

50 0849

**ESTUDIO ECONOMICO COMPARATIVO ENTRE DOS PROCEDIMIENTOS
GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE TUNELES DEL METRO
DE LA CIUDAD DE MEXICO**

IVAN ORJUELA BUENAVENTURA

TRABAJO

Presentado a la División de Estudios de
Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERIA

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

como requisito para obtener

el diploma de

Especialista en Ingeniería

(Construcción)

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F.

Agosto de 1986



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DEPFI

T. UNAM
1986
ORT

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el estudio económico comparativo entre dos procedimientos generales para la construcción de túneles del Metro de la Ciudad de México.

El primer procedimiento consiste en excavar la totalidad de un tramo interestación y revestirlo posteriormente utilizando cimbra telescópica. El segundo procedimiento consiste en excavar y revestir de manera simultánea el túnel del citado tramo.

Seguidamente se describen los diferentes pasos que intervienen en el desarrollo de cada procedimiento y se calculan sus costos inherentes.

Después, se comparan y analizan todos los costos obtenidos, de donde se concluye que el primer procedimiento resulta ser el más económico. Finalmente, se exponen las limitaciones que presenta el citado procedimiento y las consideraciones que deberán tenerse presentes cuando se quiera adoptar en la práctica.

APROBADO POR EL JURADO

Presidente: Ing. Roberto Sosa Garrido

Vocal: Ing. Francisco Javier Rodríguez Zumarraga

Secretario: M. en I. Jaime Martínez Mier

Suplente: Ing. Salvador Díaz Díaz

Suplente: Dr. Jorge Abraham Díaz Rodríguez

CONTENIDO

CAPITULO 1 - INTRODUCCION	1
1.1. Objetivos del presente estudio	1
1.2. Ventajas del túnel sobre otras alternativas	2
1.3. Procedimientos constructivos para la excavación	4
1.4. Procedimientos constructivos para el revestimiento	6
1.5. Actividades complementarias	7
CAPITULO 2 - EXCAVACION DEL TUNEL EN TODA SU LONGITUD CON REVESTIMIENTO POSTERIOR	10
2.1. Excavación	10
2.2. Rezaga	12
2.3. Soporte temporal	12
2.4. Revestimiento definitivo	15
2.5. Inyecciones de contacto	22
2.6. Actividades complementarias	24
CAPITULO 3 - EXCAVACION Y REVESTIMIENTO SIMULTANEO	29
CAPITULO 4 - COSTOS	33
4.1. Excavación y ademado	34
4.1.1. Cálculo del ciclo y avance	34
4.1.2. Costos directos de excavación	35
4.1.2.1. Mano de obra	36
4.1.2.2. Equipo	37
4.1.2.3. Materiales	37
4.2. Revestimiento definitivo - Alternativa 1	38
4.2.1. Cálculo del número de módulos y rendimiento	38
4.2.2. Costos directos del revestimiento	39
4.2.2.1. Mano de obra	40
4.2.2.2. Equipo	41
4.2.2.3. Materiales	41
4.3. Revestimiento definitivo - Alternativa 2	42
4.3.1. Cálculo del ciclo y avance	42
4.3.2. Costos directos del revestimiento	44
4.3.2.1. Mano de obra	45
4.3.2.2. Equipo	46
4.3.2.3. Materiales	46
4.4. Costos indirectos	47
4.5. Integración de costos	48
4.5.1. Alternativa 1	48
4.5.2. Alternativa 2	48
4.6. Análisis comparativo	49
CAPITULO 5 - CONCLUSIONES	50
BIBLIOGRAFIA	53

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1. Objetivos del presente estudio:

Hasta la fecha, para el Metro de la Ciudad de México el revestimiento definitivo en todos los túneles se ha efectuado utilizando únicamente cimbras estacionarias.

La posibilidad de utilizar cimbras telescópicas quedó latente cuando en 1982 la falta de presupuesto oficial condujo a la suspensión de muchas obras, entre las cuales se encontraba la línea 7 del Metro en donde se había planeado utilizar éste tipo de cimbra. Cuando se reanudaron los trabajos en dicha línea, se decidió recurrir a las cimbras estacionarias utilizadas en la línea 3, que se encontraban disponibles ya que la obra había sido terminada.

Para futuras líneas y pensando que existirá presupuesto oficial, será necesario adquirir mas cimbra, por lo que es conveniente contar con un estudio económico comparativo que ayude a la toma de decisiones para la consecución de cimbras telescópicas o estacionarias, utilizando las que se tienen.

Esto último es precisamente lo que se cubrirá con el presente trabajo. Debe aclararse que el horizonte se ha restringido a una situación promedio, o sea, consideraremos una sección típica de túnel de dos vías en cualquier tramo de interestación.

1.2. Ventajas del túnel sobre otras alternativas:

Para una ciudad como la Ciudad de México en donde la población es muy numerosa, la cantidad de vehículos es elevada y que se cuenta relativamente con pocos espacios abiertos. Debe tomarse muy en cuenta que toda obra pública municipal producirá un cierto grado de interrupciones y molestias a sus pobladores.

El utilizar el túnel como alternativa del sistema constructivo para las líneas del Metro, trae consigo una serie de ventajas que minimizan el grado de interrupciones y molestias en la superficie a los habitantes de la ciudad. Dentro de las ventajas que ofrece el túnel sobre otras alternativas podemos destacar:

a) Menor contaminación: Se elimina el ruido producido por la obra, los niveles de polvo, lodo y partículas de material excavado son muy bajos.

b) No hay cierre de vías: No se requiere cerrar vías importantes, los comercios pueden continuar operando normalmente y las rutas del transporte por superficie permanecerá inalterado.

Debe tenerse muy presente que cuando se utiliza la alternativa de construir en cajón se desvían los vehículos a calles o avenidas adyacentes a la obra, generando ésto un incremento en los volúmenes de combustibles utilizados (diesel y gasolina) y que representa un gasto monetario considerable que debe absorber la ciudadanía durante el período de ejecución.

c) No se interfieren las instalaciones municipales: Las instalaciones de gas, agua potable, drenaje, alumbrado, energía eléctrica, etc. no serán perturbadas en absoluto, ya que los trabajos estarán por debajo de los niveles donde éstas se encuentran colocadas.

En mi concepto este es tal vez el punto mas importante ya que el desarrollo de la obra se agiliza y además no se corre el peligro de dañar alguna de ellas, lo que siempre ocurre aunque se tomen todas las precauciones y que ocasiona problemas con la población afectada.

d) Mayor seguridad

la población, el riesgo por accidentes que puedan sufrir aquellas personas ajenas a los trabajos y que se introducen motivados por la curiosidad, desaparece. Además al permanecer las calles y avenidas libres de obstáculos no se facilita la presencia de aquellas personas que gustan de atentar contra la seguridad ciudadana y las buenas costumbres.

1.3. Procedimientos constructivos para la excavación:

En los túneles construidos para el Metro se han tenido que emplear diferentes procedimientos constructivos para la excavación, dependiendo fundamentalmente del tipo de suelo encontrado en cada frente, estos son:

a) Tuneleadora de pluma: Se utilizó en la línea 3-II en el tramo entre la Estación Viveros y Avenida Dalias, también en la línea 7 entre la Estación Auditorio y la Estación Barranca del Muerto, en donde el material por excavar se componía principalmente de limos arenosos y arenas limosas de compacidad media a muy compacta.

La excavación era a sección completa y el perfilado se realizó con martillos neumáticos rompedores. La rezaga fue cargada directamente al camión ya que la tuneleadora contaba con un

sistema de bandas transportadoras que permitían la operación de manera automática. Los camiones que transportaban la rezaga eran de 2 tipos: De volteo o de plataforma con botes removibles.

b) **Martillos rompedores y cargador:** Se utilizó en ciertos tramos de la línea 7 donde el suelo eran limos y arenas cementadas (típica formación Tarango).

La excavación se hacía a media sección con martillos neumáticos rompedores y el banqueo era con cargador de orugas. La rezaga recibió el tratamiento descrito en el literal anterior.

c) **Explosivos:** Este método se empleó en la línea 3-II entre Avenida Dalias y la Estación C.U., en donde se encontró roca basáltica fracturada.

La excavación se hizo en 3 etapas, siendo la primera un túnel piloto arriba de la media sección, la segunda era la ampliación arriba de la media sección y la tercera era el banqueo. Cada una de éstas etapas estaba desfasada en 5 metros.

La barrenación era con perforadoras neumáticas de pierna y de 2.40 metros de profundidad, los barrenos se cargaban luego con dinamita. La rezaga de las dos primeras secciones se efectuaba con palas y carretillas, la del banco era con cargador de orugas y camión de volteo.

Es conveniente aclarar que en éste tramo la excavación a sección completa no se realizó por los siguientes dos motivos. Primero, el túnel piloto permite ir explorando el terreno por excavar, lo que era de gran utilidad ya que se estaba cruzando

por una zona de transición entre basalto y roca. Segundo, el basalto que debía excavarse estaba muy fracturado con lo que se incrementaba el riesgo de derrumbes.

d)Escudo: En la línea 7 en la zona de Tacuba la presencia de arcillas volcánicas blandas, condujeron a que se decidiera utilizar el escudo endovelador con frente abierto (que se encontraba disponible en la zona de Parque Lira), por ser el equipo mas idóneo para excavar éste tipo de suelos.

1.4. Procedimientos constructivos para el revestimiento:

En cuanto a los procedimientos constructivos para colocar el revestimiento definitivo en los túneles del Metro, se han empleado los siguientes:

a)Cimbra estacionaria: Se trata de una cimbra metálica de 6.10 metros de longitud, compuesta por una sección para la clave y dos secciones laterales. Cuenta con una serie de ventanas situadas en forma tal que facilitan la colocación y la compactación del concreto.

b)Cimbra telescópica:

colapsables de 6.10 metros de longitud cada uno, en donde cada módulo es movido despues de transcurrido el tiempo de fraguado. Cada modulo está compuesto por cuatro secciones [una clave, dos laterales y una cubeta], además de una estructura interior sobre ruedas metálicas para el transporte de los módulos.

c)Concreto lanzado: Es un procedimiento que se utiliza en casos extremos, como pueden ser amenaza de cerrarse la excavación por inestabilidad del terreno o tambien en aquellos tramos en donde la sección del túnel es de sección variable.

1.5. Actividades complementarias:

Los procedimientos descritos en los dos numerales anteriores conllevan una serie de actividades complementarias sin las cuales no podrían ser desarrollados de manera exitosa, por lo tanto podemos decir que:

Excavación: Las actividades complementarias de éste concepto son la rezaga y el ademe.

La rezaga cubre todos los as^o producto de la excavación, como pueden ser su acarreo al vehículo que lo llevará hasta la lumbrera o el portal, el sistema con que se sacará a la superficie dicho material y el acarreo por superficie desde la obra hasta los bancos de tiro.

El ademe se refiere al sistema de soporte temporal que se dará a la excavación y dependerá de las condiciones presentadas por el subsuelo, los sistemas de ademado utilizados en las líneas del Metro son los marcos metálicos o el concreto lanzado, siendo éste último el mas empleado debido a los excelentes resultados obtenidos en la práctica.

Revestimiento: En el caso de utilizar cimbra estacionaria las actividades complementarias las componen el armado del refuerzo de guarniciones, su cimbrado, colado y fraguado, el armado del refuerzo de bóveda y paredes, colocación del molde en la zona por colar, colado de bóvedas y paredes, su tiempo de fraguado y descimbrado.

Cuando se trata de cimbra telescópica las actividades complementarias no incluyen a las relacionadas con las guarniciones.

Adicionalmente dentro del colado intervienen actividades tales como la fabricación del concreto, transporte del concreto desde la planta hasta el acceso al túnel, acarreo del concreto hasta la bomba de concreto, bombeo del concreto, compactación y vibrado.

Paralelamente con los procesos de excavación y revestimiento, deberán llevarse otras actividades complementarias como son la instrumentación, colocación de instalaciones (sistemas de iluminación, ventilación, líneas de energía eléctrica, drenajes, etc.) y las inyecciones (impermeabilización, consolidación, relleno y de contacto).

CAPITULO 2

EXCAVACION DEL TUNEL EN TODA SU LONGITUD CON REVESTIMIENTO POSTERIOR

En el presente capítulo nos ocuparemos de explicar las actividades, procedimientos constructivos que intervienen cuando se decide excavar un túnel en toda su longitud y revestirlo posteriormente utilizando cimbra telescópica.

Las principales actividades que integran la construcción de un túnel son: excavación, extracción de la rezaga, colocación del soporte temporal, revestimiento definitivo de concreto, inyecciones de contacto y actividades complementarias.

Seguidamente pasaremos a describir cada uno de éstos tópicos.

2.1. Excavación:

En vista de los excelentes resultados obtenidos en los túneles que se han construido para el Metro, la excavación se ejecutará con tuneleadora de pluma y el ataque del frente será a sección completa. (Véanse Figuras 1 y 2).

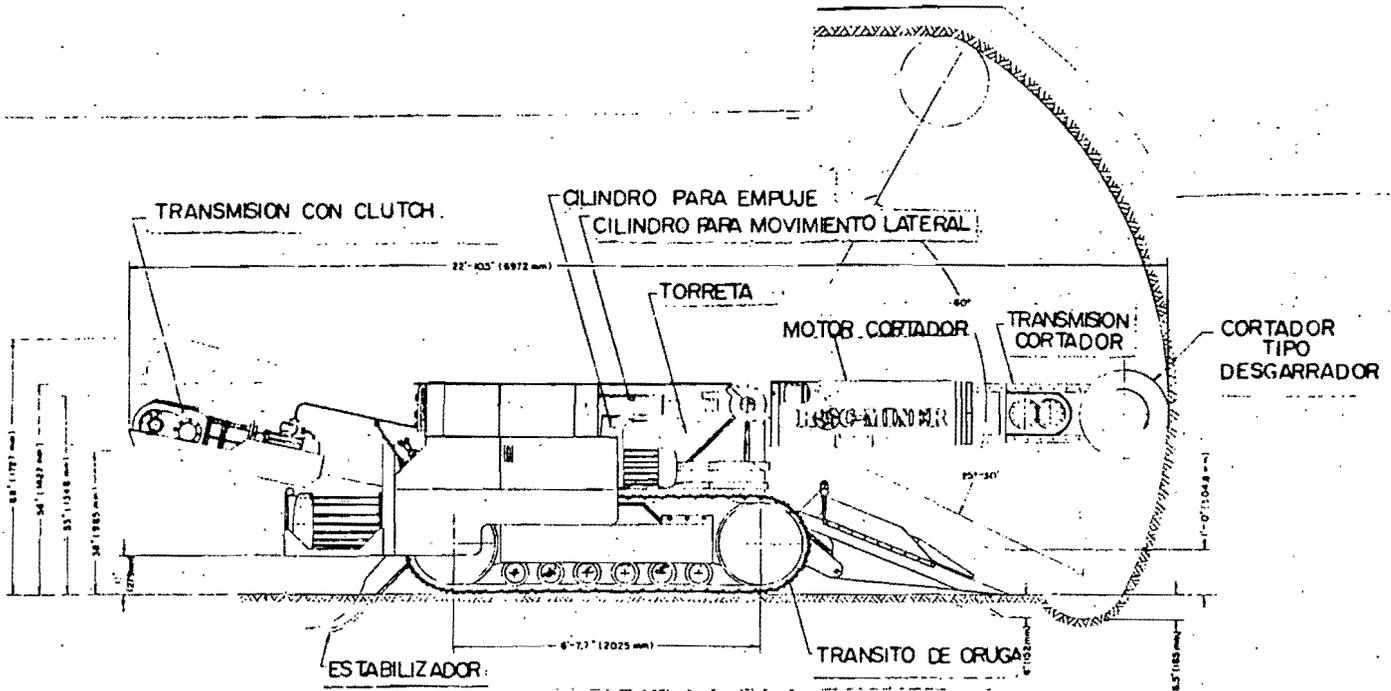
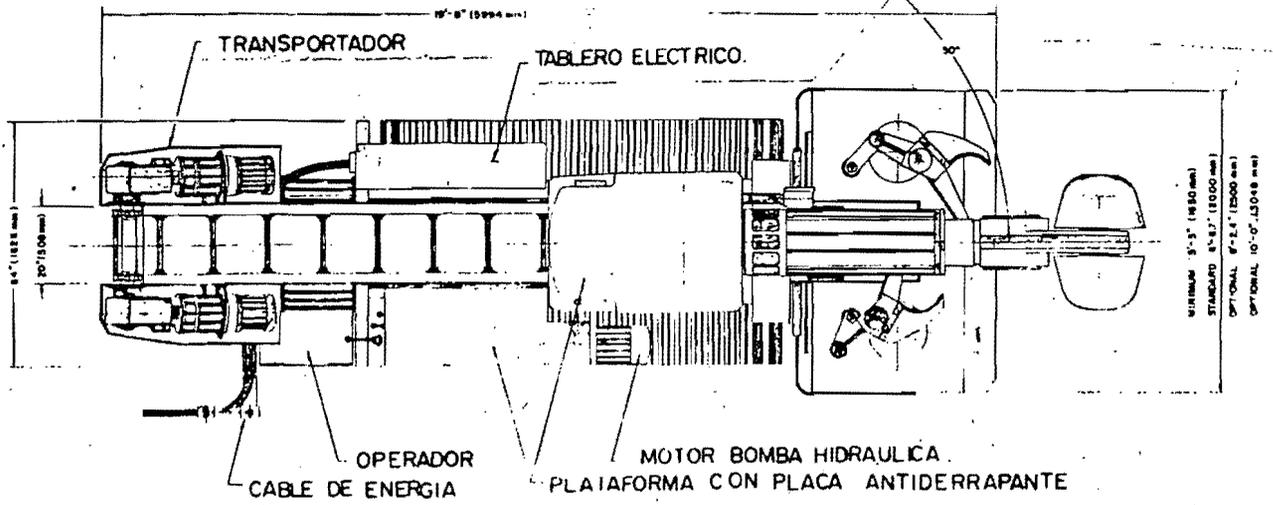


FIGURA 1 - TUNELEADORA DE PLUMA

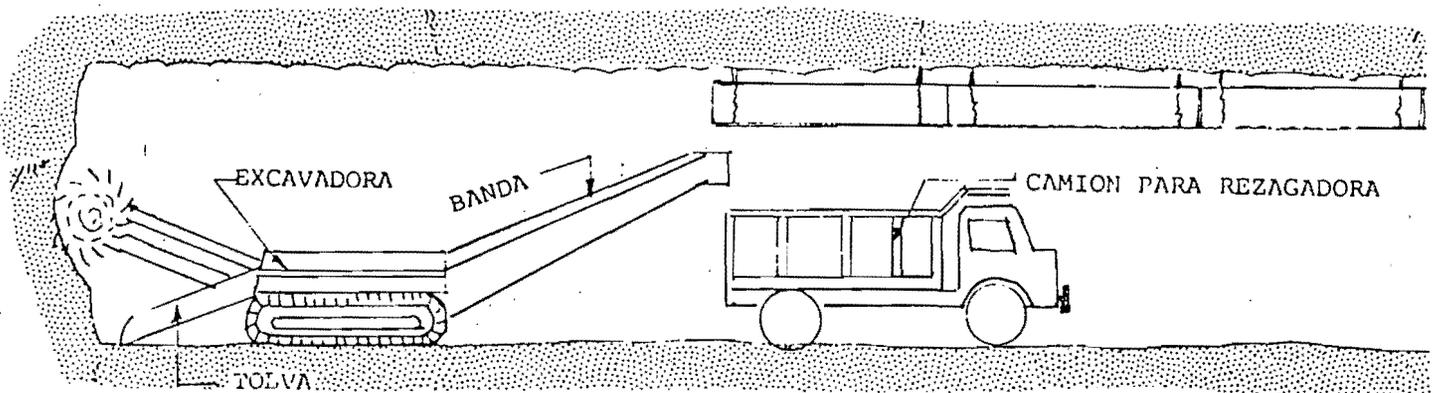


FIGURA 2 - EXCAVACION CON TUNELEADORA DE PLUMA

Esta máquina básicamente consiste en un aparato auto propulsado, con motores eléctricos, que tiene una pluma oscilante en todas las direcciones en cuyo extremo se encuentra un cortador. El eje del cortador es normal al eje de la pluma, por lo que todo el peso de la máquina y el empuje dado por la garras de tránsito pueden utilizarse para efectuar el ataque. El cortador está formado por un cuerpo masivo que tiene elementos cortantes o dientes colocados siguiendo espirales.

