proceso actual no presenta dificultades y en cualquier caso solo para algunos cálculos cortos de tal vez 5 anillos. En el momento que aparezcan valores negativos de la separación en la cola del escudo, el usuario debería deshabilitar esta opción introduciendo "0.0" en el campo de entrada.

Para anillos universales esta característica no puede ser aplicada en ningún caso y la entrada correspondiente en el campo "Separación en la cola del escudo" debe ser a toda costa "0.0". Como es natural, debe ser posible utilizar los anillos universales en cualquier posición de anillo, es decir, sin que sea preferida una posición alta de piedra final. Para proteger al usuario de una activación errónea de este campo, VMT lo desactivara en proyectos con anillos universales.

8 Relevancias

En un cálculo de secuencia de construcción de anillos con sentido influyen las llamadas "Relevancias". Normalmente estas son el avance y la separación en la cola del escudo, y en algunos proyectos también se incluye la desviación de los centros de anillos referente al eje nominal.

Las siguientes entradas son posibles:

1. Avance

2. Separación en la cola del escudo

3. (Desviación)

Estas relevancias pueden ser configuradas con ayuda de la barra desplazadora / triángulo de relevancia.

El manejo de la barra desplazadora se realiza con el ratón desplazando de la barra gris a la posición deseada o alternativamente con el regulador de enfoque pulsando las teclas "Arriba" o "Abajo" (pasos pequeños) o "Avance página" y "Retroceder página" (pasos grandes).

El manejo del triángulo se realiza con el ratón desplazando el punto amarillo a la posición deseada o alternativamente con el triángulo enfocado a través del teclado, pulsando la tecla con la flecha correspondiente y al mismo tiempo la tecla "ALT". Una entrada directa de los valores en los campos de momento no es posible.

Avance

Muchas obras tienen como objetivo que el borde delantero del último anillo construido esté perpendicular al eje de la TBM. Dicho de otra forma, valoran una extensión homogénea de los cilindros. Si es relevante, el valor debería ser de 100%, es decir, la separación en la cola del escudo y la desviación es de 0,0 %.

Separación en la cola del escudo

Un objetivo importante es mantener una buena separación en la cola del escudo, o dicho de otra forma, la separación en la cola del escudo más pequeña debe ser lo más grande posible. En el caso ideal, la separación en la cola del escudo es constante en todo el perímetro del círculo.

Si así lo decide el usuario, el valor debería ser de 100%, es decir, el avance y la desviación es de 0,0 %.

Desviación

De la misma forma pueden tenerse en cuenta las desviaciones existentes de los puntos centros de círculos referentes al DTA. Esta posibilidad solo se recomienda en trayectos suaves con desviaciones pequeñas y buena separación en la cola del escudo.

Normalmente el valor debería mantenerse en 0,0 %, al no ser que el usuario esté completamente seguro de lo que está haciendo.

Si la relevancia de las desviaciones no son aconsejables para un proyecto, en vez del triángulo de relevancia debería indicarse la barra desplazadora. Este ajuste debe ser realizado por el personal de VMT.

Naturalmente es posible combinar la relevancia de los tres criterios. Utilizando la barra desplazadora / triángulo de relevancia se controla que los 2 / 3 valores no puedan ser a la vez de 0,0 %. La distribución de la relevancia es libremente elegible.

La distribución habitual de la relevancia es por ejemplo de avance 25 % y de separación en la cola del escudo 75 % o de avance 50 % y de separación en la cola del escudo 50 %.

La finalidad de esta relevancia es de posibilitar al usuario una relación equilibrada de objetivos habitualmente dispares. Si con la separación real en la cola del escudo se obtiene un anillo consecutivo contrario al del avance de los cilindros, el usuario puede modificar los ajustes a favor del objetivo relevante. Es puede variar según los cambios en las condiciones de avance de un proyecto.

En situaciones difíciles puede darse el caso, que el usuario este obligado a realizar dos o tres cálculos para elegir de las listas obtenidas la lista preferida de anillos.

8.1 Cilindros de avance

La mayoría de las TBM tienen instaladas una multitud de cilindros de avance, de los cuales la mayoría y a veces también todos, están equipados con extensiómetros para medir su valor de extensión y las diferencias angulares horizontales y verticales con respecto al eje de escudo y al borde delantero del último anillo construido

Los ángulos son representados a veces por los llamados "valores de avance". Estos son las diferencias entre los valores de extensión de los cilindros de avance situados al otro lado correspondiente.

En la práctica están normalmente instalados cuatro o más extensiómetros. las posiciones preferidas son ARRIBA, DERECHA, ABAJO e IZQUIERDA, las llamadas posiciones nominales.

Al estar el extensiómetro inferior expuesto casi constantemente al agua y barro, se prefieren frecuentemente las posiciones diagonales de 45°. La conversión de estos valores puede ser realizada por una sencilla fórmula.

El Sistema de guiado SLS-T de la TBM puede manejar cualquiera de estas variantes, también si son utilizados más de cuatro extensiómetros. No obstante, debe ser conocida la posición de los extensiómetros y ser introducida en la pestaña TBM del editor SLS-T. Siempre que sea posible, son transmitidos automáticamente los valores de extensión de los cilindros por el PCL del sistema operativa de la TBM.

Dentro del módulo de construcción de anillos, se supone que el estado de los cilindros en sus posiciones nominales es conocido.

Nota: La entrada en los campos de los cilindros de avance solo puede realizarse con un anterior clic doble inmediatamente al lado de los campos de entrada para evitar entradas erróneas no intencionadas.

8.2 Cilindros articulados

Para la construcción de túneles muy curvados (es decir, radios pequeños en comparación con el diámetro exterior y la longitud de la TBM), existen a veces colas del escudo con cilindros de escudo articulados (en la zona del montaje de anillo). Aquí deben aplicarse los mismos principios que en los cilindros de avance. En el caso de que la TBM del proyecto actual no esté equipada con cilindros de escudo articulados, todos los valores mostrarán el valor 0,0000. Esto es comprobado con la cantidad de cilindros, que si igual a 0, se supone que no existen cilindros de escudo articulados.

Dentro del módulo de construcción de anillos, se supone que el estado de los cuatro cilindros articulados de escudo en sus posiciones nominales es conocido.

Nota: La entrada en los campos de los cilindros articulados solo puede realizarse con un anterior clic doble inmediatamente al lado de los campos de entrada para evitar entradas erróneas no intencionadas.

8.3 Factor de articulación

Hoy en día se exigen a las máquinas TBM trayectos cada vez más curvados, casi siempre en construcciones de túneles para metro o desagüe. Radios pequeños de curvas de 100m. 150m son casi siempre realizados por máquinas tuneladoras con escudos articulados. En esta parte trasera de la TBM son construidos los anillos bajo la protección del escudo.

Esto complica aún más el cálculo geométrico. Para el cálculo óptimo de secuencia de construcción de anillos no se tienen en cuenta los valores actuales de los cilindros articulados. No obstante, los valores de los cilindros articulados van cambiando durante el avance (articulaciones pasivas) y son difíciles de predecir. Los anillos consecutivos realmente son posicionados de la mejor forma con una dirección media entre el eje de la cola del escudo y el eje del propio escudo principal.

Un usuario con experiencia puede influir el porcentaje deseado para tener en cuenta los valores de los cilindros articulados con un valor entre 0 y 100 %.

El objetivo es construir los anillos de manera que:

Separación en la cola del escudo

1. obtengan una forma redonda de círculo

2. se respete el radio nominal

3. no tengan contacto con el listón de limpieza, es decir con el interior de la cola del escudo, con los cepillos, etc.

El último objetivo puede ser seguido fácilmente midiendo la distancia entre el borde exterior del concreto y la cola de escudo. Los valores varían normalmente entre 0 mm. 70 mm, dependiendo del tamaño del escudo.

Dentro del módulo de construcción de anillos, se supone que las cuatro mediciones de separación en la cola del escudo se realizan en sus posiciones nominales (posición de las 12, 3, 6 y 9 horas).

Si se trata de elegir el anillo, la separación en la cola del escudo tiene una gran influencia y a veces es el único criterio. Para el montaje de un anillo no es decisivo como fue la propia conducción del escudo, si no que el espacio libre previsto para la cola del escudo.

Al tener que realizar la entrada de la separación en la cola del escudo de nuevo para cada avance y para controlar este valor antes de cada cálculo, el programa inicia con la pestaña "Valores de inicio I" con el campo de entrada enfocado para la separación en la cola del escudo superior.

Adicionalmente pueden ser representados los campos para la separación en la cola del escudo de color tras guardar los valores de inicio estos campos volverán representados de forma tradicional. El fondo coloreado únicamente son para recordar al usuario que debe controlar estos campos. El ajuste del color debe ser realizado por el personal de VMT.

