



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

4
2g.

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES - ACATLAN

MINITUNELES

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de:
INGENIERO CIVIL

Presenta:

VICENTE ALVAREZ PIÑA

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Asesor: Ing. Juan Jacobo Schmitter M. del C.



Acatlán, Edo. de Méx.

1993



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 está 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.

INDICE

PROLOGO.....	4
CAPITULO 1. ANTECEDENTES.....	8
1.1 Conceptualización.....	16
1.2 Referencias históricas.....	18
1.3 Perspectivas económicas.....	29
CAPITULO 2. ASPECTOS GEOTECNICOS.....	32
2.1 Clasificación geotécnica.....	35
2.2 Propiedades de los suelos.....	38
2.3 Propiedades de las rocas.....	46
2.4 Estabilidad de túneles.....	49
2.4.1 Deformaciones y cambios de esfuerzos Inducidos por la excavación.....	50
2.4.2 Factor de seguridad (FS).....	57
CAPITULO 3. TECNICAS PARA LA CONSTRUCCION DE MINITUNELES.....	62
3.1 Clasificación.....	64
3.2 Miniescudos (Slurry Minishield Tunnelling).....	66
3.2.1 Miniescudo OCAMS/SM.....	69
3.2.2 Telemole.....	84
3.2.3 Telemouse.....	89
3.2.4 Crunchingmole.....	89
3.2.5 Hansemole.....	92
3.2.6 Unclemole.....	94

3.3	Perforador Auger.....	97
3.4	Perforación Direccional.....	108
3.4.1	Corte Suave.....	108
3.4.2	Guide Drill.....	120
3.4.3	Broca de Corte.....	122
3.5	Perforación Percusiva.....	128
3.6	Técnica de Hincar Tuberías (Pipe-Jacking).....	134
3.7	Técnica de Reventar Tuberías (Método Pipe-Bursting).....	145
3.8	Tendencias futuras.....	149
3.9	Comentarios sobre la estabilidad para cada técnica.....	152
CAPITULO 4. APLICACIONES INGENIERILES.....		157
4.1	Microtúnel bajo el Canal Nacional.....	157
4.1.1	Antecedentes.....	157
4.1.2	Estudio Geotécnico.....	159
4.1.3	Factor de Seguridad del Frente de Excavación.....	159
4.1.4	Proceso Constructivo.....	165
4.1.5	Fuerzas Resistivas.....	167
4.1.6	Capacidad de carga del terreno.....	170
4.1.7	Diseño de la Estructura de Atraque y Sistema Hidráulico de Empuje.....	172
4.2	Techos Subterráneos para el Metro de la Ciudad de México y de Abéres, Bélgica.....	187

4.2.1 Etapas Constructivas para el Cájón Superficial del Metro en la Ciudad de México.....	187
4.2.2 Construcción de Cajones Subterráneos con Microtúneles en la Ciudad de México.....	188
4.2.3 Construcción de Techos Subterráneos en el Metro de Amberes, Bélgica....	194
4.2.4 Cierre Hermético de Tuberías.....	199
4.2.5 Ventajas del método de Techos Subterráneos.....	201
CONCLUSIONES.....	209
REFERENCIAS.....	213
ANEXO 1. Operación equilibrada de Miniescudos con cortador de disco y flujo de lodos.....	216
ANEXO 2. Cálculo de los parámetros de dirección para la técnica de perforación direccional con sistema de corte suave.....	224
ANEXO 3. Fuerzas resistivas al proceso de inserción de tuberías (caso de aplicación).....	228

PROLOGO

El presente trabajo pretende introducir al Ingeniero en el camino de las pequeñas excavaciones subterráneas (minitúneles); presentando una recopilación de los diferentes aspectos que conforman el tema como son: geotecnia, equipos y aplicaciones ingenieriles. Para abordarlos se ha preparado el desarrollo del trabajo en cuatro capítulos, como se describe a continuación.

CAPITULO 1

En la primera parte correspondiente al capítulo 1 de la investigación se presenta una introducción al tema, con una reflexión que invita a utilizar la nueva tecnología para la instalación de servicios urbanos o industriales (tuberías) sin necesidad de abrir zanjas, sino con minitúneles. Asimismo se expone el razonamiento que ha generado el desarrollo de la tecnología y las repercusiones que provoca la utilización del método de apertura de zanjas para alojar tuberías en zonas pobladas; las ventajas del método de minitúnel, su campo de utilización, sus aplicaciones ingenieriles, conceptualización y referencias históricas.

Para completar las reflexiones, en el inciso

denominado Perspectivas Económicas, se plantea el problema de su aceptación como una nueva opción para el alojamiento de tuberías en el terreno.

CAPITULO 2

El objetivo del capítulo 2 es relacionar las propiedades más relevantes de los suelos y rocas que contribuyen a la correcta selección del equipo de excavación. Se exponen las ventajas y desventajas que se presentan al excavar con los diferentes tipos de máquinas en la amplia gama de materiales, así como la clasificación geotécnica de los minitúneles, con el fin de definir explícitamente varios medios de excavación o perforación. En este capítulo ha quedado asentado el tema de estabilidad y sus particularidades al utilizar diversas técnicas de excavación de pequeñas oquedades.

CAPITULO 3

En este capítulo se expone la recopilación de las variadas técnicas del microtúnel, tanto las particularidades de las máquinas como de sus tres procesos fundamentales que son: excavar (cortar el suelo o roca), rezagar (extraer del túnel el material producto del corte) e insertar (colocar la tubería bajo el terreno); al igual que sus ventajas y desventajas al ser utilizadas en los diferentes suelos y rocas,

los alcances longitudinales de excavación o perforación y algunos tipos de máquinas existentes.

CAPITULO 4

En este capítulo se presentan las aplicaciones ingenieriles:

- El proceso constructivo y análisis de estabilidad para el cruce de una tubería bajo el cauce de un canal.

- El proceso de ejecución para la construcción de techos subterráneos en el proyecto del metro de Amberes, Bélgica.

Esta investigación contiene además tres anexos para complementar el aspecto técnico de los minitúneles:

ANEXO 1

Presenta un análisis del equilibrio dinámico, bajo el cual deben operar las minimáquinas, llamadas miniescudos, para no provocar su atascamiento bajo el terreno o inestabilidad del mismo (según la referencia 27).

ANEXO 2

Se realizan los cálculos geométricos de los parámetros de la dirección que deberá seguir un perforador horizontal direccional con sistema de corte suave (propuesto).

ANEXO 3

Es un análisis teórico (propuesto) para determinar las fuerzas resistivas que se oponen al avance de la tubería al ser insertada bajo el terreno. Se desarrolla el análisis basandose en un ejemplo práctico.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

La tecnología del microtúnel ha surgido principalmente como una necesidad urbana ante el creciente problema de implantación y renovación de tuberías y conductos subterráneos, con el fin de proporcionar métodos constructivos que no afecten el medio superficial.

El crecimiento urbano e industrial esta generando la necesidad de introducir en el subsuelo nuevas tuberías para solventar la demanda de servicios: agua potable, drenaje, energía eléctrica, líneas de teléfono, televisión y las modernas redes de tuberías para la distribución de energéticos (gas y gasolina).

La técnica de abrir zanjas para alojamiento de tuberías en el terreno en la mayoría de los casos es inadecuada por las diversas repercusiones que acarrea su aplicación, principalmente en zonas urbanas, industriales y en los llamados puntos conflictivos (cruce de autopistas, aeropistas, vías férreas, canales y cauces naturales).

Entre las diversas repercusiones se pueden mencionar

las siguientes:

- Afectabilidad de la infraestructura (destrucción física del medio superficial).
- Problemas viales (congestionamiento del tránsito vehicular).
- Problemas económicos (afectación de la economía de terceras personas).
- Trastornos psicológicos a transeúntes y vecinos.
- El método rompe con la armonía estética del paisaje.

Cuando se construye un conducto enterrado utilizando el método de trincheras, en una zona urbana o industrial, normalmente el proyecto implica romper un tramo longitudinal del pavimento o banqueta; o cuando se cruza transversalmente una vialidad, se tiene que demoler la carpeta asfáltica, las banquetas y el camellón; algunas otras veces al cruzar la línea del proyecto por áreas verdes, se tienen que talar algunos árboles viejos, levantar el césped o algunas otras plantas.

Durante la ejecución de esos proyectos se presentan

diversos problemas, como repercusión de la apertura de zanjas. Para alojar una tubería en una vialidad es necesario desviar el tráfico o vialidades alternas o cerrar parte de la misma, esto trae como consecuencia embotellamiento o circulación lenta de los vehículos, generándose largas colas para cruzar el lugar de la obra. Si se piensa en las personas que se desplazan por ese lugar hacia otros sitios, se diría que se están demorando para llegar a sus destinos, gastando mayor cantidad de combustible así como sus vehículos; si esas personas fueran trabajadores, se hablaría de una pérdida de horas-hombre necesarias para la producción, etc. Y después de terminada la obra, es muy común dejar en el lugar los molestos "baches", que siguen perjudicando a la circulación vehicular por mucho tiempo.

La práctica del método de apertura de zanjas demuestra que es un procedimiento de fácil aplicación, el cual presupone una tecnología convencional, accesible (como el pico y la pala, y personal no muy calificado) y que garantiza la correcta instalación de las tuberías en el subsuelo.

Es un método insustituible cuando las condiciones orográficas lo favorecen, por ejemplo, en la construcción de un gasoducto u oleoducto enterrado en un terreno no muy compacto y plano. Sin embargo, otras veces en proyectos de esta naturaleza el método es inadecuado e inaplicable, por ejemplo, donde hay que atravesar montañas, cauces caudalosos,

vías férreas, carreteras, etc., los cuales se pueden denominar como puntos obligados y conflictivos del proyecto.

Al no tener disponible la alternativa de microtúnel, tales puntos conflictivos han tenido que cruzarse por métodos convencionales.

En zonas montañosas se ha seguido el contorno de la orografía para tender las tuberías, obligando al proyecto a la utilización de sistemas de bombeo para vencer las alturas.

Para cruzar una tubería por el cauce de un río de sección hidráulica pequeña, se recurre a la solución del tubo puente, que implica para el proyecto mayor tiempo de obra y la utilización de equipos de construcción pesada, como son grúas de gran capacidad, las cuales algunas veces tienen que llevarse a lugares casi inaccesibles a un costo elevado.

Para el cruce de tuberías a través de cauces de amplia sección hidráulica, se recurre a las soluciones del tubo puente y al tendido de la tubería sobre el fondo del cauce, donde la vida útil de esa tubería (normalmente de acero) puede llegar a recortarse por la falta de mantenimiento o por la mala aplicación de pinturas anticorrosivas (epóxicas). Entre otros problemas, el tendido libre de la tubería sobre el fondo del cauce, puede generar la contaminación de las aguas del

río, por fugas de hidrocarburos en los empalmes de los tubos, etc.

En algunos casos la solución ingenieril es el desvío temporal del cauce, o cuando la naturaleza lo permite se espera la época de sequía para utilizar el método de zanjeo.

El cruce de algunas vías férreas se hace muy crítico al no poder suspender el tráfico de los ferrocarriles por la amplia actividad económica que desarrollan día tras día o por las millonarias cantidades de dinero que implicaría su suspensión. En este caso el método de excavación a cielo abierto o de trincheras no es aplicable. Ante este problema el ingeniero recurre a la construcción de túneles de diámetros grandes, "Tunelotes", para cruzar alguna tubería de sección pequeña. Esta solución resulta costosa y sobrada, pero se utiliza al no existir otra alternativa disponible. Algunas veces cuando la longitud del tramo de cruce es corto, se ha utilizado en forma limitada el método de hincar tuberías.

Para atravesar una carretera se pueden utilizar cualquiera de las dos alternativas (abrir o no abrir zanja); sin embargo, la apertura de zanjas implica el bloqueo temporal de alguno de los carriles de la carretera, generandole retrasos a la circulación vehicular; además de dejar marcado el tramo de pavimento con un gran "bache" permanente. Y sin embargo,

se sigue conservando al método de apertura de zanjas como único e insustituible, sin analizar más hayá del costo económico de la obra: en el costo social.

En los países con alto nivel de industrialización y en las grandes urbes, es indiscutible y necesaria la expansión de la nueva tecnología, el microtúnel, para la renovación e implantación de tuberías y conductos subterráneos.

La técnica de no abrir zanjas o de microtúnel, se considera como una tecnología "no destructiva" (del medio subterráneo y superficial), en comparación con el método de apertura de zanjas que afecta a las estructuras superficiales y subterráneas.

Es una técnica que se desarrolla en forma similar a la de los "Tunelotes", donde se abren pozos (lumbreras) al inicio y al final de la oquedad, ocupando una reducida área superficial.

VENTAJAS DE LAS TECNICAS DEL MICROTUNEL

- No destruye pavimentos, banquetas u otras estructuras superficiales.
- Se desarrolla sin talar áreas verdes.

- No causa problemas de vialidad.
- No afecta las actividades socio-económicas de los habitantes.
- Se pueden utilizar a cualquier hora del día sin interrumpir las actividades del lugar.
- Reduce los tiempos de construcción.
- No causa molestias psicológicas.
- Es competitiva con la técnica de zanjeo o de trincheras.
- Conserva la armonía estética del lugar.

El campo de utilización es muy diverso, abarca desde la renovación hasta la construcción de nuevos conductos enterrados (minitúneles): Construcción de nuevas redes de agua potable, colectores de agua tratada, oleoductos, gasoductos, redes de distribución de gas en zonas urbanas, ductos para el alojamiento de redes de comunicación telefónica, de televisión, líneas de energía eléctrica, etc.

Las técnicas de microtúnel o de "no zanja" pueden tener diversas aplicaciones ingenieriles:

- Cruces de ductos bajo vialidades: autopistas, carreteras, avenidas, calles, etc.
- Cruce de ductos bajo vías férreas.
- Construcción de líneas de agua, drenaje, teléfono,

- eléctricas y otras, bajo banquetas y pavimentos.
- Para atravesar canales y ríos caudalosos por abajo de su sección hidráulica.
 - Construcción de oquedades a través de elevaciones orográficas.
 - Construcción de ductos bajo jardines o áreas verdes con árboles sin necesidad de talarlos o de destruir el césped.
 - Construcción de nuevos drenajes desde las casas hacia los pozos de visita (registros) que ya existen (método estrella).
 - Aplicación a la construcción de nuevas instalaciones, eléctricas, telefónicas u otras enterradas, en plazas comerciales, terminales aéreas, casas y zonas residenciales.
 - Es muy práctica su aplicación en obras de aeropuertos, sin interrupción del tráfico aéreo, para tender una nueva red hidráulica, ductos para el tendido de cables enterrados necesarios para el sistema de señalamiento aéreo. En algunos aeropuertos se ha aplicado para implementar el moderno sistema de bandas, para la descarga de mercancías y equipaje de las aeronaves.
 - Util en la construcción de techos subterráneos.
 - Se ha utilizado la técnica de minitúnel para formar el revestimiento primario de un túnel gigante

(túnel Beker).

- En general es utilizada la técnica del microtúnel para abrir cualquier oquedad bajo el terreno, para cualquier fin o uso, sin perjudicar el medio superficial.

El objetivo principal de este trabajo es el de presentar una recopilación de la tecnología del microtúnel más utilizada en los países desarrollados, con el objeto de contribuir a difundir en México las nuevas técnicas, "que no afectan el medio superficial", para la implantación y renovación de tuberías y conductos subterráneos.

1.1 CONCEPTUALIZACION

Enseguida se menciona la forma clásica de túnel y el nuevo concepto de minitúnel.

Túnel es todo paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación.

Generalmente cuando se recurre a la obra subterránea, osea a un Túnel, se piensa en secciones donde el hombre puede manipular el equipo requerido para la excavación, dentro del espacio que va quedando al avanzar.

Las obras subterráneas se han construido normalmente para pasos de vías férreas, carreteras, grandes obras hidráulicas, accesos de minas, etc. En la mayoría de estos proyectos ha gobernado para su ejecución la orografía, la geología o simplemente la necesidad técnica para ejecutarlas; pero también, se construyen túneles de pequeñas secciones que obedecen a otras necesidades, como por ejemplo: al Urbanismo.

Para ejecutar esas pequeñas oquedades denominadas Minitúneles, se aplican técnicas distintas a las clásicas, utilizadas en grandes túneles, donde el hombre por razones de espacio interviene durante su construcción operando el equipo de excavación desde el exterior (en la mayoría de los casos).

Desde el punto de vista del Urbanismo, la técnica del microtúnel tiene como objetivo ofrecer un método constructivo para la instalación y renovación de tuberías y conductos subterráneos, que durante su ejecución no afecte el medio superficial.

En cuanto a sus dimensiones, las técnicas del microtúnel consideran diámetros de hasta 3.0 metros; y las longitudes pueden ser desde 30 hasta 1500 metros.

El minitúnel puede definirse de la siguiente forma: es

una obra subterránea construida con una técnica que no afecta a las estructuras subterráneas (tuberías, cimentaciones y otras), ni al medio superficial (pavimentos, banquetas, áreas verdes, etc.). Es una oquedad de sección relativamente pequeña de eje horizontal o inclinado, construido para el alojamiento de cables o conducción de fluidos, en zonas urbanas, industriales o bajo cualquier punto denominado conflictivo (autopistas, aeropistas, vías férreas, canales, montañas, etc.) donde el constructor manipula el equipo desde el exterior de la oquedad por la falta de espacio para trabajar en forma normal dentro de ésta.

Cabe señalar que el concepto de Minitúnel es independiente del equipo utilizado para su construcción. Así como se puede usar un miniescudo para construir un túnel de sección pequeña, también se puede considerar a los barrenadores horizontales como equipos para la excavación de minitúneles.

1.2 REFERENCIAS HISTORICAS

No se tiene el lugar, la fecha ni el método con el cual inició la tecnología del microtúnel. Sin embargo, en Mayo de 1968 en la Conferencia de Minneapolis, Estados Unidos, referida a los procedimientos de túneles y pozos, se presentó una recopilación de la tecnología existente en esa época para

perforaciones horizontales (presentada en el capítulo 9 de la referencia 6).

En Estados Unidos se llevaron a cabo estudios, investigaciones, diseños, construcción de prototipos experimentales, realizados alrededor de 1968, por la necesidad de contar con una tecnología eficiente de barrenación horizontal, para el alojamiento subterráneo de líneas de energía eléctrica. En ese año la Federal Power Commission informó que había necesidad de alojar 1600 millas de líneas de transmisión subterráneas, de 60 a 345 kv, y pronosticó que para 1980, habría necesidad de tener instaladas 3000 millas de esas mismas líneas.

En los Estados Unidos se conocían para excavaciones en suelos el Spoil Auger, Compacting Augers, Mechanica Mole, Pipe Pusher, Overbuden Drilling, Vibratory (Sonic) Conduit Driver; y para perforaciones horizontales en la roca el Diamond Drilling, Rollingcutter Drilling, Dragbit Drilling, Percussive Drilling y la Machine Tunneling (Boring) (Ref. 6). De estos, algunos estaban en etapa de experimentación, y otros ya habían sido patentados.

Entre las compañías que contribuyeron en esa época al desarrollo de la tecnología del microtúnel están las siguientes: Bell Laboratories RECORD, Atlas Copco Inc.,

Contender Corp., PCM, Div. of koehring Co., CRC, Grose International Inc., Minig Equipment manufacturing Co., SoniCo Inc., Calweld, Hughes Tool, Jarva Inc., Lawrence Manufacturing Co., Menco, James S. Robbins y Associates Inc., etc.

A continuación se presenta una breve historia de las máquinas utilizadas para la perforación de pequeñas oquedades horizontales (minitúneles):

MAQUINA PERFORADORA DE ROCAS (FOUR-INCH-DIAMETER BORING MACHINE) Estados Unidos, 1958-1964

En 1958 y 1959, la Hughes Tool Co. diseñó y manufacturó una máquina de 40 pulgadas (101.6 cm) de diámetro para ser usada como máquina-laboratorio, para evaluar requerimientos y la factibilidad de aplicar máquinas excavadoras en rocas duras.

Se realizaron pruebas con ésta en un lugar con granito, en Texas, Estados Unidos, conteniendo rocas hasta 40,000 psi (2812 kg/cm^2) de resistencia a la compresión. Desarrolló un avance de 0.66 cm/min. En Inglaterra, en una piedra caliza de 14000 psi (984.20 kg/cm^2) de resistencia, alcanzó una velocidad de avance de 4.3 cm/min.

En 1961, la máquina de 40 pulgadas fue modificada

en una de 54 pulgadas, para el uso de American Gilsonite Co., Bonanza Utha, para emplearla en unas minas de gilsonite. Pruebas anteriores en los sitios de las minas, identificaron problemas relacionados con el control de dirección e imposibilidad de construir curvas. La máquina fue nuevamente modificada, seccionándola en dos partes, las cuales fueron unidas por gatos que servían para el control de dirección de la máquina. Desarrolló velocidades de avance de 2.54 cm/min en roca dura y en el gilsonite 10 cm/min.

Las experiencias de estas máquinas fueron aplicadas al diseño y desarrollo de la Betti I (Ref. 6, pág. 105, fig. 16) en 1964, año en que fue incorporado un control direccional a control remoto.

MAQUINA PARA LA PERFORACION DIRIGIDA CON SISTEMA DE PERFORACION SUAVE (HORIZONTAL DRILLING INTERNATIONAL) USA 60'S

A fines de los años 60's en Estados Unidos, los empresarios de tendido de tuberías para oleoductos, tubieron la idea de adoptar el método de perforación dirigida, utilizada para cruzar oleoductos y gaseoductos por ríos caudalosos.