El corte es producido por los dientes al incidir sobre el terreno, teniendose una fuerza debida al par de torsión proporcionado por el motor del cortador. Esta fuerza puede variarse por el empuje dado por un gato y aumentarse con el proporcionado por la máquina. Como la pluma puede oscilar horizontalmente, es posible aplicar fuerzas horizontales que ayuden con el proceso de ruptura. Cuando la superficie está muy dura puede llegarse al caso extremo de hacer que sea solo un diente el que esté en contacto, concentrandose en él las fuerzas verticales y horizontales.

El material desprendido cae en una charola en donde es empujado hacia una banda transportadora por unos brazos móviles, de la banda pasa directamente a los botes recolectores de la rezaga.

La excavación se hace en avances de 2.40 metros, despues de cada avance el proceso se interrumpe para que los perforistas, dotados de martillos neumáticos rompedores, perfilen la sección y excaven para las zapatas de apoyo del ademe.

2.2. Rezaga:

La rezaga o material excavado es cargado directamente por la tuneleadora, ya que cuenta con un mecanismo a base de bandas transportadoras que le permiten hacer esta labor de manera automática. La rezaga es colocada dentro de botes metálicos de 3 metros cúbicos de capacidad, los cuales se encuentran dispuestos por pares sobre la plataforma de un camión diesel. Por su parte el camión se encarga de transportar los botes hasta la lumbrera donde son enganchados e izados hasta la superficie con la ayuda de una torre y un malacate, para que allí sean vaciados en camiones de volteo, quienes por su parte se encargan de llevar la rezaga hasta los bancos de tiro. Después de que los botes son vaciados se introducen por la lumbrera y se colocan de nuevo sobre la plataforma del camión, quien regresa al sitio de cargue.

Debe tenerse presente que siempre deberá permanecer en el frente un camión con dos botes sobre su plataforma para que la excavación no se detenga o sea preciso arrojar la rezaga al piso.

2.3. Soporte temporal:

Después de que la sección se ha perfilado y se han excavado las zapatas, se procede a colocar el soporte temporal o ademe.

El tipo de ademe será con concreto lanzado, que consiste en colocar concreto a presión sobre la superficie excavada de manera que se cuente con una cubierta que soporte los esfuerzos producidos por la excavación y evite el intemperismo del suelo descubierto, adicionalmente tiene la ventaja de ser deformable y acusar las fallas con la debida anticipación para tomar las medidas necesarias. (Véase Figuras 3 y 4).

El procedimiento será por mezcla seca, que consiste en mezclar con la ayuda de una revolvedora, el cemento y el agregado (fino y grueso) con poca humedad e introducirlos a un alimentador mecánico o máquina de lanzado. De aquí, la mezcla es transferida a una tubería flexible por la cual circula una corriente de aire comprimido que conduce los materiales mezclados hasta la boquilla lanzadora. La boquilla tiene adaptada una tubería con varias perforaciones a través de las cuales se introduce agua a presión. Al pasar la mezcla de agregado-cemento por la boquilla, se combina con el agua y el concreto es lanzado a alta velocidad contra la superficie. Una cualidad del concreto lanzado es que no requiere de vibrado para su acomodo, ya que debido a la presión su compactación es muy buena.

Conviene aclarar que la máquina de lanzado es un mecanismo que suministra una cantidad determinada de mezcla en una corriente de aire a presión. El suministro de material debe ser proporcionado en forma regular, a un ritmo acorde con el trabajo requerido. El material debe llegar a la boquilla de lanzamiento en forma continua y con velocidad adecuada.

Esc: 1:100

Dimensiones en metros

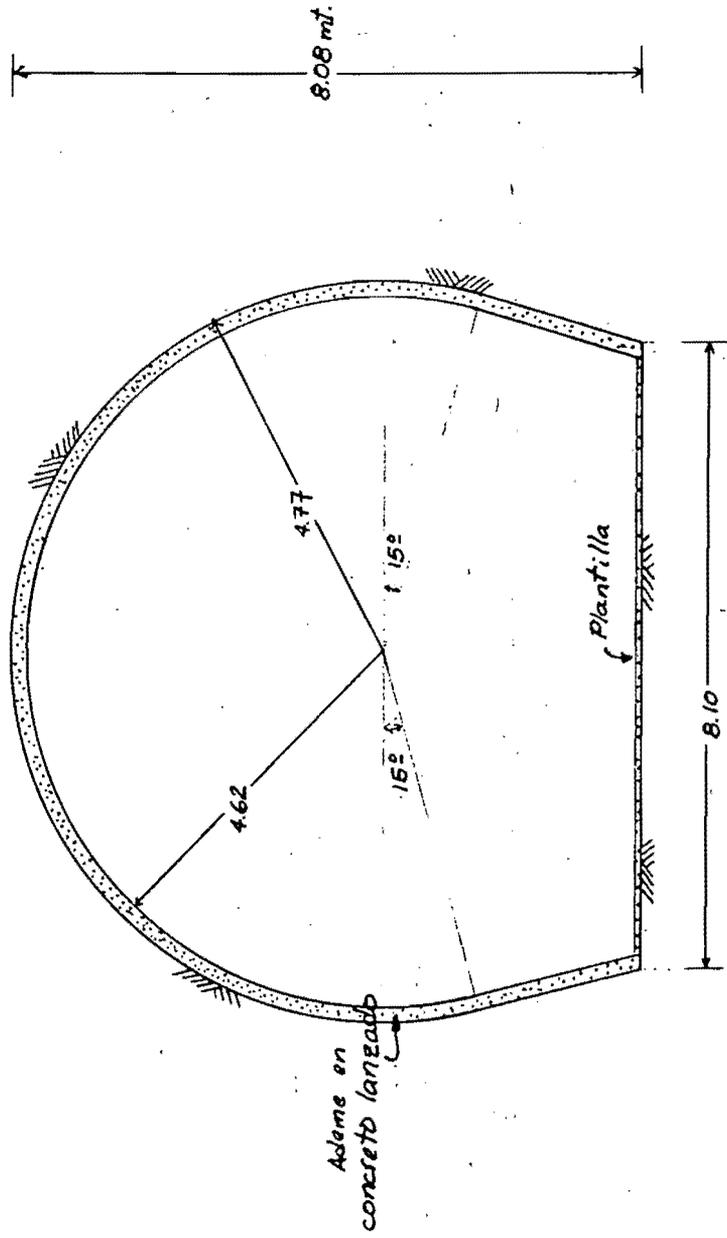
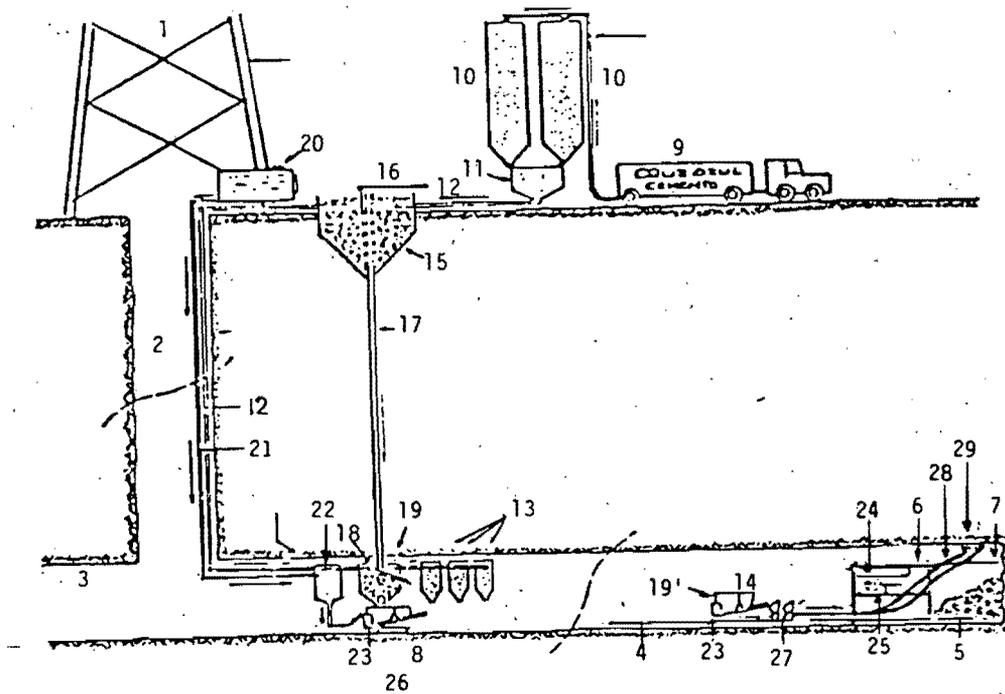


FIGURA 3 - Sección Ademada

FIGURA 4 - ESQUEMA DE LAS OPERACIONES DE CONCRETO LANZADO



INDICE.-

- | | |
|---|--|
| 1. Torre de Manteo | 16. Compuerta de descarga |
| 2. Lumbrera, diámetro 6-8 m | 17. Pozo adomado, diámetro 12-20" para bajado de agregados |
| 3. Túnel | 18. Criba vibratoria |
| 4. Cambio California | 19. Tolva secundaria para agregados, 5-10 m ³ . |
| 5. "Navajo blanket" | 19'. Tolva para agregados, 5 m ³ . |
| 6. Jumbo | 20. Tanque para acelerante concentrado, 10-20 m ³ |
| 7. Plataforma deslizante | 21. Tubo para transporte del acelerante líquido, diámetro 2-3" |
| 8. Estación de carga p/conc. lanz. | 22. Tanque secundario (intermedia p/ acelerante líquido (4-8m ³) |
| 9. Carro transportador de cemento a granel con tolva presurizada | 23. Tanque de presión para acelerante líquido |
| 10. Silos para cemento 2 x 40 ton | 24. Tanque p/acelerante líquido (en jumbo 2 m ³) |
| 11. Cámara de presión | 25. Bomba p/mezclas acel. liq. y agua y transporte a las boquillas. |
| 12. Transporte de cemento, tubo 4" | 26. Carro de agregados (Trixen) p/transportación, proporcionamiento y mezclado de cemento y agregados. |
| 13. Tolvas para cemento, 5 a 7 pzas. a 8 m ³ , con filtros | 27. Lanzadoras de concreto (2 unidades) |
| 14. Tolva para cemento, 1.5 m ³ . | 28. Manguera p/transporte del concreto lanzado seco (12 horas) |
| 15. Tolva subterránea para agregados 40-70 m ³ . | 29. Boquillas (2 unidades) de conc. lanzado. |

Por otra parte, al concreto deberá agregarsele un aditivo acelerante para obtener un fraguado rápido y un desarrollo acelerado de resistencia a edades tempranas. También se busca que el concreto lanzado no se desprege y que se puedan formar capas mas gruesas en una sola pasada. Los aditivos acelerantes pueden adquirirse en presentación líquida o sólida; los líquidos se aplican en la boquilla en forma diluida, mientras que aquellos que vienen en polvo se añaden a la mezcla antes de entrar en la máquina lanzadora.

El proceso de ademado se inicia con la remoción de partículas sueltas y materias extrañas de la superficie excavada, ésto se logra con la ayuda de aire a presión con una pequeña cantidad de agua. Lo anterior se hace para obtener la mayor adherencia posible entre el terreno y el concreto.

Seguidamente, se coloca una capa de 3 a 5 cms. de concreto y sobre ésta capa se coloca una malla electrosoldada que debe llevarse hasta el fondo de la zapata. Para fijar la malla se introducen dentro de las paredes de la excavación grapas de unos 25 cms. de longitud y se les ata la malla. Después se lanza una capa de concreto de 10 a 15 cms. de espesor, sobre ésta capa se pone otra malla electrosoldada que tambien va asegurada a las grapas puestas inicialmente y se lanza una tercera capa de concreto de igual espesor que la primera. Finalmente, se coloca una plantilla de concreto lanzado de 10 cms. de espesor sobre el piso de la excavación.

Durante el lanzamiento del concreto debe darse una especial atención a la presión del agua, del aire, a la posición de la boquilla (de manera que siempre esté normal a la superficie) y al porcentaje de rebote (que no supere el 40%).

2.4. Revestimiento definitivo:

El revestimiento definitivo en un túnel cumple las funciones de proporcionar el gálibo del proyecto para el que fué diseñado y de soportar las cargas para que la estructura funcione en forma definitiva.

Es práctica común colocar el revestimiento definitivo después de que se ha terminado la excavación de todo el túnel. Sin embargo, pueden existir condiciones de excavación en las que se hace necesario colocar el revestimiento definitivo de concreto simultáneamente con la excavación, ya sea en cada ciclo o a una distancia de tal manera que sean simultáneas las actividades de excavación y colado. De acuerdo a lo anterior podemos dividir los procedimientos en:

a) Revestimiento después de haberse efectuado la excavación en toda la longitud del túnel.

b) Revestimiento durante la excavación efectuándolo a una distancia tal, de manera que no se interfieran las actividades de excavación y colado de concreto.

Debe mencionarse que en ocasiones el revestimiento definitivo se efectúa por medio de concreto lanzado cuando la sección previamente ademada acusa problemas de estabilidad o cuando la sección es de dimensiones variables.

En el caso que ahora nos ocupa trataremos el primer procedimiento, o sea, el de revestir el túnel después de haberlo excavado en su totalidad.

Por otra parte, conviene tener presente que en los últimos años se ha mejorado el equipo y los métodos para el mezclado y colocación del concreto, así como el diseño y fabricación de cimbras, habiéndose popularizado el uso de cimbras metálicas, aplicables a la mayoría de las condiciones de revestimiento por ser económicas, fáciles de manejar y de brindar un buen acabado. Por lo tanto el uso de cimbras de madera resulta ya obsoleto y solo se recurre a ellas en curvas muy forzadas o en casos muy especiales (intersecciones, pequeñas galerías, transiciones, etc.).

Para el procedimiento escogido se utilizarán cimbras colapsables deslizantes, también conocidas como cimbras telescópicas (véase Figura 5), las cuales están compuestas de varios módulos o tramos diseñados para abatirse de tal forma que pueden ser transportados pasando a través de otros ya colocados y listos para recibir el concreto. Permiten la máxima producción por turno pues los colados pueden ser continuos. No requieren de mamparas a menos que se suspenda el colado. Se debe disponer de un número suficiente de tramos de cimbra para obtener rendimientos altos y dar tiempo a que fragüe el concreto antes de

desmontarlos y transportarlos desde el extremo final hasta el frente de la operación. El número de módulos que componen estas cimbras depende de varios factores (volumen de concreto por metro lineal, tiempo de fraguado, longitud de cada módulo, capacidad de colocación del concreto y ángulo de reposo del concreto). Para el desprendimiento, izaje y transporte de la cimbra a su próxima posición, normalmente se utilizan cilindros hidráulicos accionados por unidades de potencia hidráulica. Asimismo, la autopropulsión de los transportadores que mueven la cimbra, está constituida por motores hidráulicos, piñones, cadenas, etc., lo que permite accionar el equipo con muy poco personal especializado, con una gran rapidez.

El transporte de módulos se hace por medio de un transportador interior, que normalmente es electrohidráulico (véanse Figuras 6, 7, 8 y 9A), sirve para desprender los moldes de la clave y la cubeta, transportarlos en forma telescópica y colapsable, a través de toda la longitud de la cimbra y colocarlos en su nueva posición. Con este procedimiento el transportador está continuamente viajando en el interior y a lo largo de la cimbra por lo que, es necesario utilizar dos carros de inspección para los vibradoristas y los supervisores.

En su paso hacia la parte posterior de la cimbra, el transportador recoge el carro de inspección en cantiliver y deja en su lugar el otro carro de inspección para realizar las maniobras descritas, entonces se desplaza para desmoldar una

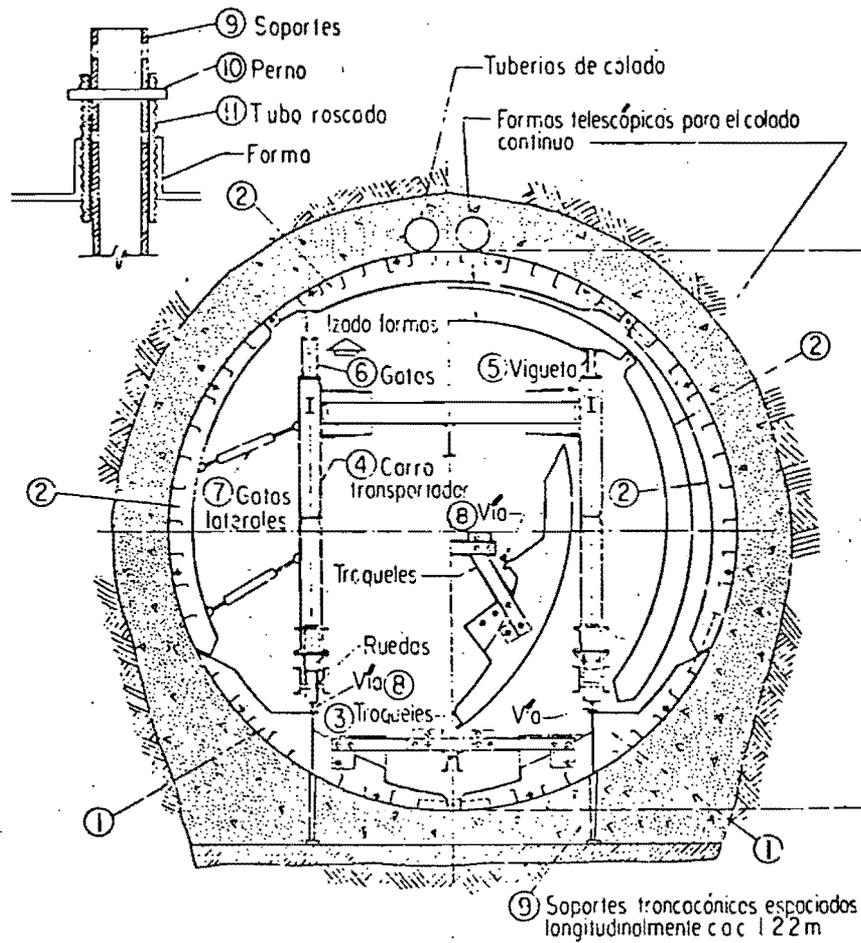
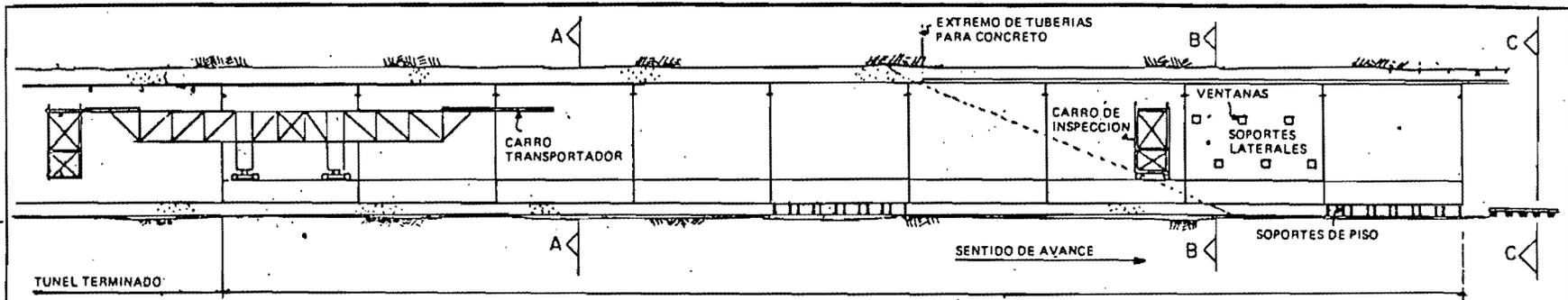