8.4 Separación nominal en la cola del escudo

La separación nominal en la cola del escudo ofrece al módulo de construcción de anillos un valor orientativo para el cálculo de los valores de la separación nominal en la cola del escudo para el cálculo de secuencia de construcción de anillos. La medida nominal debería ser el valor hipotéticamente medido con un anillo perfectamente centrado (con diámetro nominal) en cualquier punto.

8.5 Separación mínima en la cola del escudo

La separación mínima en la cola del escudo es el valor límite, que al ser traspasado causa la aparición del mensaje " Separación negativa en la cola del escudo. El valor puede ser p. ej. 0.0. Aunque es mejor introducir la aparente separación mínima en la cola del escudo e introducir como separación mínima en la cola del escudo el grosor del listón de limpieza que suele estar entre 20 mm. 30 mm. En este caso el programa avisa, con razón, si los anillos pre calculados ya han alcanzado el listón de limpieza.

Nota: La entrada en los campos para la separación nominal / mínima en la cola del escudo solo puede ser realizada después de un doble clic, inmediatamente al lado de los campos de entrada. De lo contrario los campos están desactivados para evitar entradas erróneas no deseadas.



Traslapes y escalones

IV. PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN EN SUELOS DUROS.

IV.1 ESTUDIOS PRELIMINARES.

Los proyectos de ejecución son realizados a continuación a partir de observaciones hechas sobre las galerías experimentales y también sobre los resultados de ensayos geotécnicos “in situ” y en laboratorios.

Proyecto de ejecución.

El proyecto de ejecución es elaborado conjuntamente a partir:

- De datos recogidos en el reconocimiento preliminar completados por los obtenidos con ocasión de la ejecución de galerías experimentales.
- De la clasificación geotécnica de los terrenos.
- De los resultados de ensayos geotécnicos.
- De un estudio teórico.

a) *Clasificación geotécnica de los terrenos*

Una clasificación especialmente concebida para los problemas de construcción de túneles ha sido adoptada en Alemania y en Austria. Consiste en observar el comportamiento de los diferentes terrenos encontrados por medio de galerías o nichos experimentales. El criterio de clasificación adoptado es la duración de estabilidad de la excavación experimental sin ningún revestimiento. (Laufler 1958), y esto conduce así a un reparto de los terrenos en clases A.B.C... G, en número de siete, obtenida a partir de un diagrama sobre el cual figuraban las siete zonas en cuestión, llevando en abscisa la duración de estabilidad de la excavación y en la ordenada *longitud libre* (o alcance eficaz “Wirksame Stützweite”), parámetro definido como siendo las más pequeñas de las dimensiones: *diámetro y longitud de la excavación no revestida*.

En los países de lengua almenada este criterio, está actualmente retenido para preparar las demandas de ofrecimiento a las empresas. En numerosos casos, la clasificación definitiva de los terrenos es establecida teniendo igualmente en cuenta unos resultados de ensayos geotécnicos. Un tipo característico de sostenimiento es entonces preconizado para cada clase de terreno como lo precisa de manera muy esquemática la figura 6 para las cinco primeras clases A a E. Los terrenos correspondientes a las clases F y G (la mayor parte del tiempo de los suelos) son llamados o denominados como “muy difíciles” y necesitan estudios particulares para cada caso. La excavación de túneles en tales medios impone a menudo unos tratamientos especiales de mejora, (inyección, congelación, etc.). bien entendido que las características de sostenimiento dadas sobre la figura 6 no se deben de adoptar sin reserva; procede el considerar escrupulosamente cada caso particular de manera a elegir el revestimiento continuo teniendo en cuenta la altura de cobertura, en función del modo de las excavaciones, de las condiciones de ejecución de los trabajos ... etc. La colocación en obra del método austriaco es, en efecto, muy flexible, y la clasificación de los terrenos y los tipos de sostenimiento se establecen a una clase cercana. Con todo rigor no hay

diferentes tipos bien característicos de sostenimiento: sino más bien una continuidad entre cada uno de ellos. Conviene también precisar que todo revestimiento puede ser reforzado después de su colocación y puede así pasar de una clase a otra.

b) Ensayos geotécnicos.

La finalidad de los ensayos geotécnicos ejecutados “in situ” o en el laboratorio es doble; a saber:

- Dar informaciones sobre la deformabilidad de los terrenos para permitir el efectuar unos cálculos teóricos sobre la distribución de las contracciones y de las deformaciones. En ciertos casos, las medidas de deformabilidad son asociadas a naturales.
- Determinar las características mecánicas del material para cada clase de terreno, es decir, las curvas o zonas intrínsecas.

Las características de deformabilidad de los terrenos intervienen en el cálculo de las distribuciones de las contracciones y de las deformaciones alrededor del túnel para cada etapa de ejecución (sección parcial o total).

Las obras especializadas de mecánica de suelos y de rocas tratan ampliamente problemas ligados a la determinación de los parámetros de deformabilidad, módulos de deformación, coeficiente de Poisson, ley de comportamiento etc...) No procede por tanto el extenderse ampliamente sobre estas cuestiones. A título indicativo, precisaremos simplemente que en Alemania los ensayos más corrientemente realizados son los ensayos con dilatómetro en sondeo, los ensayos con placa en cilindro plano en galería e, igualmente, en algunos casos particulares, ensayos dinámicos (basados sobre la medida de velocidad de propagación de las ondas) Todos los ensayos son realizados “in situ”.

La determinación de las características mecánicas de los terrenos juega un papel importante en el dimensionado del revestimiento. Las contracciones, calculadas o medidas, son en efecto confrontadas con la resistencia del terreno, lo que condiciona, en el estadio del proyecto de ejecución, las características del sostenimiento necesario para asegurar la estabilidad del conjunto.

Como para los ensayos de deformabilidad no nos extenderemos sobre las cuestiones de determinación de las características mecánicas del material. Los ensayos mecánicos mas corrientemente practicados son los ensayos de compresión simple, los ensayos de tracción indirecta, (ensayos brasileños, ProtodiaKonov, punzamiento, etc), los ensayos triaxiales y los ensayos de laboratorio son realizados y sobre todo interpretados, teniendo en cuenta la estructura del medio, el efecto de escala, las leyes de comportamiento del material.

El establecimiento del proyecto de ejecución no puede concebirse sin ensayos de anclaje, siendo el bulbo de anclaje uno de los elementos determinantes en la sustentación. Es en efecto, a partir de los ensayos de anclaje, realizados en cada clase de terreno, cuando serán determinadas las técnicas óptimas de anclaje, las fuerzas de rotura y las cargas admisibles en los bulones.

c) *Estudio teórico*

Los cálculos teóricos se basan especialmente sobre la simulación del comportamiento mecánico del medio alrededor de la cavidad; esto comporta una estimación de la distribución de contracciones, la determinación de las zonas de plasticidad o pseudoplasticidad, una estimación de las deformaciones, (convergencia en el túnel y eventualmente hundimiento en superficie). Esta simulación es realizada con ayuda de modelos matemáticos sobre ordenador por el método clásico de los elementos terminados, muy perfeccionado actualmente, (exageradamente algunas veces). Si bien la potencia de los ordenadores ha impulsado muy lejos los límites de posibilidad del método, conviene ser prudente en cuanto a la importancia a atribuir a los resultados de los cálculos teóricos. Estos últimos son, en efecto, tributarios, de una parte, de las hipótesis hechas sobre la estructura del medio, las leyes del comportamiento, las condiciones en los límites, etc. En Alemania Federal se efectúan evidentemente unos cálculos teóricos (Baudendistel, Malina, Müller 1970 a y b, Wittke 1970 etc.); estos cálculos permiten el dar unas características teóricas de sostenimiento, pero es sobre todo a partir de observaciones hechas durante la ejecución de los trabajos cuando será determinado el sostenimiento óptimo. Estas observaciones "in situ" consisten en un control y un seguimiento muy preciso del comportamiento del terreno con medidas de convergencias, extensometría y medidas de diferenciales, lo que será objeto de nuestro siguiente párrafo.

Durante la ejecución de los trabajos

a) *Medidas de deformaciones*

En la práctica, por tanto, el dimensionado real del revestimiento se determina en el estado de la ejecución de los trabajos efectuando *unas medidas de deformaciones* en el avance en perfiles elegidos por adelantado en cada clase de terreno encontrado. Estas medidas de deformaciones son hechas con ayuda de tasómetros, extensómetros o aparatos de medida de convergencia. Estos tres tipos de aparatos dan todas unas variaciones de longitudes entre unos puntos solidarios del terreno o del revestimiento. Es en función de la amplitud de las deformaciones como son ajustadas las características del sostenimiento (espesor del concreto lanzado, importancia del montaje de cimbras, densidad de las anclajes), de acuerdo con las exigencias reales del terreno, tomando como revestimiento de principio el determinado por el estudio teórico. Las medidas "in situ" sobre la obra misma permiten además el controlar si los resultados de los cálculos (deformaciones) son representativos, y por tanto el juzgar si las conclusiones deducidas de estos cálculos pueden ser consideradas como valederas.