En 1984 la Societé du Groupe Spie-Batignolles (Francia) junto con su filial de Norteamérica, Spie International Inc., USA, pusieron en marcha la HDI (Horizontal

Drilling International). Es una máquina para desarrollar el método de perforación dirigida con sistema de perforación suave.

MAQUINA DE PERFORACION DIRIGIDA CON BROCA, USA, 1970-1979

La Titán Construction de Sacramento, USA, desarrolló en los 70's una tecnología propia, para el paso de tuberías, a través de cauces de ríos.

El primer trabajo consistió en el tendido de una tubería de 4 pulgadas (10.16 cm) de diámetro y de 180 metros de longitud, atravesando el río Panjaro en California.

En 1979, el método fue adquirido por la Reading and Bates Constructor Co., Tulsa, USA, la mayor compañía internacional de tendidos de conductos por tubería.

El método ha ido en desarrollo aumentando la longitud y el diámetro de las tuberías que se colocan bajo el terreno, logrando hasta la fecha tendidos de tubería de hasta 1500 metros para un diámetro de 40 pulgadas (101.6 cm).

MAQUINA DE PERFORACION AUGER (WITTE THRUSTBORING MACHINE),
ALEMANIA OCCIDENTAL, 70'S

A fines de los 70's la firma Bohrtechnik con promoción financiera del West German Ministry for Research and Technology ha desarrollado microperforadores de túneles para tubos de 250 a 1000 mm de diámetro para la realización de conexiones de drenajes domiciliarios en forma de estrella (los drenajes domiciliarios se conectan a un pozo central) (Ref. 10, pág. 16).

MAQUINA DE PERFORACION PERCUSIVA (BT40), INGLATERRA, 1975

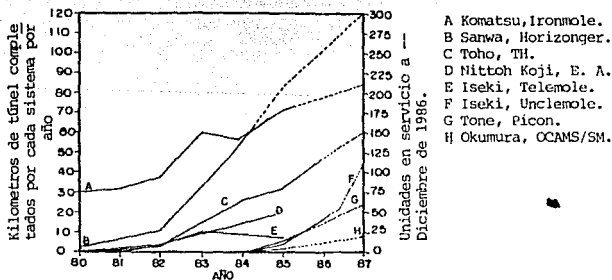
La máquina BT40 con sistema de perforación percusiva fue construida en 1975 por la British Telecom Research Laboratories (BTRL) en Martlesham, Suffolk; originalmente de 25 a 30 mm de diámetro el que finalmente fue cambiado a 40 mm por razones técnicas (el diámetro máximo de la manguera de aire del compresor obligó a tal cambio).

La BT40 se promovió principalmente en Inglaterra, y alternativamente en Alemania lo hizo la compañía Tracto Technik para una máquina similar de 45 mm de diámetro.

METODO DE REVIENTA TUBERIAS (PIPE-BURST), INGLATERRA 1976-1977

El método de Pipe-Burst ha sido desarrollado por la British Gas North Western en unión con la contratista D.J. Ryan and Sons, para reemplazamiento de tuberías de concreto (o similares), de 50 a 600 mm de diámetro; recientemente (1988) trabajan en un método similar neumático para tuberías de fierro fundido.

LAS TECNICAS DEL MICROTUNEL JAPONES, JAPON, 1980-1988



Ref. 21, pág. 5.

Japón esta a la vanguardia en las técnicas del microtúnel, con su fuerte desarrollo alcanzado en los últimos

años.

Según el doctor en ingeniería, Satoru Toyama (vice-presidente de la Japan Sewage Works Agency, encargado de la supervisión del proyecto nacional de drenaje del Japón, y considerado el hombre más importante de los microtúneles) las técnicas más utilizadas en Japón son (hasta 1985):

- La técnica de hincar tubos (Pipe-Jacking).
- El método de Auger.
- La técnica de miniescudos (Slurry Shield Method).

En la gráfica anterior se muestran las compañías japonesas dedicadas a los microtúneles.

Komatsu es la precursora en Japón de la tecnología moderna del microtúnel; inventó los microtúneles en 1973 con la máquina denominada "Iron Mole" la que desarrolla el método Auger (extracción de rezaga con serpentín), en conjunción con el hincado de tuberías (Pipe-Jacking), (ver referencia 2, pág. 222-224).

Con esta máquina se pueden alcanzar diámetros de hasta 1100 mm.

La máquina más reciente (1986) de Komatsu es el modelo

TP80-2 que deposita la rezaga (suelo o roca producto de la excavación) en la lumbrera de llegada.

La compañía japonesa Sanwa inventó en 1978 la máquina Horizonger, la cual tuvo gran éxito, contribuyendo a la construcción de más de 80 km de microtúneles en un solo año.

En diciembre de 1986 introduce al mercado su máquina Horizonger para excavaciones en roca, el modelo SH823 de 350 mm de diámetro (Ref. 20, pág. 11), cuenta con un sistema triturador (Crushing) y sistema de extracción de rezaga por medio de flujo de lodos (Slurry). Desarrolló otras versiones del SH823 con control direccional, y con rezagador tipo auger (serpentín); las cuales pueden romper boleos de hasta 1/3 de su diámetro. Para tuberías de 250 a 300 mm de diámetro desarrolló el modelo SH308. Una de sus grandes contribuciones, fue la construcción de la máquina SHD1030, que es una máquina que puede hincar tubos de concreto de hasta 1000 mm de diámetro.

Iseki es otra de las compañías japonesas que han manufacturado máquinas para la construcción de microtúneles. Desde 1979 desarrolló las máquinas "Telemole" las cuales cuentan con sistema rezagador por medio de flujo de lodos (slurry) y sistema de control remoto para su operación; diseñada para excavar principalmente en suelos blandos y arenas

finas, puede insertar en el terreno tuberías de hasta 900 mm de diámetro. Para diámetros pequeños (hasta 300 mm) con las mismas características, inventó la minimáquina Telemouse; muy utilizada en Japón, Singapur, China y Alemania Occidental.

Para excavar en suelos con boleos, Iseki manufacturó la "Crunchingmole"; ésta ya cuenta con sistema de trituración basado en un molino giratorio de gran eficiencia para la destrucción de boleos.

Iseki Poli-Tech en 1986 introduce al mercado una nueva máquina trituradora de boleos, la "Unclemole" (Ref. 20 pág. 13); representa una de las mayores contribuciones de los últimos años a la tecnología del microtúnel. Es una máquina con un molino cónico excéntrico giratorio, capaz de excavar en cualquier tipo de suelo.

Por otra parte, Iseki, esta desarrollando un prototipo de máquina con sistema de corte con chiflones de agua (Jet cutting) para inserción en el terreno de tuberías de 100 a 200 mm de diámetro. Su prototipo podrá contar con una presión de agua de 200 N/mm^2 (2040.0 kg/cm^2), capaz de atravesar rocas.

Uno de los trabajos de construcción de microtúneles de Iseki, donde se utiliza la Unclemole, es un proyecto para colocar bajo el terreno una tubería de 1000 mm de diámetro.

El tramo de la tubería era de 248 metros y fue ejecutado en dos partes. La obra tuvo una duración de 25 días con turnos de 12 horas. El proyecto contaba con una curva de 300 metros de radio, para ejecutarla los ingenieros tuvieron que colocar entre los tubos de concreto y el anillo de empuje, cuñas de acero para darle efecto a la curva.

Durante el recorrido se encontró suelo blando con gravas y pedrejones, para reducir la fricción entre el suelo y los tubos que se hincaron se inyectaba bentonita (entre el suelo y los tubos) requiriéndose una fuerza de empuje de 600 toneladas, para ésto Iseki tuvo que acoplar un sistema de varios gatos hidráulicos.

Toho, en 1986 era el tercer más importante manufacturero de equipo para microtúneles en Japón, desarrolló una máquina prototipo, la OK Mole, (Ref. 20, pág. 21). En un trabajo llevado a cabo en Kyushu, Japón, excavó en boleos, aplicando una fuerza de 60 N/mm^2 (612 kg/cm^2) para el corte. En Enero de ese mismo año introdujo al mercado la máquina HUME ACE para suelos blandos, que es otra versión de los miniescudos.

Okumura desde 1978 manufactura las mini-máquinas tipo OCAMS, las cuales fueron diseñadas principalmente para suelos blandos y arenas. Son totalmente automáticas, cuentan

con la tecnología más avanzada de sistemas de Telecontrol y Telemetría, para su control remoto.

1.3 PERSPECTIVAS ECONOMICAS

La primera pregunta que surge ante la presencia de la tecnología de microtúnel, gira en torno a su costo, costo respecto a las técnicas de apertura de zanjas.

En México donde la industria de la construcción se basa en la amplia mano de obra existente, es difícil aceptar algún cambio en la tecnología, pues el "obrero", se dice representa obras baratas y la "tecnología" despilfarro de dinero. Sin embargo, se olvida que la implantación o desarrollo de la técnica de microtúnel representa un nuevo campo de aplicación, con sus retribuíbles costos. Es así como se podrán proyectar sin excusa alguna, excavaciones subterráneas de sección pequeña, en lugares que eran inaccesibles para la ingeniería tradicional.

Entre las razones por las cuales las nuevas tecnologías no pueden ser aceptadas fácilmente se pueden mencionar las siguientes:

- Costumbre.
- Economía.

- Ignorancia de lo nuevo.

Es cotidiano observar por las calles de una ciudad la colocación de tuberías, utilizando sin objeción alguna la técnica de apertura de zanjas, procediendo con renuencia, y por desgracia es una arraigada costumbre de la ingeniería civil.

La economía del microtúnel no es bien entendida, simplemente se presupone que es antieconómica, y bajo este concepto difícilmente se acepta. Se dice que la obra "Túnel" es más cara que las obras realizadas con una técnica de apertura de zanjas para el tendido de tuberías, la cual es una afirmación sin razón que entorpece el entendimiento económico para la utilización de la nueva tecnología.

No se debe olvidar que el éxito de una tecnología no surge en sus primeros intentos, ha de pasar por una serie de etapas:

- Necesidad de introducción.- Existencia de un mercado potencial, obras y proyectos.
- Desarrollo paralelo a la técnica tradicional.- Es aquí donde surgen cuantitativamente los parámetros de su aceptación, rendimientos y ahorros.

- La técnica tradicional se torna obsoleta.- Inicio intenso del desarrollo de la nueva tecnología.

Algunas veces la no utilización de una tecnología se debe al desconocimiento de su existencia, o a la falta de comprensión de su funcionalidad; cuando no se tiene información acerca de las características propias de cada tipo de equipo, de sus aplicaciones y beneficios, y en sí, de su esencia misma.

En este momento es difícil suponer cuánto será el ahorro (en tiempo y dinero), que pueda generar en el futuro la utilización de las técnicas de microtúnel, ya que no se sabe cuál será su aceptación. Sin embargo, en los países industrializados es común escuchar la siguiente opinión: las técnicas de microtúnel pueden llegar a ser tan económicas que quedan justificadas por si solas, sin considerar adicionalmente los costos sociales. Es así como opina por ejemplo, el director Jim Carter de la compañía inglesa, South Staffordshire Water Company (Microtunneling, Summer 1986).

CAPITULO 2

ASPECTOS GEOTECNICOS

Es importante conocer el material subterráneo donde se construirá el pequeño túnel, para definir cuál será la técnica y el procedimiento de excavación o perforación que se deberá utilizar.

No basta saber si el medio de excavación es un suelo o roca, también se deben conocer sus características geotécnicas. Si es suelo, definir su comportamiento bajo ciertas condiciones de confinamiento o contenido de agua; en el caso de suelos finos, establecer los límites de consistencia, para determinar bajo que cantidades de agua ese suelo pasa de su estado natural sólido o semisólido a un estado de consistencia líquido (lodo) (consideración relevante para el uso de la técnica de minescudos con flujo de lodos). El análisis granulométrico de los suelos gruesos permitirá establecer los porcentajes de los diferentes tamaños de partículas que lo forman; es importante conocer ésto para decidir cuál será el método y la herramienta para la extracción de la rezaga, producto de la excavación.

Una propiedad medible en los suelos finos, que representa a la plasticidad y al grado de rigidez del terreno,

es el estado de consistencia. En algunas técnicas de minitúneles es frecuente utilizar agua durante el proceso de excavación y es indiscutible que parte de ésta se integre al suelo, cambiando su consistencia y estabilidad. También, el agua puede resultar indeseable cuando se utiliza una máquina percusiva para la perforación, ya que los impactos contra el suelo con exceso de agua producen un efecto de rebote elástico o amortiguamiento, impidiendo el avance de la máquina dentro del terreno.

El conocimiento de los parámetros de resistencia obtenidos de pruebas de campo o de laboratorio, sirven para conocer la oposición que ofrecerá el suelo al ser cortado y de su estabilidad al ser desconfinado. Los parámetros más importantes son: la cohesión, el ángulo de fricción interna y la resistencia al esfuerzo cortante.

Al igual que en los "Tunelotes", durante o después de la excavación el suelo se puede llevar a la falla, si no se contrarresta el efecto de descarga (extensión del suelo) colocando apoyo artificial, esto es estructuras de soporte (tubos).

En el proceso de excavación de minitúneles, el problema principal es el corte del suelo (esfuerzo cortante), más que la penetración de la herramienta cortante (resistencia

a la penetración). De esta manera el parámetro de resistencia al corte ofrece un dato importante para el diseño del sistema de torque de dichas herramientas.

Del estudio de los parámetros de resistencia se puede llegar a evaluar el factor de seguridad (FS) del pequeño túnel, así como definir estructuralmente su soporte.

Cuando se utiliza el método convencional de minitúnel, excavar y rezagar, no es preocupante desconocer la cantidad de espacios vacíos que contiene la estructura del suelo, pero, cuando se emplea un método que implica la compactación del terreno, entonces será necesario por lo menos tener idea de tales espacios, pues de estos depende si la tubería puede o no ser insertada en el terreno (cuando se utiliza el método de inserción directa, tubo cerrado por el frente). Para tener conocimiento de los espacios vacíos de la estructura del suelo, se recurre a la evaluación volumétrica del material, con ésta se conocen los diferentes volúmenes de los tres estados de la materia que forman a la masa de suelo (volumen de sólidos, volumen de agua y volumen de aire); a partir de los cuales se obtienen las diferentes relaciones volumétricas.

Antes de realizar cualquier excavación en una zona urbana o industrial es necesario realizar un estudio del medio de excavación. Primero, para conocer las propiedades del

suelo o manto rocoso, y segundo, para saber si hay estructuras artificiales enterradas (que no se ven a simple vista) y que pudieran ser afectadas o afectar al curso de la excavación. El ingeniero de los minitúneles se apoya en la geofísica, principalmente, para conocer a detalle a que condiciones de excavación se enfrentará y poder proyectar el trazo menos conflictivo del pequeño túnel.

2.1 CLASIFICACION GEOTECNICA

La clasificación de los minitúneles tomada desde el punto de vista donde se excavará la oquedad, envuelve todos los conocimientos necesarios que se deben tener antes de decidir la técnica de minitúnel a utilizar.

Tener conocimiento de las condiciones geológicas y geotécnicas del medio subterráneo, origen geológico de la formación, definición del N.A.F., contenido natural de agua, consistencia o dureza del terreno, comportamiento mecánico del material durante la excavación, etc., son fundamentales.

Entre otras consideraciones que no se deben olvidar son la existencia de fallas o discontinuidades, movimientos tectónicos del lugar, sismisidad, etc. Otra, también importante, es la existencia de estructuras subterráneas que pudieran ser dañadas al excavar la nueva oquedad.

Se hace más importante el conocimiento del medio de excavación subterráneo, cuando se piensa en las pequeñas máquinas, que normalmente carecen de un uso universal.

Para definir claramente el medio subterráneo donde se excavará la pequeña oquedad, se ha propuesto clasificar a los minitúneles en relación a:

AGUA CONTENIDA EN EL MATERIAL

- Secos o con poca humedad.
- Bajo el nivel de aguas freáticas (N.A.F.).
- Lacustres.
- Bajo cauces de ríos.
- Submarinos.

EN RELACION AL TIPO DE SUELO (CALCIFICACION SUCS):

- Arenas sin finos (SW o SP).
- Arenas con finos (SM o SC).
- Gravas sin finos (GW o GP).
- Gravas con finos (GM o GC).
- Tepetate (CH).
- Limos (ML o MH).
- Arcilla (CL).
- Suelos con boleos o pedrejones (GM o GC).

- Turba (Pt).
- Toba (Cl).
- Loess (ML).
- Margas (CM).
- Caliche (CH).
- Cascajo (GM o GC).
- Heterogéneos (GM o GC).

DE ACUERDO AL ORIGEN GEOLOGICO DE SU FORMACION:

- En suelos residuales
- En suelos transportados

EN RELACION A LA CONSISTENCIA FISICA OBSERVADA:

- Suelo blando o suelto.
- Suelo duro por cementación.
- Suelo duro por consolidación.
- Suelo expansivo.
- Suelo pegajoso.

EN CUANTO AL COMPORTAMIENTO MECANICO DE LA ROCA AL SER PERFORADA:

- Rocas elasto-frágiles (granito, cuarcita, etc.).
- Rocas elasto-plásticas (mármol, caliza, arenisca, etc.).

- Rocas de alta plasticidad (arcilla, sal gema) y muy porosas (piedra pómez, caliza porosa).

Esta última clasificación, en cuanto a rocas, da información de las propiedades deformatorias de la roca al ser penetrada por la herramienta de corte y de su dificultad para ser cortada. Y se justifica esta última clasificación, ya que como se mencionó anteriormente, importa más el proceso de corte que la estabilización de la oquedad.

2.2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes: la sólida, la líquida y la gaseosa. La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo (incluyendo la capa sólida absorbida); la líquida por el agua (libre, específicamente, aunque en los suelos pueden existir otros líquidos de menor significación; la fase gaseosa comprende sobre todo el aire, si bien pueden estar presentes otros gases. (vapores -- sulfurosos, anhídrido, carbónico, etc.)

Los suelos poseen dos propiedades relevantes:

- El conjunto de partículas minerales posee una organización bien definida y propiedades que varían vectorialmente. Lo que significa que las propiedades de los suelos varían mucho más rápido en el sentido vertical que en el horizontal.

- La organización de las partículas minerales es tal, que el agua que posee todo suelo en menor o mayor cantidad, puede, si hay suficiente, tener continuidad en el sentido de la distribución de presiones. El agua no ocupa huecos aislados, sin intercomunicación, puede llenar todos los poros que dejan entre si las partículas minerales y que se intercomunican, de manera que el agua forma una masa continua que contiene el mineral en su seno.

Los suelos por su origen se dividen en:

- Residuales: se forman por intemperización en el mismo sitio donde yacía la roca madre, conservando, aunque lejanamente la estructura de ésta.

- Transportados: formados por la sedimentación progresiva de partículas procedentes de otros suelos o del desgaste de rocas.

La profundidad y el tipo de suelos residuales depende de las condiciones climatológicas existentes en su formación, son propios de las zonas onduladas o montañosas; los suelos residuales arcillosos pueden provocarse en ambientes cálidos húmedos o los granulares en ambientes fríos secos. Los suelos transportados los encontramos en valles o planicies de costa.

En la naturaleza pueden encontrarse diversos agentes de transporte como son los glaciares, el viento, los ríos y corrientes de agua superficial, los mares y las fuerzas de gravedad.

Las aguas que escurren de las laderas de colinas y montes ayudadas de las fuerzas de gravedad, arrastran partículas formando depósitos de talud en las faldas de esas elevaciones. Se caracterizan por ser heterogéneos, sueltos y formados principalmente de materiales gruesos.

Los ríos transportan materiales de diversas graduaciones, depositándolos a lo largo de su perfil, según varíe la velocidad de su curso, cuando disminuye ésta, también pierde capacidad de transporte, depositándose los materiales más gruesos. Los ríos transportan y depositan suelos según sus tamaños decrecientes, correspondiendo las partículas más finas (limos y arcillas) a depósitos próximos a su desembocadura.

Los depósitos lacustres son generalmente de grano muy fino, a causa de las bajas velocidades con que fluyen las aguas en los lagos.

Los depósitos marinos suelen ser estratificados, reflejando muchas veces las características de las costas que los mares bañan.

Los depósitos glaciares están formados por suelos heterogéneos, desde grandes bloques hasta materiales muy finamente granulados, a causa de las grandes presiones desarrolladas y de la abrasión producida por el movimiento de las masas de hielo.

Los vientos pueden arrastrar partículas cuyo tamaño puede variar desde el limo hasta el de las arenas gruesas, estos arrastres pueden hacer que las partículas se depositen a muchos kilómetros de su lugar de origen. Los dos tipos principales de suelo que pueden formar son los loess y los médanos.

Los loess son depósitos eólicos constituidos por una mezcla uniforme de arenas finas cuarzosas, algo feldespáticas, y limos con algo de cohesión, debido a la presencia de carbonatos de calcio solubles.

En los suelos formados por partículas gruesas los minerales predominantes son: feldespato de potasio, sodio o calcio, micas, olivino, serpentina, etc.; óxidos cuyos principales componentes son el cuarzo (SiO_2), la limonita, la magnetita y el corindón; carbonatos como la calcita y la dolomita y sulfatos, principalmente la anhidrita y el yeso.

En los suelos gruesos el comportamiento mecánico

e hidráulico esta principalmente condicionado por su compacidad y la orientación de sus partículas.

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre una estructura bien definida, cuyos átomos se disponen en láminas.