FIGURA 5 - SECCION DE CIMBRA TELESCOPICA



CORTE LONGITUDINAL

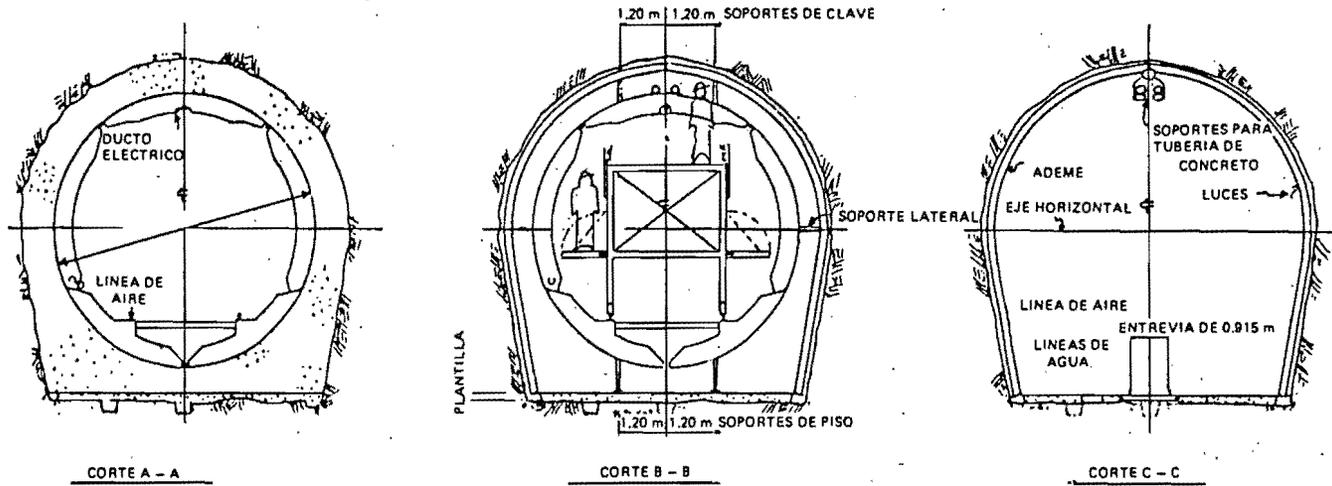
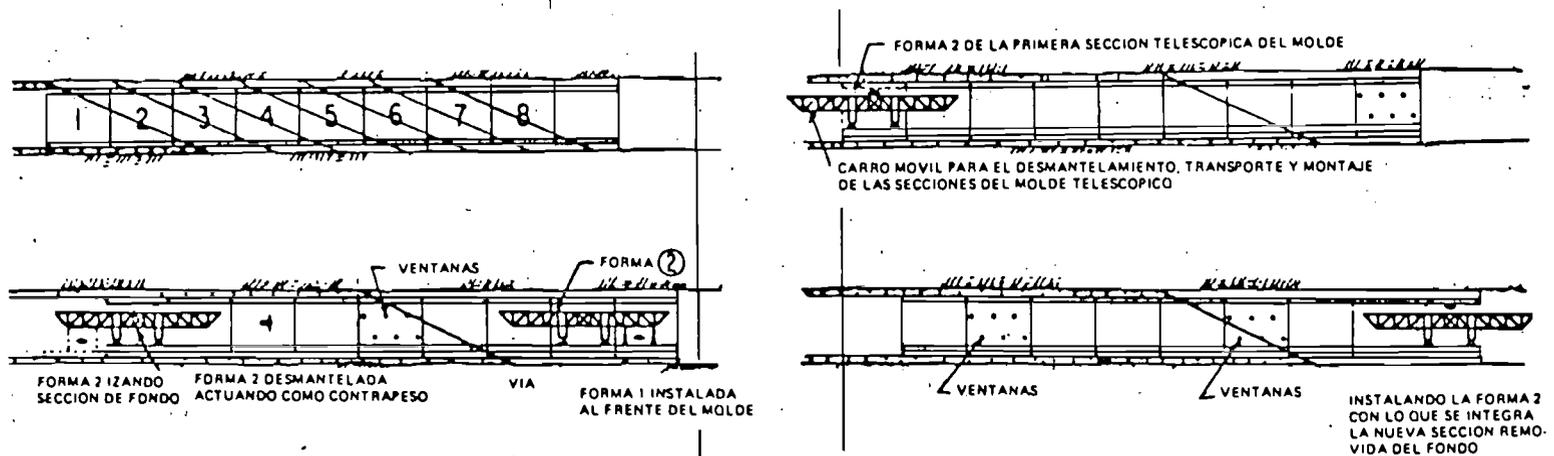


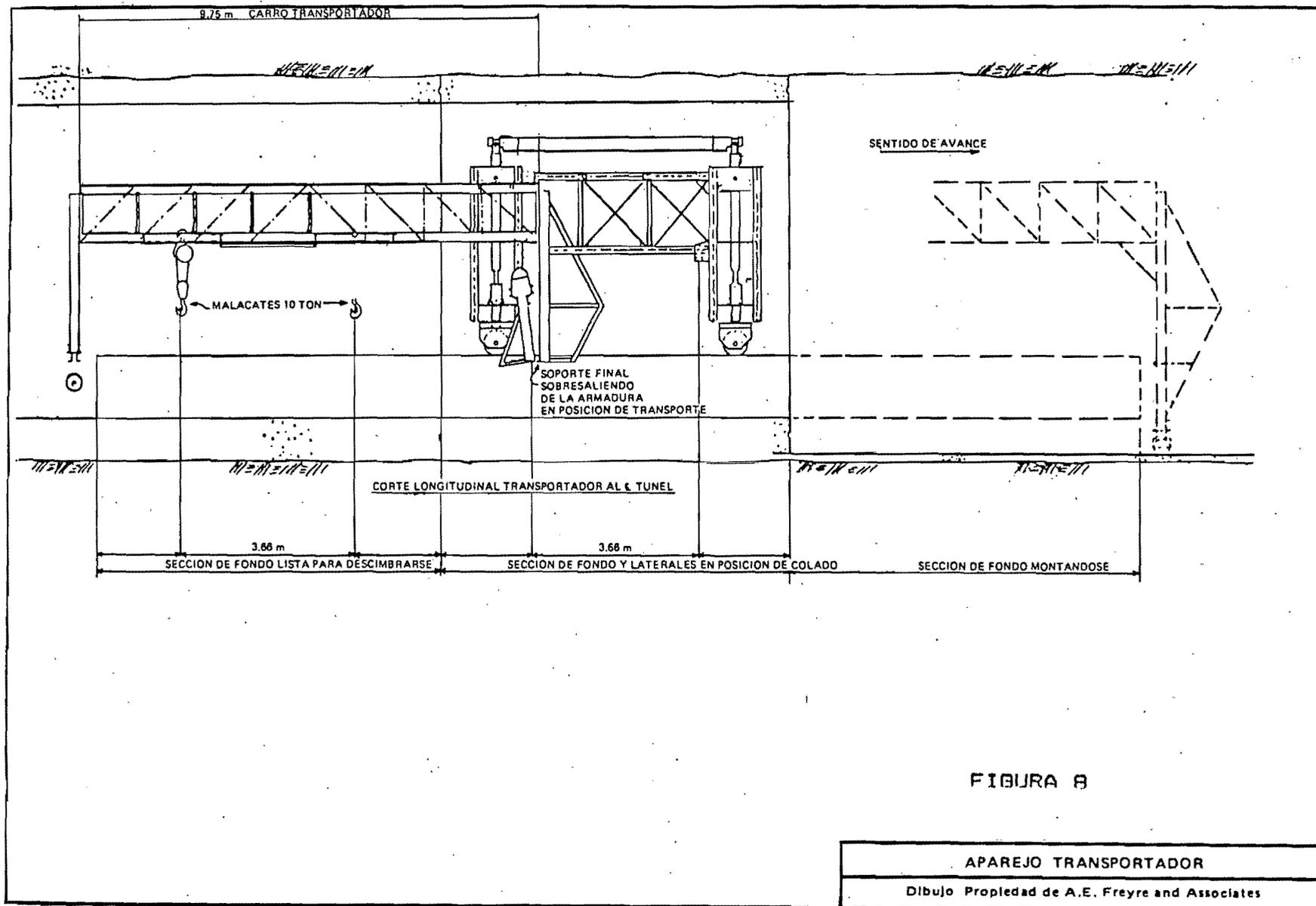
FIGURA 6

CIMBRA PARA EL SISTEMA DE COLADO CONTINUO

Dibujo Propiedad de A.E. Freyre and Associates

FIGURA 7 - RITMO DE COLADO Y SECUENCIA DEL MOVIMIENTO
DE LAS SECCIONES DEL MOLDE





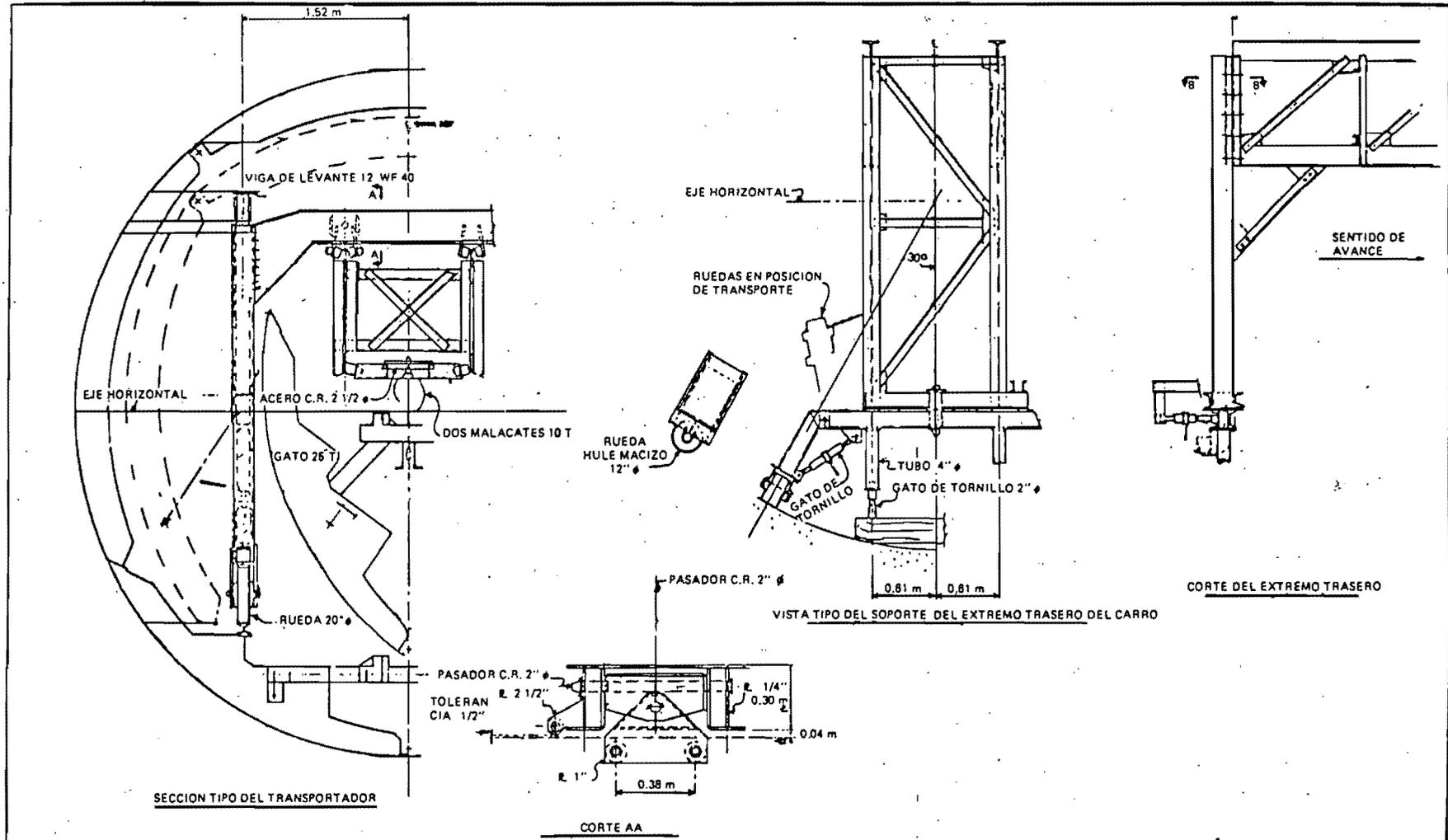


FIGURA 9A

SECCION TIPICA Y EXTREMO DE APAREJO TRANSPORTADOR

Dibujo Propiedad de A.E. Freyre and Associates

sección de cimbra, haciendo el movimiento inverso en su camino de regreso, permitiendo de esta manera poder realizar la operación de vibrado e inspección, con pérdidas mínimas de tiempo.

La cimbra deberá proveerse de anclas de flotación o de sustentación de la cimbra a su posición correcta. Existe una gran variedad de sistemas de anclaje para las cimbras, no existe ninguna regla específica, sino por el contrario, cada túnel presenta sus requerimientos específicos de anclaje. Existen en el mercado diferentes y muy variados tipos de anclas de sujección, de tensión, para esfuerzo cortante, o anclas para transmitir el peso del equipo al terreno, debiendo merecer este capítulo especial atención por el costo involucrado en el sistema.

Después de desmontar cada módulo se deberá limpiar (para remover partículas extrañas que estén adheridas), se revisará a fin de detectar la presencia de defectos que dificulten un buen colado, en caso tal que no pueda ser reparado satisfactoriamente, deberá ser reemplazado por otro módulo en buen estado.

Adicionalmente, las cimbras deberán contar con instalaciones eléctricas, hidráulicas y neumáticas. La cimbra telescópica resulta más económica en túneles largos, aunque también puede ser utilizada en túneles cortos y medianos, en donde puede mantenerse viva la superficie del concreto.

La elaboración del concreto se lleva a cabo en la superficie con el auxilio de una planta o de plantas propias de la obra, o suministrado por ollas revolventoras que lo acarrearán desde plantas ajenas a la obra. Las prácticas que son recomendables para

fabricar el concreto para revestimiento de túneles, no difieren de las que se aplican en otras obras en donde existen requisitos de calidad y especificaciones de producción bien definidos y relativamente estrictos. Los ingredientes empleados son básicamente los mismos que para un concreto convencional, sin embargo, por sus condiciones de colocación deberá procurarse utilizar preferiblemente agregado grueso triturado y arena de río o de depósitos naturales.

Teniendo presente que el transporte es uno de los aspectos que ocasionan mayores problemas en el concreto que se emplea para revestimientos de túneles, la alternativa que se propone es la utilizar camiones revolvedores para el transporte en superficie, tubo de caída libre en el descenso vertical y bombas dentro del túnel.

Los camiones revolvedores tienen la ventaja de evitar la segregación del concreto y la necesidad de contar con una unidad de remezclado. Debe tenerse presente que el número de camiones sea suficiente, para que no se vayan a presentar problemas con el abastecimiento del concreto debido a la densidad de tráfico durante algunas horas del día y a la factibilidad de descomposturas del equipo.

El tubo de caída libre no es otra cosa que una tubería (de 15 a 20 cms. de diámetro) que conduce verticalmente el concreto desde la superficie hasta el túnel, al final de la tubería se instala un tanque amortiguador que recibe el impacto de la caída libre del concreto y lo descarga a una tolva donde se alimentan los sistemas de transporte horizontal. Para el empleo de este

método es necesario tomar algunas recomendaciones: El tubo vertical debe estar a plomo, bien asegurado a la pared del pozo, ya que pequeñas variaciones del eje vertical producen desgaste rápido de la tubería; los extremos de los tubos que se suelden, deben estar colocados de tal manera que formen juntas circulares sin rugosidades ni salientes; es necesario limpiar constantemente la tubería y el tanque amortiguador, evitando que el concreto adherido se endurezca; el tanque deberá llevar en la parte inferior una compuerta de guillotina, cuya función es la de permitir la salida del concreto que se acumula en la parte inferior antes de que se endurezca; la descarga del tanque amortiguador se localizará a las dos terceras partes de su altura, para disponer de un colchon de concreto que sirva para amortiguar, en parte, la velocidad de caída; el tanque se soportará sobre cuatro resortes con los que absorbe parte de la energía producida por la caída del concreto; en el fondo del tanque, en dirección axial con la tubería, se dispondrá de una "aguja" metálica para romper el chorro y ayudar a que se produzca la "ebullición" del concreto que produce el efecto de un remezclado; debido a la potencia de la bomba, la separación entre cada pozo no deberá exceder los 250 metros. (Véanse Figuras 9, 10 y 11).