Cuando pueden ser utilizados, lo que es el caso único para los túneles de poca profundidad, los "tasómetros" (o extensómetros situados desde la superficie del suelo) dan unos datos extremadamente interesantes porque suelen ser colocados en el terreno antes de la ejecución del túnel (fig. 8). La experiencia muestra que las primeras deformaciones aparecen netamente antes de que el frente de corte en el túnel haya alcanzado la sección de medidas. Así, para el metro de

Frankfurt, por ejemplo, el 30% de las deformaciones intervienen antes la travesía de plan de medida.

Con los extensómetros colocados desde el túnel, no se informa nada más que sobre la fase final de las deformaciones (aproximadamente los 20 a 50% últimos % de las deformaciones, en razón del retraso de colocación en obra de los aparatos).

Para las excavaciones de gran sección, este problema no se plantea generalmente, porque se tiene, en efecto, la posibilidad de colocar extensómetros de base transferible a partir de una galería de reconocimiento.

En algunos casos particulares de las medidas de las convergencias, (convergencia directa entre dos puntos o cadena integradora de convergencia) pueden ser utilizadas. Por razones de medidas de la obra, este tipo de mediciones no es frecuentemente adoptado.

Las medidas de deformación completadas por unas mediciones topográficas en superficies o en subterráneo a partir de puntos fijos, permiten el determinar los desplazamientos absolutos en las cercanías del túnel.

Las numerosas medidas hechas en Alemania muestran que las deformaciones crecen muy rápidamente desde la apertura de la excavación y son atenuadas cuando interviene el fraguado del concreto lanzado, parándose los movimientos cuando es terminado el revestimiento (cierre del revestimiento en los terrenos difíciles).

Para las excavaciones de gran sección, los alemanes prevén frecuentemente además de extensómetros, unos indicadores de deformación (tales como la cadena eléctrica de la firma Interfels) puesto en obra en unos barrenos de sondeos paralelos al eje de la excavación. Como para los tesómetros, esto permite incluso para las excavaciones muy profundas el conocer el comportamiento del terreno con avance. La experiencia, muestra que en ciertos casos el 80% de las deformaciones aparecen en el indicador de deformación antes de que las medidas hayan podido ser hechas en la pared de la cavidad en el mismo plano de medida.

Estas medidas de deformación son uno de los elementos más importantes para la puesta en marcha del nuevo método austriaco. Ellas permiten el controlar el comportamiento del terreno y de ajustar exactamente el revestimiento. Además, han dado la posibilidad de aprovechar una de las grandes ventajas del método austriaco mostrando que, incluso para los terrenos difíciles, las perturbaciones y desórdenes en las cercanías de la excavación eran mucho mas reducidas por este método que por todas las técnicas tradicionales de construcción de túneles.

b) Medidas de contracciones

En complemento de las medidas de deformación, es corriente también el efectuar unas medidas de contracciones en el contacto hormigón-roca (contracciones radiales) en el propio revestimiento (contracciones tangenciales) con ayuda de células de contracciones (células götzl, en general). Estas medidas son más delicadas que las medidas de deformación; la dispersión es bastante grande y la validad o la representatividad de los resultados se pone a menudo en duda. Se pueden,

sin embargo, sacar unas enseñanzas interesantes y confirmar que un sostenimiento ha sido correctamente concebido.

Para terminar, añadiremos además que el control de las fuerzas de anclaje constituye una medida indirecta de las contracciones. Esto puede constituir un método de auscultación cómodo de los túneles después de su ejecución.

CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS

La naturaleza de las rocas y sus propiedades tienen una gran influencia en su comportamiento y juegan un papel muy importante en la selección del método utilizado en su excavación. En seguida se enlistan las principales características de las rocas:

Características Petrográficas de las rocas:

Principalmente los contenidos minerales del macizo rocoso.

Características físicas de las rocas:

Son los definidos a partir de ensayos de compresión simple, pruebas triaxiales, densidad y dureza.

Características mecánicas de la masa rocosa

- ✚ Grado de fracturamiento, representado por el RQD (Rock Quality Designation).
- ✚ Clasificación de la roca basada sobre el esfuerzo de ruptura en compresión simple (Unconfined Compressive Strength), ver tabla de Deere y Miller en lo siguiente:

Clasificación	Kg/cm ²	Roca
1. Muy alta resistencia	2250	Cuarcita, Diarita, Granito
2. Alta resistencia	1125-2250	Gneis, Basalto
3. Resistencia media	550-1125	Caliza, Mármol
4. Resistencia baja	275-550	Arenisca, Lutita
5. Resistencia muy baja	275	Pizarra, Limolita

Según la clasificación de la roca de un macizo, se puede seleccionar el método de excavación: explosivos o máquina tunelera (TBM).

Los explosivos se pueden usar en los rangos de las rocas 1 a 4 y las máquinas tuneleras, según su tipo, se pueden usar en todos los tipos de rocas de 1 a 5.

IV.2 MÉTODO DE EXCAVACIÓN CON EXPLOSIVOS.

Introducción

Los explosivos son de uso muy común para la excavación de las rocas. Se usan para cortes de taludes, de bancos y excavación de obras subterráneas. Sin embargo, su uso en las obras subterráneas requiere un entrenamiento especial.

En el diseño de una voladura en un túnel se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros.

Tipo de roca: La propagación de las ondas provocadas por la detonación de un explosivo en un barreno es diferente para cada tipo de roca. La propagación de onda es más rápida en una roca dura que en una roca blanda. También la composición de la roca tiene gran influencia en la fragmentación de la misma y muchas rocas duras se rompen con mayor facilidad que una roca suave (comportamiento frágil).

Tipo de explosivo: Cada explosivo cuenta con características propias como son la densidad, la velocidad de detonación, la resistencia al agua, la energía disponible, etc., que son de suma importancia para decidir el material explosivo a elegir.

Factor de carga: Se define como la cantidad de explosivo utilizado para fragmentar un metro cúbico de roca y se expresa en gr/m^3 . El factor de carga depende del tipo de roca, del intemperismo de la masa rocosa y de la sección a excavar.

Geología local: La geología de la masa rocosa a excavar es el factor más importante al determinarse el diseño total de una voladura. Las estructuras geológicas tales como las fisuras, oquedades, fallas y posición de los estratos juegan un factor muy importante en los resultados de una voladura, por lo tanto se deben tomar las precauciones pertinentes para optimizar los resultados en cuanto a al factor de carga, al tipo de explosivo a las longitudes de los barrenos.

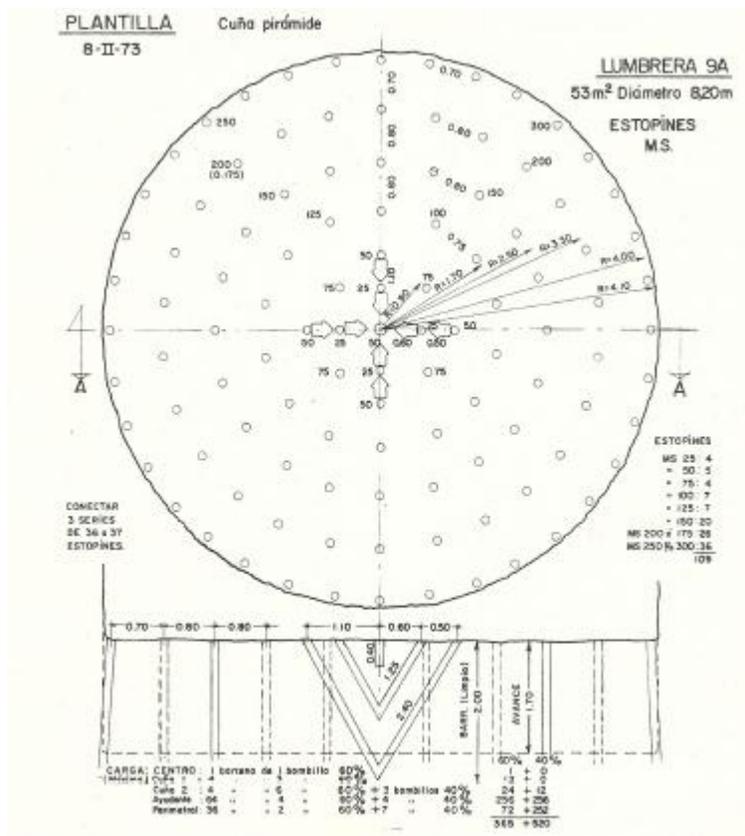
Barrenación: Los factores a considerar son el diámetro, la profundidad, el paralelismo de barrenación y la sub-barrenación.