Existen tres grupos de arcillas: caolinitas, montmorilonitas e illitas. Las caolinitas son relativamente estables en presencia del agua. En las montmorilonitas, debido a su estructuración y a sus fuerzas eléctricas, el agua puede introducirse a ellas. Lo anterior produce un incremento en el volumen, manifestándose como una expansión. Por lo cual, en presencia de agua, presentan fuerte tendencia de inestabilidad.

Las arcillas illitas se comportan también como las montmorilonitas; su constitución interna tiende a formar grupos de materia que reducen el área expuesta al agua, presentando menor expansividad.

A los suelos se les puede clasificar a partir de las observaciones que se han realizado en campo como sigue:

- ARENA Y GRAVA. Son agregados sin cohesión, forma-

dos por fragmentos redondeados, subredondeados o angulares, procedentes de rocas poco alteradas.

- TEPETATE. Tierra endurecida con alta resistencia a la penetración de las herramientas de perforación. Presenta gran cohesión entre sus partículas.

- LIMO INORGANICO. Llamado "harina de roca", es esencialmente de grano fino, formado por partículas equidimensionales, con comportamiento poco plástico cuando actúan en conjunto. Si las partículas son similares a hojuelas, con dos dimensiones mayores que la tercera, aumenta su plasticidad.

- ARCILLA. Derivada de la composición de los minerales de las rocas, provoca los comportamientos más indeseables del subsuelo haciéndolo potencialmente expansivo si está seco y preconsolidado o bien comprensible, si se ha sedimentado en un medio acuático. Su permeabilidad es en general baja.

- TURBA. De origen francamente orgánico, tiene componentes fibrosos de origen vegetal y es sumamente inestable y comprensible.

- TOBA. Es un agregado de fragmentos minerales o rocas arrojados por erupciones volcánicas y depositados por acción del agua o del viento.

- **LOESS.** Sedimento uniforme y colusivo de origen eólico, su tamaño medio de partículas oscila entre 0.01 y 0.05 mm y su cohesión es debida a la presencia de carbonato de calcio.

- **MARGAS.** Arcillas calcáreas duras o muy duras.

- **CALICHE.** Capas de suelo cementado por algún carbonato.

- **ARCILLAS BENTONITICAS.** Formadas por la alteración química de las cenizas volcánicas. Pertenecen al grupo de arcillas expansivas (montmorilonitas).

De acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos existen:

- Gravas
- Arenas
- Limos
- Arcillas y
- Suelos orgánicos.

Un análisis de las partículas que forman a las gravas y las arenas permite definir si son bien graduadas o uniformes.

Por su parte, la determinación de los límites de consistencia en los limos, arcillas y suelos orgánicos permite conocer si son de alta o baja plasticidad.

La resistencia de los suelos resulta de fundamental importancia para anticipar su comportamiento al ser excavados y así adoptar la técnica y el equipo al tipo de suelo.

También en los túneles de pequeña sección transversal es importante, para muchos casos, determinar el efecto del confinamiento en la resistencia del suelo, así como la resistencia no confinada del mismo. El comportamiento elastoplástico del material a diferentes niveles de esfuerzos es también fundamental para el análisis del proceso de minituneleo.

Como en toda excavación el tiempo, el efecto del agua y el intemperismo son factores que deben considerarse.

Por muy pequeña que sea la excavación esta puede actuar como un dren, produciendo consolidación y asentamiento en materiales compresibles, afectando a estructuras vecinas.

La permeabilidad del medio permitirá anticipar la cantidad de agua que se puede integrar al túnel si este no tuviera una protección impermeable.

Es más importante para este caso conocer las variaciones bruscas de la estratigrafía que las mismas propiedades del suelo. Las propiedades del suelo deben integrarse al plano estratigráfico del conjunto de materiales que serán afectados por la excavación.

2.3 PROPIEDADES DE LAS ROCAS

Llámense rocas a las formaciones minerales naturales que integran la corteza terrestre, constituidas por los minerales de roca heterogéneos u homogéneos, tanto incoherentes como ligados entre sí por las fuerzas de integración molecular o por un material cementante.

Las rocas por su origen se clasifican en:

- Igneas.
- Sedimentarias.
- Metamórficas.

Las rocas ígneas se forman a partir del magma existente en el interior de la tierra, pueden ser intrusivas cuando se forman a una gran profundidad o extrusivas cuando se forman en el exterior de la corteza por derrames volcánicos. Entre las rocas intrusivas están el Granito, el Granito Porfídico y el Gabro. Y entre las extrusivas están la Riolita, la Ande-

sita y el Basalto.

Las rocas sedimentarias se han formado a través del tiempo por el depósito, aglutinamiento y cementación de partículas de otras rocas o de microorganismos, principalmente en ambientes marinos. Los estratos formados son horizontales, pueden plegarse o sufrir deformaciones por la acción de fuerzas tectónicas dando lugar a rocas con diferentes propiedades y características. Pertenecen a este grupo la Caliza, la Arenisca, la Lutita, etc.

Las metamórficas son originadas por la acción combinada de presión y calor sobre rocas preexistentes, dando lugar a rocas con diferentes propiedades y características. Son típicas el Gneiss, el Esquisto, el Mármol, etc.

La permeabilidad del macizo rocoso a través de fracturas, fallas, huecos de disolución, etc., influyen de una manera decisiva sobre la obra subterránea, más que la permeabilidad individual de la roca.

Se deben conocer las fallas existentes, su actividad relativa y el material de relleno que contienen, para el diseño estructural de la obra, e incluso, para decidir el cambio de su trazo.

La diversidad de propiedades de las rocas dependen del origen y de los procesos geológicos transcurridos después de su formación, durante el largo tiempo de su existencia.

Las propiedades físicas de las rocas caracterizan el estado físico de las mismas. Las que intervienen de modo directo o indirecto sobre el proceso de perforación son: grado de coherencia, porosidad, densidad, peso específico, estructura, textura y granulosidad.

Las propiedades mecánicas se expresan por la capacidad de las rocas a oponer resistencia a la deformación y desagregación; entre ellas figuran la resistencia mecánica, la solidez, resistencia dinámica, dureza, elasticidad, fragilidad, plasticidad y la abrasividad (ver propiedades físico mecánicas de las rocas en la referencia 1).

La investigación y el estudio de las propiedades físico-mecánicas de las rocas son necesarias para:

- La elección del método de perforación, tipo y forma de la herramienta de corte más productiva.
- Elección del procedimiento de extracción de la rezaga.
- Para el diseño de la estructura de soporte o para

la consolidación de las paredes.

2.4 ESTABILIDAD DE TUNELES

La gravedad en combinación con las fuerzas tectónicas presentes en la corteza terrestre, dan lugar a la distribución original de esfuerzos existentes en todo punto del planeta.

Al realizarse una oquedad en un medio cualquiera, cuya distribución de esfuerzos es igual entre puntos de igual profundidad y monótonamente creciente con la profundidad, se provocará de inmediato una distribución de esfuerzos en el medio.

Las trayectorias de los esfuerzos que originalmente se consideran verticales y paralelas entre sí, sufrirán un reajuste alrededor de la excavación (como un nudo en la madera), reduciendo sus separaciones originales y deformando sus trayectorias al pasar cerca del hueco.

Tal estrechamiento de las trayectorias de los esfuerzos se traduce en una intensa alteración de los esfuerzos originales del medio, máxima en la periferia de la oquedad y disipándose asintóticamente al alejarse de ésta.

Al retirar el material de la excavación, la responsa-

bilidad de la carga la toma la periferia y vecindad de la oquedad y en los materiales vecinos se presenta un efecto de pérdida de capacidad de carga por desconfinamiento.

Después de la preocupación de la forma de excavación o perforación y rezaga del terreno, la tecnología del microtúnel ha resuelto, en buena medida, el problema de inestabilidad durante y posteriormente al proceso de construcción.

Los procesos sincronizados de excavación con los métodos del microtuneleo se llevan a cabo prácticamente sin enterar a la masa subterránea de algún cambio de esfuerzos.

2.4.1 Deformaciones y Cambios de Esfuerzos Inducidos por la excavación.

Al realizar la excavación de un túnel de cualquier dimensión y profundidad, se estará provocando en la masa de suelo un cambio en el estado de esfuerzos.

La redistribución de esfuerzos debido a las deformaciones del suelo, provocadas por la excavación, se pueden presentar en forma más crítica en el frente de ataque. Una de las razones prácticas que pueden conducir a la inestabilidad del frente es un error en el proceso de operación de la máquina, que rompa la coordinación de los eventos del proceso-

(excavar rezagar y empujar).

Las condiciones iniciales del estado de esfuerzos de un punto por el que más tarde se excavará son el esfuerzo vertical promedio inicial, $\bar{\sigma}_{vo} = \gamma H$ y, el esfuerzo horizontal promedio inicial, $\bar{\sigma}_{ho} = K_o \gamma H$, como se muestra en la figura 2.1. Al llegar la excavación a esta sección se generan deformaciones y un nuevo estado de esfuerzos en la masa de suelo que envuelve al frente y a la periferia de la cavidad. Si el suelo no resiste a esta nueva condición de esfuerzos, se provocará la falla del frente.

En la masa de suelo inestable que ha fallado, se pueden diferenciar tres zonas con diferentes patrones de deformación, como se ilustra en la figura 2.2.

La primera es una masa cilíndrica con desplazamiento vertical, en forma de un cuerpo rígido, fcdh, ya que las partículas componentes de esta masa no sufren desplazamientos relativos respecto al cuerpo cilíndrico, éste tiende a deslizarse como un todo. En la segunda zona, la que envuelve al prisma cilíndrico, si presenta fuertes deformaciones angulares. Bajo la base del prisma cilíndrico, se localiza una tercera zona, fbi, donde el suelo sufre grandes deformaciones por esfuerzos cortantes que distorsionan completamente su estructura original.

La falla de frente puede transmitirse hasta la superficie provocando hundimientos, y por éstos, afectando a otras estructuras que se apoyan en esa masa de suelo.

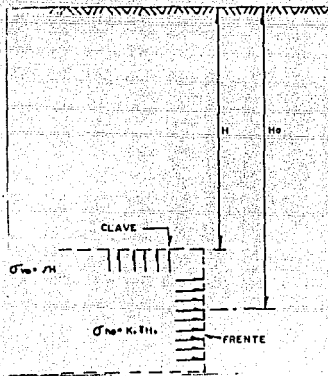


Figura 2.1 Presiones verticales y horizontales en la masa de suelo antes de la excavación de un túnel. Ref. 9, pág. 4.41.

En el caso de las máquinas excavadoras, este fenómeno puede surgir al no haber coordinación entre la excavación y el avance de la máquina. Por ejemplo, el caso extremo podría ser cuando con un miniescudo de frente cerrado y presurizable se estuviera excavando sin un avance aparente (donde el volumen de lodo extraído es mayor que el correspondiente al avance

logrado (ver anexo 1)), provocándose una socavación (sobrecavación) en el frente de ataque, induciendo deformaciones en el suelo inmediato; si la resistencia del suelo no llega a soportar tales deformaciones, puede causarse la falla del frente de excavación.

El menor o mayor grado del estado de desequilibrio dependerá de las características mecánicas que observe el suelo durante su excavación, así como el tipo de máquina utilizada, de su operación y del mismo procedimiento constructivo.

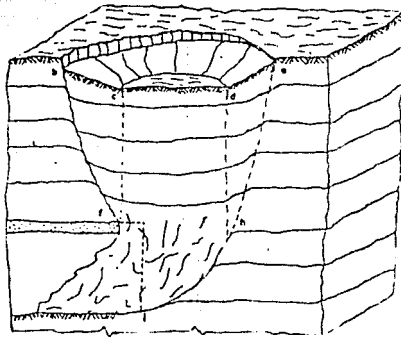


Figura 2.2 Falla del frente de un túnel en suelo inestable. -
Ref. 9, pág. 4. 92.

Para analizar el equilibrio de la masa de suelo que rodea al frente del túnel se utiliza el mecanismo simplificado

de falla, el que refleja los patrones de deformación de cada una las zonas del suelo afectadas por la excavación, figura 2.3.

El prisma 1, tiene la forma de una cuña de Coulumb; el prisma rectangular 2, se apoya sobre la cuña. Este transmite sus cargas verticales debidas a su peso propio al prisma 1, el cual tiende a deslizarse sobre el plano de falla, con un ángulo de $45 - \phi/2$, la tendencia de movimiento de la cuña es hacia el túnel al no encontrar oposición en el frente (en los miniescudos con flujo de lodos, el bombeo puede generar presiones negativas en la cámara de lodos, manifestándose como una succión de suelo hacia el interior de la máquina, y ésto equivale a no tener soporte en el frente u oposición). Un tercer prisma se localiza sobre la clave del frente, a lo largo del techo sin ademe temporal, figura 2.4, esto es, la longitud de avance de excavación, donde las dimensiones de apoyo estan dadas por la longitud sin sosten temporal y la dimensión de la sección transversal del túnel. En el equilibrio de este sistema intervienen, por una parte las fuerzas actuantes debidas a los pesos propios de cada uno de los prisma P_1 , P_2 , P_3 que tienden a producir el movimiento descendente del conjunto de masas; por otra parte, las fuerzas resistentes que se oponen a tal desplazamiento, derivadas de la resistencia del suelo y actuando en las caras de los prismas, como se muestra en la figura 2.4.

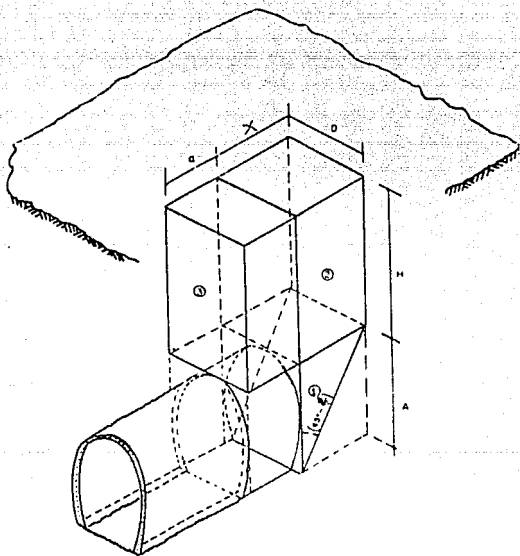


Figura 2.3 Mecanismo simplificado del equilibrio del frente.
Ref. 9, pág. 4.94.

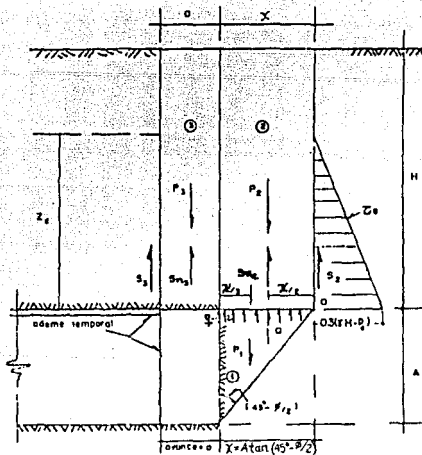


Figura 2.4 Sistema de fuerzas que intervienen en el equilibrio del mecanismo simplificado del frente. Ref. 3, figura 9.

2.4.2 Factor de Seguridad (FS)

Para asegurar que el suelo no vaya a fallar, es necesario que el momento resistente sea mayor que el momento actuante, el primero, debido a la resistencia del suelo y el segundo al peso del mismo. La relación que define al factor de seguridad es la siguiente:

$$FS = \frac{M_r}{M_a}$$

Donde M_r es el momento resistente, y M_a el momento actuante.

Las fuerzas actuantes debidas a cada uno de los prismas del sistema unificado de falla, son: P_1 , P_2 y P_3 (figura 2.4); las cuales solo dependen del volumen de los prismas y del peso volumétrico del suelo.

Las fuerzas resistentes que se representan por Q , S_2 , S_{n2} , S_{n3} y S_3 como se muestra en la figura 2.4, se obtienen de la manera siguiente:

Q es la máxima fuerza resistente que ofrece la cuña del frente de desplazamiento bajo la acción de su propio peso y el de los prismas P_2 y P_3 ; su valor se obtiene de la solución de Meyerhoff para la capacidad de carga de una zapata rectangular, dada por la expresión siguiente:

$$q = 3.4c / \sqrt{K_a} \qquad Q = 3.4cXD / \sqrt{K_a}$$

En la tabla 1 de la referencia 3 se presenta un valor diferente para q : $q = 2.67c \cdot \sqrt{K_p} + P_f K_p$ y $Q = qXD$. La cual toma en cuenta la presión compensadora P_f . Esta presión proporciona una fuerza hidráulica que equilibra la presión hidrostática que actúa en el frente de ataque, para el caso de los miniescudos con flujo de lodos.

$S_2 = S_{m2} Z_d^D$, donde S_{m2} es el valor medio de la resistencia al corte del suelo actuando en la cara del prisma 2, hasta la altura Z_d ; esta magnitud está dada por la altura hasta la que se desarrollan esfuerzos cortantes inducidos en las caras de los prismas, al eliminar las presiones iniciales $\sqrt{v_0}$ y $\sqrt{h_0}$ por la excavación. Z_d alcanza el valor de 1.7 veces el diámetro de la oquedad, como valor máximo ($Z_{dmax} = 1.7D$),

arriba de esta altura los esfuerzos cortantes son insignificantes.

$S_{n2} = 2S_{m3} Z_d^a$, semejante a la anterior, actuando en las caras anterior y posterior del prisma 3, y S_{m3} es la resistencia al cortante del suelo.

$S_3 = S_{m3} Z_d^D$, donde Z_d^D es el área perpendicular a la dirección del avance del túnel correspondiente al prisma 3.

El factor de seguridad queda definido por la siguiente relación:

$$FS = \frac{M_r}{M_a}$$

Sustituyendo los valores de los momentos debidos a las fuerzas resistentes y actuantes se tiene:

$$FS = \frac{S_{m2} Z_d X^2 + 2S_{m3} a (X+a/2) Z_d + S_{m3} (X+a) DZ_d + 1.7DX^2 / \sqrt{K_a}}{1/2 \sqrt{HDX^2} + \sqrt{HDa} (X+a/2) + 1/3 \sqrt{ADX^2}}$$

Haciendo la relación geométrica $H/A=n$ y simplificando se obtiene:

$$FS = \frac{\left[\frac{2(S_{m2} - S_{m3})}{(1+a/X)^2} + 2S_{m3} \right] \frac{Z_d}{D} + \frac{2S_{m3}}{(1+a/X)\sqrt{Ka}} \cdot \frac{Z_d}{A} + \frac{3.4c}{(1+a/X)^2\sqrt{Ka}}}{\gamma H \left[1 + \frac{2}{3n(1+a/X)^2} \right]}$$

En la tabla siguiente se muestran las fuerzas actuan-
tes y resistentes del sistema simplificado de falla:

FUERZAS ACTUAN-
TES

FUERZA	DISTANCIA	MOMENTO
$P_1 = 1/2 \gamma A X D$	$2/3 X$	$M = 1/3 \gamma A X D^2$
$P_2 = \gamma X D H$	$X/2$	$M = 1/2 \gamma H D X^2$
$P_3 = \gamma a D H$	$X+a/2$	$M = \gamma H D a (X+a/2)$

FUERZAS RESISTENTES

FUERZA	DISTANCIA	MOMENTO
$S_2 = S_{m2} Z_d D$	0	$M_{s2} = 0$
$S_{n2} = 2S_{m2} Z_d X$	$X/2$	$M_{sn2} = S_{m2} Z_d X^2$
$S_{n3} = 2S_{m3} Z_d a$	$X+a/2$	$M_{sn3} = 2S_{m3} a (X+a/2) Z_d$
$S_3 = S_{m3} Z_d D$	$X+a$	$M_{s3} = S_{m3} D (X+a) Z_d$
$Q = 3.4c X D / \sqrt{Ka}$	$X/2$	$M_q = 1.7c X^2 D / \sqrt{Ka}$

En la ecuación general de la estabilidad del frente
se pueden distinguir los siguientes aspectos que determinan
al factor de seguridad (FS):

Dimensiones del túnel.

- Profundidad a la clave.
- Ancho de la sección excavada.
- Altura de la sección excavada.
- Longitud de avance de la excavación sin apoyo temporal.

Propiedades del suelo.

- Peso volumétrico (γ^t).
- La cohesión (c).
- El ángulo de fricción interna (ϕ).
- Resistencia al esfuerzo cortante del suelo (s), atrás del frente, y sobre la clave del túnel.

La teoría de la inestabilidad de túneles presentada, representa las condiciones más críticas de la excavación de oquedades. Se refiere a excavaciones lentas, realizadas con el método convencional, para grandes secciones, etc. Donde es muy factible que se generen los tres prismas del mecanismo simplificado de falla: por el avance lento y sin soporte de la clave de la oquedad, el prisma 3; al dejar sin confinamiento durante algún tiempo el frente de ataque, el prisma 1 y 2.

CAPITULO 3

TECNICAS PARA LA CONSTRUCCION DE MINITUNELES

Las técnicas para la construcción de minitúneles cumplen con tres procesos fundamentales:

- Cortar.
- Rezagar.
- Insertar.

Los cuales se deben ejecutar en forma sistemática.

PROCESO DE CORTE O EXCAVACION

La forma de corte de las pequeñas máquinas excavadoras se presenta por el efecto de una herramienta penetrante, al girar o impactar su masa contra el terreno o por la fuerza de choque de algún fluido a alta presión.