Por su parte las bombas suministran un flujo continuo de concreto a través de una tubería. La tubería será metálica de 15 cms. de diámetro, formada por varios tramos de 2 metros de longitud con juntas rápidas en sus extremos. Al término de la tubería vendrá una "Estructura Garza" para subir la tubería que

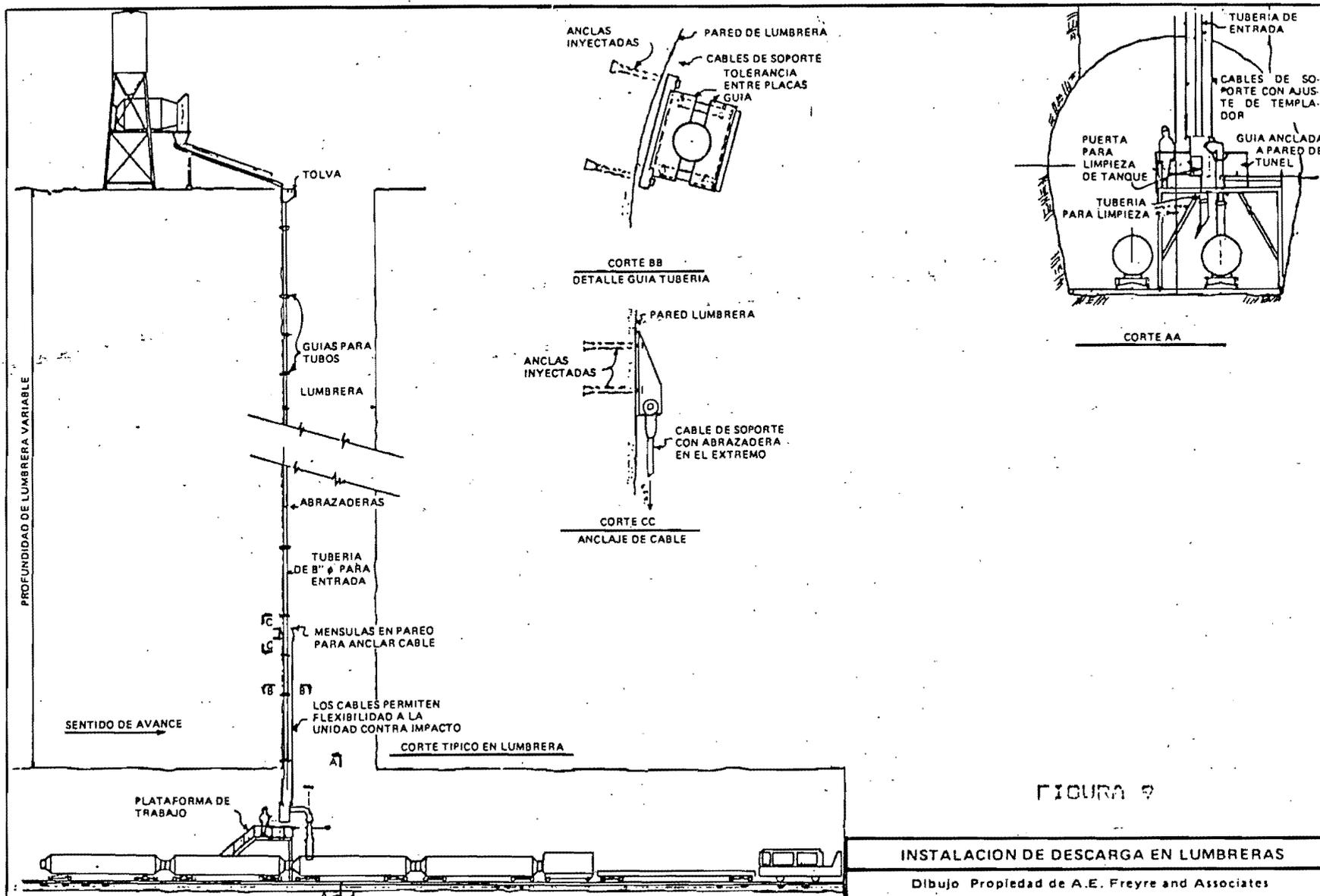


FIGURA 9

INSTALACION DE DESCARGA EN LUMBRERAS

Dibujo Propiedad de A.E. Freyre and Associates

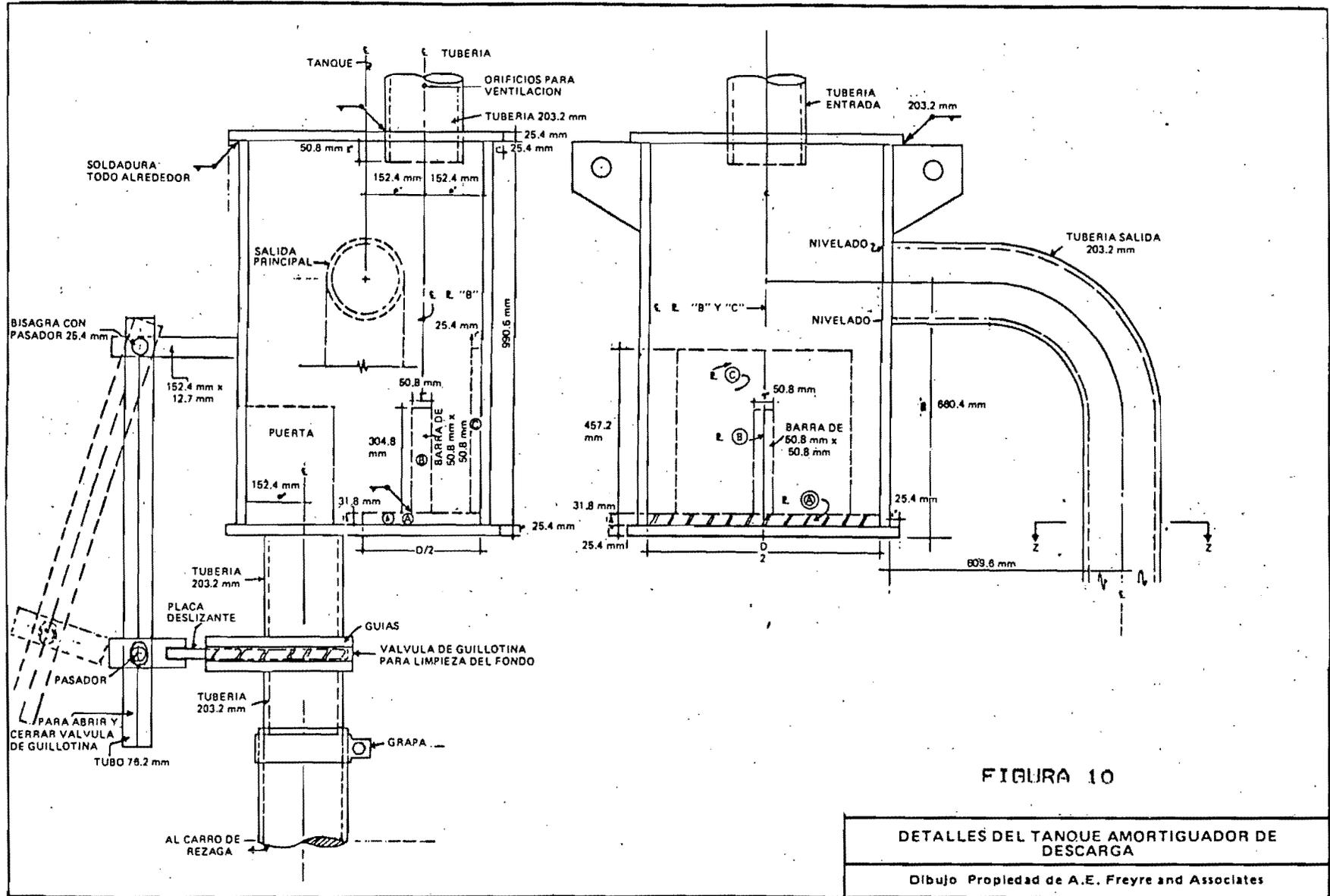
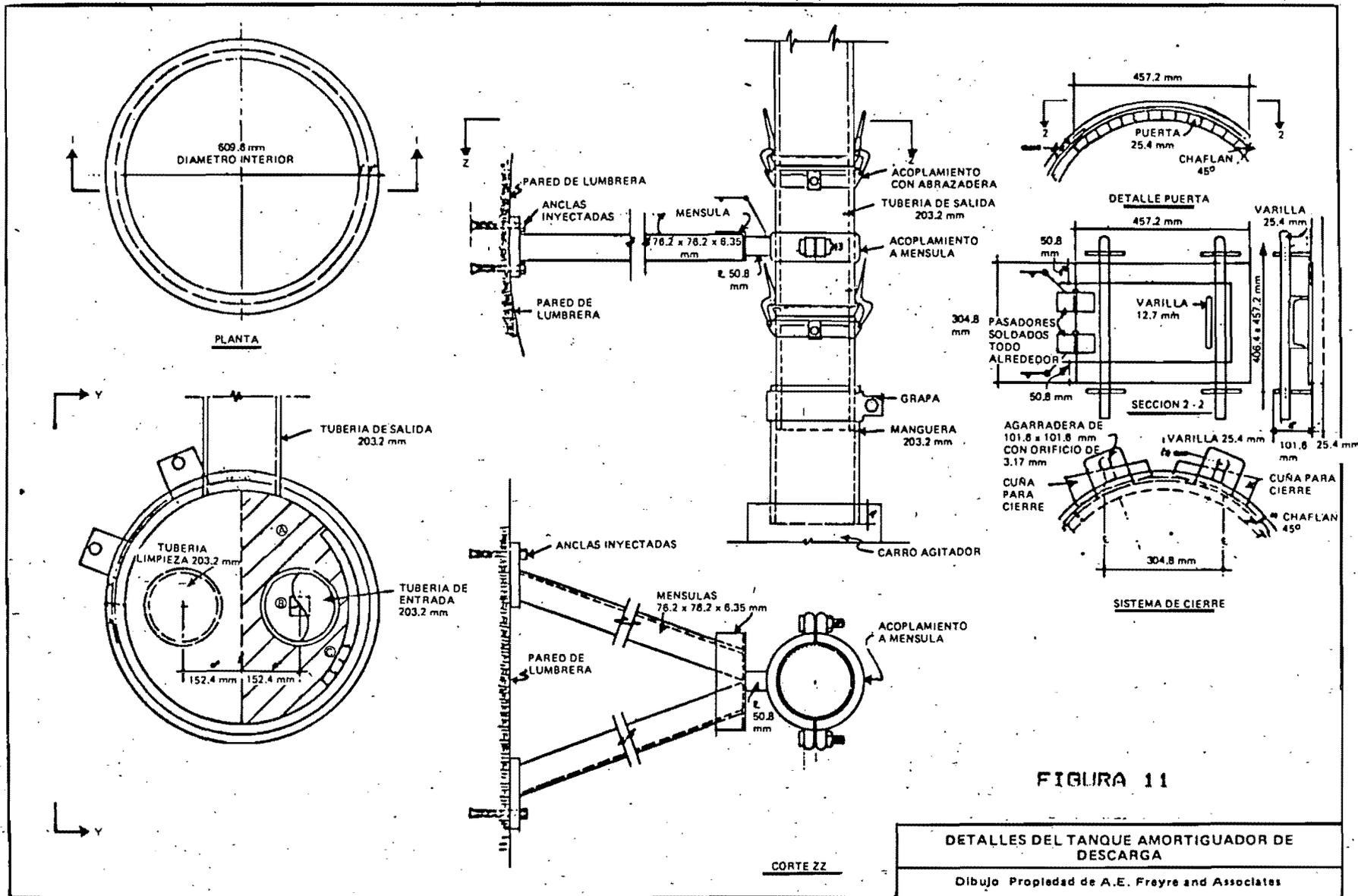


FIGURA 10

DETALLES DEL TANQUE AMORTIGUADOR DE
 DESCARGA
 Dibujo Propiedad de A.E. Freyre and Associates



depositará el concreto en la parte superior de la cimbra y que se irá corriendo conforme avance el colado. Consiste en una estructura metálica que sujeta la tubería desde el piso del túnel hasta la parte superior de la cimbra, normalmente es una estructura rígida con escaleras de acceso e inspección para la tubería de colocación del concreto. (Véase Figura 12).

También se deberá contar con una tolva receptora con capacidad de una olla revolvedora, que servirá como vaso regulador para el suministro del concreto, esta tolva será la que alimente a la bomba que estará colocada en la parte inferior. La bomba de concreto deberá estar situada a 250 metros de la cimbra telescópica, como máximo.

Durante el colado la bomba va depositando el concreto en la parte superior de la cimbra, el concreto se desliza por las paredes hasta el piso del túnel formandose un talud que adopta su ángulo de reposo, produciendose un llenado uniforme de abajo hacia arriba. La compactación es efectuada por medio de vibradores de inmersión que se introducen en el concreto a través de ventanas estratégicamente colocadas en la cimbra, así como también por medio de vibradores adosados a la cimbra llamados de pared o contacto (principalmente en la parte inferior, donde es difícil introducir los vibradores de inmersión). A medida que el concreto va avanzando la tubería que entrega el concreto se deberá mover en el mismo sentido, dejándola inmersa de 1.00 a 1.50 metros dentro del concreto para evitar la segregación y garantizar el llenado.

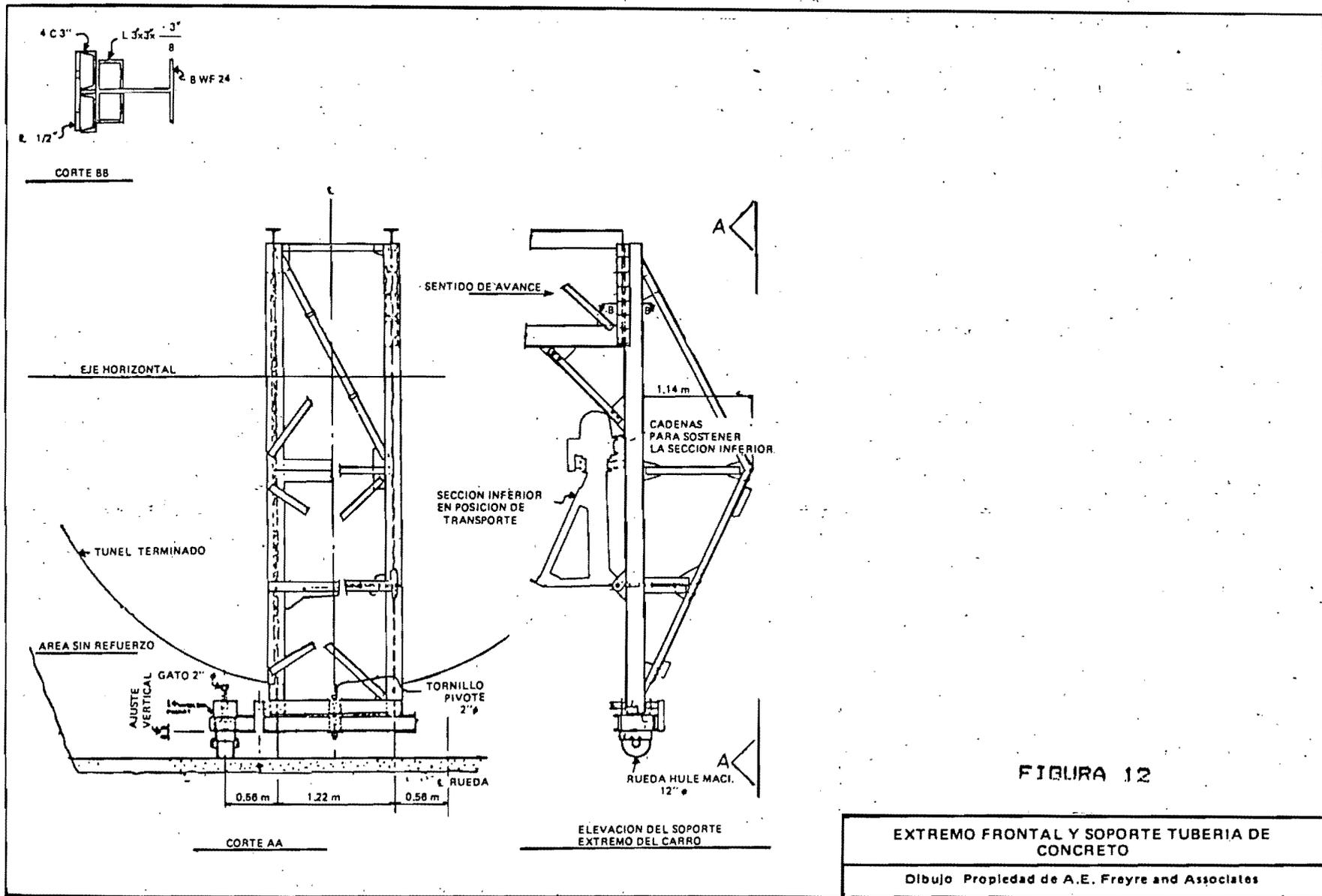


FIGURA 12

EXTREMO FRONTAL Y SOPORTE TUBERIA DE CONCRETO

Dibujo Propiedad de A.E. Freyre and Associates

Debe procurarse de mantener limpios todos los equipos utilizados en la colocación del refuerzo definitivo, ya que esto redundará en el progreso del colado.

Simultáneamente con el proceso de colado, se debe ir colocando el acero de refuerzo de toda la sección del túnel. La distancia entre el frente de armado del refuerzo y la cimbra, debe ser tal, que las actividades de colado y armado no se interfieran, por lo general, el frente de armado se localiza a unos 30 metros adelante de la cimbra.

Sintetizando lo anteriormente expuesto, el procedimiento de revestimiento definitivo de concreto de un túnel que ha sido excavado previamente en toda su longitud será:

- 1) Fabricación del concreto en superficie.
- 2) Carga de concreto a las ollas revolventoras.
- 3) Suministro de concreto a la estación de carga en el túnel.
- 4) Bombeo de concreto hacia la cimbra.
- 5) Compactación del concreto por medio de vibradores de contacto e inmersión.
- 6) Movimiento de cada módulo después de transcurrido el tiempo de fraguado.
- 7) Armado del acero de refuerzo de toda la sección del túnel.

2.5. Inyecciones de contacto:

Esta actividad se encuentra especificada para toda obra de túnel revestido con concreto y tiene por objeto llenar los vacíos dejados entre el revestimiento definitivo y la excavación, para

evitar en lo posible deformaciones del terreno y concentraciones de esfuerzos sobre el propio revestimiento, así como la impermeabilización de la periferia. (Véanse Figuras 13 a 15).

Las inyecciones de contacto se realizan en tres fases:

Primera fase: En esta fase se rellenan varios vacíos de varios centímetros de altura, especialmente en la clave del túnel, y cuando la edad del concreto cumple con los 14 días de edad.

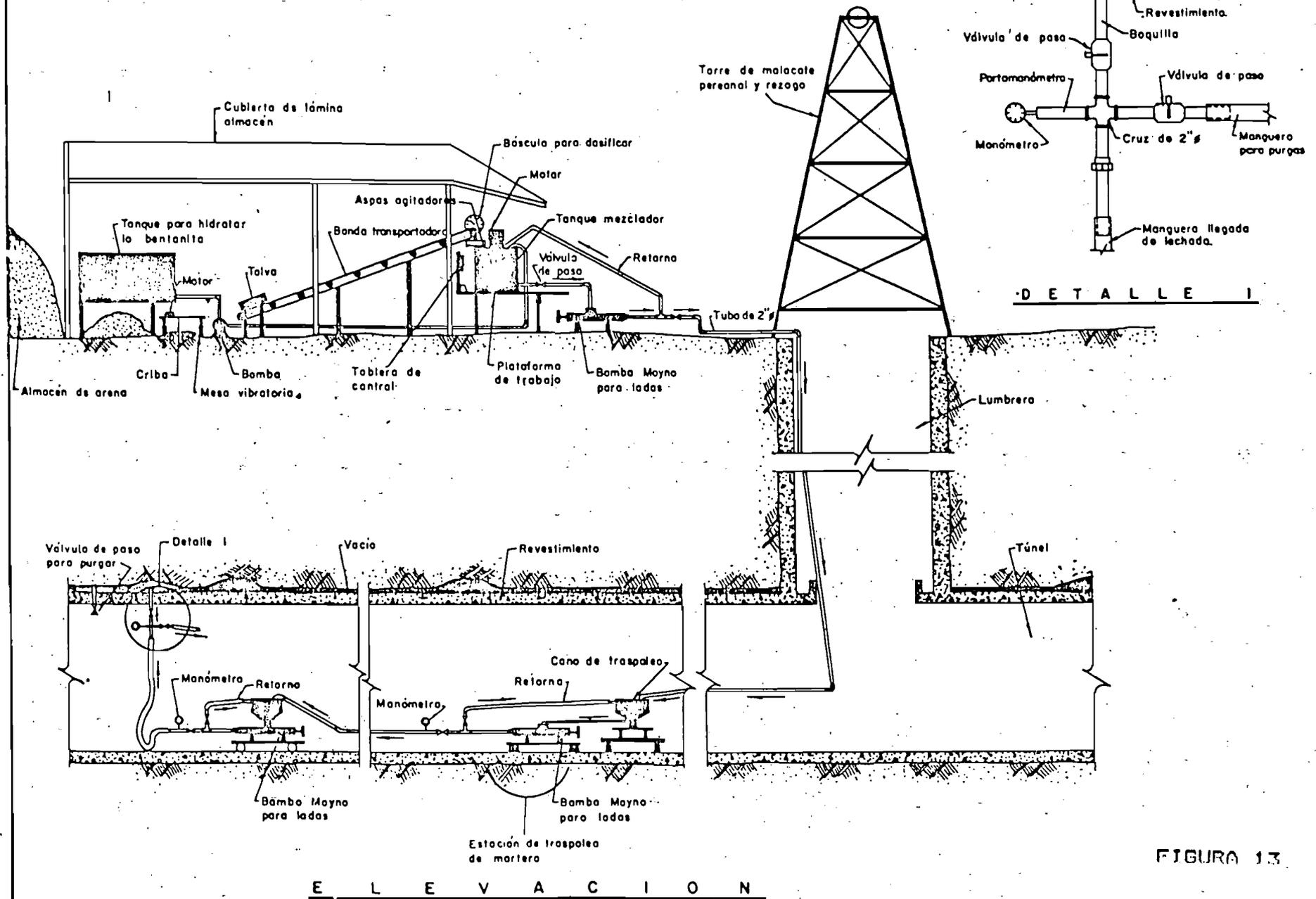
Se perforan barrenos de 5 cms. de diámetro a cada 8 metros distribuidos en aureolas alternadas en números impares y pares a lo largo del tramo por inyectar. Los barrenos de ambas aureolas deberán atravesar el concreto y penetrar 10 cms. en el terreno.