Es importante que los barrenos sean dados en la posición y orientación correcta. La localización de los barrenos en la cara (frente), antes de ser perforados, deben hacerse con gran exactitud, los errores en la perforación tienen un efecto muy significativo en las excavaciones subterráneas.

En las voladuras de túneles y lumbreras es necesarios crear una segunda cara libre (cuña), hacia donde la roca puede quebrarse y desplazarse. La segunda cara libre se produce por la localización y orientación de los barrenos en la frente y disparos en un predeterminado orden, antes del resto de la voladura. Después de que se hace el corte, el resto de los barrenos de disparan hacia la cara libre, de acuerdo al diseño de retardos. El diseño de los barrenos restantes en el disparo se puede comparar a una voladura de banco.

✚ Métodos de excavación con explosivos

Método de sección completa: Este es un método usual en túneles de pequeño y mediano tamaño. Con este método se vuela la sección completa. La secuencia ideal consiste en: perforación, voladura y rezagado completo del material acumulado por el disparo y tratamientos eventuales en las paredes del túnel. El patrón de perforación, la profundidad, el número de barrenos, el equipo de perforación, el rezagado, la ventilación, etc. Deben ser por lo tanto bien seleccionados para llevar a cabo el ciclo completo.



Método de ataque superior y banco: Este método es muy utilizado en el caso de túneles de tamaño considerable, y consiste en abrir un túnel a lo largo del techo de la sección, consiguiéndose acceso para reforzar la roca en dicha zona. El resto de la sección se remueve con uno o más bancos.

✚ Tipos de cuñas

La parte inicial y más crítica en la apertura de un túnel o una lumbreira es la cuña, la función esencial de este corte es proporcionar una cara libre adicional hacia donde la roca quebrada pueda desplazarse. Existen dos tipos de cuñas: cuñas en ángulo y cuñas en paralelo. El segundo tipo de cuñas es el más usado en las aperturas de túneles.

Cuñas en barrenación paralela: a este tipo de cuña se le puede denominar también cuña quemada y está formada por barrenos en paralele de igual o diferente diámetro, con la salvedad de que algunos barrenos de la cuña no se cargan porque servirán de alivio a la roca fragmentada para empujarla durante la voladura. Para el funcionamiento adecuado de estas cuñas, es necesario un alineamiento y espaciamiento adecuado entre los barrenos, con el fin de obtener el avance diseñado para la voladura.

Secuencia y tiempo de disparo

En las cuñas quemadas, los primero barrenos en detonar deberán estar por lo general muy cerca de los barrenos vacíos. La roca fragmentada por los dos primeros barrenos en la cuña son empujados hacia los barrenos sin carga, antes de ser proyectado hacia fuera de la cada.

Cuando los retardos entre barrenos sucesivos se incrementan, se generan los siguientes beneficios.

- La cuña tiene una alta probabilidad de salir completa y el disparo tendrá también un avance completo.
- La rezaga tiene un alto y corto perfil.
- Los niveles de vibración son bajos ya que los barrenos tienen una cara libre efectiva.

Barrenos de producción

El espaciamiento de los barrenos de producción fuera del área de la cuña depende de muchos factores, que incluyen:

- El tipo de roca
- Diámetro del barreno
- La sección del frente
- Fragmentación requerida por el equipo de rezaga
-

El patrón de barrenación está afectado por el diámetro de perforación y el tipo de roca. Se deberá desarrollar y seguir un patrón sistemático de perforación. En el caso de túneles no es muy común que se utilicen barrenos mayores a 45 mm (1 ¾"); el diseño de bordos y espaciamientos aproximados son distintos para diferentes diámetros de perforación. Rocas más suaves o más duras requerirán menores o mayores bordos, respectivamente.

Medidas contra del sobre rompimiento

En rocas competentes pudiera no ser necesario el uso de técnicas especiales para obtener paredes y perfiles satisfactorios. Sin embargo, el espaciamiento entre barrenos perimetrales y de alivio deberá ser reducido.

Donde el terreno no es muy consistente, o el riesgo de caídos de roca puede ser importante, es esencial usar métodos de voladura perimetral. El éxito de cada técnica es muy independiente de la exactitud de perforación, el tipo de roca y el explosivo utilizado.

Las voladuras perimetrales tienen importantes ventajas para proporcionar paredes y perfiles que son firmes y bien cortados. Sobre todo cuando se utilizar un diseño adecuado de voladura para este fin.

En las voladuras perimetrales, el sobre rompimiento o afectación de la roca son minimizadas por:

- Reducción de la energía del explosivo por metro en los barrenos perimetrales.
- Reducción del espaciamiento entre barrenos perimetrales, usualmente $\frac{3}{4}$ del espaciamiento normal.
- Asegurar que el desplazamiento de los barrenos de perímetro sea de 0.6 a 0.785 veces el bordo.
- Disparar los barrenos perimetrales en el último retardo, una vez que el resto de los barrenos hayan creado una cara libre efectiva.
- Cargar los barrenos de pared con cargas desacopladas o con productos de menor energía.

IV.3 MÉTODO DE EXCAVACIÓN CON ESCUDO TBM.

Introducción

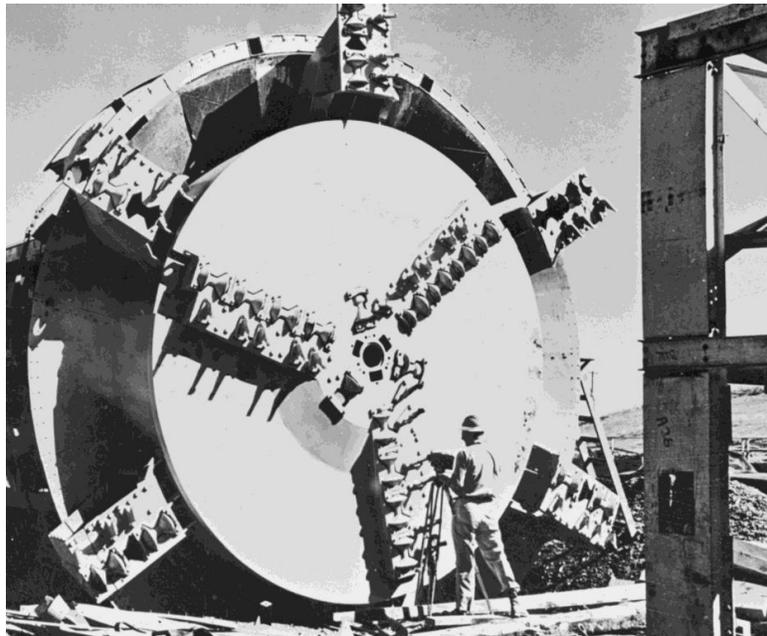
Frente a la alta demanda en la excavación de obras subterráneas en rocas durante las últimas décadas la investigación relativa a las máquinas tuneladoras de sección completa (TBM: Tunnel Boring Machine) se ha desarrollado de manera muy importante logrando rendimientos que difícilmente otro método de excavación, permitiría lograr.

Desde los años cincuenta, el desarrollo de las máquinas TBM sea ha enfocado sobre dos objetivos:

- Permitir a las máquinas tuneladoras excavar túneles en rocas duras, sanas y abrasivas.
- Permitir las máquinas tuneladoras excavar túneles atravesando distintos tipos de geologías, en rocas de buena a mala calidad integrando en este caso el tratamiento de las paredes del túnel atrás de la máquina.

La primera máquina TBM moderna fue diseñada y construida en 1956 con una diámetro de 3.28 m para ser usadas en un túnel de drenaje en la ciudad de Toronto, Canadá. Ha logrado excavar 4.5 km de túnel con éxito.

Actualmente los TBM son: De Frente abierto, De Viga principal, Tuneladoras de Doble Escudo, Single Shield TBM.





Chongqing Metro, Dos TBM's de Viga Principal de 6.3 m diámetro. 12 km (7.5 mi) de longitud con 8 estaciones.

Mejor turno 47 m (154 ft), promedio de avance 1,148 m (3,766 ft) por mes en arenisca.

Según las definiciones indicadas arriba, una roca dura se caracteriza por una resistencia media a muy alta.