Los elementos cortantes pueden ser: un cortador de disco, una broca ahusada, el bisel de un tubo, un flujo a alta presión, un martillo neumático, etc. Las diferentes formas de energía (eléctrica, oleohidráulica, neumática, mecánica, sónica y otras) producen el movimiento a las herramientas de excavación. La energía eléctrica, oleohidráulica o mecánica hace girar a un cortador dentado, desgastando el material;

la neumática puede lograr el vaivén de una cabeza cortadora, perforando por impactos; la energía dinámica de un flujo a alta presión puede lograr el corte del terreno a través de chiflones; y con la energía sónica en forma de vibraciones transmitidas al terreno a través de la tubería (de acero) durante su penetración, reduce la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. También, la energía oleohidráulica utilizada por medio de un gato, produce un empuje, necesario para la inserción de tuberías en el terreno.

PROCESO DE EXTRACCION DE REZAGA

El proceso de rezagar consiste en encausar el material que se va cortando hacia el exterior de la oquedad. En los métodos de microtuneleo se distinguen tres tipos de extracción: circulación de flujo de lodos (slurry), transportador helicoidal y limpieza posterior a la inserción de la tubería.

El sistema rezagador por flujo de lodos lo forman dos tuberías conectadas a una cámara de mezclado y a un tanque almacenador, así como bombas hidráulicas. Estas últimas establecen una circulación controlada de lodos a través de los conductos y al pasar por la cámara encausan el material de corte hacia la superficie.

El transportador helicoidal lo forma un tren de barras con canales espirales, al girarlas desde el exterior conducen el material excavado, retirándolo del pequeño túnel.

Estos dos métodos de extracción de rezaga se llevan a cabo simultáneamente al proceso de excavación.

La otra forma empleada para la extracción del material de corte es utilizado en el método de hincado de tuberías, donde se emplea agua o aire a presión para su limpieza después de la inserción del tramo de tubería.

PROCESO DE INSERCIÓN

El empuje de tuberías para su penetración en el subsuelo es un proceso indispensable para la mayoría de los métodos de microtúnel, ya que en algunos, la inserción de los ductos de ademe se lleva a cabo por tracción.

Durante este proceso, las fuerzas de empuje o tracción deben ser eficientes para vencer a las resistencias (cohesivas o friccionantes) que se oponen al movimiento.

3.1 CLASIFICACION

Esta clasificación representa a las técnicas en sus

diversos procesos, a las cualidades propias de cada etapa (inserción, excavación y extracción de la rezaga), que las hace ser diferentes y aplicables a diferentes tipos de material.

Las distintas máquinas se han diseñado a partir de las necesidades que se generan al excavar o perforar algún material subterráneo, partiendo de la forma de cortar y rezagar el suelo o roca, así como de la manera de llevar en la dirección correcta la máquina hacia el objetivo.

No resulta práctico clasificar a las técnicas de excavación de los minitúneles respecto a los materiales en que se van a aplicar, aunque sí se recomienda una específica para cierto rango de materiales; es más práctico clasificar a las técnicas respecto a su proceso de operación y construcción.

En seguida se presenta la clasificación de los minitúneles, mencionando algunas máquinas comerciales, sus alcances y limitaciones, al igual que los suelos donde pueden excavar.

- Miniescudos.
- Perforador Auger.
- Perforación Direccional.

- Perforación Percusiva.
- Técnica de Hincar Tuberías.
- Técnica de Reventar Tuberías.

3.2 MINIESCUDOS (SLURRY MINISHIELD TUNNELLING)

Procesos:

Cortar: El elemento cortante (disco, broca u otro) se mueve independiente al sistema de rezaga.

Rezagar: La extracción del material producto de la excavación se lleva a cabo por medio de la circulación balanceada de lodos, a través de una cámara presurizable.

Inserción: Utiliza el proceso Pipe-Jacking, el que consiste en el empuje de tuberías desde un pozo de lanzamiento por medio de gatos hidráulicos.

El miniescudo es uno de los conceptos más completos y modernos de máquinas excavadoras de túneles pequeños el cual consiste en un cilindro metálico implementado con diferentes sistemas para realizar los tres procesos principales del minituneleo que son: excavación, extracción de la rezaga e inserción de la tubería de ademe.

Una de las cualidades comunes de los miniescudos es la operación de sus funciones a control remoto así como también el moderno sistema de extracción de rezaga por medio de flujo de lodos.

En el diseño de estas máquinas intervienen diferentes disciplinas: ingeniería mecánica, geotécnica, cibernética, computación, electrónica de la comunicación, hidráulica, electro-hidráulica, la ingeniería de los sensores remotos, topografía, etc.

Entre la ventaja de los miniescudos (con flujo de lodos) se pueden mencionar las siguientes:

- Es capaz de mantener una presión estabilizadora en el frente de excavación, tanto hidráulica como mecánica.

- Disminuye al mínimo los riesgos de inestabilidad y asentamientos de estructuras vecinas a la oquedad.

- El proceso constructivo con este método es muy rápido. La excavación, la rezaga y el empuje de la estructura de soporte (tubería) se ejecuta en una sola operación, formando un proceso sistemático.

- Es recomendable por su presión estabilizadora

en suelos arenosos sumergidos.

- Un solo hombre puede llevar adelante la operación de la máquina; ya que cuenta con sensores y controles electrohidráulicos y electroneumáticos (remotos).

- Como todas las técnicas de minitúnel, el proceso constructivo se lleva a cabo en un espacio pequeño que no interrumpe al tránsito de vehículos, no causa molestias a los habitantes circunvecinos, además, mantiene en buena medida sin afectación la infraestructura de servicios.

- Capaz de excavar sin interrupción hasta 200 metros de longitud.

- Es competitivo a nivel económico con las técnicas tradicionales de tendido de tuberías (método de excavación a cielo abierto).

- Entre otras cosas se puede mencionar que son máquinas rápidas y de alta precisión.

3.2.1 MINIESCUDO OCAMS/SM

En el diseño de este tipo de máquinas de minitúneles se han tomado en consideración las condiciones del medio de excavación (suelo o manto rocoso), cargas estáticas, dureza del terreno, la presión hidrostática del agua contenida en el suelo y el comportamiento del material cuando esta mezclado con el agua (formando un lodo), para conocer el grado de dificultad que presentará el material al ser cortado o extraído por tuberías.

Los miniescudos de este tipo son máquinas excavadoras de pequeñas dimensiones, con un disco cortador dentado, sistema de flujo de lodos (Slurry), gatos hidráulicos para el empuje de las tuberías de ademe, gatos direccionales, sistema de sensores y controles remotos, así como, equipo de topografía, etc. (ver figuras 3.1 y 3.2).

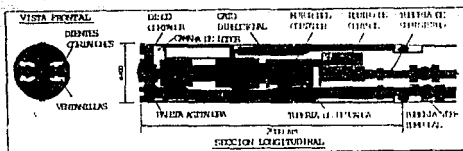


Figura 3.1 Minimáquina excavadora de túneles (OCAMS/SM). Ref. 15.

La cabeza de corte es un disco dentado con ranuras, al girar escarba y permite la entrada al material cortado a un depósito llamado cámara de lodos (a través de las ranuras). La cámara de lodos es el espacio formado entre el disco cortador y una mampara metálica, lugar donde se lleva a cabo la mezcla del suelo con el agua, para formar lodo y poder ser extraído como un flujo a presión. Para que el material adquiera esa característica (de flujo) se ejecuta el proceso de circulación de lodos, que tiene como finalidad mezclar, licuar, conducir y extraer al material producto de la excavación (rezaga). Este procedimiento inicia con el suministro de agua al sitio donde se licua el suelo, a través de una tubería dispuesta a lo largo de la oquedad, por medio de una bomba de caudal variable. Al ingresar el agua y la rezaga sólida a la cámara, la misma inercia del flujo suministrado realiza la mezcla del suelo y el agua, aunque también el mismo movimiento del disco cortador contribuye a tal acción, ya que tiene dispuestas una serie de paletas agitadoras (figura 3.1). La mezcla lodosa (con densidad y viscosidad apropiadas) se extrae en forma continua de la cámara, con una bomba de succión de caudal variable y se conduce por la tubería de descarga hasta el exterior de la oquedad, donde se deposita y se procesa para otros usos (figuras 3.2).

Las bombas de caudal variable permiten suministrar en forma continua la cantidad de agua óptima para formar una

mezcla lodosa fluida, con densidad apropiada para su conducción (por la tubería de descarga) . Para tal efecto, a la bomba de descarga se le regula su flujo para que succione el lodo de la cámara en forma proporcional al suministro de agua, evitando con ésto generar en el interior de la cámara de lodos presiones negativas (de vacío).

Con la regulación balanceada de los caudales de suministro y succión se persigue también, establecer en el interior de la cámara un gradiente de presión positivo, para mantener en el frente una presión estabilizadora que se equilibre con la carga hidrostática que genera el agua contenida en el suelo.

La circulación de lodos no se establece inicialmente por la cámara de lodos, sino a través de un tubo de desvío llamado "By-pass" (figura 3.2), proceso que se conoce como recirculación, ya que tiene como finalidad normalizar el flujo dentro de las tuberías, arrastrando aire o sedimentos acumulados que pudiesen perjudicar.

El sistema de desvío lo forman tanto el tubo del mismo nombre (desvío) como un grupo de válvulas neumáticas operadoras a control remoto (figura 3.1 y 3.2) . Para establecer la circulación por el By-pass, se cierran las válvulas de la tubería de suministro y descarga, y posteriormente se

abre la de desvío; y viceversa cuando la circulación se realiza por la cámara de lodos.

El éxito o fracaso de la excavación de un minitúnel con este tipo de miniescudo, depende en gran medida de la operación del sistema de flujo de lodos, para lo cual son utilizados sensores y controles remotos que garantizan en buena medida su funcionamiento.

Los flujos y las presiones con que se suministra y descarga el lodo y el agua respectivamente son sensados; así también las válvulas del sistema de By-pass y las bombas de revolución variable son operadas a control remoto. Tanto los sensores como los controles están conectados a una cabina de control central, desde donde se dirige toda la operación y control de la máquina (fig. 3.2).

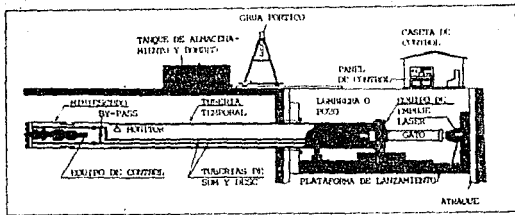


Figura 3.2 Sistema OCAMS/SM (Okumura Corporation Automatic Mechanical Shield/Super-Mini). Ref. 15.

Simultáneamente al proceso de excavación y extracción de rezaga se realiza el empuje de tubos temporales, y así, ambos permiten el avance sistemático de la máquina. El equipo de empuje se coloca en un pozo de lanzamiento donde se inicia la excavación del túnel; consiste en un gato(s) hidráulico(s) de empuje montado sobre un carro, el cual es una plataforma de viguetas metálicas que se puede nivelar, sobre ésta se van colocando los tubos para ser hincados en el suelo; también, sobre el carro se fija el equipo de rayo láser para la topografía del pequeño túnel (ver figura 3.3).

En el proceso constructivo se distinguen dos etapas: excavación y reemplazamiento (figura 3.4). En la primera, al mismo tiempo que el miniescudo excava y avanza, se va hincando la tubería de uso temporal, que son tubos acondicionados con ductos para el intercambio de energía con la pequeña máquina excavadora, por donde se suministra el agua para la mezcla de lodo y se extrae la rezaga en forma de lodo; tienen un ducto para conducir el cable de la corriente eléctrica del motor del cortador y los cables para las señales de los sensores remotos, entre otros (como se muestra en la figura 3.5). Estos tubos son posteriormente reemplazados cuando la máquina ha concluido la etapa de excavación; al mismo tiempo que son extraídos los tubos temporales se hincan los tubos de servicio, los que sirven de revestimiento definitivo al minitúnel.

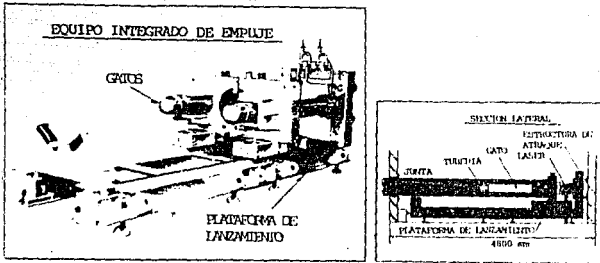


Figura 3.3 Equipo integrado de empuje, se observa la plataforma de lanzamiento nivelable. Ref. 15.

La tubería de servicio es metálica y diseñada para soportar sin deformaciones apreciables, las fuerzas de empuje durante su hincado, las cargas del suelo y las sobrecargas superficiales, así como las cargas dinámicas generales en su interior (cuando trabaja como tubería a presión).

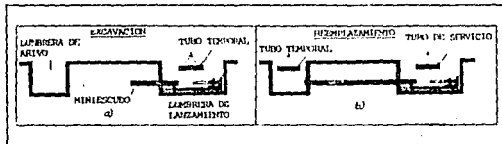


Figura 3.4 Etapas del proceso constructivo de un minitúnel utilizando un miniescudo. Ref. 15.

- a) Excavación e inserción de la tubería de uso temporal.
- b) Reemplazamiento de la tubería temporal por la de servicio.

Normalmente, el diámetro exterior de los miniescudos es mayor que el de los tubos; la diferencia de diámetros es con la finalidad de abrir una sección de túnel un poco mayor que el de la tubería, para reducir las fricciones entre los tubos y el suelo, y de esta forma utilizar menos fuerza de empuje.

El cilindro del miniescudo esta dividido en dos partes sobrepuestas, articuladas por medio de cuatro gatos hidráulicos, los cuales se operan independientes para corregir la dirección de la máquina sobre su eje vertical y horizontal (ver figura 3.1).

Para conocer la posición relativa del pequeño excavador de túneles el operador se auxilia de los resultados topográficos; donde las medidas horizontales son obtenidas con el rayo laser y la pendiente con un inclinómetro colocado en el interior de la máquina.

La utilización de sensores y controles remotos es primordial para la operación de este tipo de máquina excavadora, debido a sus pequeñas dimensiones.

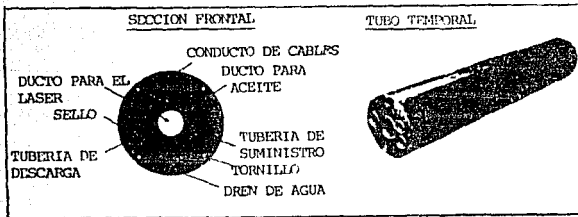


Figura 3.5 Tubo de uso temporal, acondicionado para el proceso de excavación de miniescudos con rezagador con flujo de lodos. Ref. 15.

Al sistema de sensores y controles remotos se les conoce como TC/TM (Telecontrol y Telemetría). Los sensores remotos son elementos que transforman los fenómenos físicos en señales eléctricas o electrónicas para ser transmitidas a un punto distante, donde se traducen en lecturas ópticas; se pueden medir de esta forma la presión de los fluidos, el desplazamiento de la máquina, su inclinación, el flujo que pasa por las tuberías, etc.

Los sensores para medir la presión de los fluidos consiste en un diafragma, donde incide la fuerza de éste (directa o indirectamente), provocándose una deformación en el material. Una corriente eléctrica que pasa a través de este diafragma es alterada por las deformaciones, cuando éste se alarga aumenta su resistencia y disminuye la corriente

eléctrica (principio basado en la ley de Ohm: $I=V/R$), la cual es emitida a un punto remoto (con rango de 4 a 20 mA) e interpretada en unidades de presión (kg/cm^2); los sensores de presión son conocidos como transductores de presión (figura 3.6).

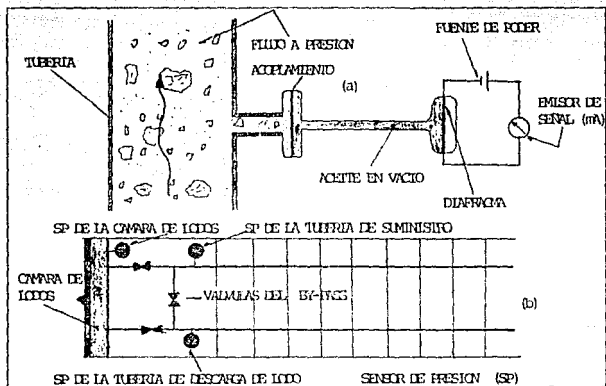


Figura 3.6 Sensores de presión. Ref. 27.

- a) Se muestra el funcionamiento de un sensor de presión.
 b) Sensores de presión en un miniescudo.

En los miniescudos el sensor de presión es utilizado para conocer la presión con la que se está suministrando el agua a la cámara de lodos (ver figura 3.6 b). Es importante conocer esta presión, ya que a partir de su lectura se pueden inducir las condiciones de trabajo de la máquina; por ejemplo, cuando la cámara de lodos se satura de material de excavación tiende a bloquear los ductos (tanto el de suministro de agua

como el de descarga de lodo) en sus entradas a la cámara, este fenómeno se manifiesta en un aumento de la presión de suministro, que indica que la tubería se está taponeando. Si las tuberías se llegaran a bloquear, ya sea por el aumento de la densidad (donde el flujo pasa de un lodo de baja densidad a una pasta pegajosa sin fluidez) o por el atoramiento de una pequeña roca intrusiva en la tubería, el sistema de rezaga prácticamente quedaría bloqueado y la máquina atrapada bajo el suelo; implicando con esto, la realización de una excavación adicional para extraerla del subsuelo para su reparación (incrementándose el tiempo y costo de la obra).

En los miniescudos es muy útil el rayo láser para saber cuál es su posición respecto a un plano horizontal. El aparato de rayo láser se coloca sobre un punto fijo en la lumbrera de lanzamiento, en el escudo se colocan dos tarjetas receptoras A y B, sobre las cuales se realizan lecturas (ver figura 3.7); al relacionarlas se aproxima la tendencia de la máquina respecto a una línea teórica de proyecto. Esta lectura topográfica se complementa con la información sensada por el inclinómetro colocado en el interior del pequeño escudo, el que indica la inclinación de la máquina respecto al eje horizontal; esta lectura sensada es emitida electrónicamente hacia la cabina de control central. Esta información en conjunto permite operar en forma correcta los gatos de dirección para llevar al miniescudo hacia el frente lo más

cerca posible de la línea teórica de proyecto.

Otro sensor muy utilizado en esta técnica de excavación es el de desplazamiento, éste permite conocer la velocidad de inserción de la máquina en el interior del suelo (parámetro que se debe conocer para lograr el equilibrio de los flujos, ver anexo 1).

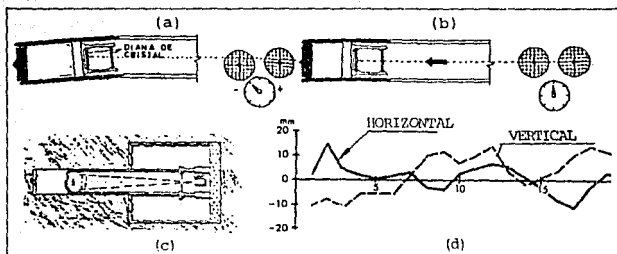


Figura 3.7 Método topográfico con rayo láser.

- a) Escudo desalineado con pendiente positiva.
 - b) Escudo alineado y sin pendiente.
 - c) Equipo láser montado sobre la plataforma de lanzamiento.
 - d) Se muestra una gráfica de la posición actualizada del miniescudo.
- Ref. 15.

La figura 3.8 muestra un tipo de sensor de desplazamiento. Es un flexómetro con perforaciones y un lector óptico. Por medio de una tarjeta electrónica se logra integrar la velocidad de desplazamiento, a partir del tiempo que tarda la cinta en recorrer 10 cm, separación que existe entre cada perforación.

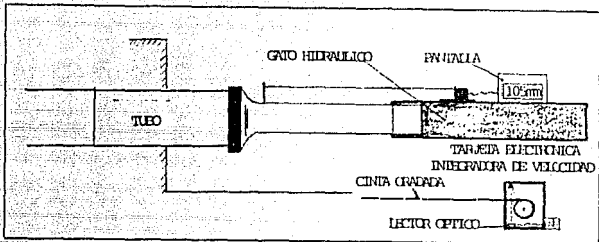


Figura 3.8 Sensor de desplazamiento utilizandolo en la medición del desplazamiento del bastago de un gato hidráulico. Ref. 27.

Otro parámetro medible para la operación sistematizada del miniescudo es el flujo de lodos, tanto el de suministro (agua) como el de descarga (lodo).

El flujo de lodos (slurry) es el encargado de establecer la presión (compesadora) en la cámara de lodos, que equilibra a la presión hidrostática encontrada en el suelo. Para medir estos flujos se cuenta con flujómetros o tubos magnéticos, ver figura 3.9. El principio de éstos esta basado en

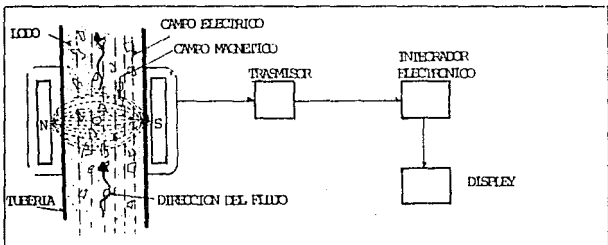


Figura 3.9 Tubo magnético flujómetro para medir el flujo de líquidos en tuberías. Ref. 27.

el electromagnetismo. Cuando el flujo pasa por una sección, debido a su movimiento genera líneas de corriente eléctricas parásitas. por otra parte, en la misma sección de aforo se forma un campo magnético por medio de un par de bobinas polarizadas, entonces, al pasar el flujo por esta sección hace variar la magnitud del campo magnético. Por otra parte, la variación de densidad del flujo provoca cambios en el campo magnético. Estos parámetros, flujo y densidad, son integrados electrónicamente y emitidos por señales telefónicas a la cabina de control central.