El orden de inyectado se realiza iniciando con el de mas bajo nivel, utilizando los altos como testigos. La inyección se hace a una presión máxima de 4 Kg./cm²., la mezcla inyectada se compone de agua, bentonita, arena y cemento.

Segunda fase: Se llenan los vacíos del orden de un centímetro cuando la primera fase cumple los catorce días. Se lleva a cabo en secciones de un solo barreno 8 metros y localizadas entre las secciones de la primera fase.

Se perforan todos los barrenos, posteriormente se emboquillan y colocan válvulas de paso en los barrenos de las próximas cuatro secciones adelante de la que se está inyectando, inmediatamente se procede a inyectar el barreno, despues se sella el barreno y se sigue con el próximo. El procedimiento se va repitiendo hasta terminar el tramo.

INSTALACIONES PARA INYECCION DE CONTACTO



DETALLE I

E L E V A C I O N

FIGURA 13

INYECCION DE CONTACTO REVESTIMIENTO DEFINITIVO-TERRENO

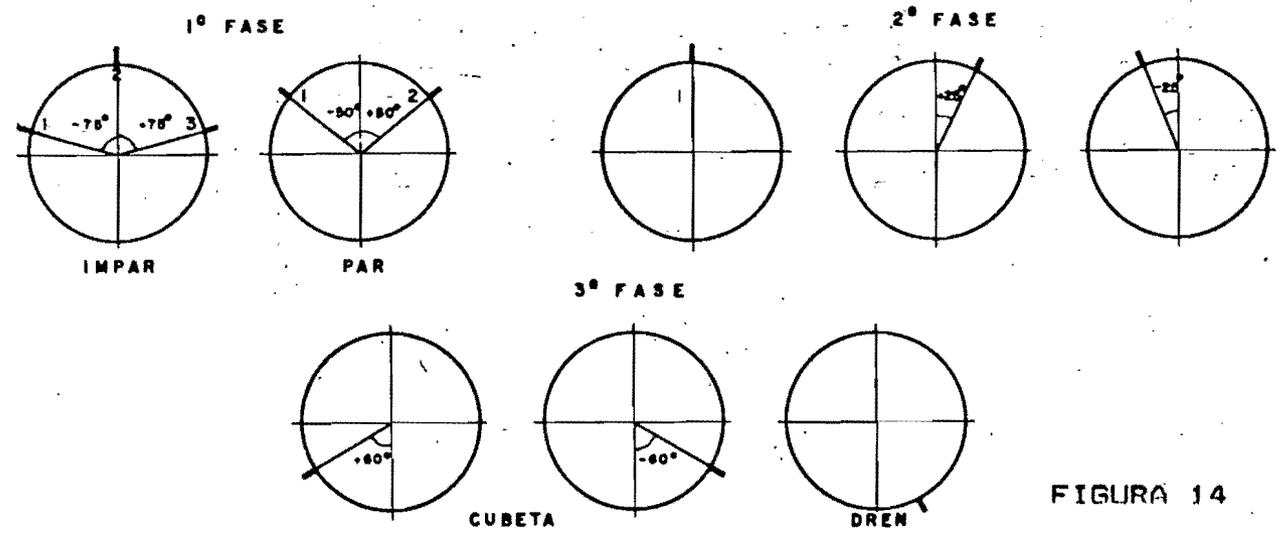
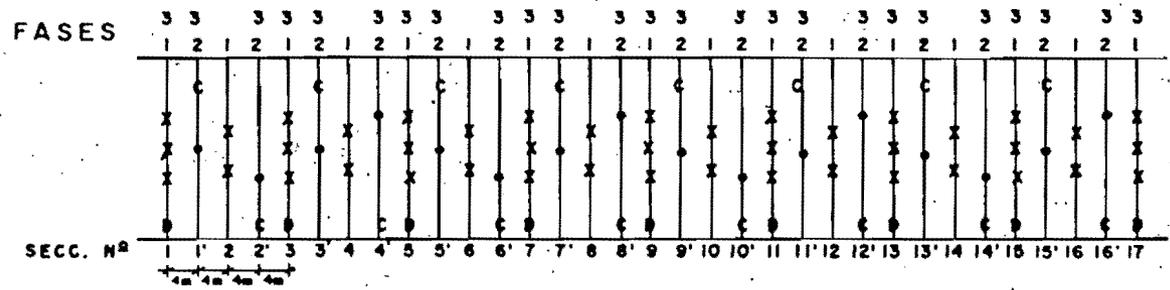


FIGURA 14

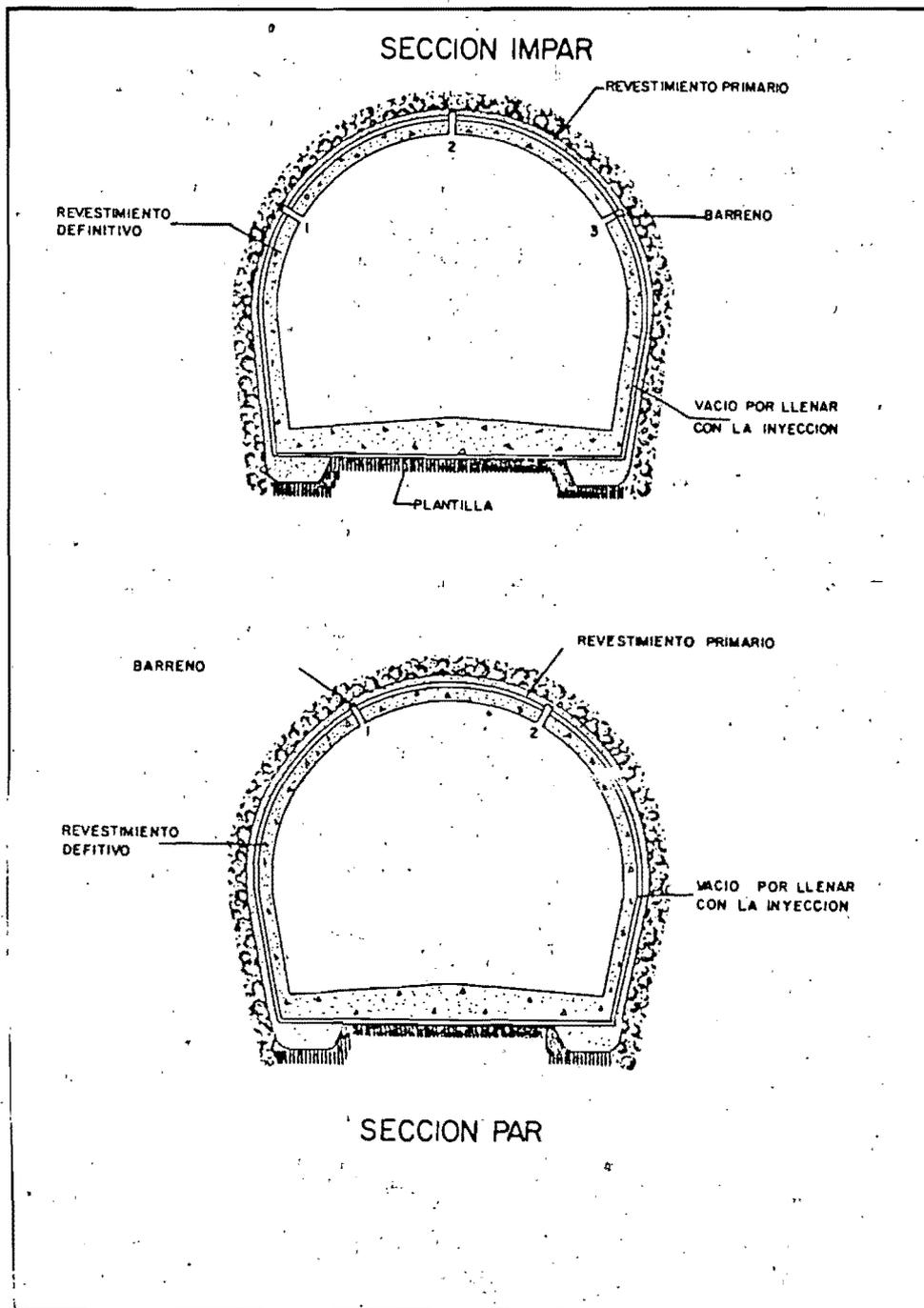


FIGURA 15 - SECCIONES PARA INYECCIONES DE CONTACTO - PRIMERA FASE

En este caso la presión de inyección es de 5 Kg./cm²., y la mezcla contiene los mismos componentes, pero es mas rica en cemento.

Tercera fase: Inyección del dren y la cubeta cuando la primera fase cumple 14 días, o sea, puede ser simultánea con la segunda fase.

Para la cubeta el volúmen de absorción es mínimo y se sigue el mismo criterio de la segunda fase. Para los drenes se fijan secciones a cada 16 metros con un solo barreno intermedias a la cubeta.

Se utilizan 10 mezclas densas por una de tipo fluido, repitiendo hasta llenar los barrenos. Tanto la presión de inyección como las mezclas fluidas son iguales a los de la segunda fase, las mezclas densas son iguales a la de la primera fase.

2.6. Actividades complementarias:

Para que las actividades descritas en los numerales anteriores de este capítulo puedan desarrollarse satisfactoriamente, es preciso realizar una serie de actividades complementarias, que son:

Topografía: Esta actividad se refiere al control topográfico dentro del túnel y consiste en señalar la línea y el nivel de cada ciclo. Para ello la brigada de topografía llevará al frente los datos de pendiente del proyecto y del eje del túnel. Otra de las funciones de la brigada de topografía es la de tomar datos de varios puntos del perímetro de la última sección excavada para dibujar de inmediato en papel dicho perímetro a escala y detectar sobreexcavaciones o protuberancias que quedaron dentro de la sección del proyecto.

El control topográfico deberá repetirse de acuerdo con el avance obtenido en cada ciclo. Es conveniente efectuar verificaciones de la línea y nivel del frente a cada 30 metros basándose en datos obtenidos en la superficie por medio de orientaciones astronómicas.

Instrumentación: La medición de desplazamiento del suelo en la vecindad de la excavación del túnel, nos proporciona datos que permiten modificar el procedimiento constructivo en caso necesario, verificar o rediseñar el ademe, definir el efecto del movimiento en estructuras adyacentes y determinar la magnitud y las causas del movimiento.

Las observaciones deberán iniciarse con un reconocimiento visual ampliándolas con la instrumentación que se diseña para definir las condiciones del túnel durante y después de su construcción. Adicionalmente, deberá efectuarse una nivelación superficial referenciada a una cota preestablecida antes de iniciar los trabajos.

La importancia de la instrumentación es relevante cuando sus resultados se interpretan rápidamente para el conocimiento del constructor y principalmente para ser utilizados en reajustar diseños y métodos constructivos.

Los instrumentos mas utilizados para medir desplazamientos son los extensómetros e inclinómetros, los cuales se colocan antes de la excavación. Durante la excavación y dentro del túnel se fijan estaciones para medición de convergencias que son registradas al tomar lecturas con longímetros de precisión.

Accesos: Para la construcción de todo túnel se requiere de obras preliminares que dependiendo de las condiciones topográficas pueden ser excavaciones a cielo abierto (tajos) y/o pozos (lumberas).

Por estos accesos podremos introducir los equipos, materiales y ductos que nos permitirán construir el túnel, así mismo, nos servirán para extraer la rezaga y ayudar con la ventilación. Las dimensiones de los accesos depende esencialmente de la sección que tendrá el túnel y el tamaño del equipo que intervendrá en la construcción.

Ventilación: El trabajo de excavación en túneles requiere de suministro de aire fresco en el frente, que es el lugar donde se encuentra laborando la mayor parte del personal.

El aire se suministra desde el exterior del túnel haciendo uso de ventiladores eléctricos y tubería de lamina engargolada o de lona. Una vez calculado el consumo de aire requerido se elige el ventilador adecuado, la separación entre ventiladores y el diámetro de la tubería.

Abatimiento del nivel freático: Cuando la excavación se debe realizar por debajo del nivel freático, es necesario realizar un abatimiento del mismo con el objeto de facilitar las operaciones de construcción y para mejorar las condiciones del frente.

Generalmente, el sistema de abatimiento consiste en perforar pozos hasta una profundidad bajo la plantilla del túnel igual a dos veces el diámetro de éste, e instalar en ellos bombas sumergibles.

En caso de que se presenten aportaciones dentro del túnel, será necesario evacuarlas. Si la pendiente del túnel es positiva basta con hacer una zanja y conducir las aguas hasta un cárcamo situado en la lumbrera mas próxima, en caso de ser negativa la pendiente será preciso recurrir al bombeo.

Inspección y supervisión: Permanentemente deberán verificarse las siguientes actividades: Limpieza de piso, limpieza de la superficie por colar, presencia de peines, alineamiento vertical y horizontal, dosificación de los agregados y el cemento, calidad de los ingredientes del concreto, calidad propia del concreto, limpieza de los moldes, tolerancias, vibrado, tiempo de fraguado,

colocación del refuerzo, cimbrado, etc. Las especificaciones establecidas para el proyecto deberán ser respetadas y observadas con el mayor interés.

CAPITULO 3

EXCAVACION Y REVESTIMIENTO SIMULTANEOS

Al excavar y revestir simultáneamente un túnel las actividades que integran su construcción se dividen en: Excavación, rezaga, ademe, revestimiento definitivo, inyecciones de contacto y actividades complementarias.

Aunque los fundamentos de cada actividad son iguales a los descritos en el capítulo anterior, existen determinadas circunstancias que los modifican radicalmente y los hacen ser muy diferentes.

El retiro de la rezaga debe pasar forzosamente por la zona que se está colando, lo que nos obliga a modificar la secuencia de armado del acero de refuerzo y colado de la cubeta.

El procedimiento de colado debido al tipo de cimbra utilizada es totalmente diferente, ya que la cimbra es de tipo estacionario por lo que los avances son más lentos (véase Figura 16). El equipo de colocación y el procedimiento empleado pueden ser los mismos que en el caso del colado continuo, únicamente que al no ser necesario que el equipo se esté moviendo en forma constante

puede simplificarse la plataforma de colado, con lo cual la inversión económica por éste concepto es menor a cambio de un ritmo mas lento en el colado.

La cimbra será metálica y deberá llevar ventanas para ayudar a la inspección y a la compactación del concreto; la compodrán tres secciones, una en clave y dos laterales, las cuales son retraídas por gatos hidráulicos para descimbrar y asentar sobre el carro transportador. Asentada la cimbra sobre el carro transportador, un motor colocado en uno de los sistemas de rodamiento de este carro, efectúa un movimiento de translación hasta el sitio del siguiente colado. Al llegar allí, los gatos hidráulicos restituyen la posición de proyecto de la clave y laterales. Desde luego, la línea y el nivel para cada colado deben ser controlados topográficamente. Ya que la excavación y el revestimiento serán simultáneos, deberá tenerse presente que el carro transportador permita el paso de equipo para la excavación del frente sin causar interferencias. (Véanse Figuras 17 y 18).

En cuanto al armado del acero de refuerzo de la sección, deberá estar colocado antes de cada movimiento de cimbra en una longitud igual o mayor a la del molde.

El colado del revestimiento se realizará a unos 200 metros del frente de excavación y será por secciones o etapas; el tipo de seccionamiento más empleado es el de dividir el revestimiento en una zona inferior o cubeta, dos muros o guarniciones y el arco; el orden en el que se efectúen los trabajos se puede variar, para el caso que nos ocupa proponemos realizarlo en las siguientes etapas:

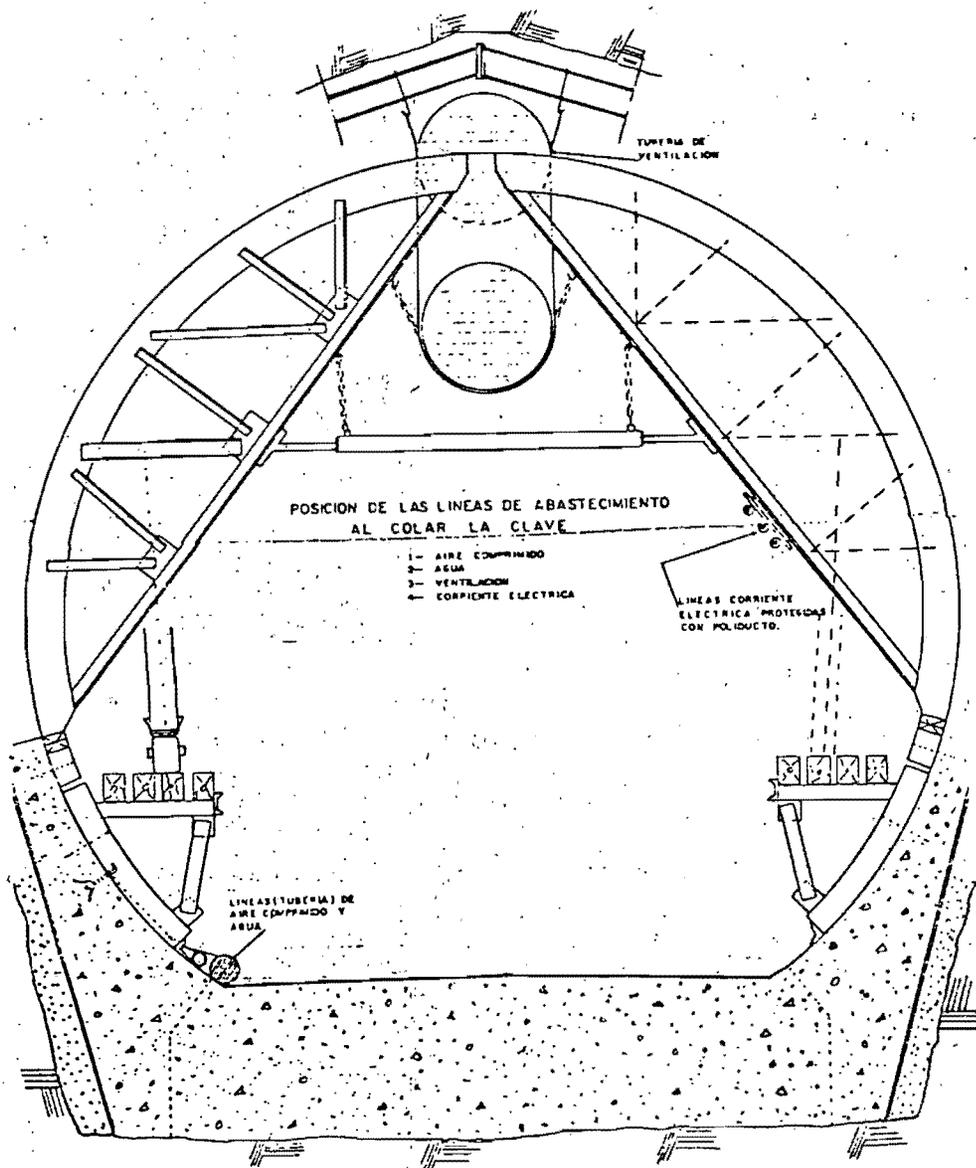
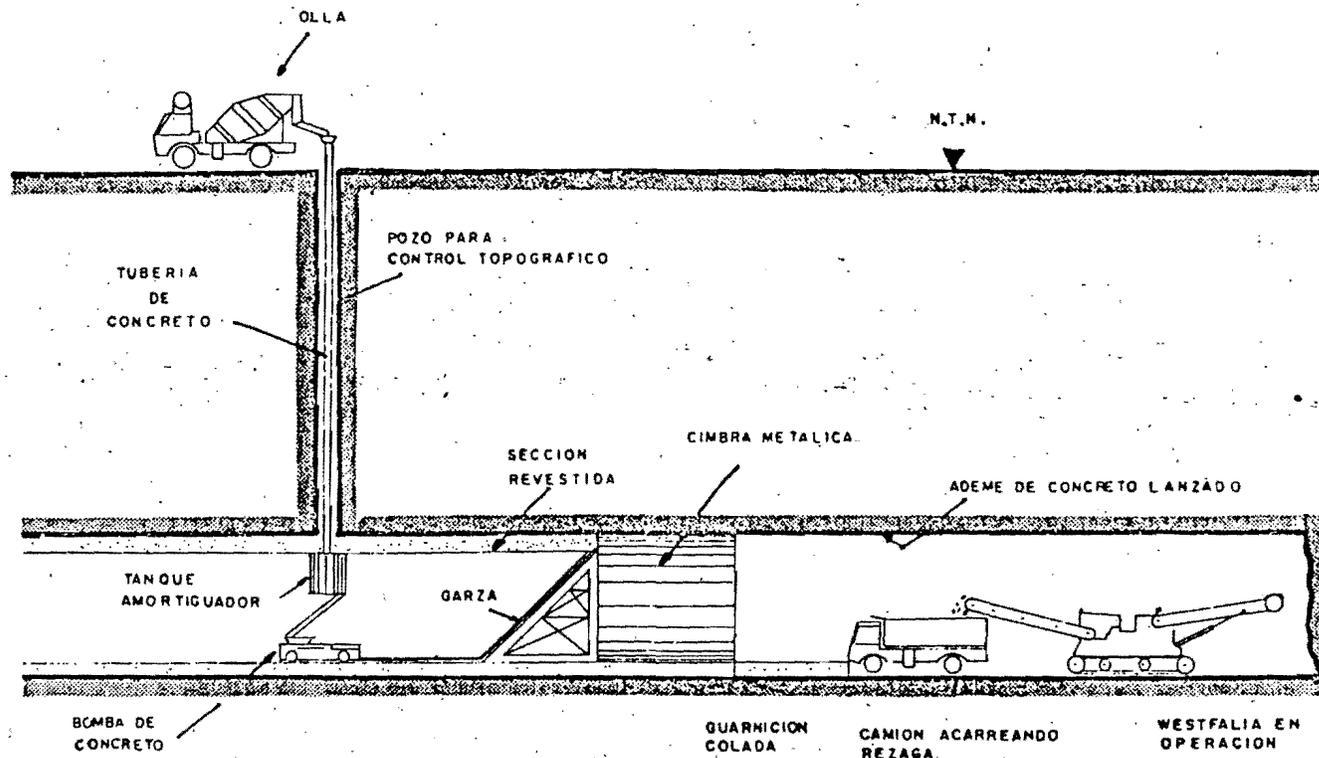