Una máquina TBM de frente abierto típico para roca dura consta de tres conjuntos estructurales principales, a saber:

La cabeza cortadora: Está provista de cortadores de disco de diferentes tipos: cortadores dobles de disco para la parte central de la cabeza cortadora, cortadores de un solo disco y cortadores de contorno.



El soporte de la cabeza cortadora con las unidades de accionamiento y el cojinete principal: El apoyo de la cabeza cortadora y la viga principal constituyen la parte medular de una máquina TBM y proporcionan la base de sustentación de las otras partes.

El sistema de sujeción y el sistema de empuje: Existen dos tipos básicamente diferentes: las máquinas de doble agarre con dos sistemas fijos de sujeción, y las máquinas con una sola fijación dotadas de empujadores delanteros deslizantes (zapatas de apoyo extensibles) adicionales. Estos últimos se mueven hacia delante en forma simultánea con el proceso de avance y son los responsables de la estabilización de la cabeza cortadora.

TBM con escudo.

Los TBM con escudo se usan cuando las condiciones de la masa de roca son menos favorables, y se requieren medidas amplias para el soporte sistemático de la roca. Los TBM con escudo se pueden clasificar en escudos sencillos y en escudos dobles (telescopicos). Con la cabeza al frente, la parte restante de estas máquinas está integrada a una estructura cilíndrica de acero. En la parte posterior protegida del escudo se puede colocar el revestimiento del túnel mediante la erección de dovelas de concreto.

El procedimiento típico mediante un TBM con escudo es el siguiente:

- Excavar la longitud correspondiente a una carrera (el TBM avanza hacia delante por el empuje de los gatos).
- Detener la máquina y retraer los gatos de avance.
- Instalar los segmentos prefabricados de concreto en el espacio libre de la cola del escudo para formar un anillo completo de dovelas.
- Empujar con los gatos actuando contra el nuevo anillo de dovelas instalado e iniciar la excavación para la siguiente carrera.



✚ Ventajas generales contra desventajas generales de los equipos TBM de frente abierto y de escudo

Máquina	Ventaja general	Desventaja general
TBM de Frente Abierto	<p>Listo para funcionar óptimamente en la excavación de túneles con excelente rapidez de avance.</p> <p>Soporte temporal de la roca a continuación de la demanda real local, con posibilidad de ser reforzada en etapas posteriores, en caso necesario.</p> <p>Acceso más fácil al frente del túnel y a las paredes laterales para consolidación e inyectado o trabajos de sellado.</p> <p>Fácil control del comportamiento de la masa rocosa en combinación con mediciones geotécnicas; posibilidad de optimar el diseño del revestimiento final.</p> <p>Posibilidad de diámetros variables de excavación.</p> <p>La inversión en el equipo tunelero se puede prorratear entre varios proyectos de túneles, con una fácil rehabilitación de la TBM para diferentes diámetros de excavación.</p>	<p>El proceso tunelero implica una gran flexibilidad para adecuar el soporte del túnel y la logística a la situación real.</p> <p>Soporte temporal de la roca muy complejo (costoso) a pesar del revestimiento final.</p> <p>Tasas de avance relativamente bajas en condiciones de roca de mala calidad (en comparación con los escudos tuneladores).</p> <p>No hay plena garantía de que la máquina TBM no se vaya a atorar en zonas falladas o debido a convergencias altas.</p> <p>Hay problemas de sujeción y de maniobrabilidad en terrenos pobres o en formaciones locales de roca muy blanda</p>

Máquina	Ventajas generales	Desventajas generales
TBM con escudo	<p>Excavación muy sistemática del túnel que permite una “curva de aprendizaje” de corta duración para que el contratista se familiarice.</p> <p>El comportamiento del túnel es casi independiente de una amplia gama de condiciones de la masa rocosa para lograr una rutina eficiente de trabajo de operación y</p>	<p>Riesgo de que se atore el escudo debido a convergencia o a efectos expansivos del túnel excavado (el riesgo es mayor durante suspensiones para mantenimiento o en días feriados.</p> <p>Posibilidades de maniobrabilidad limitadas para la máquina en</p>

	<p>logística de la TBM.</p> <p>Enfoque seguro y sistemático para diseñar el revestimiento del túnel. No intervienen los tipos de soporte de roca ni las variaciones locales.</p> <p>Condiciones de trabajo seguras para el personal.</p>	<p>terrenos muy blandos.</p> <p>Enfoque conservador (costoso) para el diseño del soporte del túnel (dovelas): se relaciona con coberturas de masas de roca pobres y consecuentemente sobrediseño en tramos más favorables de túnel.</p> <p>Mayor investigación para equipos tuneladores y para fabricación de dovelas de concreto.</p> <p>Menores posibilidades para el contratista de encontrar un nuevo proyecto para el escudo excavador, cambios muy limitados y muy costosos del diámetro de la excavación; mayor amortización de la inversión.</p>
--	--	--

- ✚ Investigaciones geológicas y geotécnicas preliminares para excavación de túneles en roca con máquinas TBM.

Los parámetros importantes a tomar en cuenta en un proyecto de excavación de túnel en roca mediante TBM son:

Parámetros geológicos

- Resistencia de la masa rocosa y sus propiedades elásticas.
- Tipo de rocas atravesadas.
- Perforabilidad y abrasividad de las rocas (análisis petrográfico).
- Clasificación de la masa rocosa según los sistemas estándares internacionales (RMR de Beniaowski, Q de Barton, etc.).
- Posibilidad de existencia de gas.

Parámetros relativos al túnel.

- Características geométricas del trazo: pendientes, radios de curvas, etc.
- Requerimientos en soporte: anclas, concreto lanzado, concreto colado, marcos metálicos o dovelas de concreto.
- Limitaciones de la presión de agua.

Parámetros necesarios para el diseño de la máquina TBM.

- Especificación del tipo, espaciamento y perfil de los motores para asegurar el toque necesario para el avance de la máquina TBM.



El TBM de Roca más grande del Mundo, lanzado en Septiembre del 2006.

Primer Ensamble en Sitio (OFTA)

IV.4 METODO AUSTRIACO.

Introducción

Los recientes progresos realizados en la construcción de túneles y el desarrollo de las nuevas técnicas, se explican en gran parte por el hecho de que el ingeniero ha tomado conciencia de que era esencial, o sea imperativo, cuando se hace la apertura de una excavación, el perturbar al mínimo las condiciones naturales en el macizo.

En el estado inicial, el terreno se encuentra en un estado de tricontracciones naturales. Este estado se encuentra notablemente transformado durante la excavación de un túnel que tiene por efecto el descomprimir el terreno. Es por tanto elemental y necesario el adoptar unos métodos de construcción que permitan el evitar, o limitar al máximo la tremendamente nefasta descompresión de los terrenos en las proximidades de la excavación. Esta descompresión interna se acompaña, en efecto, de una dilatación (Auflockerung) y de una caída irremediable de las características mecánicas del medio, a un punto tal que en un terreno descompresionado, la estabilidad del conjunto no pueda ser asegurada nada más que al precio de la puesta en obra de una sustentación muy importante.

Una primera limitación aunque reducida, de las perturbaciones y de la descompresión en el medio natural, viene conseguida por excavación sin explosivos por medio de la excavadora mecánica o máquina de avance, o incluso, cuando es el explosivo necesario, por aplicación de las nuevas técnicas de precorte.

Sin embargo, es sobre todo por medio de la sustentación que es posible el limitar al máximo la descompresión y sus efectos nefastos. De esta constatación ha nacido el nuevo método austríaco de construcción de túneles, debido al profesor austríaco Rabcewicz, y desarrollado en los países de lengua alemana desde hace más de una decena de años. Este método abandona la sustentación provisional, siempre problemática, utilizando desde la apertura de la excavación en sección parcial o total, el hormigón proyectado como revestimiento definitivo. La acción del hormigón proyectado, con una capa ligera e incrementada por el anclaje, lo que da por efecto que el terreno sea apto para soportarse a sí mismo, elimina totalmente los riesgos de descompresión.

El fin de esta exposición es el de presentar este nuevo método austríaco de construcción de túneles, poco conocido y por tanto no aplicado en muchos países. Después de haber esbozado, los principios del método, comparándolo con los métodos convencionales, daremos algunos detalles tecnológicos para la puesta en obra del método e insistiendo sobre los problemas puramente geotécnicos. Una presentación sucinta de algunas obras realizadas en Alemania Federal ilustra a continuación la exposición, que termina abordando los aspectos económicos del problema de puesta en obra de este método comparado con los métodos tradicionales.

Principio del nuevo método austríaco.

Para comprender bien los principios del nuevo método austríaco, es conveniente compararlo con los métodos convencionales en todos los estados de la ejecución de los trabajos.