En la figura 3.10 (a y b), se muestra la computadora central receptora de las señales remotas y la forma como son desplegados los resultados por una pantalla CRT.

Existen diversas versiones de la máquina OCAMS, como se indica enseguida:

Túneles revestidos con segmentos (dovelas);

OCMS — { diámetro de 1.8 a 11.0 m.
 Método Pipe-Jacking.

OAMS/A: ϕ 0.9 a 3.6 m.

OCAMS/PS: ϕ 0.6 a 1.2 m.

OCAMS/SM: ϕ 0.25 a 0.5 m.

En la figura 3.11 se muestran las especificaciones más importantes de la OCAMS/SM.

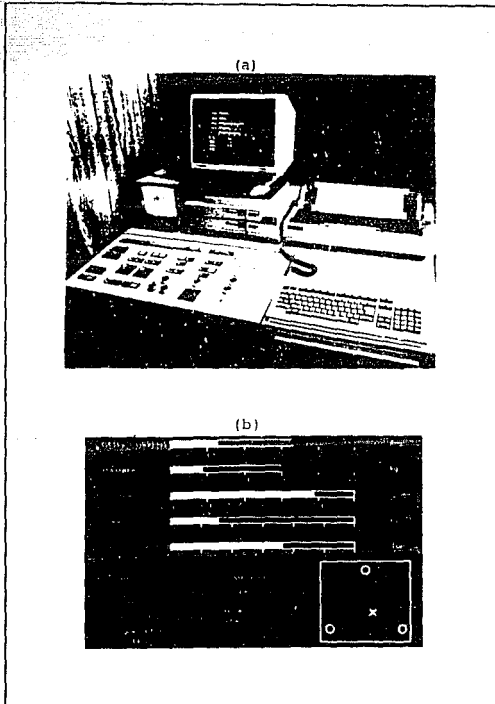
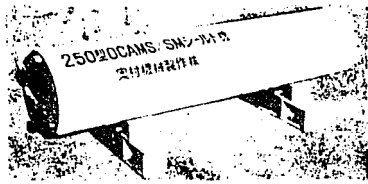


Figura 3.10 a) Computadora para la operación del miniescudo OCAMS/SM.
b) Despliegue de resultados durante la operación del miniescudo. Ref. 15.



DIAMETRO INT. DEL TUBO DE SERVICIO	250 mm
DIAMETRO DEL MINIESCUDO OCAMS/SM	400 mm
LARGO	2000 mm
GATOS DIRECCIONALES (4 PIEZAS)	3 ton/pza
UNIDAD HIDRAULICA	0.18 KW (1.34 HP)
TORQUE DEL CORTADOR	177 kg-m
VELOCIDAD DE GIRO DEL CORTADOR	10.1 a 12.1 rpm
MOTOR DEL CORTADOR	2.2 KW (16.4 HP)
TUBERIAS DEL FLUJO DE LODOS	
SUMINISTRO	2" (5.08 cm)
DESCARGA	2 1/2" (6.35 cm)

Figura 3.11. Especificaciones de la máquina OCAMS/SM (OKUMURA Corporation Automatic Mechanical Shield/Super-Mi ni). Ref. 15.

3.2.2 Telemole

El miniescudo Telemole es una patente de la compañía japonesa Iseki; el principio de funcionamiento es similar al de la máquina de Okumura (OCAMS/SM). Cuenta con sistema de Telecontrol y Telemetría para la operación a control remoto; la extracción de la rezaga es por el método de circulación de lodos (Slurry), en la figura 3.12 se muestra el sistema Telemole.

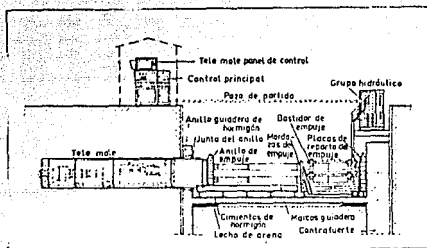


Figura 3.12 Sistema para la operación de la máquina TELEMOLE.
Ref. 2, pág. 238.

La máquina mide 4.6 metros de longitud, es utilizada para la instalación de tuberías de 730 a 960 mm de diámetro; su precisión es de 30 mm en el sentido vertical y 20 mm en el horizontal; tiene un alcance longitudinal registrado de 200 metros para una tubería de 960 mm; según registros en Alemania ha alcanzado hasta 120 metros con una velocidad de avance de 3 a 18 m/día (días de 8 horas y con 4 personas).

La máquina Telemole ha sido utilizada para excavar oquedades en suelos blandos, arcillas, limos, arenas finas con baja cohesión y otros. El tamaño máximo granulométrico que puede trabajar sin problemas es de 50 mm.

La tubería que se inserta en el suelo puede ser de acero, asbesto-cemento, GRP y otras.

Una de las cualidades de este sistema es su cortador de disco de sección completa y con desplazamiento telescópico, (ver figura 3.13 a y b). Para que el cortador realice el movimiento telescópico (movimiento hacia atrás y hacia adelante) se tiene dispuesto un gato hidráulico (como se observa en la figura 3.13). Cuando el gato está totalmente extendido, el cortador se posiciona fuera del cilindro metálico y se puede ocultar dentro de éste al retraer el gato.

Este diseño ofrece las siguientes ventajas:

Cortar sin avanzar o avanzar sin cortar:

Estos dos procesos son muy importantes en la excavación de suelos consolidados o duros.

Ante este hecho se debe recordar que el disco dentado (de los miniescudos) es el encargado de ejecutar el corte

del terreno, entendido como dos procesos, el primero, la insercción de los dientes en el material (venciendo con esto su resistencia a la penetración) y segundo, la ejecución del corte. Además, la parte frontal de los miniescudos tienen un bisel, que puede penetrar al suelo únicamente cuando el empuje de la máquina es mayor que su resistencia a la penetración, como se indica en la figura 3.13 a) y b).

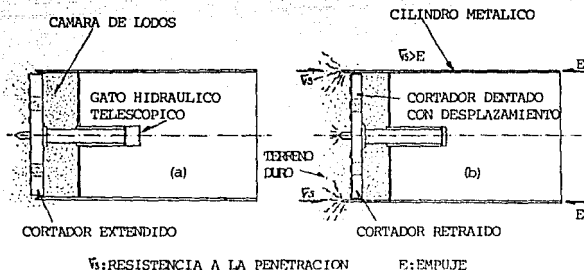


Figura 3.13 Escudo con cortador de disco de desplazamiento telescópico. Ref.27
 a) Máquina con el cortador fuera del cilindro metálico. El gato hidráulico se encuentra extendido. La resistencia a la penetración, V_s , no se contraponen al avance de la máquina.
 b) Máquina con el cortador retraído. La resistencia a la penetración, V_s , es mayor que el empuje de la máquina, y el suelo se contraponen al avance del cilindro metálico.

Cuando el suelo es muy duro se procede a extender el cortador al máximo, con la finalidad de mantener los dientes clavados en el terreno en forma continua e ir abriendo paso al cilindro que se hinca. Cuando el escudo no tiene esta disponibilidad y se diseña de tal forma que el cortador siempre este dentro del cilindro, el 'primero en contraponerse

al suelo será el bisel (frontal) del escudo (cilindro), el cual no tiene, como se dijo, función de corte. Si la resistencia del suelo (a la penetración) es mayor que el empuje máximo de la máquina, los dientes no se clavarán y por consiguiente el corte no se podrá ejecutar, quedando la máquina virtualmente atrapada.

Cuando el miniescudo (como el caso del Telemole) cuenta con un cortador telescópico, ante un suelo duro, el problema antes citado puede resolverse de la siguiente forma:

1.- Extender el cortador al máximo para clavar los dientes en el terreno duro.

2.- Girar el cortador hasta que el amperaje del motor de corte baje al mínimo; durante esta operación no se recomienda accionar la fuerza de empuje.

3.- Parado el cortador (sin movimiento giratorio) retraerlo al máximo, ya para entonces habrá cortado el suelo duro.

4.- Avanzar la máquina girando el cortador, hasta que el amperaje del motor de corte se incremente, o si el motor es hidráulico hasta que la presión de corte aumente súbitamente.

5.- Repetir el proceso hasta encontrar suelo de menor dureza.

Avanzar sin sobreexcavación del frente:

Esto se logra manteniendo al cortador excavando dentro del cilindro, pues cuando se excava en arenas con baja cohesión o en suelos muy blandos (arcillas o limos) con el cortador fuera del cilindro, se pueden provocar sobrecortes, que se traducen en afectaciones del medio.

Menor riesgo de atascamiento del disco cortador:

El movimiento telescópico del cortador reduce el riesgo de atascamiento del disco cortador en los suelos altamente pegajosos.

Su sistema hidráulico rezagador puede conducir arenas finas, para ésto se recomienda el uso de bentonita; cuando la arena es extraída por bombeo es muy fácil que se llegue a sedimentar (tanto puede ser en los tiempos sin operación como durante el bombeo), con la bentonita agregada al agua de suministro se forma una mezcla densa y viscosa (pero con fluidez), la cual evita que las arenas fluyan sin depositarse en las tuberías, reduciendo con ésto la posibilidad de taponamientos por acumulación de sedimentos.

3.2.3 Telemouse

Es solo una modalidad del miniescudo Telemole. Cuenta con un cortador de disco, el cual tiene un par de compuertas con salientes de corte. El corte y apertura de tales ventanillas se realiza en forma coordinada y a control remoto.

Las compuertas dejan entrar material únicamente cuando en el frente el sensor de presión esta registrando un valor mayor al calibrado.

El control sobre las ventanillas del cortador (apertura y cierre) ofrece una gran ventaja para regular la cantidad de material que entra a la cámara de lodos, así como obstruye el paso a materiales de gran tamaño (ver anexo 1).

Puede perforar a través de tuberías viejas de hormigón sin acero.

Este tipo de máquina se ha diseñado para colocar tuberías de hasta 350 mm de diámetro.

3.2.4 Crunchingmole

Con el diseño de esta máquina se ha tratado de resolver uno de los principales problemas de los miniescudos que

utilizan el sistema de circulación de lodos para la extracción de la rezaga: excavar en suelos granulares con tamaños granulométricos no bombeables. Muchas de las veces ese tipo de materiales sí pueden ser excavados, pero en el momento de ser extraídos taponean las pequeñas tuberías.

A la Crunchingmole se le diseñó un molino giratorio para la eliminación de gravas grandes o cantos rodados mediante un proceso de machaqueo, ver figura 3.14.

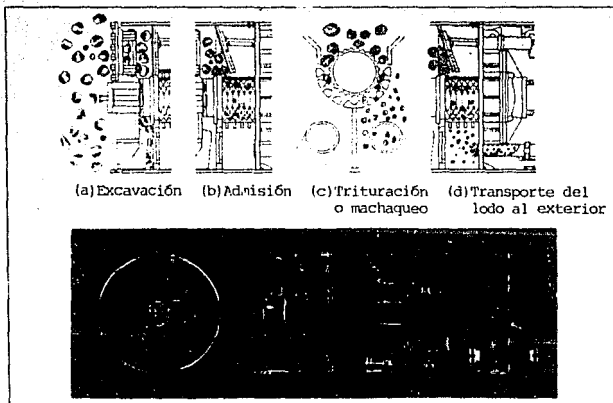


Figura 3.14 Miniescudo Crunchingmole. Ref. 2, Pag.234.

Al cortador se le diseñaron ventanillas más grandes para permitir el paso a boleas de hasta 130 mm, y dientes dis-

puestos para cortar en ambos sentidos del giro del cortador.

El cortador cuenta con dos grupos de ventanillas como se muestra en la figura 3.14. Al girar el cortador excava el material y le permite el paso hacia una primera cámara (únicamente por la parte superior, ver figura 3.14 a), parte de este material pasa a través de una ventanilla con compuerta (regulable) al molino giratorio, ahí es triturado hasta un tamaño de 50 mm o menos (en el caso de miniescudos Crunchingmole de 600 mm de diámetro) y depositado en una segunda cámara (de lodos), de la cual es extraído el material por bombeo hasta la superficie, donde son separados del lodo los materiales gruesos.

Se han observado problemas de su uso en arcillas pegajosas, pero puede excavar hasta en rocas blandas fracturadas, pues su cortador está dispuesto fuera del cilindro (escudo) y con ésto, los dientes siempre permanecieran clavados en el terreno duro.

Una versión del Crunchingmole se construyó con cortador giratorio y discos de corte para suelos más duros, como si fué un pequeño topo.

3.2.5 Hansemole

Esta máquina fue desarrollada en Alemania con los principios de trituración de la Crunthingmole; su operación es similar, (ver figura 3.15).

Las mejoras logradas en esta máquina son:

- La longitud de la máquina se recortó a 3.10 metros, lo que permite construir lumbreras de menor tamaño.

- Las paredes del cilindro son de mayor espesor, permitiendo soportar mayores cargas, y con esto se pueden hacer excavaciones hasta 10 metros de profundidad.

- El motor del cortador es de mayor potencia y eficiencia.

- Mejor calidad de los gatos de dirección.

- Se superó el problema de acumulación de materiales en la cámara de recepción (donde entra el material sin moler), se logró colocando paletas o aletas detrás del cortador, las cuales, remueven el material con el giro del cortador y ayudan a pasar a los materiales gruesos al molino giratorio.

- El miniescudo Crunchingmole puede excavar en suelos que contengan gravas de más de 130 mm de diámetro, reduciéndolas a 50 mm con la molienda.

Su sistema de control y operación es similar al escudo OCAMS/SM.

Las experiencias en Alemania con esta máquina dicen que ha podido excavar en margas duras con grandes piedras, con un rendimiento de 9 metros en turnos de 8 horas; también, se ha observado que la fricción se puede reducir utilizando agua en el caso de los suelos pesados, y en arenas o en suelos pétreos con el uso de bentonita (inyectada entre el suelo y la tubería que se hinca).

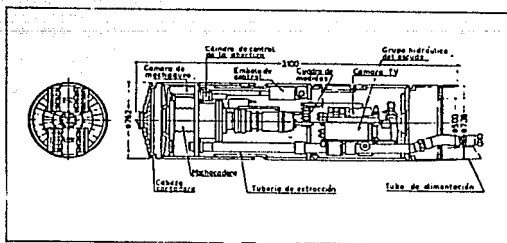


Figura 3.15. Miniescudo Hansemole. Ref. 2, pág. 239.

3.2.6 Unclemole

La innovación principal de la máquina UNCLEMOLE es el triturador cónico que gira excéntricamente, convirtiendo boleos y otros obstáculos en pedazos muy pequeños que pueden circular sin problemas en forma de lodo por las tuberías, ver figura 3.16.

El cortador dentado (cuyos filos sobresalen hacia adelante) gira al mismo tiempo que el molino cónico.

El material de excavación es empujado hacia el interior del molino por el mismo avance de la máquina, conforme éste se desliza hacia el interior de la oquedad; debido a la acción de las altas fuerzas generadas por la velocidad de rotación, los materiales de gran tamaño y dureza son triturados, integrándose al fluido lodoso que prevalece en la cámara de trituración.

Debido a que la máquina puede generar un alto par de rotación, es capaz de excavar con gran rapidez a través de cualquier tipo de material: arcilla, limo, gravas, boleos, cascajo de relleno, lutitas y pizarras arcillosas, ludolitas y areniscas blandas; capaz de moler piedras con dureza de hasta 2000 kg/cm^2 .

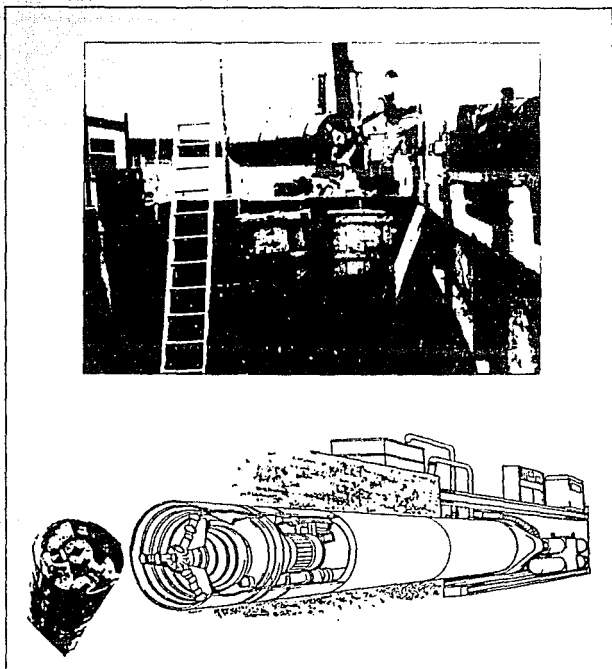


Figura 3.16 Miniescudo Unclemole. Ref. 17, pág. 63
y ref. 20, pág. 38.

El suelo excavado es removido por el flujo de agua lodosa, manteniendo balanceada la presión del flujo con la del agua subterránea.

La ventaja sobre otras máquinas en cuanto a la excavación de suelos finos, es que el molino excéntrico tiende a formar bolas, no permitiendo que se peguen a las paredes los materiales pegajosos (como las arcillas).

La operación de la máquina se lleva a cabo a control remoto, como en los miniescudos OCAMS/SM.

La máquina admite materiales cuyo tamaño sea no mayor de 30% del diámetro de la máquina y los puede reducir hasta los 25 mm; los materiales gruesos desalojados por el fluido lodoso son separados de éste por medio de un sistema de carcamos, con el fin de reutilizar el lodo (tratado).

Este tipo de miniescudo ha sido diseñado para la instalación de tuberías de 370 a 1000 mm de diámetro. Las longitudes de las excavaciones que puede realizar son de hasta 100 metros.

3.3 PERFORACION AUGER

Procesos:

Corte y rezaga: Esencialmente el elemento cortador es movido desde el exterior de la oquedad a través de barras helicoidales, que a su vez realizan el proceso de extracción de la rezaga del interior del pequeño túnel.

Inserción: Se lleva a cabo también, con el método Pipe-Jacking.

Modelos comerciales:

Modelo/Materiales de excavación:	Diámetro (mm)	Alcance (m)	Velocidad (cm/min)	Rendimiento (m/día)
PERFORADOR HORIZONTAL DE SUELOS (American Auger) (Ref. 2, pág. 230). Arenas y gravas.	250-700	60	--	--
A. HOWDEN-SANWA (Fig. 3.17). (Ref. 17). Arenas y gravas - con pocos finos.	300-600	--	--	12
WBM-16 WESTALFIA L. (Fig. 3.18). (Ref. 18, Pág. 277). Arenas y gravas.	250-800	90	--	10
WTBM (Witte Thrus boring Machine) (Fig. 3.19). (Ref. 11, pág. 16). Arenas y gravas.	250-1000	30	--	--

Continuación...

Modelo/Materiales de excavación	Diámetro (mm)	Alcance (m)	Velocidad (cm/min)	Rendimiento (m/día)
SPOLL AUGER (Fig. 3.22) (Ref. 6, pág.95). Especialmente para arenas.	70	60	--	--
PERFORADOR AUGER DE TIERRA BANCEADA (Kandenco) (Fig. 3.23) (Ref. 21, pág.8). Arenas y gravas con finos.	KR: 250 KRS: 1200	300	--	--
PERFORADOR AUGER CON DISCOS CORTADORES (TTL-700, Tone) (Fig. 3.20). (Ref.26, pág.18). Especialmente para rocas fracturadas.	500	45	---	--



Figura 3.17. Perforador Auger (Sanwal). Ref. 17, pág. 64.

La diferencia esencial de un perforador Auger y los miniescudos es la siguiente: en los miniescudos el torque para el giro del cortador es generado por una unidad hidráulica o eléctrica, independiente del sistema rezagador; mientras que en los perforadores Auger el mismo sistema rezagador de barras helicoidales (serpentín), a la vez que gira para extraer al material de excavación, hace rotar a la herramienta de corte, funcionando como un solo elemento (cortador-rezagador), (ver figuras 3.1, 3.2 y 3.17).

Un perforador Auger puede ser tan sencillo como el de la figura 3.22, o tan sofisticado como el de las figuras 3.17, 3.20 y 3.23.

En las máquinas Auger más modernas se distinguen las partes mostradas en la figura 3.18.

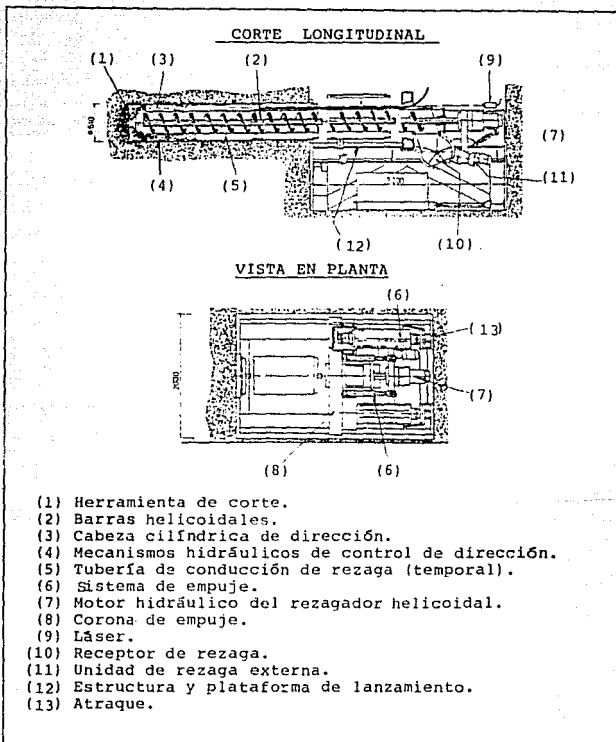


Figura 3.18. Partes principales de un Perforador Auger. Ref. 18, pág. 277.