FIGURA 16 - SECCION DE CIMBRA ESTACIONARIA

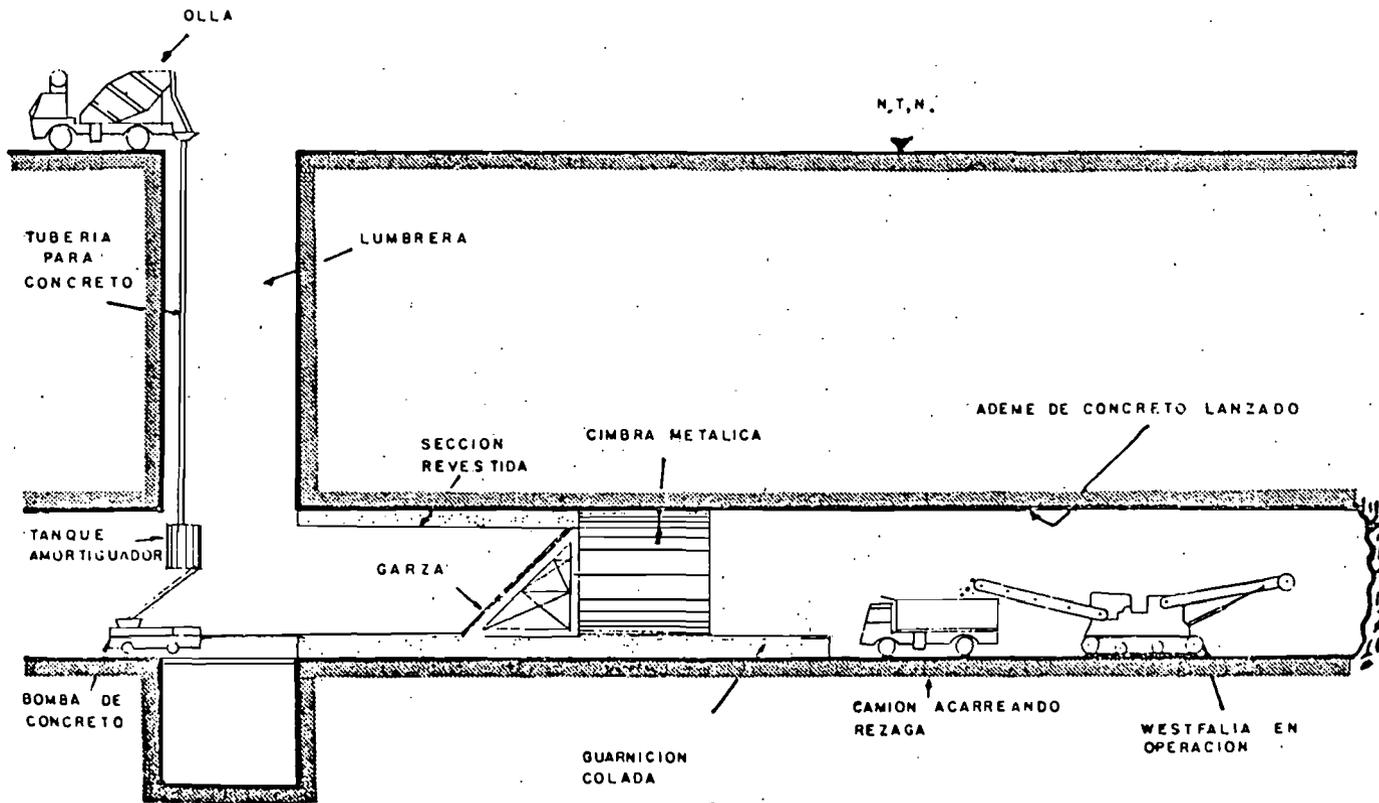
EXCAVACION Y REVESTIMIENTO SIMULTANEO



COLADO INTERMEDIO

FIGURA 17

EXCAVACION Y REVESTIMIENTO SIMULTANEO



COLADO CERCANO A LA LUMBRERA

FIGURA 18

Primera etapa: Colado de guarniciones laterales para anclaje y rodamiento. (Véanse Figuras 19 y 20).

Segunda etapa: Colado de clave y paredes laterales del túnel. (Véase Figura 21).

Tercera etapa: Colado de losa de piso o cubeta del túnel. (Véanse Figuras 22 y 23).

Para llevar al cabo la primera etapa de colado se utilizará una cimbra de la misma longitud de la que se usará en clave y paredes. Cabe destacar que la topografía del túnel se resolvera en este colado, por lo que la cimbra de las guarniciones cuenta con mecanismos para facilitar su alineación y nivelación. Este equipo cuenta con soportes para colocar el anclaje de la segunda etapa de colado, dicho anclaje se escoge de acuerdo a los requerimientos de cada túnel.

Con relación a la tercera etapa las actividades pueden ser desarrolladas al final de cada semana o al final de terminación del tramo. De esta última manera el rendimiento de colocación de concreto es muy alto ya que sería la única actividad a llevar. El colado se hace con la ayuda de una regla deslizante que se apoya sobre las guarniciones coladas en la primera etapa. El equipo está integrado por un deflector delantero para una buena distribución del concreto, una plataforma de apoyo a los obreros

que dan el acabado final y vibradores de contacto para dar un buen acabado, así como un lastre que evite la flotación del equipo.

Resumiendo las actividades que intervienen en la presente alternativa tenemos:

- 1) Armado del acero de refuerzo en guarniciones.
- 2) Cimbrado de las guarniciones.
- 3) Colado de las guarniciones.
- 4) Tiempo de fraguado de las guarniciones.
- 5) Armado del acero de refuerzo en bóveda y paredes.
- 6) Movimiento e instalación de la cimbra en la zona de colado.
- 7) Colado de paredes y bóveda.
- 8) Tiempo de fraguado de paredes y bóveda.
- 9) Descimbrado.

Dentro del ciclo de colado debemos tener presentes las siguientes actividades:

- a) Fabricación del concreto.
- b) Carga del concreto de la planta a los vehículos de acarreo.
- c) Acarreo del concreto hasta la bomba.
- d) Bombeo del concreto.

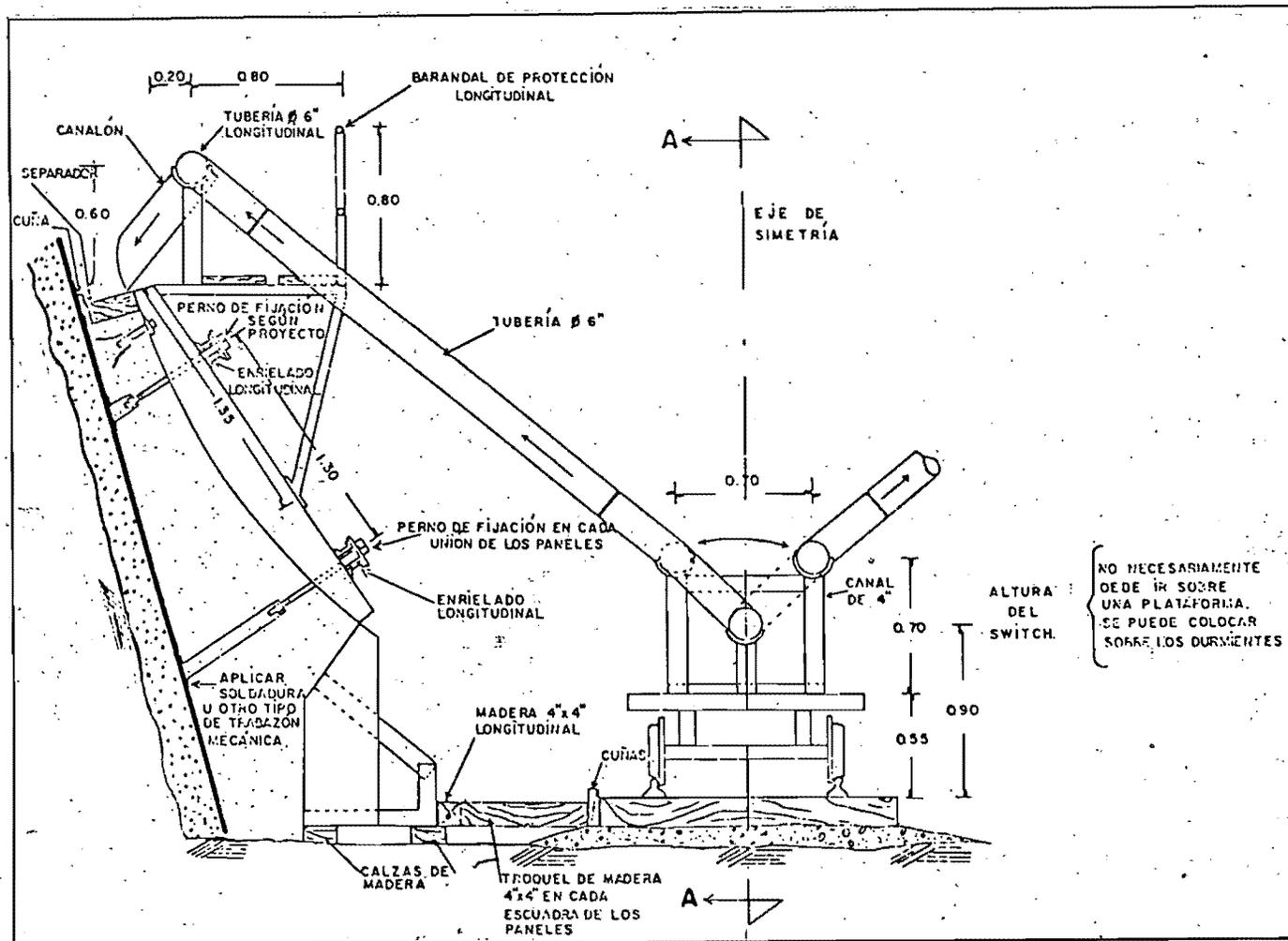


FIGURA 19 - COLADO DE GUARNICION

COLADO DE GUARNICIÓN.

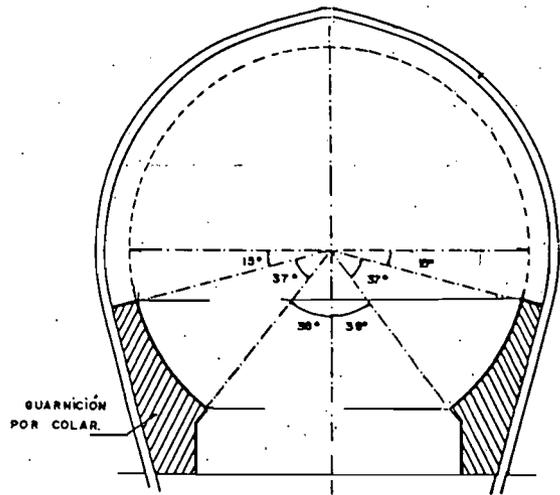


FIGURA 20

COLADO DE CLAVE

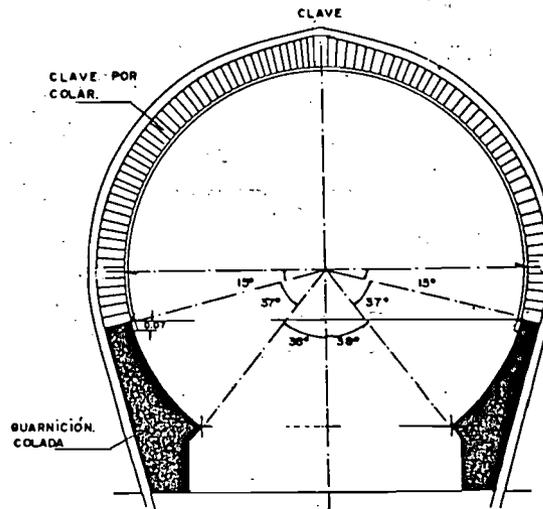


FIGURA 21

COLADO DE CUBETA

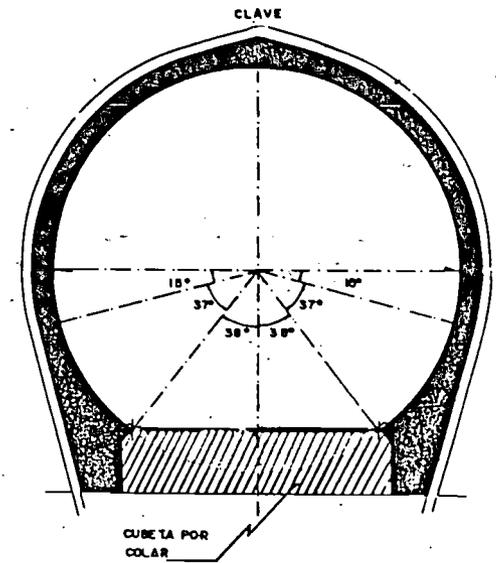


FIGURA 22

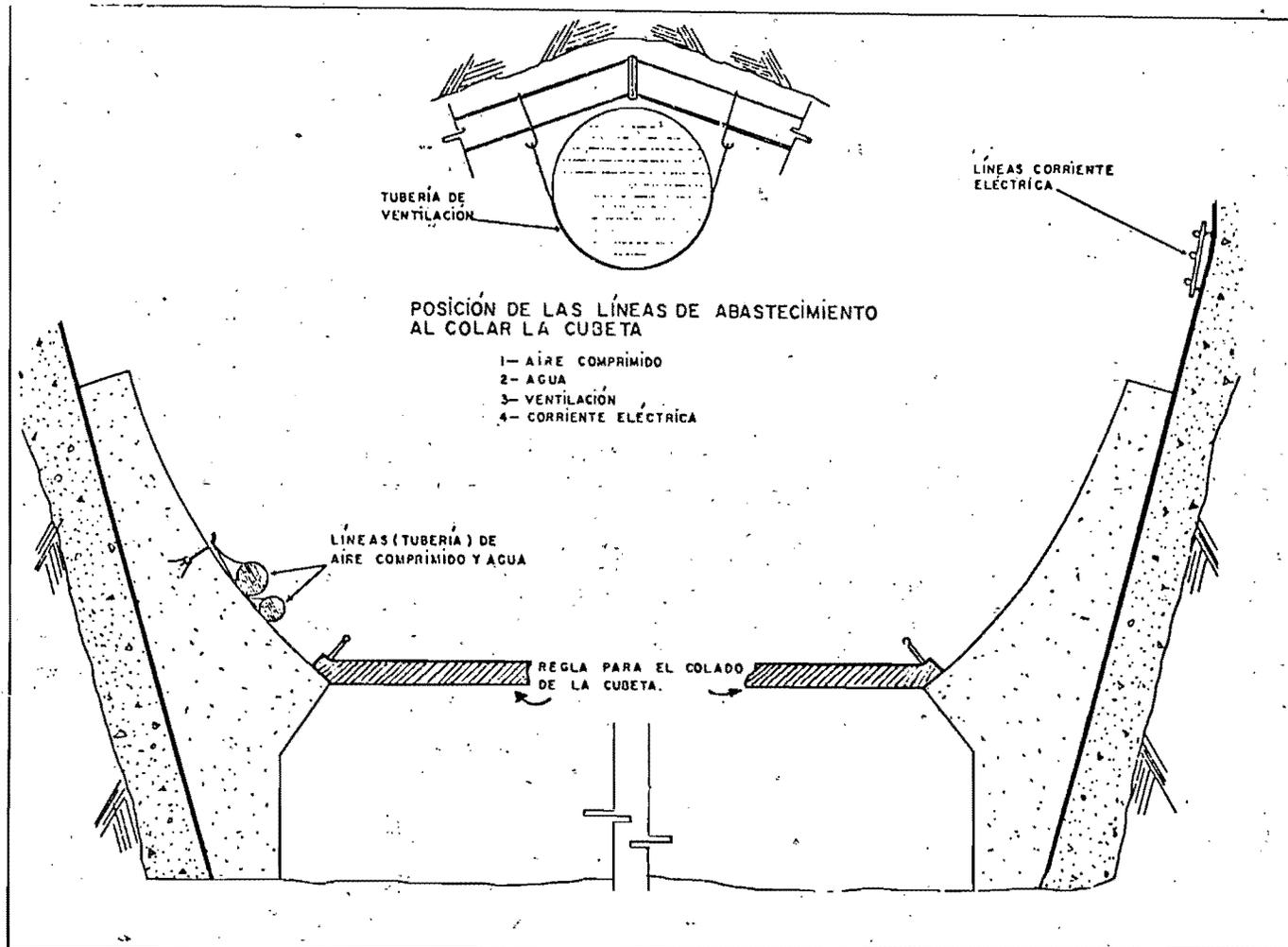


FIGURA 23 - COLADO DE CUBETA

CAPITULO 4

COSTOS

Antes de que obtenegamos y analicemos los costos de las alternativas descritas en los dos capítulos anteriores fijaremos los siguientes parámetros:

- a) Denominaremos "Alternativa 1" a la excavación del túnel en toda su longitud con revestimiento posterior.
- b) Denominaremos "Alternativa 2" a la excavación y el revestimiento simultáneos.
- d) El tramo interestación que analizaremos tendrá de 1000 metros de longitud.
- e) La sección será para un túnel de dos vías. (Véase Figura 24).
- f) Los costos directos estarán integrados por los conceptos de: Mano de obra, materiales y equipo.
- g) Todo el equipo que utilizaremos será rentado.
- h) El concreto hidráulico lo compraremos en una concretera comercial, quien por su parte, se encargará de entregarlo en la lumbrera o pozo que indiquemos.
- i) En el caso de la alternativa 2, el revestimiento se empezará a colocar cuando la excavación supere los 200 metros.

j) El ademe en concreto lanzado se ha diseñado para que sea capaz de absorber los esfuerzos que se presenten antes de que el túnel sea revestido definitivamente.

k) El material por excavar a todo lo largo del tramo interestación, estará constituido unicamente por limos arenosos y arenas limosas de compacidad media a muy compacta.