Según las técnicas tradicionales, la excavación se hace según la más grande sección posible y guardando como objetivo la rentabilidad de la perforación, debiendo ser la sección mínima a arrancar compatible con la dimensión de los elementos de sustentación (cimbras metálicas). Por el contrario, con el método austríaco se esfuerza uno en reducir al máximo los desordenes en el terreno trabajando en sección parcial muy débil, si es posible con excavación mecánica o en caso contrario con un plan de tiro finamente calculado, franqueando unos problemas de rendimiento previstos.

Después de la excavación en el método convencional, el sostenimiento provisional es asegurado por cimbras metálicas, muy pesadas, sobredimensionadas, que no se adaptan en absoluto al perfil exterior. Cualesquiera que sean las técnicas adoptadas, se realiza así un sostenimiento rígido que no tiene nada más que contactos parciales con el macizo. A menudo, este contacto no se establece nada más que después de una deformación importante (convergencia) arrastrando la aparición de zonas de descompresión muy extendidas en el terreno. Este proceso tiene consecuencias múltiples, muy desfavorables: por una parte, una caída de las características mecánicas de los terrenos en las zonas tocadas por la descompresión y, por otra, la movilización de fuerzas concentradas muy elevadas en el punto de contacto entre el sostenimiento provisional y el macizo. Estas fuerzas concéntricas son a veces tan elevadas, en razón de su carácter de punta, que llevan un deterioro (que puede llegar hasta la rotura) de las cimbras metálicas. Utilizando el concreto lanzado, ligeramente armando de varillas soldadas, se realiza por el contrario un sostenimiento continuo, perfectamente solidario con el terreno, adaptándose exactamente a las irregularidades del perfil y rellenado los vacíos y fisuras del macizo. A esto, se añade que el concreto lanzado es de una colocación en obra muy rápida sea cual sea la sección del túnel. Las primeras capas de concreto lanzado, desde su aplicación, aseguran una protección del macizo contra toda forma de alteración. El sostenimiento con concreto lanzado, incluso considerado como provisional, presenta incontestablemente una gran superioridad, tanto sobre el plano geotécnico, tecnológico, como económico sobre el sostenimiento tradicional por cimbras metálicas o cerchas.

Las diferencias esenciales entre el procedimiento convencional y el nuevo método austríaco aparecen quizá todavía más netamente en el estadio final de la construcción. La figura 1 representa esquemáticamente dos perfiles tipos de túnel con su sostenimiento definitivo: el uno, según el método convencional y, el segundo según las técnicas austríacas. Las diferencias llevan en primer lugar a los tres puntos siguientes:

- Las técnicas de colocación en obra del sostenimiento.
- El tiempo de colocación en obra del sostenimiento.
- El procedimiento mecánico del sostenimiento.

El último punto es en gran parte el resultado de las dos anteriores.

La sustentación tradicional está constituida por una bóveda de hormigón encofrado, colocado según la abertura de la excavación en sección total. En ciertos casos, el sostenimiento provisional

(cerchas o cimbras metálicas) es dejado en obra, es incrustado en la bóveda; juega entonces el papel de armadura. A pesar de la inyección de relleno, es simple difícil el tener una buena unión entre la bóveda y el macizo. Para remediar los efectos nefastos de la descompresión, el espesor de la bóveda debe en general alcanzar unos valores del orden de los 80 a los 100 centímetros. La bóveda es entonces muy rígida y muy pesada, y esto necesita por tanto encofrados deslizantes importantes que paralizan completamente la obra, lo que excluye en general la posibilidad de ejecutar el sostenimiento definitivo inmediatamente después de la excavación. Plazos de varios meses, a veces de un año, intervienen a menudo entre la excavación y la colocación del revestimiento definitivo.

La bóveda tradicional en concreto colado con cimbra, constituye por tanto una sustentación:

- De mucho plazo para ser colocada.
- Demasiado rígida, con lo que la bóveda no se adapta así a las exigencias del terreno.
- No está solidariamente ligada al macizo.

Como hemos precisado más arriba, el nuevo método austríaco de construcción de túneles se caracteriza esencialmente por la utilización del concreto lanzado para el revestimiento definitivo, una vez que la excavación, en sección parcial o total es realizada con el fin de bloquear en cierto modo el macizo; es decir de limitar al máximo la descompresión mejorando con ello la resistencia mecánica del terreno y haciéndole capaz de sostenerse por sí mismo.

El concreto lanzado protege el terreno desde su colocación contra toda acción de agentes externos tales como el agua o el aire. Este armado según las necesidades, en general por un entramado soldado (de diámetro de 6 a 8 m/m). Su comportamiento y la adherencia del revestimiento al macizo quedan asegurados por la colocación de una red de anclajes de poca longitud, (de 3 a 6 metros para los túneles de sección inferior a los 100 m²). Las fuerzas de anclaje son generalmente tomadas inferiores a 20 toneladas. La densidad de los anclajes es adaptada a cada caso en particular. Generalmente esta densidad es tomada entre los dos límites siguientes: un anclaje/4 m² y un anclaje/20 m², valores que se dan solamente a título indicativo. En los difíciles, la acción de las armaduras y del anclaje es reforzado por la colocación de cimbras metálicas ligeras incrustadas en el concreto lanzado.

El espesor del revestimiento terminado pasa generalmente entre 10 y 30 cms. Teniendo esto en cuenta de los aspectos máximos de fuera de perfil. Para una sección útil dada de túnel, (abertura libre) la sección del revestimiento tradicional y de los rellenos (por inyección) puede sobrepasar, según Muller el 50% de la sección útil, mientras que por el método austríaco, esta misma sección no alcanza sino raramente el 10% de la misma sección útil. El método austríaco permite, por tanto, el hacer una economía sustancial sobre la sección total a excavar para una sección útil dada, y esta economía puede alcanzar el 40% de la sección útil.

El concreto lanzado armado y anclado al macizo contribuye a dar al terreno en las proximidades de la excavación una presión de confinamiento suficiente como para aumentar considerablemente su

resistencia mecánica. El conjunto constituido por el revestimiento y por los anclajes permite por tanto al terreno el participar en una gran parte en el sostenimiento del medio, y esto es en razón de la formación de una bóveda monolítica compuesta por el hormigón y el terreno. El terreno, ayudado en cierto modo por el revestimiento exterior, se vuelve auto-portante. Por su propia naturaleza, la bóveda así realizada conserva una cierta flexibilidad que le permite, en consecuencia, el adaptarse mucho mejor a las modificaciones del medio debido a la excavación y a la redistribución de las contracciones. Los deformados de las secciones iniciales son frecuentemente asimétricos en los terrenos anisótropos. Un tal comportamiento no puede intervenir en el caso de una bóveda rígida (método convencional) que se encuentra a menudo sobre dimensionada en ciertas zonas e igualmente demasiado solicitada o incluso subdimensionada en otras.

Para explicar los dos procesos de sostenimiento por el método tradicional y la nueva técnica austríaca, es cómodo el razonar sobre un diagrama de Mohr. Se trata de un caso de un terreno difícil que necesita sostenimiento.

La puesta en obra de las técnicas tradicionales se acompaña generalmente siempre de una descompresión, que lleva consigo una dilatación del macizo y una dislocación sobre todo localizada en corona. Esta dislocación incluso cuando es insignificante, lleva consigo una caída de las características mecánicas del terreno. En tales circunstancias, la resistencia límite se encuentra ampliamente rebasada, (el círculo de contracciones corta a la curva intrínseca 1), parecen entonces unos desórdenes y unas roturas más o menos importantes en el macizo.

Con la utilización del concreto lanzado colocado en los minutos que siguen a la excavación, la descompresión del macizo no tiene tiempo de intervenir, (la sección de arranque, total o parcial, será elegida de manera que este imperativo sea respetado).

La primera capa de concreto lanzado bloquea al macizo en superficie, suelda los bloques rocosos, cimenta las fisuras y las juntas y mejora así la cohesión del macizo, aportando al mismo tiempo un ligero confinamiento. Este confinamiento juega, como veremos, un papel muy importante. Sobre el diagrama de Mohr se tiene por tanto una evolución, esquematizada sobre el diagrama opuesta a la que interviene en el caso del método tradicional. Se beneficia de una mejora de las características intrínsecas del material y, además de una transferencia del círculo de contracciones en el sentido de las contracciones normales positivas, en razón de la reacción P (confinamiento) aportada por el revestimiento continuo del concreto lanzado. Esta reacción P_i se encuentra muy favorablemente amplificada por la puesta bajo tensión de los anclajes. Así por el método austríaco, el material no se deteriora mecánicamente sino que, al contrario, se mejora y por vía de las consecuencias los riesgos de desórdenes de roturas se encuentran alejados. Las dimensiones del revestimiento (espesor del hormigón proyectado, anclajes), debe ser tal que los círculos que representan los estados de contracciones, alrededor del túnel no se encuentran allí donde las curvas intrínsecas del material. Este razonamiento permanece valedero, cualquiera que sean la razón y la dirección consideradas en pie derecho (compresión) o en corona donde las contracciones de tracción pueden intervenir.