El corte del material puede llevarse a cabo por medio de un disco dentado (figura 3.17), con broca ahusada (figu-

ra 3.19) o con cabeza giratoria y discos (figura 3.20).

Cuando se utiliza disco dentado, su trabajo lo efectúa fuera del cilindro (aquí no importa que este fuera cortado ya que su aplicación se limita a suelos duros donde es muy baja la posibilidad de sobreexcavación); el hecho de que el cortador este retirado del cilindro, permite la entrada del material cortado con mayor facilidad, integrándolo al serpiente rezagador más rápido. El disco cortador gira a las mismas revoluciones que el serpiente, sobre el cual se ejerce una presión en forma constante a través de las barras helicoidales, permitiendo mantener los dientes excavadores continuamente clavados en el terreno, facilitando de esta manera el corte del material.

En el caso del Auger con broca ahusada y cabeza de recorte, el proceso de excavación se presenta en dos partes en forma simultánea, (figura 3.19); primeramente la broca ahusada corta por el centro de la cavidad hasta un diámetro menor que el pequeño túnel, y la cabeza de recorte afilada, que es la parte delantera del cilindro de dirección, se va encajado en el material alterado sin dificultad, logrando la excavación del diámetro final. El cortador (broca) es movido desde la lumbrera de lanzamiento a través del tren de barras helicoidales.

Ya que este tipo de máquinas es propio de suelos duros o consolidados no es necesario que haya una presión hidráulica en el frente; aunque en el caso de excavación en arenas sumergidas a la técnica Auger se le puede adicionar un flujo de lodo para establecer una presión hidráulica en el frente.

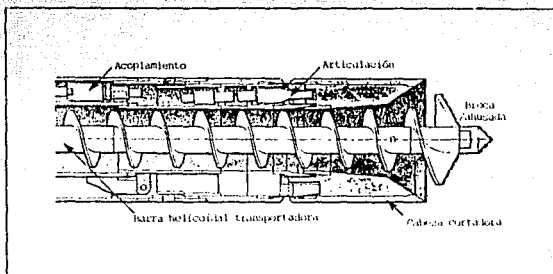


Figura 3.19. Perforador Auger con broca ahusada. (Witte Thrushoring Machine). Ref. 11, pág. 16.

En el caso de suelos rocosos se prefiere utilizar el perforador Auger con cabeza giratoria y discos (similar a la cabeza de discos de los topes, figura 3.20). Como en cualquier sistema excavador de minitúneles, también en éste se aplica una fuerza axial sobre los discos cortadores, que al encajar su filo a la roca dura más fácilmente la rompe.

Las barras de serpentín por poseer aletas helicoidales al girar transmiten un movimiento de traslación y de esta manera pueden transportar al suelo desde el frente de corte hasta la lumbrera de lanzamiento, donde es retirado a otro sitio.

Al mismo tiempo que se efectúa el corte y el transporte del material, se ejecuta el proceso de inserción de la tubería de conducción de rezaga, la cual es empujada hacia el interior del terreno con gatos hidráulicos. La fuerza de empuje es aplicada a la tubería a través de una corona de empuje, con el fin de distribuir uniformemente las fuerzas de los gatos.

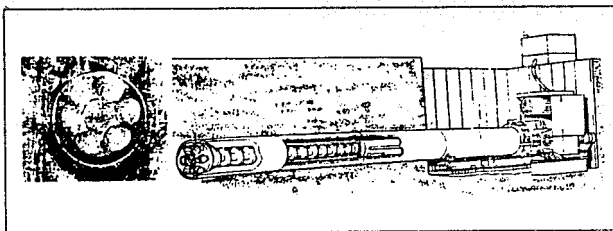


Figura 3.20 . Perforador Auger con discos cortadores. Ref. 21, pág. 18.

Las máquinas más modernas de perforación Auger cuentan con una cabeza cilíndrica de dirección, figura 3.19, la cual está sujeta al resto de la máquina por cuatro gatos hidráulicos

que le sirven de pivoteo para su movimiento de corrección de dirección. La operación de estos gatos se realiza a control remoto por medio de válvulas electrohidráulicas y una computadora.

Se utiliza un sistema topográfico de rayo láser para precisar la posición relativa de la pequeña máquina; el rayo es emitido a través de la sección de tubería que no es ocupada por el tubo del serpiente, como se observa en la figura 3.18.

La tubería utilizada durante la etapa de excavación, es diseñada con un conducto interior por el que se introduce el rezagador helicoidal como se muestra en la figura 3.21; ésta tiene uso temporal, ya que al ser concluida la etapa de excavación, es introducida una nueva tubería al terreno (de uso permanente), al mismo tiempo que se inserta, empuja hacia adelante a la tubería temporal, la cual es retirada por la lumbrera de arriba. Las tuberías de servicio están diseñadas en acero o asbesto-cemento a esfuerzos de aplastamiento y compresión axial. Los tramos de tubo son normalmente de 1.2 hasta 4.0 metros. En algunos sistemas de Auger no muy sofisticados, la misma tubería de servicio es utilizada para conducir la rezaga.



Figura 3.21. Barras elicoidales. Ref. 23. pág. 21.

Los tubos se insertan o se soldan. Cuando se inserta un tubo a otro, se suelen utilizar sellos de tipo O-ring, protegiendo el interior de la tubería de las filtraciones de agua; también, el sello de hule o de neopreno sella contra las altas presiones que pudieran generarse en el interior de la tubería por algún fluido a presión.

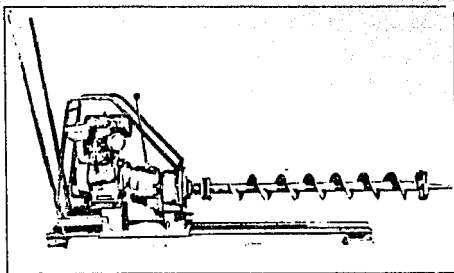


Figura 3.22. Perforador Auger (Div of Koehring Co.). Ref. 6, pag. 95.

La plataforma de lanzamiento es una cama de media caña construida con viguetas metálicas, apoyada sobre una estructura debidamente nivelada y troquelada.

El atraque es el apoyo trasero de los gatos de empuje; suele construirse de viguetas metálicas o de concreto armado.

La rezaga del pequeño túnel cae a un receptor el cual la conduce a otro depósito, de donde posteriormente es retirada.

El método puede aplicarse en suelos de alta cohesión, arenosos, suelos con mezclas de arena y grava, suelos duros y rocas.

La longitud normal de perforación es de 50 metros; los diámetros de las tuberías de acero varían entre 150 y 800 mm, para tubos de hormigón entre 250 y 700 mm.

Una máquina Auger, donde el elemento cortador es independiente del tren de barras helicoidales es el perforador de tierra balanceada. (figura 3.23).

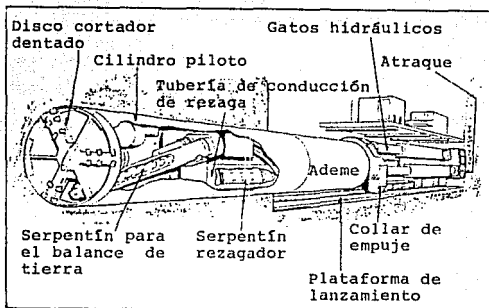


Figura 3.23. Perforador Auger de tierra balanceada. Ref. 22, pág. 8.

En el perforador de tierra balanceada, el material entra a una primera cámara, de donde es extraído a una velocidad controlada para mantener una presión de tierra en el frente, lo que se logra manteniendo igual la cantidad de material que entra a la cámara, con el material que se extrae de ésta. El cortador de disco puede girar a diferentes velocidades, ya que es independiente del rezagador helicoidal. Este tipo de perforador tiene dos serpentines, uno de revolución variable (de control remoto) que extrae la rezaga de la primera cámara y la lleva a un segundo depósito, el que alimenta al rezagador de serpentín, conduciendo la rezaga hasta la lumbrera de lanzamiento. Esta máquina así diseñada es ideal para arenas con bajos contenidos de finos (arenas de baja cohesión) y además, para excavar sobre o bajo el

nivel de aguas freáticas.

3.4 PERFORACION DIRECCIONAL

3.4.1 Corte Suave

Procesos:

Cortar: El corte del material se lleva a cabo con chiflones de agua con bentonita.

Rezagar: La rezaga se deja acumular a lo largo de la oquedad, para que funcione como ademe; la cual es retirada por bombas mediante un proceso de succión, simultáneo a la etapa de inserción.

Inserción: La tubería de ademe es colocada dentro de la oquedad, mediante el proceso de tracción.

Modelos comerciales:

Modelo/Materiales de excavación:	Diámetro (mm)	Alcance (m)	Velocidad (cm/min)	Rendimiento (m/día)
HDI (horizontal Drilling International) (Fig. 3.24). (Ref. 19, pág. 80) Para cruzar cauces a través de aluviones o materiales de resistencia menor a los 350 Kg/cm ² .	300-1000	1500	—	—
GUIDE DRIL (Flow-Mole) (Fig. 3.30). (Ref. 20, pág. 15). Especialmente para suelos duros. Puede cortar en arenas - por su amplio control de su presión de corte.	Tubos de PVC de 5l	125	Presión de perforación: 1500 a 4000 - 1b/pulg ²	—

Los minitúneles construidos con esta técnica no resultan del todo horizontales; su proceso constructivo obliga a construirlos con un radio de curvatura vertical, aunque para la mayor parte de su recorrido se puede controlar la excavación manteniéndose horizontal. Es una técnica de alto rendimiento constructivo y para largos recorridos de excavación (ver anexo 2). La barrenación principal piloto se lleva a cabo con el sistema llamado de "Corte suave". Consiste en

un chorro de agua de alta presión aplicado en el frente de excavación, el que va abriendo paso al tren de barras de perforación.

Una de las interrogantes importantes que se hace el ingeniero de los minitúneles, es si habrá en el terreno de excavación algún obstáculo, muchas veces se auxilia de la geofísica para asegurar que no los hay; sin embargo, con este método de perforación suave se puede evitar el choque con estos obstáculos, que en zonas urbanas pudiera tratarse de alguna estructura de servicio; esta técnica ofrece esa ventaja, pues permite detectar sobre su trayectoria de recorrido, estructuras duras con el mismo chorro a alta presión, esta forma de detección está basada en el principio que menciona que la fuerza necesaria para mover un obstáculo, es igual a la reacción que éste ofrece. Lo que indica que, a cada variación de la resistencia o dureza del terreno, la presión del chorro también variará, este hecho permite calibrar el sistema a una presión máxima, la cual al alcanzarse, puede ser indicativa de lo que hay en el recorrido, algún obstáculo, que en el caso de las zonas urbanas puede ser una tubería de gas o petróleo que pudieran dañarse.

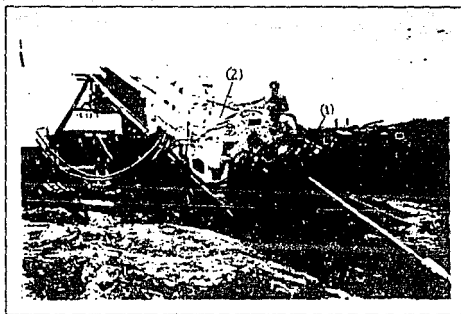


Figura 3.24. Máquina de perforación direccional con sistema de corte suave.
Ref. 19, pág. 88.

El proceso constructivo se lleva a cabo en tres etapas:

- 1) Perforación Piloto.
- 2) Excavación de ensanchamiento.
- 3) Colocación de la tubería de servicio.

(ver figura 3.25 a), b) y c).

Las partes principales que conforman la máquina de barrenación horizontal con sistema de perforación suave son:

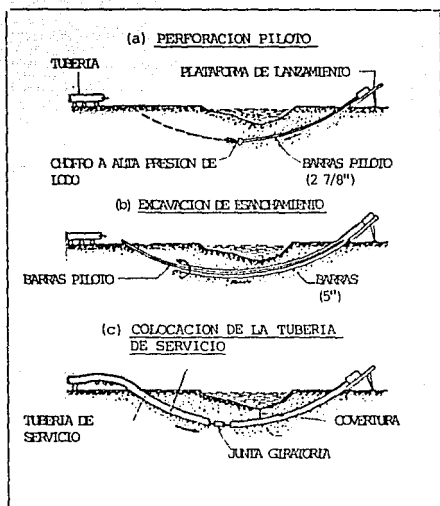


Figura 3.25. Etapas del proceso constructivo del método de Barrenación Horizontal con sistema de corte suave. Ref. 19, pág. 87.

sistema de empuje, tracción, rotación, inyección de alta presión, plataforma guía con mecanismo de inclinación, barras de perforación, chiflón de corte, sonda de dirección cabeza de corte ensanchadora y una junta giratoria (ver figuras 3.24 y 3.25 a), b) y c).

La máquina perforadora cuenta con una plataforma inclinable, ayudada por un gato hidráulico para tal función; sobre la plataforma se desliza hacia atrás y adelante el equipo de perforación, movido con el mecanismo de tracción, que puede ser una cadena o una barra guía dentada. El equipo de perforación lo conforman los sistemas de empuje, tracción, rotación, inyección de alta presión, barras y brocas.

ETAPA 1: PERFORACION PILOTO

Para iniciar la perforación piloto, es muy importante definir cuál deberá ser la inclinación de la plataforma de lanzamiento, y el radio de curvatura de ataque de la barra guía, (ver figura 3.26). Este último es la curvatura que se le deberá dar a la primera barra, de tal forma que ésta describa el curso de la excavación (ver anexo 2).

La plataforma es inclinada a un ángulo de proyecto por medio de gatos hidráulicos. Sobre éste se encuentra el equipo de perforación (hidráulico). En la figura 3.24, la

parte (1) es el mecanismo de rotación de las barras de perforación; la parte (2) la forman el sistema de tracción (junto con la plataforma de lanzamiento y su cadena o engrane de tracción), sistema de empuje y distribuidor de inyección de alta presión.

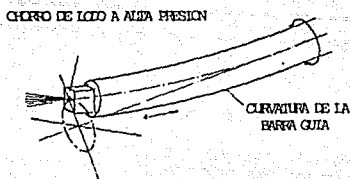


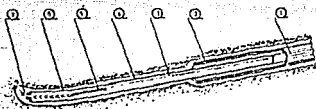
Figura 3.26. Barra guía con curvatura para el control de la dirección. Ref. 19, pág. 87.

En la perforación piloto se utilizan barras de acero, las cuales tienen un pequeño oradamiento central, por el que se conduce el fluido a alta presión; las barras se unen con la rosca que tiene cada una en sus extremos.

En la primera barra de perforación se introduce una sonda direccional, es un dispositivo utilizado para ubicar en el subsuelo la posición de la barra guía. La sonda es sensorizada en forma remota con el uso de instrumentos de geofísica (método de polarización negativa remota), y de

esta forma se conoce cual es la tendencia que sigue bajo el terreno la barra guía, que es la que describe la trayectoria de la pequeña excavación. La barra guía se reviste con un forro anti-magnético como requisito para la aplicación del método geofísico.

La barra guía tiene varios "chiflones" (de 2 a 5) en la cabeza, éstos son pequeños orificios ubicados en la parte frontal de la barra direccional (ver la figura 3.27), el diámetro de éstos es de entre 0.5 y 1.0 mm.



- 1 BARRAS DE PERFORACION
- 2 TUBOS DE ADEME
- 3 CABLE DE CONTROL DIRECCIONAL
- 4 FORRO ANTI-MAGNETICO
- 5 SONDA DIRECCIONAL
- 6 BARRA GUIA
- 7 CHORRO DE LODO A ALTA PRESION

Figura 3.27. Barra guía direccional (principio de corte suave - por el chorro alta presión). Ref. 19, pág. 87.

El tren de barras es empujado por la máquina con el sistema de gatos de empuje hacia el interior de la excavación, al mismo tiempo que la barra guía con sus "chiflones" va cortando al suelo (con una presión de 105 a 352 kg/cm²), abriendo espacio para el avance de las barras de perforación.

La inyección para el corte de terreno es una mezcla homogénea de bentonita. El fluido al incidir en el suelo lo corta y a la vez lo hace circular hacia el interior de la excavación; la mezcla de bentonita con el material cortado sirven de ademe a la oquedad y además, como lubricante para el movimiento de las barras, reduciendo la fricción de éstas con el suelo.

Cuando son detectadas desviaciones de la barra guía se utiliza la rotación del tren de barras para corregir. Al rotar la barra curvada (por efecto del giro del tren de barras) realiza un movimiento de traslación, orientando su ángulo de ataque hacia la trayectoria del proyecto.

También son utilizados tubos de ademe, dentro de los que se desliza libremente el tren de barras; éstos se utilizan por unas cuantas decenas de metros al iniciar la barrenación, como guía para el resto de la excavación. El primer tubo-ademe insertado al suelo es de mayor diámetro (exterior), permitiendo hincar el resto de la tubería con facilidad.

ETAPA 2: EXCAVACION DE ENSANCHAMIENTO

El objetivo de la primera etapa fué abrir la excavación hasta un diámetro mucho menor que el de la tubería de

Servicio de un extremo al otro (de una margen a la otra de un río, como se ejemplifica en la figura 3.25), sin excavaciones adicionales, lumbreras o pozos, únicamente introduciendo la barra con la dirección correcta hacia el objetivo.

En esta segunda etapa, la excavación inicial es ampliada hasta el diámetro final, que es un poco mayor que el diámetro de la tubería de servicio.

Para realizar la ampliación de la sección, se utiliza una cabeza ensanchadora con "chiflones" (figura 3.28), la cual es atornillada al tren de barras desde la margen de arriba, en el lugar de la barra guía. La máquina tracciona para jalar el tren de barras (utilizado en la etapa inicial) junto con la cabeza ensanchadora; durante éste proceso se introduce simultáneamente un nuevo conjunto de barras.

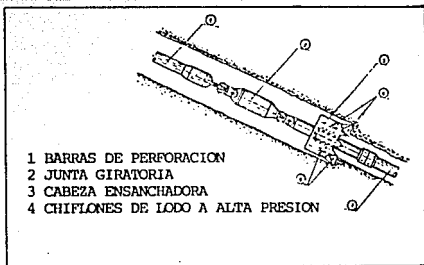


Figura 3.28. Cabeza ensanchadora con chiflones cortadores.
 Ref. 19, pág. 87.

La cabeza ensanchadora utiliza para el corte "chiflones" con bentonita, colocados perimetralmente (ver figura - 3.28). Simultáneamente al corte, la máquina tracciona a la cabeza para su avance. La bentonita es suministrada por el mismo tren de barras utilizado en la primera etapa, ésta junto con la rezaga, llenan el espacio de la nueva sección, ayudándole a su estabilidad.

La profundidad de corte es regulada con la velocidad de avance de la cabeza ensanchadora, éste parámetro se ajusta durante la perforación en forma indirecta. Al jalar la máquina el tren de barras junto con la cabeza de corte, el sistema hidráulico mantiene una presión constante, la cual, aumenta cuando la cabeza se incrusta contra el material duro y disminuye al vencer su resistencia, además, la unidad oleohidráulica del sistema de tracción es autoregulable, es decir, si aumenta la presión de tracción, automáticamente se reduce la velocidad de avance y en ese momento los "chiflones" concentran su energía cortadora sobre una misma área hasta fatigar al suelo duro, cortándolo. Cuando esto sucede, la presión del sistema de bombeo de la bentonita aumenta (puede llegar al límite, que es la presión calibrada en el sistema) y vuelve a disminuir cuando la cabeza de corte logra avanzar.

ETAPA 3: COLOCACION DE LA TUBERIA DE SERVICIO

Cuando se ha concluido el ensachamiento, la tubería de servicio se introduce a la oquedad, por medio del tren de barras que se introdujo en la segunda etapa; desde el extremo opuesto de la máquina, simultáneamente se extrae de la excavación la bentonita y el material de corte que se han acumulado dentro de la oquedad.

Detrás de la última barra, se coloca un cilindro con "chiflones", con el fin de quitar del paso el azolve acumulado para que pueda introducirse libremente la tubería de servicio. Entre ésta última y el cilindro limpiador, se coloca una junta giratoria para evitar esfuerzos de torsión (figura 3.29).

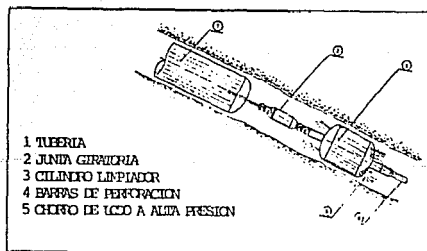


Figura 3.29. Tracción de la tubería de servicio hacia el interior de la oquedad. Ref. 19 pág 87.

Antes de introducir la tubería en el terreno se prepara, uniendo los tubos de acero con soldadura, y se sujeta a pruebas de radiografías en uniones y al paso de fluidos a presión.

Con este método se logran recorridos de 1500 metros -

con diámetros de hasta 500 mm.

3.4.2 GUIDE DRIL

El Guide Dril es una de las máquinas que utilizan el sistema de corte suave (Soft-Bor), y que realizan perforaciones dirigidas.

Es utilizado en zonas urbanas para el tendido de tuberías de conducción de gas, gasolina, agua, etc.