4.1. EXCAVACION Y ADEMADO:

4.1.1 Cálculo del ciclo y avance:

Rendimiento de la tuneleadora [Rt]=	25 Mt ³ ./Hr.
Avance por ciclo [Ac]=	2.40 Mts.
Area transversal de la sección por excavar [At]=	65.35 Mt ² .
Perímetro por revestir con concreto lanzado [Pl]=	21.78 Mts.
Espesor de concreto lanzado [El]=	0.15 Mts.
Coeficiente de rebote [Cr]=	1.30
Factor de eficiencia [F]=	0.80
Tiempo de excavación [Te]= (At x Ac / Rt)=	6.27 Hrs.
Tiempo de ademado [Ta]= (Pr x El x Ac x Cr / Rt)=	1.69 Hrs.
Tiempo de topografía [Tt]=	0.25 Hrs.
Tiempo del ciclo [Tce]= (Te + Ta + Tt)=	8.21 Hrs.

Esc. = 1:100

Dimensiones en metros.

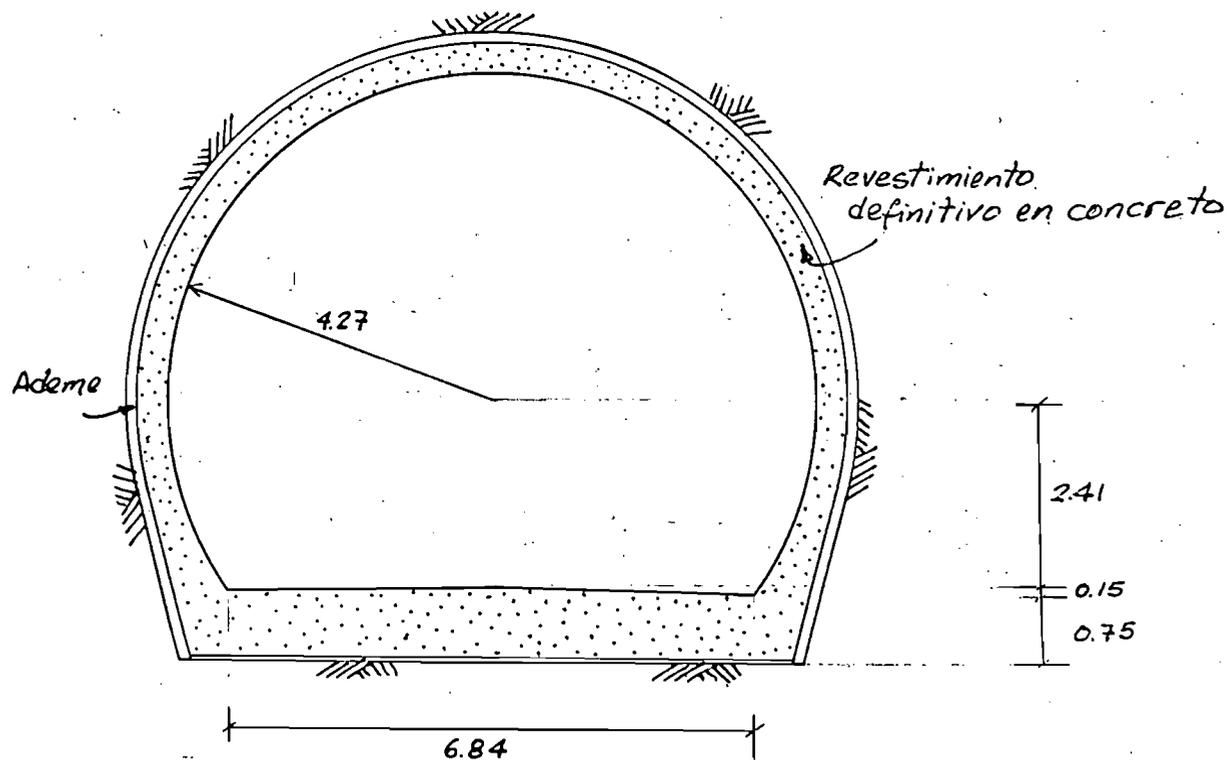


FIGURA 24 - Sección Transversal del Túnel

Número de ciclos diarios [C]= $(24 \times F / Tce)$ = 2.34 cic/día
Avance [Av]= $(C \times Ac)$ = 5.61 mt./día

A partir de los resultados inmediatamente obtenidos, calculamos el tiempo que necesitamos para excavar y ademar la totalidad del tramo interestación:

Tiempo de excavación y
ademe de todo el tramo [T]= $(1000 / Av)$ = 179.25 días

4.1.2. Costos directos de excavación:

Tal como lo expresamos en el literal f), los costos directos que en adelante se obtengan se limitarán a la mano de obra, los materiales y el equipo.

Dentro del concepto de mano de obra, debemos aclarar que el jornal real es el resultado de afectar el jornal nominal por el factor de salario real (FSR) calculado, que para este caso resultó ser de 1.552 por tratarse de una obra pública.

4.1.2.1. Mano de obra:

CATEGORIA	CANT	JORNAL NOMINAL	JORNAL REAL	TOTAL [\$/DIA]
Ayudante de lanzado	12	2,100.00	3,259.20	39,110.40
Ayudante de limpieza	12	2,100.00	3,259.20	39,110.40
Ayudante de manteo	12	2,100.00	3,259.20	39,110.40
Ayudante de perforista	9	2,100.00	3,259.20	29,332.80
Ayudante de soldador	3	2,100.00	3,259.20	9,777.60
Bombero	3	2,975.00	4,617.20	13,851.60
Cabo de excavación	3	3,015.00	4,679.28	14,037.84
Cabo de lanzado	3	3,015.00	4,679.28	14,037.84
Cadeneros	6	2,665.00	4,136.08	24,816.48
Chofer camión de plataforma	9	3,085.00	4,787.92	43,091.28
Chofer camión de volteo	15	3,085.00	4,787.92	71,818.80
Compresorista	3	2,735.00	4,244.72	12,734.16
Electricista	3	2,975.00	4,617.20	13,851.60
Elevadorista	3	2,665.00	4,136.08	12,408.24
Lanzador	3	2,995.00	4,648.24	13,944.72
Operador malacate	3	2,860.00	4,438.72	13,316.16
Operador máquina lanzadora	6	2,665.00	4,136.08	24,816.48
Operador tuneleadora	3	3,070.00	4,764.64	14,293.92
Perforistas	9	2,975.00	4,617.20	41,554.80
Soldadores	3	2,975.00	4,617.20	13,851.60
Telefonista	6	2,665.00	4,136.08	24,816.48
Tolvero	3	2,665.00	4,136.08	12,408.24
TOTAL MANO DE OBRA EXCAVACION				\$536,091.84
RENDIMIENTO [ML./DIA]				5.61
COSTO POR METRO [\$/ML.]				\$95,560.04

4.1.2.2. Equipo:

DESCRIPCION	CANT	RENTA MENSUAL	COSTO [\$/MES]
Bomba eléctrica de 30 HP	1	48,500.00	48,500.00
Bomba neumática de 2"	2	32,000.00	64,000.00
Botes de 3 mt3. para rezaga	6	15,000.00	90,000.00
Camión de plataforma de 15 ton	3	120,000.00	360,000.00
Camión de volteo de 6 mt3.	5	120,000.00	600,000.00
Camión mezclador tipo trixer	2	140,000.00	280,000.00
Compresor	2	650,000.00	1,300,000.00
Elevador de personal	1	450,000.00	450,000.00
Equipo de soldadura	2	200,000.00	400,000.00
Lanzadora de concreto	2	410,000.00	820,000.00
Martillo neumático	3	50,000.00	150,000.00
Silo para cemento de 60 ton.	1	115,000.00	115,000.00
Tolva receptora en la torre	1	20,000.00	20,000.00
Torre y malacate de manto	1	150,000.00	150,000.00
Tuneleadora de pluma	1	9,000,000.00	9,000,000.00
Ventiladores	2	100,000.00	200,000.00
TOTAL EQUIPO PARA EXCAVACION			\$14,047,500.00
RENDIMIENTO [ML./DIA]			5.61
COSTO POR METRO [\$/ML.]			\$83,467.02

4.1.2.3. Materiales:

CONCEPTO	UNID	CANT/ML	VR. UNIT.	COSTO/ML
Acetileno	Crga	.04	8,200.00	328.00
Aditivo acelerante	Kgr.	87.88	218.00	19,157.84
Agregados	Mt3.	5.08	3,400.00	17,272.00
Agua	Lt.	510.00	1.00	510.00
Alambre recocido	Kgr.	1.90	260.50	494.95
Cable 2/0 para alumbrado	M.L.	4.00	1,275.00	5,100.00
Cemento Portland tipo I	Ton.	1.69	28,196.00	47,651.24
Lámpara fluorescente	Pza	.20	8,790.00	1,758.00
Mallalac de 6 x 6"	Mt ² .	21.78	354.00	7,710.12
Manguera de 3/4" para aire	M.L.	.80	10,583.00	8,466.40
Oxígeno	Crga	.06	2,500.00	150.00
Picas para tuneleadora	Pza	5.00	6,800.00	34,000.00
Pulsetas para martillo	Pza	1.30	4,100.00	5,330.00
Soldadura 7018 de 1/8"	Kgr.	.25	581.00	145.25
Tubería de 2" para agua	M.L.	1.00	2,050.00	2,050.00
Tubería de 36" para ventil.	M.L.	1.00	9,217.00	9,217.00
Tubería de 8" para aire	M.L.	1.00	3,835.00	3,835.00
COSTO POR METRO [\$/ML.]				\$163,175.80

4.2. REVESTIMIENTO DEFINITIVO - ALTERNATIVA 1

4.2.1. Cálculo del número de módulos y rendimiento:

Rendimiento de la bomba de concreto [Rb]=	30 Mt ³ ./Hr.
Area de la sección por colar [Ar]=	13.50 Mt ² .
Longitud de cada módulo [Lm]=	6.10 Mts.
Altura del túnel [H]=	8.08 Mts.
Angulo de reposo del concreto [α]=	22.50 °
Tiempo de movimiento de cada módulo [Tm]=	2 Horas
Tiempo de fraguado [Tf]=	8 Horas
Longitud por fraguado [Lf]= (Rb x Tf / Ar)=	17.78 Mts.
Longitud por movimiento [Lo]= (Rb x Tm / Ar)=	4.44 Mts.
Longitud del talud de concreto [Lc]= (H / tanα)=	19.51 Mts.
Longitud de la cimbra [L]= (Lm + Lf + Lo + Lc)=	47.73 Mts.
Número de módulos= (L / Lm)= 7.96 módulos =	8 Módulos
Rendimiento del colado [Rc]= (Rb / Ar)=	2.22 Mt./Hr.

El tiempo de ejecución para revestir todo el tramo de túnel considerado (1,000 mts.) será de:

Tiempo total de revestimiento

de todo el túnel [Ta1]= (1000x Ar/ Rb)=18.75 días

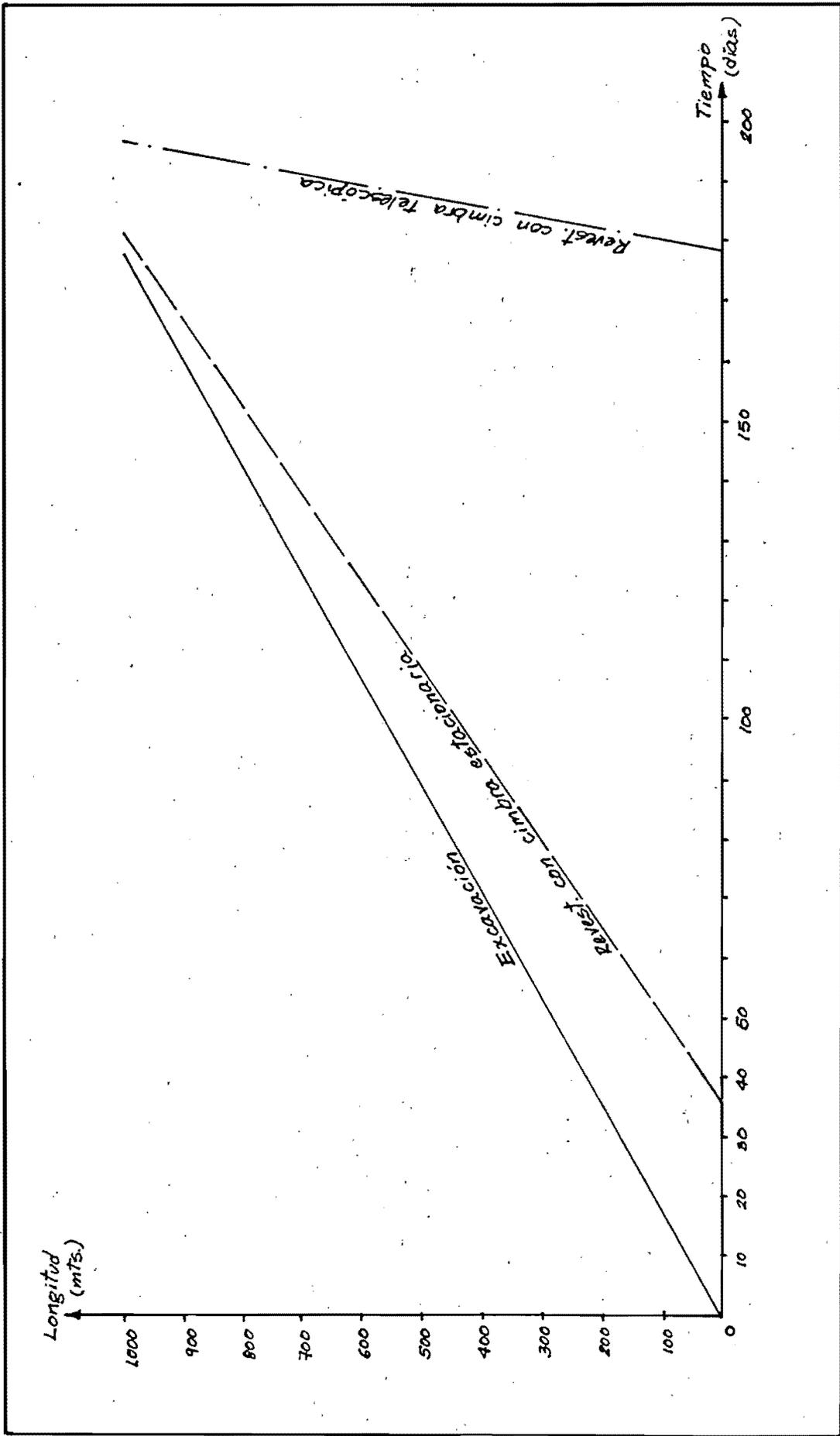


FIGURA 25

Tiempo total de ejecución
de la obra = $(T + T_{a1}) =$ 197 días
(Véase Figura 25)

4.2.2. Costos directos del revestimiento:

A continuación tenemos los costos directos que se generan para colocar el revestimiento definitivo cuando utilizamos cimbra telescópica:

4.2.2.1. Mano de obra:

CATEGORIA	CANT	JORNAL NOMINAL	JORNAL REAL	TOTAL [\$/DIA]
Albañil	6	3,015.00	4,679.28	28,075.68
Ayudante de carpintero	12	2,100.00	3,259.20	39,110.40
Ayudante de carro transp.	3	2,100.00	3,259.20	9,777.60
Ayudante de descarga	6	2,100.00	3,259.20	19,555.20
Ayudante de fierrero	18	2,100.00	3,259.20	58,665.60
Ayudante de mecánico	6	2,675.00	4,151.60	24,909.60
Ayudante de soldador	6	2,100.00	3,259.20	19,555.20
Ayudante de vibradorista	6	2,100.00	3,259.20	19,555.20
Bombero	3	2,975.00	4,617.20	13,851.60
Cabo de maniobras	3	2,805.00	4,353.36	13,060.08
Cabo de vibradoristas	3	3,279.00	5,089.01	15,267.02
Cabo fierrero	3	3,016.00	4,680.83	14,042.50
Cadeneros	6	2,665.00	4,136.08	24,816.48
Carpintero	6	2,805.00	4,353.36	26,120.16
Compresorista	3	2,735.00	4,244.72	12,734.16
Electricista	3	2,975.00	4,617.20	13,851.60
Elevadorista	3	2,665.00	4,136.08	12,408.24
Fierreros	18	2,905.00	4,508.56	81,154.08
Maniobrista	12	2,860.00	4,438.72	53,264.64
Operador bomba de concreto	3	3,015.00	4,679.28	14,037.84
Operador carro transportador	3	2,975.00	4,617.20	13,851.60
Operador de malacate	3	2,860.00	4,438.72	13,316.16
Soldador	6	2,975.00	4,617.20	27,703.20
Telefonista	6	2,665.00	4,136.08	24,816.48
Tuberos	6	2,665.00	4,136.08	24,816.48
Vibradoristas	12	2,805.00	4,353.36	52,240.32
TOTAL MANO OBRA EN REVESTIM.				\$670,557.12
RENDIMIENTO [ML./HORA]				2.22
COSTO POR METRO				\$12,572.95

4.2.2.2. Equipos:

DESCRIPCION	CANT	RENTA MENSUAL	COSTO [\$/MES]
Bomba eléctrica de 30 HP	1	48,500.00	48,500.00
Bomba neumática de 2"	2	32,000.00	64,000.00
Bomba para concreto	1	1,200,000.00	1,200,000.00
Carro transportador de cimbra	1	1,200,000.00	1,200,000.00
Compresor	2	650,000.00	1,300,000.00
Elevador de personal	1	450,000.00	450,000.00
Estructura garza	1	20,000.00	20,000.00
Módulo de cimbra deslizante	8	1,200,000.00	9,600,000.00
Sierra circular	1	33,500.00	33,500.00
Tolva receptora de concreto	1	14,000.00	14,000.00
Torre y malacate de manto	1	150,000.00	150,000.00
Vibrador de contacto	4	35,000.00	140,000.00
Vibrador de inmersión	4	35,000.00	140,000.00
TOTAL EQUIPO PARA REVESTIMIENTO			\$14,360,000.00
RENDIMIENTO [ML./HORA]			2.22
COSTO POR METRO [\$/ML.]			\$8,975.00

4.2.2.3. Materiales:

CONCEPTO	UNID	CANT/ML	VR. UNIT.	COSTO/ML
Acero de refuerzo	Kgr.	784.37	162.00	127,067.94
Acetileno	Crga	.03	8,200.00	246.00
Aditivo desmoldante	Lt.	8.63	190.00	1,639.70
Aditivo para curado	Lt.	6.50	217.00	1,410.50
Alambre recocido	Kgr.	12.00	260.50	3,126.00
Anclajes de cimbra	Pza.	2.50	635.00	1,587.50
Concreto fc'=250 Kgr.cm ² .	Mt3.	13.50	22,700.00	306,450.00
Madera	P.T.	5.00	85.00	425.00
Oxígeno	Crga	.05	2,500.00	125.00
Silletas PVC para desagüe	Pza.	.80	956.00	764.80
Soldadura 7018 de 1/8"	Kgr.	1.75	581.00	1,016.75
Tubería metálica 10"	M.L.	.02	15,270.00	305.40
Tubería metálica 6" p/bombeo	M.L.	2.00	10,740.00	21,480.00
Tubería PVC de 8" p/desagüe	M.L.	2.00	3,835.00	7,670.00
COSTO POR METRO [\$/ML.]				\$473,314.59

4.3. REVESTIMIENTO DEFINITIVO - ALTERNATIVA 2

Cuando utilizamos cimbra estacionaria tenemos tres frentes de trabajo: Guarniciones, clave y cubeta.