En el compartimiento del macizo a través del cual se abre una excavación, tres fenómenos son de primera importancia, a saber:

- 1) *la influencia de la descompresión y de la dilatación del macizo sobre la resistencia mecánica.*

Según Müller (1970), una dilatación (volumétrica) V/V de 2 a 3% puede llevar consigo para ciertos macizos rocosos una pérdida de resistencia del orden del 80 al 90%.

- 2) *La influencia del grado de confinamiento $n=0.3/0.1$ sobre la resistencia.*

Es necesario evitar que el terreno trabaje en tensión (en corona) o en compresión uniaxial (en pie derecho). La resistencia de los medios naturales, a menudo fisurados, depende estrechamente del grado de confinamiento y de la orientación del tensor de contracciones como lo muestra la figura 3 debida a Müller y Palher (1965).

- 3) *La influencia del factor "tiempo" sobre la descompresión del macizo y sus consecuencias.*

El factor tiempo juega un papel muy importante en el proceso de descompresión, seguido de fenómenos de dilatación y de dislocación. En el nuevo método austriaco, las oportunidades de éxito serán tanto mayores cuando la colocación y el fraguado del concreto proyectado sean más rápidos.

A estos tres puntos corresponden evidentemente tres imperativos fundamentales a respetar cuando se trata de la construcción de túneles:

- 1) Evitar o limitar toda descompresión o dislocación del macizo en las cercanías de la excavación.
- 2) Aportar en cuando sea posible a la pared de excavación un confinamiento continuo para neutralizar los estados de contracciones uniaxiales.
- 3) Utilizar lo mejor posible el tiempo disponible antes de que el macizo se deforme.

Está claro que ninguna de estas tres condiciones se respetaba en el método convencional. Esto tiene por consecuencia el hacer intervenir unas sobrecargas anormalmente amplificadas en razón de las consecuencias de la descompresión. En función del problema planteado y del fin a alcanzar, el nuevo método austriaco de construcción de túneles permite, por la afortunada asociación del hormigón reforzado por entramados soldados (y eventualmente de cimbras ligeras) y arraigado al terreno por anclaje, es capaz de realizar un sostenimiento que presenta las siguientes características:

- Es de colocación en obra rápida, inmediatamente después de la excavación.
- Constituye un revestimiento definitivo

- Puede intervenir en sección total o parcial, incluso de bajas dimensiones, para los terrenos muy difíciles o los túneles de gran sección.
- Es flexible y se adapta por ello a los caprichos del terreno;
- Es continuo y no engendra así ninguna fuerza de punta elevada entre el macizo y el revestimiento.
- Es perfectamente solidario al terreno y forma con él una bóveda monolítica.
- Mejora las características mecánicas del medio natural soldando los bloques entre sí, cimentando los vacíos, juntas o fisuras.
- Aporta una presión radial de confinamiento estabilizadora en el macizo.
- Hace posible el drenaje del macizo.

Sobre el plano geotécnico, la elaboración del proyecto de ejecución necesita en contrapartida:

- Un buen conocimiento del medio y de las características mecánicas de los materiales (en obra y su evolución).
- Una evaluación del estado de las contracciones en el macizo alrededor de la cavidad excavada, en sección parcial o total.
- Un control muy preciso de las deformaciones “in situ” en el estudio de la ejecución de los trabajos en vista a comprender el sostenimiento a las necesidades, jugando sobre los parámetros variables (espesor de concreto lanzado, ferrallas densidad de anclajes, etc.).

Estos tres puntos definen perfectamente la naturaleza y la importancia de los estudios geológicos y geotécnicos (observaciones sobre el terreno, ensayos “in situ” y en laboratorios, cálculos teóricos, etc.) que procede el prever para poner en obra el nuevo método de construcción de túneles.

Problemas geotécnicos

La puesta en obra del método austriaco necesita, en principio, como la mayoría de los trabajos en roca, un buen reconocimiento geológico e hidrogeológico (para la piezometría y las permeabilidades) así como una primera identificación geotécnica de los terrenos encontrados. Esta identificación puede ser realizada a partir de un perfil geofísico completado por unos logaritmos de índices de resistencia y de índices de fracturación (Rock Quality Designation R Q D, por ejemplo) en los sondeos.

Un análisis de la estructura del medio es igualmente conveniente efectuarla en el estudio del anteproyecto. Los caracteres continuo-discontinuos. Homogéneo-heterogéneo, isótropo-anisótropo. De los terrenos a atravesar son a considerarse con el mayor rigor posible. Es, en efecto, de esta caracterización de lo que dependen la naturaleza y la importancia del estudio geotécnico, (estudio teórico y ensayos) de los estudios que haya que realizar.

V. CONCLUSIONES

Como se puede apreciar, en todos los procedimientos que se utilizan para la excavación de las lumbreras en suelos, exceptuando la Técnica Túnel y la Técnica Estrella, son utilizados los muros colados en el sitio, excavados con diferentes procedimientos y equipos, dando con ello resultados diferentes en calidad y tiempo de ejecución.

En las lumbreras excavadas en tobas o roca es necesario, por la cantidad de agua existente, perforar pozos en todo el perímetro, colocando en cada uno de ellos una bomba de pozo profundo, ayudando a disminuir en gran parte las filtraciones y aminorando el bombeo interior que normalmente se lleva en una excavación de lumbrera, este bombeo es hecho a base de bombas centrífugas y en profundidades mayores de 30 m, se hacen nichos de traspaleo.

Cuando no es posible abatir el nivel freático a base de bombeo exterior, previo a la excavación, se procede a hacer inyecciones, obligando con ello a disminuir la permeabilidad de la roca.

A continuación se explica el ciclo de trabajo que se obtiene en la excavación de una lumbrera:

Datos:

- a) Diámetro.....7.20
- b) Área de la sección.....51.84 m².
- c) Tipo de material.....roca muy fracturada con empaque de arcilla
- d) Cantidad de agua.....casi nula (30 /seg)
- e) Tipo de ademe.....marcos con retaque de madera
- f) Equipo de rezaga.....Eimco 632
- g) Sistema de manto.....draga de 1.15 m³ (1 ½ yd³)
- h) Capacidad del bote de manto.....0.8 m³
- i) Cantidad de barrenos.....54 pzas
- j) Longitud de barrenación....1.50 m

Tiempos:

- a) Barrenación y limpieza.....3.00 h
- b) Carga de explosivos y conexión.....2.00 h
- c) Retiro, voladura y ventilación.....0.75 h
- d) Bajada de equipo de rezaga y rezagado.....6.00 h
- e) Retiro de equipo de rezaga.....0.50 h
- f) Ademe.....1.50 h

13.75 h

Comparando los tiempos del ciclo de excavación de un túnel y una lumbrera de la misma sección, los tiempos de excavación de lumbreras son mayores debido a que es una excavación vertical y cada que sube o baja material, equipo, rezaga, etc., las actividades se suspenden por completo pues el personal se pega a las paredes de la lumbrera para protegerse.

El procedimiento de construcción de túneles con escudo abierto, es reciente en México. La decisión de utilizar este sistema se debe a que con el método tradicional peligraría la estabilidad del túnel, ya que el terreno por el que pasa el trazo está constituido principalmente por limo, arena, arcilla y combinaciones de ellos, cuya resistencia al esfuerzo constante es de baja a muy baja.

Mediante el escudo, la estabilidad del frente queda asegurada con la presión que se le aplica con el mismo escudo, y la del túnel con el ademe de anillos de dovelas.

El avance que se obtiene supera algunas veces al del método tradicional, tomando en cuenta que depende de varios factores, como son:

- a) Características del terreno que influyen en la rapidez del corte.
En terrenos con estratos de arena que contienen agua, el material fluye y el ademado tiene que hacerse con mucho cuidado, teniendo en ocasiones que quitarse tabla por tabla, cortando el terreno y ademando nuevamente inmediato, para evitar que el frente se caiga. Si el terreno es por lo contrario, demasiado duro o compacto, el corte debe hacerse con martillos neumáticos más pesados, que hacen más lento el avance.
- b) Eficiencia del equipo
Esto se obtiene con un mantenimiento regular del mismo, así como de una operación cuidadosa.
- c) Sistema adecuado para el avance.