La perforación con esta máquina se inicia con un diámetro de 35 mm, introduciendo las barras en forma dirigida por medio de una plataforma de lanzamiento, normalmente con 17° de inclinación respecto a la horizontal, figura 3.30 a) y b). Posteriormente se ejecuta el ensanchamiento de la oquedad, para lo cual en el extremo opuesto de las barras se coloca una cabeza ensanchadora (que funciona como surtidor de los "chiflones" que ésta tiene) de 102 mm. Al mismo tiempo que se realiza el ensanchamiento, se jala la tubería de PVC hacia el interior de la oquedad para formar un diámetro interior final de 51 mm.

El alcance longitudinal de esta máquina es de 125 metros, con una precisión de 300 mm; puede funcionar hasta una profundidad de 2.4 metros, y generar radios de curvatura

vertical de 9.0 metros.

Es recomendable su uso en arcillas duras, aunque puede excavar en cualquier suelo (con tan sólo regular la presión de corte de los "chiflones"). En suelos donde hay rocas con dureza mayor que su capacidad de corte, puede tener problemas, aunque éstos, pueden ser resueltos cambiando fácilmente el trazo de la excavación sin grandes pérdidas de tiempo ni pozos adicionales.

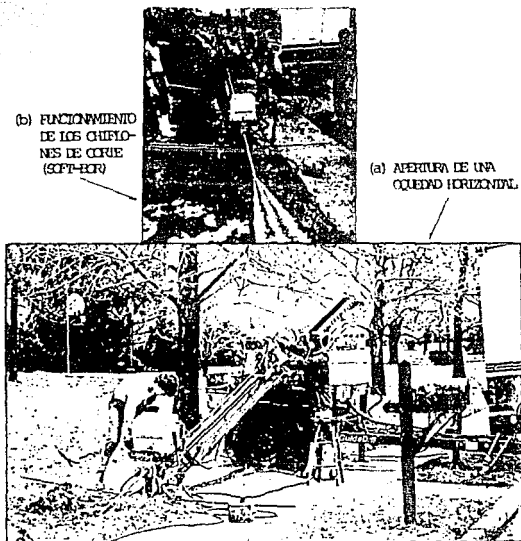


Figura 3.30 Equipo de perforación Guide Drill. Ref. 20, pág.15

3.4.3 Broca de Corte

Procesos:

Cortar: Perforación del barrenado piloto: se utiliza el sistema de corte suave (Soft-Bor) por medio de chiflones.

Perforación de ensanchamiento: corte con broca, la cual es movida con la misma presión del fluido de corte.

Rezagar: El mismo fluido a alta presión impulsa al material hacia el exterior de la oquedad.

Inserción: Durante el proceso de ensanchamiento, la tubería de ademe es introducida al interior de la oquedad y jalada a través de las barras.

Esta tecnología fué desarrollada por la Titán Construction de Sacramento, USA; y adquirida por la Reading and Bates Constructor, Co., Tulsa (USA). Se han llegado a realizar tendidos de tubería de hasta 1500 metros con un diámetro de 40 pulgadas (916.0 mm).

Esta técnica es similar a la de perforación suave, donde el chorro a presión es dirigido directamente contra el terreno para efectuar su corte; en la técnica con broca

el fluido de alta presión es utilizado para provocar el giro de una broca, la que se encarga de cortar el suelo; además, el fluido a presión transporta el material cortado hacia el exterior de la oquedad.

Esta técnica al igual que la de perforación suave ha sido desarrollada para atravesar cauces de ríos, donde las técnicas tradicionales (zanja a cielo abierto, colocación de un tubo puente, etc.) algunas veces no son soluciones aconsejables por los riesgos que se corren, ni fácilmente ejecutables en el caso de ríos caudalosos muy profundos.

El método se ha ido desarrollando y con el se ha alcanzado cruzar cauces con tendidos de tubería de más de 1500 metros y diámetros de 40 pulgadas (1000 mm).

El método consiste en una perforación inicial con un taladro piloto suavemente curvado (de 8" (203 mm) de diámetro), dirigido desde una margen a la otra, figura 3.31 a). Al igual que en la técnica de corte suave, las barras de perforación se introducen al suelo desde una de las orillas del cauce, con un ángulo de inclinación (de entrada) utilizando para ello la plataforma de lanzamiento (normalmente con un ángulo de 12°). En este caso, la perforación continua con dicho ángulo hasta colocarse por debajo de la profundidad del río, entonces, realiza su recorrido describiendo una curva

cóncava hasta alcanzar la posición horizontal, continuando así su trayectoria por debajo del río, a una profundidad fuera de riesgos (dragados: 10 metros generalmente), figura 3.31 a). Una vez que la perforación ha pasado por debajo del cauce comienza a ascender mediante otra curva cóncava para salir a la otra orilla con otro ángulo (normalmente de 8°) hacia el objetivo.

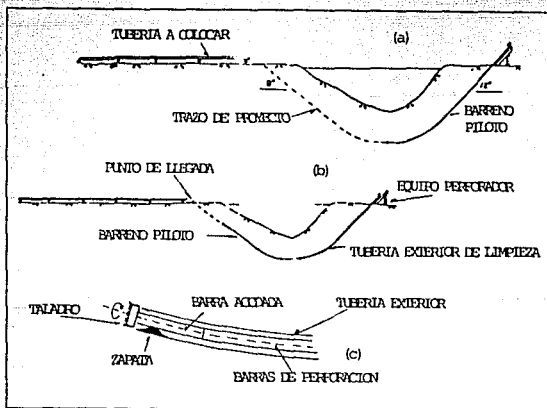


Figura 3.31 Aspectos de la técnica de Perforación Direccional con broca de corte. Ref. 2, pág. 244 y ref. 27.

- a) Perforación piloto.
- b) Introducción de la tubería de limpieza, haciéndola girar sobre la tubería del barreno piloto y ambas se empujan alternativamente a lo largo de la traza (según J.D. Hair G.E. Shiers).
- c) Detalle de la barra acodada (benhousing), se muestra la zapata que acentúa su excentricidad (Ref. 27).

La perforación se hace con lodo bentonítico, bombeado

al interior del taladro a través de la parte central de las barras de perforación, este flujo hace girar a un motor que a su vez, mueve a una cabeza de corte. Simultáneamente al proceso de corte, el lodo bentonítico actúa como fluido de refrigeración y como vehículo de transporte de los detritus de la perforación, los que arrastra hasta el pozo receptor en la superficie.

El motor esta montado sobre una barra acodada (curvada), con la cual se le logra dar a la perforación los efectos requeridos (lineales o curvos).

Se consigue un perfil recto o curvo guiando las barras de perforación a medida que son empujadas dentro del terreno. La dirección es controlada mediante la posición de la barra acodada (bent housing) y con la zapata metálica soldada a un lado de la tubería (es la encargada de acentuar la excentricidad de la barra acodada), figura 3.31 c). El avance del taladro piloto es registrado mediante un sistema de dirección especialmente diseñado.

Una parte del sistema de dirección es un instrumento colocado en el interior de una caja situada dentro de la sarta de barras (detrás del motor), el cual registra la posición exacta de la broca de perforación, respecto a los ejes X, Y y Z, referidos a un origen en la superficie del te-

rreno. Junto con la posición relativa del bent housing, esta señal es transmitida mediante emisiones de radio a la otra parte del sistema situado en la superficie, donde una computadora convierte a estas en datos observables y los graba en una pantalla CRT, y además, en papel. Una vez que la posición se conoce, se hace una comparación con la posición teórica que debería tener; si hay alguna desviación, se puede corregir girando las barras de perforación, situando al bent housing en la posición de la dirección correcta.

Mientras el taladro piloto progresa, los detritus de perforación se mezclan con la bentonita, aumentando la tensión contra las barras de perforación. Para relajar esta tensión se coloca una tubería de lavado de mayor diámetro que las barras (normalmente de 5", 130 mm), y la doble tubería se introduce empujándola alternativamente a lo largo de la traza, hasta que la sarta (tren de barras) y la tubería de lavado que le sigue salgan al otro extremo (figura 3.31 b). El tren de barras es retirado atrás, a través de la tubería de lavado, dejando la tubería de limpieza en su sitio para que actúe como sarta de arrastre en las dos operaciones siguientes, de ensanche, preensanche e inserción de la tubería hacia el interior de la oquedad. Según sea la longitud y el diámetro de la tubería a instalar, y las condiciones del suelo, estas operaciones se ejecutan separadas o simultáneamente.

El preensanche amplía la perforación hasta un diámetro ligeramente mayor que el de la tubería a instalar, para ello, se acopla una fresa cortadora al extremo del tubo de lavado. La máquina de perforación hace girar el tubo de lavado y a la fresa cortadora, a la vez que son traccionados a lo largo de la excavación (figura 3.32). Simultáneamente se introduce una nueva tubería de lavado, acoplada detrás del cortador.

La bentonita bombeada a través de la tubería de lavado transporta los detritus al exterior. La bentonita y la tubería de lavado aseguran la estabilidad de la excavación ensanchada.

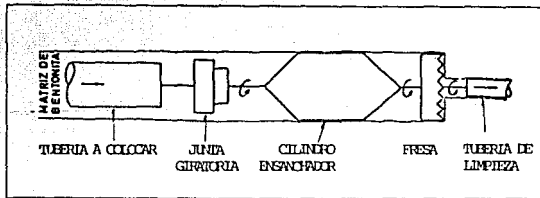


Figura 3.32. Ensanchamiento del barreno piloto: se tira de la tubería de limpieza, fresa y ensanchador haciéndolos girar a lo largo del camino perforado. La junta giratoria y la tubería a colocar viene detrás dentro de una matriz de bentonita. Ref. 2, pág. - 224.

Finalmente se instala la tubería definitiva; antes de instalarla, se tiende en toda su longitud, debidamente alineada sobre rodillos para ser pintada, soldada y examinada hidráulicamente con un fluido a alta presión. Para asegurar que las soldaduras han sido debidamente aplicadas se examinan con rayos X; para protegerla contra la corrosión se pinta con pintura epóxica. Para su instalación se acopla al cilindro ensanchador a través de una junta giratoria que le impide su rotación (ver figura 3.32). Para asegurar un mejor deslizamiento de la tubería a colocar, se lubrica la excavación con bentonita, la cual forma una matriz.

3.5 PERFORACION PERCUSIVA

Procesos:

Corte-compactación*: La apertura de la oquedad se lleva a cabo por la compactación del suelo, por el movimiento de una cabeza percusiva en vaivén.

Inserción: Al mismo tiempo que avanza la máquina hacia el interior del terreno, jala a la tubería que servirá de ademe.

* En lugar de Rezagu.

Modelo/Materiales de excavación:	Diámetro (mm)	Alcance (m)	Velocidad (cm/min)	Rendimiento (m/día)
BT40 (British Telecom) (Ref. 12, pág. 29). - Desde una arcilla dura o arena con cohesión - hasta un suelo con agua: difícilmente perfora en suelos sueltos.	40	60	1	—
GRUNDOMAT (Tracto-Técnicos) (Ref. 16). Suelos con cohesión o duros con algún cemento; tiene problemas cuando se excava en suelos con agua o sueltos.	45-180	30-60	18	—

Esta técnica es diferente a otras, ya que el corte del material (suelo o roca) se lleva a cabo por impactos, no hay rezaga por extraer (instantáneamente al cortar el material lo compacta).

Para introducir un clavo en un material duro no se requiere únicamente golpear con un martillo con frecuencia, sino también, aplicar cada golpe con un máximo impacto energético (fuerza necesaria para desplazarlo). En base a ese hecho están construidas las máquinas de perforación percusiva.

Se trata de un martillo neumático que transmite impactos con frecuencia contra una cabeza, ver figura 3.33, que adquiere un movimiento de vaivén, provocando corte y compactación en el terreno, lo cual se aprovecha para abrir una oquedad.

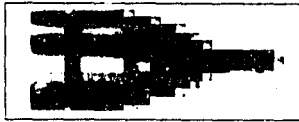


Figura 3.33. Cabeza percusiva.
Ref. 16.

En la figura 3.34 se presentan las partes de una máquina de perforación percusiva (BT40, British Telecom); para la cual se puede describir su funcionamiento como sigue: el aire que entra por el conducto (H) ejerce presión contra el pistón (I) en forma instantánea, provocando su desplazamiento, al final de su recorrido golpea al yunque de transferencia (C), y éste a su vez, le crea un movimiento muy rápido a la cabeza de impactos (E); en la parte trasera de la máquina el orificio (J) del ducto (H) también se desplaza hacia adelante, hasta coincidir con el escape (K), al alinearse éstos se produce una descompresión del pistón y una compresión en el émbolo equilibrador para contramarcha, generándose un movimiento hacia atrás. Posteriormente, el aire de contra-

marcha escapa. El resultado de este funcionamiento es el vaivén de la cabeza que se desplaza hacia atrás y hacia adelante (6 veces por segundo). El movimiento resultante de este trabajo es el desplazamiento del martillo percusivo hacia el interior del suelo.

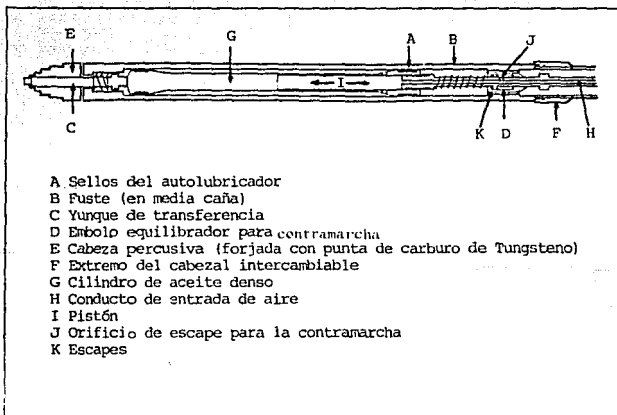


Figura 3.34. Máquina de perforación percusiva (BT40). Ref. 11, pág. 29.

El uso de esta máquina es muy simple, se coloca en una plataforma metálica sobre una media caña nivelable (figura 3.35); la plataforma puede estar en un hoyo o en cualquier desnivel del terreno. Al inicio de la perforación se excava

un poco a mano para introducir la cabeza percusiva; también es necesario que se ejerza una presión contra la máquina hasta que ésta se agarre al terreno.

El aire necesario para su funcionamiento es suministrado por un compresor.

Cuando las condiciones lo permiten, para dirigirlo se utiliza un cuadro con lente, nivel y estadal, como se muestra en la figura 3.35 a) y b).

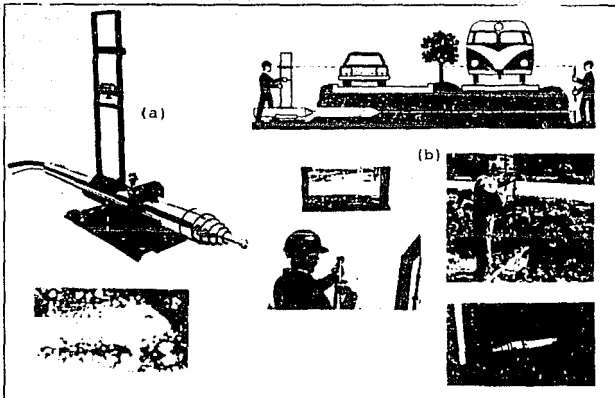


Figura 3.35. Aspectos de la técnica de Perforación Percusiva.
 a) Máquina de perforación percusiva (GRUNDOMAT).
 b) Aplicaciones.
 Ref. 16.

Una versión de estas máquinas (utilizadas en Francia) son las "Fusée GRUNDOMAT" (de Tracto-Techniques), las cuales pueden jalar tuberías de 45 a 180 mm de diámetro (ver la tabla siguiente). Las tuberías pueden ser de PVC, PE o acero.

TIPO DE GRUNDOMAT	45-E	65-E	75-E	95-E	110-E	130-E	145-E	180-E
DIÁMETRO DE LA CULEBRINA (mm)	45	65	75	95	110	130	145	180
LONGITUD DE LA MÁQUINA (mm)	900	1220	1400	1600	1850	1500	1850	2150
PESO (kg)	8	25	32	68	96	110	180	290
CONSUMO DE AIRE (m ³ /min)	0.45	0.70	1.00	1.20	1.80	1.60	4.50	4.50
NUM. DE GOLPES POR MIN. (min ⁻¹)	550	450	400	330	280	350	300	275
PRESIÓN MÁXIMA (bar)	7	7	7	7	7	7	7	7

Ref. 16.

Para reducir la fricción con el suelo se realiza la excavación con una máquina de diámetro mayor que el tubo, por ejemplo, es usual utilizar un diámetro de máquina de 75 mm y tubos de 63 mm.

El medio de perforación puede ser arcilla muy compresible, arena con o sin agua, en otros no podrá excavar, como es el caso de los suelos sumergidos con alto contenido de agua, donde se presenta el fenómeno de rebote elástico, generado por el agua atrapada en el interior del material. Para la perforación en suelos sueltos, con este tipo de máquina, es necesario mantener sobre ésta una presión axial, para su

mayor agarre con el suelo.

Con esta técnica se han podido realizar perforaciones horizontales de 30 a 60 metros a 10 m/hr.

3.6 TECNICA DE HINCAR TUBERIAS (PIPE-JACKING)

Procesos:

Método estático:

Inserción-corte: La apertura de la oquedad se lleva a cabo por la inserción directa en el terreno de una tubería (abierta o cerrada); para lo cual, se utilizan gatos hidráulicos que empujan la tubería hacia el interior del suelo. El corte se realiza solamente en el perímetro del tubo frontal o tubo piloto, el cual lleva en el frente un anillo metálico con filo.

Limpieza-extracción

De rezaga: es un proceso que se lleva a cabo al terminar la inserción de la tubería. Se utilizan chiflones de agua con arena o varillas de serpentín para la limpieza de la tubería (que normalmente queda retacada de material).

Método dinámico:

Inserción-corte: La tubería se inserta en el suelo por medio de una máquina neumática.

Limpieza: Se realiza con la inyección de agua a presión o por medios mecánicos con varillas helicoidales.

Modelos comerciales:

Modelo/Materiales de excavación:	Diámetro (mm)	Alcance (m)	Velocidad (cm/min)	Rendimiento (m/día)
GRUNDORAM (Tracto-Techniques) (Ref. 16). Desarrolla una - fuerza de empuje - de 80 a 1000 ton. Recomendable en - suelos sueltos y arenas con baja - cohesión.	145-450	30-40	8-16	--
GATOS HIDRAULICOS TUBO PILOTO Suelos blandos y - arenas.	25-2000	30-50	1-4	5-10

El término hincar se emplea cuando a un tubo o varilla se le aplica una fuerza de empuje con el fin de provocar su inserción en algún material.

En casi todas las técnicas de minitúnel la etapa de excavación o perforación se realiza simultáneamente al proceso de empuje de tubos para su inserción en el suelo o roca. En este caso, la técnica de hincar tubos se refiere a un empuje sobre la tubería para su inserción directa en el suelo.

El proceso de abrir oquedades con este método implica dos etapas: la primera donde se hincan o insertan los tubos en el terreno, y la segunda, cuando se retira el material excavado.

La técnica tradicional utiliza el método estático para el hincado de las tuberías: por medio de gatos hidráulicos para el empuje. Tracto-Techiques en Francia, ha desarrollado el método dinámico para la inserción directa de tuberías (construyendo la máquina GRUNDORAM, versión Pousse-Tube)

por medio de un sistema de percusión (que es una adaptación de la GRUNDOMAT).

Cuando se utiliza el método estático para el hincado de tuberías, en la primera etapa intervienen los siguientes elementos (ver figura 3.36 a) y b):

- Tubo piloto.
- Corona de empuje.
- Gatos hidráulicos.
- Plataforma de lanzamiento.
- Atraque.
- Unidad hidráulica.
- Equipo de topografía.

El proceso consiste en abrir una lumbrera, llamada de lanzamiento, puede ser rectangular o en círculo. En el fondo de ésta se construye una plantilla de concreto simple sin pendientes, sobre la que se coloca la plataforma metálica de lanzamiento, también llamada 'cuna', la que queda nivelada y anclada al piso.

En la parte trasera de la lumbrera se coloca una estructura metálica de atraque, o se construye un muro de concreto reforzado con una cara plana; será aquí donde el gato o gatos se apoyen para transmitir su empuje a la tubería.

El cilindro hidráulico (gato) se coloca sobre la cuna apoyando la parte trasera en el atraque; en la parte de adelante de la cuna se disponen los tubos para su inserción. En la parte frontal del vástago del gato de empuje se coloca la corona de empuje, que sirve de acoplamiento entre la tubería y el cilindro hidráulico. Tiene como función distribuir uniformemente el empuje sobre el perímetro de apoyo del tubo, y además, como anillo de pivoteo para corregir desviaciones.

Cuando se ha colocado sobre la cuna un tubo para ser insertado, el vástago del gato se encuentra retraído; para iniciar su inserción se pone en marcha la unidad hidráulica, suministrando aceite a presión al gato, entonces, el vástago se desplaza, empujando al tubo hacia el interior del terreno; los tubos insertados se van uniendo con soldadura.

El tubo piloto realiza las siguientes funciones:

- El corte del suelo por penetración estática.
- La compactación del suelo, con el fin de reducir la fricción de los tubos subsecuentes.