Como ya dijimos, las guarniciones se ejecutarán en primer lugar y llevarán una ventaja de dos tramos colados sobre el frente de la clave. En cuanto a la cubeta, la ejecutaremos durante los fines de semana.

4.3.1. Cálculo del ciclo y avances:

Area transversal de guarniciones [Ag]=	1.50 Mt ² .
Area transversal de clave [Ak]=	7.10 Mt ² .
Area transversal de cubeta [Aq]=	4.90 Mt ² .
Rendimiento bomba de concreto [Rb]=	30.00 Mt ³ ./Hr.
Longitud de la cimbra [L]=	6.10 Metros
Tiempo de fraguado del concreto [Tf]=	8.00 Horas
Tiempo de armado guarniciones [T1]=	2.00 Horas
Tiempo cimbrado guarniciones [T2]=	2.00 Horas
Tiempo de colocación via en guarniciones [T3]=	1.00 Horas
Tiempo de armado refuerzo clave [T4]=	8.00 Horas
Tiempo de colocación tapón en clave [T5]=	1.00 Horas
Tiempo de descimbrado clave [T6]=	2.00 Horas
Tiempo movimiento cimbra clave [T7]=	0.40 Horas
Tiempo de limpieza y engrase de cimbra clave [T8]=	1.60 Horas

Tiempo de cimbrado de la clave [T9]=	2.00 Horas
Tiempo de alineación y nivelación [T0]=	0.50 Horas
Tiempo colado guarniciones [Tcg]= (Ag x L/ Rb)=	0.31 Horas
Tiempo colado clave [Tck]= (Ak x L/ Rb)=	1.44 Horas

Duración ciclo de
guarnición [Tg]= (Tcg +Tf +T1 +T2 +T3 +T4)= 21.31 Hr/ciclo

Duración ciclo de
clave [Tk]= (Tck +Tf +T5 +T6 +T7 +T8 +T9 +T0)= 16.94 Hr/ciclo

Número de ciclos guarnición [Cg]= (24 /Tg)= 1.13 cic./dia

Número de ciclos clave [Ck]= (24 /Tk)= 1.42 cic./dia

Avance guarniciones [Avg]= (Cg * L)= 6.87 Mt./dia

Avance clave [Avk]= (Ck * L)= 8.64 Mt./dia

Podemos apreciar que la actividad crítica será el colado de las guarniciones ya que su avance es menor al de la clave.

Para verificar que en un momento dado las actividades de colado no tengan que ser interrumpidas por alcanzar al frente de excavación, tenemos:

Tiempo de excavación
de 200 metros [Te200]= (200 / 5.61)= 35.65 días

Tiempo de revestimiento

de todo el túnel [Tra2]= (1,000 / Avg)= 145.56 días

Tiempo total de

ejecución de la obra= (Te200 + Tra2)= 181.21 días

(Véase Figura 25)

Como la duración total de la excavación es de 178.25 días, no se presentarán interrupciones durante el revestimiento y la obra estará totalmente concluida a los 3 días de haberse terminado la excavación.

4.3.2. Costos directos del revestimiento:

Cuando la excavación y el revestimiento son simultáneos los costos directos que se generan son los siguientes:

4.3.2.1. Mano de obra:

CATEGORIA	CANT	JORNAL NOMINAL	JORNAL REAL	TOTAL [\$/DIA]
Albañil	6	3,015.00	4,679.28	28,075.68
Ayudante de carpintero	12	2,100.00	3,259.20	39,110.40
Ayudante de descarga	6	2,100.00	3,259.20	19,555.20
Ayudante de fierrero	18	2,100.00	3,259.20	58,665.60
Ayudante de mecánico	6	2,675.00	4,151.60	24,909.60
Ayudante de soldador	6	2,100.00	3,259.20	19,555.20
Ayudante de vibradorista	6	2,100.00	3,259.20	19,555.20
Bombero	2	2,975.00	4,617.20	9,234.40
Cabo de maniobras	3	2,805.00	4,353.36	13,060.08
Cabo de vibradoristas	3	3,279.00	5,089.01	15,267.02
Cabo fierrero	3	3,016.00	4,680.83	14,042.50
Cadeneros	6	2,665.00	4,136.08	24,816.48
Carpintero	6	2,805.00	4,353.36	26,120.16
Electricista	3	2,975.00	4,617.20	13,851.60
Fierreros	18	2,905.00	4,508.56	81,154.08
Maniobrista	12	2,860.00	4,438.72	53,264.64
Operador bomba de concreto	3	3,015.00	4,679.28	14,037.84
Soldador	6	2,975.00	4,617.20	27,703.20
Telefonista	3	2,665.00	4,136.08	12,408.24
Tuberos	6	2,665.00	4,136.08	24,816.48
Vibradoristas	12	2,805.00	4,353.36	52,240.32
TOTAL MANO DE OBRA REVESTIM.				\$591,443.92
RENDIMIENTO [ML./DIA]				6.87
COSTO POR METRO. [\$/ML.]				\$86,090.82

4.3.2.2. Equipos:

DESCRIPCION	CANT	RENTA MENSUAL	COSTO [\$/MES]
Bomba neumática de 2"	1	32,000.00	32,000.00
Bomba para concreto	1	1,200,000.00	1,200,000.00
Camioneta de 1 ton.	1	80,000.00	80,000.00
Carro transportador de cimbra	1	750,000.00	750,000.00
Cimbra estacionaria	1	1,000,000.00	1,000,000.00
Compresor	1	650,000.00	650,000.00
Estructura garza	1	20,000.00	20,000.00
Sierra circular	1	33,500.00	33,500.00
Tolva receptora de concreto	1	14,000.00	14,000.00
Vibrador de contacto	10	35,000.00	350,000.00
Vibrador de inmersión	10	35,000.00	350,000.00
TOTAL EQUIPO REVESTIMIENTO			\$5,979,500.00
RENDIMIENTO [ML./DIA]			6.87
COSTO POR METRO [\$/ML.]			\$29,012.62

4.3.2.3. Materiales:

CONCEPTO	UNID	CANT/ML	VR. UNIT.	COSTO/ML
Acero de refuerzo	Kgr.	784.37	162.00	127,067.94
Acetileno	Crga	.03	8,200.00	246.00
Aditivo desmoldante	Lt.	6.35	190.00	1,206.50
Aditivo para curado	Lt.	6.50	217.00	1,410.50
Alambre recocido	Kgr.	12.00	260.50	3,126.00
Anclajes de cimbra	Pza.	2.50	635.00	1,587.50
Banda PVC de 6" para juntas	M.L.	2.00	390.00	780.00
Cimbra para guarnición	Mt ² .	2.17	190.00	412.30
Cimbra para tapones	Mt ² .	2.28	4,650.00	10,602.00
Colas de cochino para anclas	Pza.	3.00	650.00	1,950.00
Concreto fc'=250 Kgr.cm ² .	Mt ³ .	13.50	22,700.00	306,450.00
Madera	P.T.	5.00	85.00	425.00
Oxígeno	Crga	.05	2,500.00	125.00
Silletas PVC para desagüe	Pza.	.80	956.00	764.80
Soldadura 7018 de 1/8"	Kgr.	1.75	581.00	1,016.75
Tubería metálica 10"	M.L.	.02	15,270.00	305.40
Tubería metálica 6" p/bombeo	M.L.	2.00	10,740.00	21,480.00
Tubería PVC de 8" p/desagüe	M.L.	2.00	3,835.00	7,670.00
COSTO POR METRO [\$/ML.]				\$486,625.69

4.4. COSTOS INDIRECTOS

En este rubro, se tienen costos inmediatos y diferidos expresados como porcentajes del costo directo.

Los costos indirectos son los cargos requeridos por la organización técnica y administrativa de la empresa, en ellos incluimos la administración central, la administración de campo, los imprevistos, el costo financiero y las utilidades.

En vista de las diferencias en los procedimientos a seguir para cada alternativa, los costos indirectos serán diferentes en cada caso, siendo mayores para la alternativa 1 debido a la mayor duración para desarrollar la totalidad de los trabajos.

Seguidamente presentamos una tabla en donde se desglosan los costos indirectos de cada alternativa:

CONCEPTO	ALTERNAT. 1	ALTERNAT. 2
<u>Administración central:</u>		
Gastos técnicos y administrativos	5.00%	4.70%
Alquileres y amortizaciones	.75%	.50%
Gastos de promoción y capacitación	.65%	.50%
Fianzas, seguros y obligaciones	.20%	.15%
Materiales de consumo	.90%	.65%
Total administración central	7.50%	6.50%
<u>Administración de campo:</u>		
Gastos técnicos y administrativos	7.00%	6.50%
Comunicaciones y fletes	.50%	.40%
Construcciones provisionales	.60%	.55%
Consumos y varios	.50%	.40%
Total administración de campo	8.60%	7.85%
Costo financiero	8.50%	8.50%
Imprevistos	3.00%	3.00%
Utilidad	10.00%	10.00%
TOTAL COSTOS INDIRECTOS	37.60%	35.85%

4.5. INTEGRACION DE COSTOS

Con el propósito de determinar el costo final de cada alternativa es preciso integrar los costos y porcentajes obtenidos en las secciones anteriores.

4.5.1. ALTERNATIVA 1

CONCEPTO	COSTO EXCAVACION [\$/ML.]	COSTO REVESTIM. [\$/ML.]	COSTO TOTAL [\$/ML.]	INDICE [%]
Costo directo:				
Mano de obra	95,560.04	12,572.95	108,132.99	9.39
Equipo	83,467.02	8,975.00	92,442.02	8.03
Materiales	163,175.80	473,314.59	636,490.39	55.26
Total costo directo	342,202.86	494,862.54	837,065.40	72.67
Costo indirecto	128,668.28	186,068.32	314,736.59	27.33
COSTO TOTAL [\$/ML.]	470,871.14	680,930.86	1,151,801.99	100.00

4.5.2. ALTERNATIVA 2

CONCEPTO	COSTO EXCAVACION [\$/ML.]	COSTO REVESTIM. [\$/ML.]	COSTO TOTAL [\$/ML.]	INDICE [%]
Costo directo:				
Mano de obra	95,560.04	86,090.82	181,650.86	14.17
Equipo	83,467.02	29,012.62	112,479.64	8.77
Materiales	163,175.80	486,625.69	649,801.49	50.67
Total costo directo	342,202.86	601,729.13	943,931.99	73.61
Costo indirecto	122,679.73	215,719.89	338,399.62	26.39
COSTO TOTAL [\$/ML.]	464,882.59	817,449.02	1,282,331.61	100.00

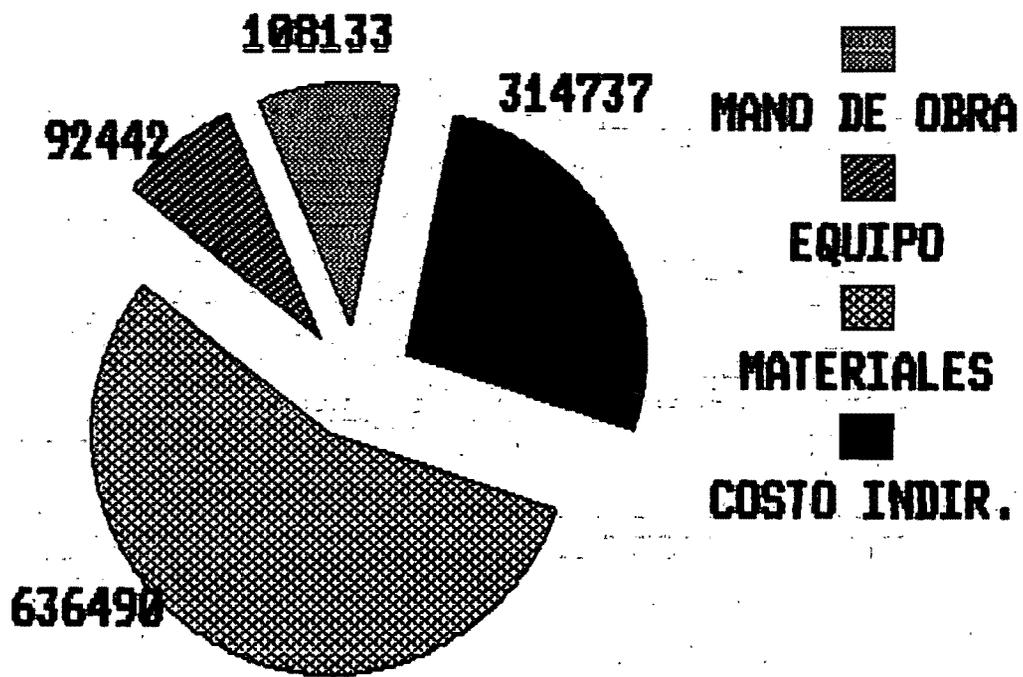
4.6. ANALISIS COMPARATIVO

En el siguiente cuadro sintetizamos los diferentes costos por metro lineal para poder compararlos y ver de una manera mas clara las diferencias que existen entre una y otra alternativa.

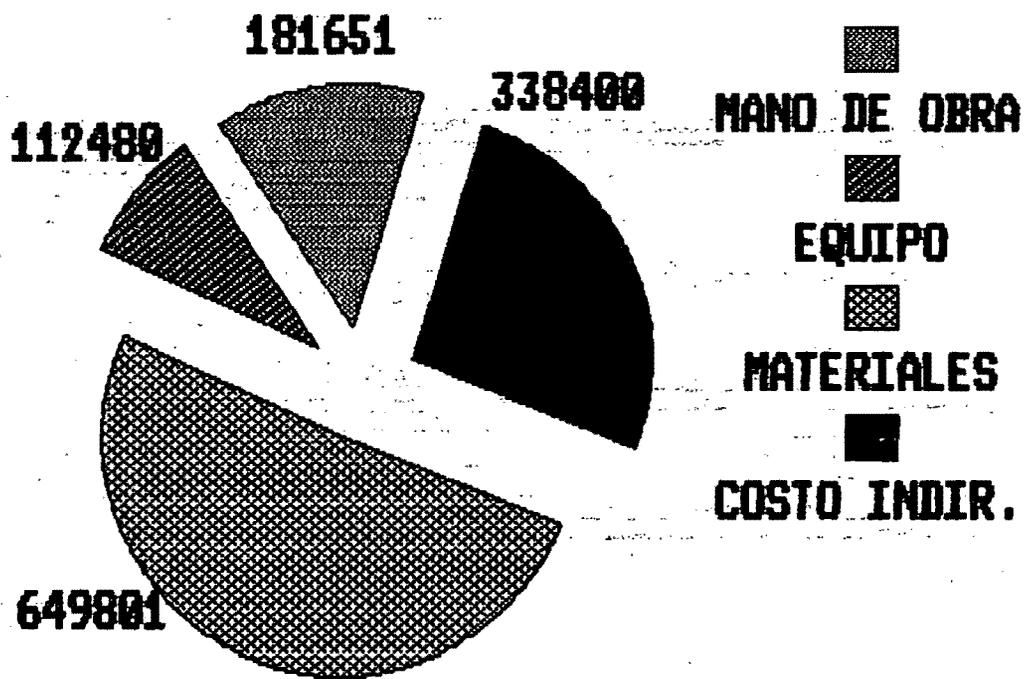
En la columna denominada "Diferencia Costo" podemos apreciar la diferencia de costos entre la alternativa 2 y la alternativa 1.

CONCEPTO	COSTO ALTERNATIVA 1 [\$/ML.]	COSTO ALTERNATIVA 2 [\$/ML.]	DIFERENCIA COSTO [\$/ML.]
MANO DE OBRA	108,132.99	181,650.86	73,517.87
EQUIPO	92,442.02	112,479.64	20,037.62
MATERIALES	636,490.39	649,801.49	13,311.10
COSTO INDIR.	314,736.59	338,399.62	23,663.03
TOTAL [\$/ML.]	1,151,801.99	1,282,331.61	130,529.62

Con el objeto de apreciar un poco mas facilmente la incidencia de los diferentes conceptos sobre los costos de las alternativas propuestas, a partir de los datos consignados en la tabla anterior presentamos las siguientes gráficas:



ALTERNATIVA 1



ALTERNATIVA 2

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

Debido a las razones expuestas en el primer capítulo, hasta la fecha el procedimiento tradicional para la construcción de los diferentes túneles del Metro de la Ciudad de México ha sido el de excavación y revestimiento simultáneos.

Sin embargo, el presente estudio nos demuestra que si adoptamos el procedimiento de excavar el túnel en toda su longitud con revestimiento posterior, lograremos abatir el costo de la obra en un porcentaje significativo.

Paralelamente, el deseo de las instituciones oficiales por generar un mayor número de empleos será posible, pues para ésta alternativa requeriremos de un mayor número de trabajadores.

Con el procedimiento sugerido podremos ejecutar la obra con una mayor comodidad ya que no existirán interferencias entre las diferentes actividades (excavación, colados, armado de refuerzos, extracción de la rezaga, etc.).

Desafortunadamente este procedimiento representa para el constructor algunos aspectos un poco desfavorables, como pueden ser:

a) Costo de la cimbra telescópica:

La inversión por concepto de cimbra telescópica será ocho veces mayor que para el caso de la cimbra estacionaria. Adicionalmente el riesgo de que la inversión pueda quedar inmovilizada en un momento dado es elevado, ya que estamos siendo vulnerables a un cese intempestivo de las obras debido a fluctuaciones en la situación económica estatal, o que por alguna circunstancia el diseño geométrico de la sección del túnel deba ser modificado, o a que no se ganen futuros concursos para terminar de amortizar la inversión.

b) Número de personal:

Debido al hecho natural que se presenta cuando el número de personas empleadas es alto, la eficiencia per capita tiende a disminuir, generándose la necesidad de incrementar el número para compensar la falta de eficiencia. Por otra parte, la consecución de personal idóneo para estas labores es difícil y pensar en una capacitación durante el desarrollo de los trabajos va en detrimento directo de la calidad de la obra.

c) Incremento de recursos:

El hecho de que la obra se realice en un mayor tiempo puede forzarnos a tener que hacer mayores inversiones en recursos (equipo de superficie, torres de manteo, elevadores, silos de cemento, etc.), ya que los que se utilizan durante la etapa de revestimiento estarán distraídos y no podrán ser transferidos al siguiente frente.

Como en todo, cada propuesta tiene aspectos positivos y negativos pero consideramos que en este caso las cosas buenas pesan mas que sus opuestas. Además si tomamos las precauciones debidas los efectos contrarios podrán ser minimizados.

Como conclusión definitiva al presente trabajo, pienso que para la contrucción de futuros túneles para el Metro de la Ciudad de México la alternativa de excavarlos en toda su longitud y revestirlos posteriormente deberá ser tomada muy en cuenta, ya que el costo de la obra sale considerablemente mas bajo que con el método que tradicionalmente se suponía era lo mas barato. El hecho de que la obra se tarde un par de semanas mas en ser concluida, no es relevante ya que los beneficios de tipo económico para la ciudad y sus habitantes tienen un gran peso.

BIBLIOGRAFIA

"The Art of Tunneling", K.Szechy, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1973

"Tunnels: Planning, Design and Construction", T.M.Me Zaw and J.V. Bartlett, Harwood, Chichester, Gr. Britain, 1981

"Tunnel Engineering Handbook", J.O.Bickel and T.R.Kuesel, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1982

"Memoria Técnica de las Obras del Drenaje Profundo del Distrito Federal", Túnel S.A. de C.V., México, 1977

"Diseño y Construcción de Túneles", División de Educación Continua, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México D.F., 1985

"Notas del Curso Victor Hardy 85", Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas A.C., México D.F., 1985

"Apuntes del Curso Construcción de Túneles", División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México D.F., 85-I