Se debe contar con un Cambio California cercano al escudo y con otra vía doble en el túnel para poder almacenar corridos de botes vacíos o llenos y de velas acomodadas en el truck para el armado del anillo.

Es importante asimismo, tener un número suficiente de botes repartidos en las corridas necesarias para la rezaga del material proveniente de la excavación.

En el manto, un eficiente sistema para desalojar el material del túnel y vaciarlo en los camiones que lo llevarán al tiro.

- d) El aspecto humano, debido a que es el obrero quien puede acelerar o incrementar su rendimiento normal.

En algunos países se ha logrado encontrar un promedio de avance diario con escudo en túneles que atraviesan materiales como limo-arenoso algo compacto, siendo de 5.5 m para túneles con un diámetro semejante al nuestro.

Si el material es arena fina con agua, el avance decrece a 2.25 m por día aproximadamente. En nuestro caso, se ha logrado avanzar 6 m con relativa facilidad (en zonas donde el material es limo-arenoso).

Debe hacerse hincapié en el alto índice de seguridad que proporciona el método de excavación con escudo, que es superior al que proporcionan otros métodos. El número de accidentes de trabajo es reducido y lo que es más importante, la mayoría de ellos son leves.

De lo anterior se concluye que el método de excavación con escudo abierto en el Interceptor Central del Sistema de Drenaje Profundo para el Distrito Federal, donde se tienen materiales relativamente estables, es el más conveniente teniendo en cuenta el alto rendimiento del avance logrado y la seguridad que proporciona, así como el mínimo daño que se produce en las construcciones urbanas de la superficie.

La utilización por primera vez en México de aire comprimido a baja presión en la excavación de túneles, está permitiendo acumular una experiencia incalculable del comportamiento del personal y del terreno que deberá ser aprovechado en el futuro inmediato, los resultados hasta la fecha son muy satisfactorios y los controles que se están llevando permitirán definir con claridad la bondad del método utilizado.

El nuevo método austriaco, basado sobre la utilización del para “bloquear” el terreno a partir de su apertura, marca un progreso muy concreto en el campo de la realización de excavaciones subterráneas, tanto en los conjuntos rocosos como en los terrenos difíciles.

Este progreso científico y técnico ha sido posible gracias a un mejor conocimiento del comportamiento mecánico del medio en razón esencialmente de las observaciones y medidas efectuadas sobre el terreno.

Las posibilidades de cálculos, considerablemente acrecentadas, por los progresos recientes de la informática, han contribuido igualmente a explicar ciertos fenómenos, pero hay que subrayar que no es nada más que a partir de los cálculos teóricos cuando las características óptimas de las excavaciones, (naturaleza y dimensionado del sostenimiento, pueden ser determinadas.

Es necesario resaltar que los empujes del terreno sobre el revestimiento dependen muy poco de la resistencia del material sino esencialmente de la manera con la cual son realizados la excavación y el sostenimiento (historia de la obra).

Toda perturbación, incluso ulterior a la realización de la cavidad, puede jugar un papel importante sobre las presiones, así como el remplazado del sostenimiento provisional por el revestimiento definitivo en el método convencional puede llevar consigo unos desórdenes importantes en el macizo y movilizar unas sobrecargas suplementarias que actúan sobre el revestimiento. Por el método austriaco todo riesgo de este género queda descartado; en efecto, el revestimiento de concreto lanzado reforzado y anclado al terreno es definitivo desde la apertura de la cavidad. Esta manera de proceder permite sobre todo, como lo muestran las medidas de las deformaciones, el eliminar los efectos nefastos de la descompresión. Después del arranque, los movimientos se

atenúan rápidamente; y los primeros esfuerzos consecutivos a la descompresión son, en efecto, soportados desde su aparición, si bien que toda degradación del macizo se encuentra ausente.

El campo de aplicación del nuevo método austriaco de construcción de túneles es muy amplio. Su gran flexibilidad de utilización permite su puesta en obra tanto en macizos muy compactos como en rocas alteradas o en terrenos difíciles, (entre otros los suelos). Se puede incluso afirmar que el método es aplicable en todas partes, bajo la reserva expresa de que se puede realizar sobre todo el perfil del túnel una cavidad de por lo menos una decena de metros cúbicos estables durante un tiempo lo suficientemente largo como para permitir la colocación y el fraguado del concreto lanzado. Este imperativo fija por tanto los límites de aplicación del método, así como no puede ser realizado, por ejemplo, en los suelos sin cohesión como terrenos con bolos sueltos o demasiado plásticos.

En razón a la gran extensión de su campo de aplicación, el método austriaco es por tanto particularmente bien apto para la travesía de los terrenos muy heterogéneos. En tales medios, el principio de sostenimiento permanece el mismo, y solamente varían la importancia del acero densidad de los anclajes.

El nuevo método austriaco es por tanto muy racional por tres razones principales: el proceso de sostenimiento es óptimo mecánicamente hablando, el sistema no es engorroso, entre otras cosas, por los elementos de sostenimiento provisional y de los encofrados deslizantes y, en fin, sobre el plano económico, el método austriaco puede ser puesto en obra a un precio de costo inferior al que interviene cuando se aplican las técnicas tradicionales. El mayor problema a remontar en los países donde este método no es corrientemente adoptado, es el de convencer al maestro de obra de las ventajas del método e igualmente el de hacer admitir a la empresa el formar equipos para estas nuevas técnicas, como era el caso en Alemania Federal hace una decena de años.

VI. BIBLIOGRAFIA

Comisión Nacional del Agua, **Archivo Histórico del Agua**; México 2011.

Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, **Curso "Victor Hardy 1998"**, México, D.F.; octubre 1998.

Víctor Manuel López Aburto, **Fundamentos para la Explotación de Minas**, División de Ingeniería de Ciencias de la Tierra; Facultad de Ingeniería; 2003.

Trinidad García, **Los Mineros Mexicanos**, Editorial Porrúa; 1995.

Construcción de Obras Subterráneas en Suelos, **Seminario**; febrero 1987.

Túnel S.A. de C.V., **Memoria Técnica de las Obras del Drenaje Profundo del Distrito Federal**, Tomo 1.

Reporte técnico, **Exploración del Subsuelo para Túneles en Suelos Blandos**, reporte técnico; Amitos, México D.F., 1993

Ing. Luis Ayestaranr, Ing. J. Jacobo Schmitter, Solum S.A., **Aire comprimido en túneles**

Copco Robbins, Askilsrudo. G, **Hard rock excavation by tunnel boring machines**; 1997

Excavación mecanizada de túneles en roca; Conferencia amito, Büchie; 1998

John Wiley & Sons, Lamgeforsu. y kihiströmb, **The modern techniques of rock blasting**; 1963

Uso de explosivos en obras de ingeniería civil, **Seminario de la sociedad mexicana de mecánica de rocas**, Smmr; 1997

A. Balkema, Rotterdam Wagner Harald, Schulter Alfred; **Túnel boring machines**; 1966

Referencias

1. Programa maestro del metro. Segunda revisión versión 1985. Departamento del distrito federal. Secretaría general de obras Comisión de vialidad y transporte urbano.
2. Plan rector de vialidad y transporte del distrito federal. Versión abreviada de la actualización a junio de 1982. Covitur, D.F.
3. Anuario de vialidad y transporte 1983. Departamento del distrito federal Coordinación general del transporte.
4. Metro de la ciudad de México. Características de las líneas. Covitur, D.F., diciembre 1986
5. El subsuelo de la ciudad de México. Marsal, Raúl J. y Mazari, M., Facultad de ingeniería, UNAM, 1959
6. Características geológicas y geotécnicas del valle de México, no. 1, serie 100 kilómetros de metro, Mooser, F., Tamez, E. Etal, D.F, Secretaría General de Obras y Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, septiembre 1986.
7. Construcción e la zona poniente del valle de túneles para el metro de la ciudad de México (en preparación), serie 100 kilómetros de metro, Veytia, M., Ocampo r., et al, D.F., Secretaría General de Obras y Comisión de Vialidad y Transporte Urbano.
8. Informe de costos de la obra civil del metro. Informe interno, vocalía de construcción del metro. Área técnica. Subgerencia de control de estimaciones. Covitur, D.F, junio 1985.
9. Broms, B. B. And Bennermarkh. "Stability of clay in vertical openings". Proceedings a. S. C. E. Soil mechanics and foundation engineering division, vol. 193, part 1, 1967.
10. K. Szechy, "the art of tunneling", published by Tankonyukiado, Budapest, 1968.
11. Ayestarán r. L., Farjeate. P., Schmitterj. J. "Aire comprimido en túneles" – ix congreso nacional de ingeniería civil – Mazatlán noviembre 1973.