Para realizar estas dos funciones el tubo piloto cuenta con las siguientes características:

El tubo piloto es normalmente de acero con un filo perimetral en la parte frontal, como se muestra en la figura 3.36 b; cuando es de concreto cuenta con un anillo de acero afilado, el filo penetra en el suelo provocando su corte. El material de la zona A (Como se muestra en la figura 3.36 a) entra en el interior del tubo piloto, donde la fricción del suelo con el tubo es máxima (zona E); dado que el diámetro interior de los tubos subsiguientes es un poco mayor al del tubo piloto, la fricción interna disminuye, pero conforme la longitud de la tubería insertada se incrementa, las fuerzas friccionantes se van adicionando. El suelo de la zona B es el primero en fallar, debido a la carga axial que le transmite el anillo afilado, al sucitarse la falla del material de esta zona, el anillo penetra provocando grandes deformaciones al suelo, plastificación y compactación del terreno sobre el exterior del tubo piloto. El material que se encuentra inmediatamente detrás del anillo afilado (zona C) se encuentra altamente compactado y las fuerzas friccionantes que se generan son muy altas. Para disminuir este efecto, y que no trascienda a lo largo de la tubería, algunas veces se le construye al tubo piloto una costura de soldadura anti-friccionante en forma helicoidal, como se aprecia en la figura 3.36 b); otras veces para restar este efecto de fricción, se utiliza el tubo piloto de mayor diámetro que el de los tubos subsiguientes. En la zona D se observa como las costuras helicoidales ayudan a comprimir al suelo, abriendo más la oquedad para facilitar

la inserción de la tubería.

Cuando los tubos son de concreto en la parte trasera se les coloca un anillo metálico (empotrado) para evitar su despostillamiento.

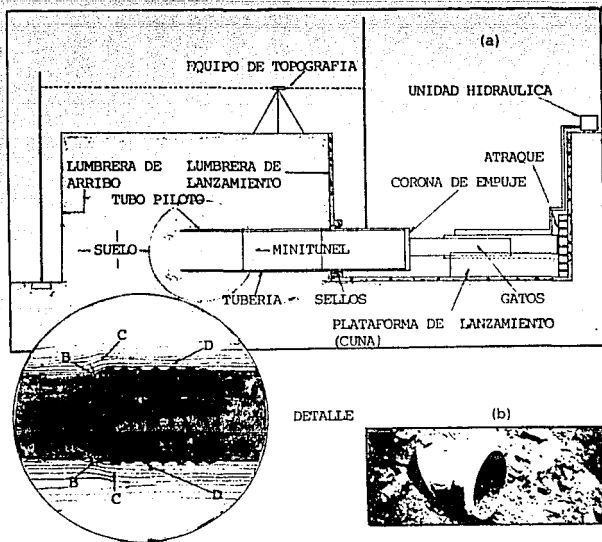


Figura 3.36 Inserción de tuberías por el método estático. Ref. 27 y ref. 16.

La inserción directa de tuberías (hincado) por el método dinámico (con la máquina GRUNDORAM) consiste en insertar

la tubería en el suelo por medio de golpeo, con un equipo neumático similar a un martillo de aire. En el proceso de inserción intervienen los siguientes elementos (ver figura 3.37):

- Tubo piloto de acero.
- Máquina de percusión neumática (GRUNDORAM).
- Cadenas de sujeción.
- Compresor.
- Casco de acoplamiento.
- Pieza intermedia para la rezaga.
- Plataforma con sistema de nivelación neumática.
- Equipo de topografía.

El proceso constructivo es similar al hincado de tuberías con el método estático.

Se abre una zanja o se realiza un corte vertical, como se observa en la figura 3.37; frente a la pared de ataque se coloca el primer tubo piloto sobre una cama de viguetas metálicas o de madera, colocados transversalmente a la tubería hincada, y sobre un piso debidamente nivelado. Posteriormente se acopla la máquina GRUNDORAM al tubo; debido a que normalmente los tubos a hincar son de diámetro diferente al de la

máquina de impactos, se utiliza un casco de acoplamiento que se ajusta a los dos diámetros. Detrás del cople, se coloca una pieza intermedia con una ventana para retirar el material de la excavación (la ventana de desfogue es muy usual cuando el material de excavación puede fluir fácilmente, como es el caso de las arenas sin cohesión). Colocadas estas dos piezas intermedias, la máquina se sujeta a la tubería con cadenas debidamente tensadas. La máquina de impactos se coloca sobre una plataforma con sistema de nivelación neumática y cuando ha quedado debidamente nivelada y sujeta, se procede a instalar el compresor por medio de mangueras de alta presión. El proceso de hincado inicia al poner en marcha el compresor, realizándose en el interior de la máquina el movimiento de vaivén del yunque golpeador que impacta contra el tubo (funcionamiento similar al de la máquina BT40, figura 3.34).

Al insertar el primer tubo, la máquina se recorre hacia atrás para disponer el siguiente; para la unión de un tubo con otro tubo se utiliza soldadura, la cual se aplica después de que el tubo se ha nivelado y sujeto a la máquina de impactos.

La presión y la cantidad de aire requeridas se regulan durante el proceso, según las necesidades que se presentan durante la inserción, para lo cual, se utilizan válvulas neumáticas a la salida del compresor.

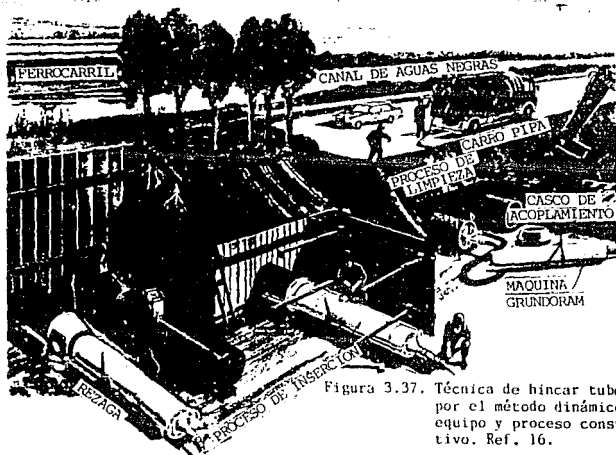


Figura 3.37. Técnica de hincar tuberías por el método dinámico: equipo y proceso constructivo. Ref. 16.

Algunas especificaciones técnicas de las máquinas percusivas GRUNDORAM aparecen en la tabla siguiente:

TIPO DE GRUNDORAM	TITAN	OLYMP	HERKULES	GIGANT	KOLOSS	GOLIATH
DIAMETRO (mm)	145	180	220	260	350	450
LARGO (m)	1.60	1.70	1.85	1.90	2.30	3.20
PESO (kg)	180	290	410	600	1300	2800
CAUDAL DE AIRE (m ³ /min)	4-5	7-8	6-7	10-12	20	35-36
PRESION (bar)	6-7	6-7	6-7	6-7	6-7	6-7
NUM DE GOLPES POR MIN (min ⁻¹)	280	280	265	250	200	170
DIAMETRO DE TUBO A PARTIR DE (mm)	100	100	120	200	280	380

Ref. 16.

Cuando ha concluido la inserción de la tubería por cualquiera de los dos métodos, ésta se encontrará retacada de material; para su limpieza se utiliza aire comprimido y

agua a presión, como se observa en las figuras 3.37 y 3.38. La limpieza se lleva a cabo colocando en un extremo de la tubería una manguera para suministrar agua y/o aire a presión, ver figura 3.38 a) y b). Se introduce dentro del tubo la manguera, conectada por medio de un cilindro y un cople atornillado. El cilindro tiene un orificio intermedio y está construido de hule o neopreno, el que se expande al recibir la presión del agua o aire, funcionando como sello expansivo; el agua y el aire empujan al suelo hacia la salida de la tubería (como se muestra en la figura 3.38 c). Cuando este método no es próspero, se utilizan métodos mecánicos para la limpieza.

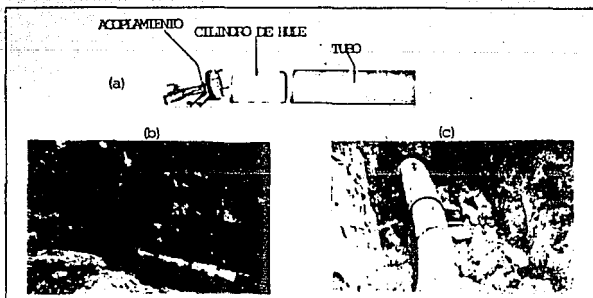


Figura 3.38. Limpieza del tubo hincado. Ref. 16.

- a) Se muestra el acoplamiento y el cilindro de hule o neopreno.
- b) Instalación de la manguera de agua y/o aire.
- c) Se observa el material después de ser extraído de la tubería.

La técnica de hincar tuberías se utiliza para cubrir

tramos cortos, normalmente de 30 a 40 metros, aunque con la GRUNDORAM se han alcanzado longitudes de 84 metros.

La velocidad de inserción de los tubos con la GRUNDORAM es de 8 a 16 cm/min; y puede desarrollar empujes de 80 hasta 1500 toneladas.

La precisión con que se llega a la lumbrera de arriba se puede considerar baja si se compara con los miniescudos que poseen sistema de Telecontrol y Telemetría para su dirección, sin embargo muchas veces no afecta al proyecto llegar con algunos centímetros de error.

Los diámetros de los tubos utilizados son desde 25 hasta 1500 mm. Cuando se utiliza el método estático pueden ser de concreto o de acero, y para el método dinámico son empleados únicamente tubos de acero.

3.7 TECNICA DE REVENTAR TUBERIAS (METODO PIPE BURSTING)

Procesos:

Rotura de la tubería: El método consiste en destruir la tubería vieja e insertar otra de menor diámetro; la rotura del tubo viejo se realiza con un equipo neumático (buster).

Inserción: A la vez que se realiza la destrucción de la tubería vieja, el mismo cabrestante que jala a la máquina tracciona a la nueva tubería hacia el interior de la oquedad.

Modelos comerciales:

Modelo/Materiales de excavación:	Diámetro (mm)	Alcance (m)	Velocidad (cm/min)	Rendimiento (m/día)
PNEUMATIC-PUNCHER PPL 15 ^s (Ref. 1. . . pág. 18). Para reventar tuberías de concreto - simple (sin acero). (Tiene un consumo de aire de 4.9-7.0 m ³ /min a una presión de 120 lb/pulg ²).	155-300	100	240	--

La sustitución de tuberías dañadas sin necesidad de abrir zanjas es parte de las técnicas del microtúnel.

El método PIPE BURSTING (reventar tuberías) consiste en insertar una tubería dentro de otra ya existente, para lo cual la tubería es fracturada totalmente y comprimida contra

el terreno circundante; lo que indica que la tubería a reemplazar no podrá ser de diámetro mayor que la existente.

La rotura de la tubería se lleva a cabo con un equipo reventador neumático (Buster), como el que aparece en la figura 3.39.

El reventador de tubos tiene en la parte frontal una serie de orificios por los que despidе aire, ejerciendo presión contra la pared de la tubería, provocándole un estado de tensión (un efecto de cuña), por otra parte, al mismo tiempo la unidad reventadora es jalada con gran fuerza, con un cobrestante hidráulico de tensión constante (de 2.5 toneladas) desde el pozo de arriba; estos dos efectos (tensión transversal y tracción axial) producen la rotura total de la tubería.

El cable de tracción se cruza por dentro de la tubería vieja y se conecta al rompedor como se aprecia en la figura 3.39 c).

La velocidad de destrucción con la unidad reventadora es de aproximadamente 4 cm/seg, lo que significa que un tramo de tubería de 100 metros se reemplazaría en menos de 3/4 de una hora.

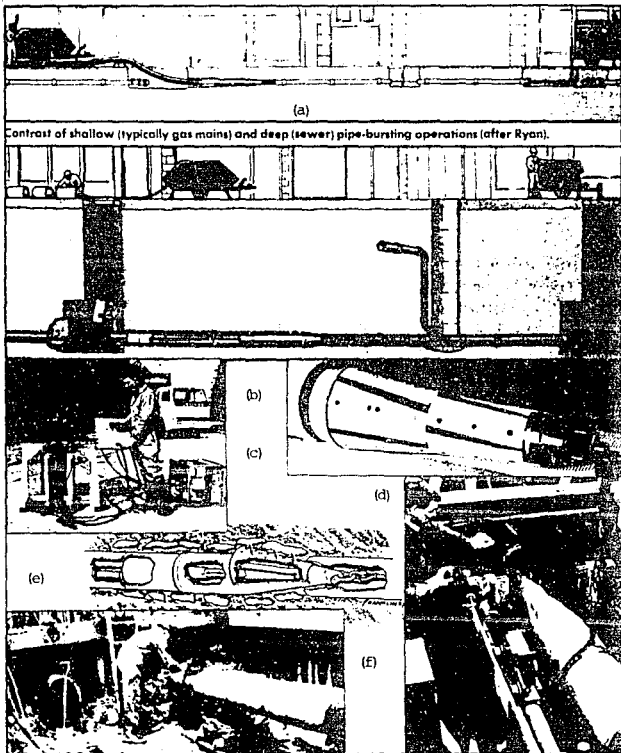


Figura 3.39 Método Pipe Bursting. Ref. 25, pág. 26.

- a) Proceso constructivo. b) Cabeza reventadora hidráulica.
 c) Equipo de tracción del reventador. d) Avanzado del proceso.
 e) Rompeor en operación. f) Inserción del reventador en la tubería vieja.

Una vez destruida la tubería antigua ha quedado el espacio libre para colocar la nueva. Para la colocación de ésta se utiliza el mismo equipo de tracción; la tubería es jalada por la unidad reventadora simultáneamente al proceso de destrucción.

3.8 TENDENCIAS FUTURAS.

la técnica del microtúnel esta en expansión en todos los países con alto nivel de industrialización y en aquellos donde se están desarrollando grandes concentraciones urbanas; cada día hay que construir más conductos de agua potable, de drenaje, teléfono, gas, oleoductos, etc., muchas de las veces estos trabajos de construcción se realizan dentro de áreas urbanas, para lo cual la técnica de apertura de zanjas (trincheras) para la colocación de tuberías enterradas, resulta en la mayoría de los casos inadecuada por las molestas repercusiones sociales.

Todos estos trabajos en la mayoría de los casos pueden realizarse sin necesidad de afectar grandes áreas superficiales, este es el objetivo de la técnica del microtúnel.

Esta tecnología, para su desarrollo futuro, necesita del avance tecnológico de los métodos de detección y localiza-

ción de posibles obstáculos bajo el terreno: grandes boleos, pilotes desviados, coladeras enterradas, trozos de banquetas, ductos de gas, colectores en servicio y en general cualquier conducto que pudiera ser dañado por la construcción de la nueva oquedad.

Actualmente se están desarrollando técnicas de detección subterránea, basadas en la utilización del radar y en otras técnicas de prospección geofísica.

El futuro de los microtúneles demandará una localización previa y precisa de la situación de las tuberías y obstáculos que pudieran ser afectadas o entorpecer la construcción de los nuevos microtúneles. Este es un punto en el que se requiere avanzar rápidamente.

Debido al alto costo que implica adquirir estos equipos se ha estancado su uso, por tal motivo, es imperante desarrollarlos de tal manera que resulte económica su aplicación, y así, el margen de competencia del microtúnel sea mayor.

Además, el enemigo número uno de la tecnología del minitúnel es la multitud de tuberías, cables, conductos, viejas tablaestacas de madera y otros servicios de nuestra sociedad moderna.

Un concepto ideal de detección, es conseguir un registro continuo que barra todo el ancho de la calle, y que, en una única pasada, pueda identificar y trazar cada servicio, su tipo, el material de fabricación, la alineación, la profundidad, el diámetro y además, si está en servicio o abandonado; todos estos datos, permitirán diseñar adecuadamente el nuevo trazo del microtúnel.

La dirección automática de los equipos será una de las exigencias futuras en el desarrollo del microtúnel. En la actualidad, la mayoría de los equipos se opera en forma semiautomática, basándose en resultados topográficos, mientras el futuro exige una preprogramación que permita a los equipos adaptarse a curvas o tangentes predeterminadas.

Entre las técnicas actuales que tienen un futuro prometedor, está la técnica de reventar tuberías (Pipe Bursting), aplicada a la industria del gas, agua, tendido de tuberías para colectores, etc.

El futuro tecnológico traerá innovaciones como las siguientes:

- Utilización de "Chips" para comandar la dirección preprogramada del pequeño túnel, y la utilización de robots que hagan el trabajo dentro de las tuberías.

- Utilización del rayo laser como medio de control direccional.

- Utilización del rayo laser para destrucción de obstáculos, y además, para que realice el corte de la pared del registro para la conexión de la tubería.

- Utilización del laser para convertir las arenas de sílice en tuberías de vidrio y la arcilla en tuberías de arcilla vitrificada.

- Colocación instantánea de revestimientos "instant set" (revestimiento de materiales extruidos).

- Tendencia a utilizar pozos de dimensiones más reducidas.

Ver referencia 2 en las páginas 248 - 249.

3-9 COMENTARIOS SOBRE LA ESTABILIDAD PARA CADA TECNICA

la teoría de la inestabilidad de túneles presentada en el capítulo 2 representa las condiciones más críticas de la excavación de oquedades. Se refiere a excavaciones lentas, realizadas con métodos convencionales, para grandes secciones, etc.; donde es muy factible que se genere el dese-

equilibrio de los tres prismas del mecanismo simplificado de falla (figura 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4): por el avance lento y sin soporte de la clave de la oquedad el prisma 3, al dejar sin confinamiento durante largo tiempo el frente de ataque el prisma 1 y 2.

Las técnicas del microtúnel se desarrollan en tiempos cortos generalmente, por otra parte, el frente de excavación o perforación se mantiene siempre confinado, ya sea en forma mecánica, por el cortador o broca y en otros casos en forma hidráulica a través del lodo de excavación. De manera que una operación sincronizada y equilibrada de los equipos de perforación o excavación, eliminan prácticamente toda posibilidad de inestabilidad.

En los miniescudos, en las máquinas Auger y en el método de inserción directa de tuberías (tuberías hincadas), el mismo cilindro piloto (primer tubo o casco de la máquina) se va insertando en el terreno, actuando como soporte temporal, y de esta forma se reduce hasta cero la longitud sin apoyo temporal (la variable "a" del mecanismo simplificado de falla, ver figura 2.4) que es la que genera al prisma 3.

Para el caso de las máquinas de perforación direccional (con sistema de perforación suave o con broca de corte) el mismo flujo de lodo o bentonita utilizados para el corte

del material, sirven de ademe a la excavación. Cuando el flujo a alta presión ha excavado, se desplaza hacia el interior de la oquedad arrastrando los detritus cortados, almacenándose a lo largo de toda la perforación y sirviendo de esta manera de soporte; bajo estas condiciones es muy difícil que se genere la inestabilidad, tanto de las paredes de la oquedad como del frente de ataque.

Con el método de perforación percusiva, no hay posibilidad de falla del frente por desconfinamiento; ya que, cuando un suelo es compactado con la humedad óptima, adquiere mayor resistencia al esfuerzo cortante, y para este caso, favorece a la estabilidad de la oquedad. En suelos muy compactos (con baja relación de vacíos) si se forza a la máquina a penetrar en el terreno, puede generar bufamientos superficiales.

En la técnica de tubos hincados, el fenómeno de inestabilidad puede ser importante cuando se inserta un tubo abierto por el frente. Conforme la tubería se inserta el material va ingresando hacia la tubería hincada, y éste sirve de soporte al suelo del frente, por lo que es importante que no sea retirado hasta no concluir el hincado de la tubería. Este caso se puede hacer crítico en arenas sin cohesión y en arcillas expansivas.

En la figura 3.40 se muestran algunas de las parti-

cularidades de estabilidad para cada una de las técnicas del microtúnel.

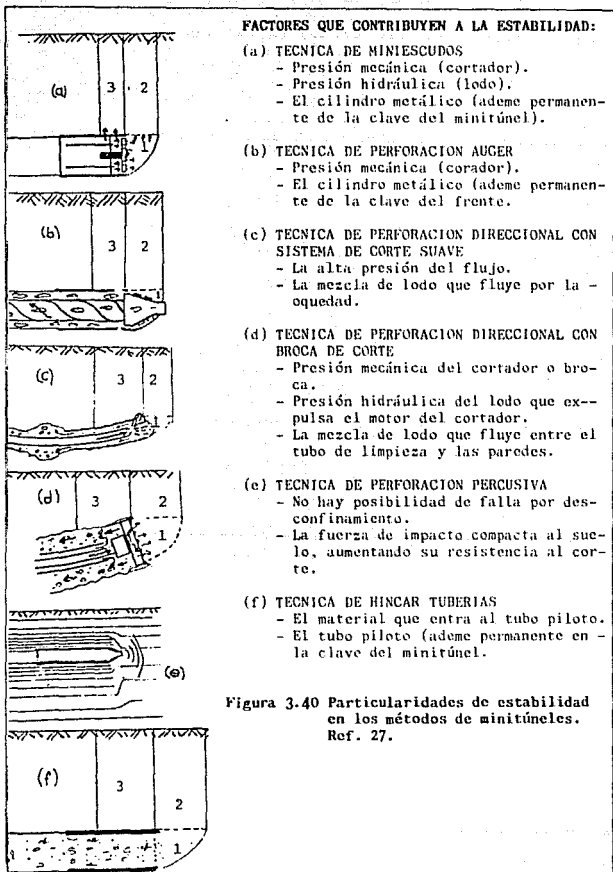


Figura 3.40 Particularidades de estabilidad en los métodos de minitúneles. Ref. 27.

CAPITULO 4

APLICACIONES INGENIERILES

Las redes de tuberías o conductos subterráneos que se han tenido que alojar bajo otras infraestructuras como canales, ríos, vías férreas, vialidades, pistas aéreas, etc., se han construido a un alto costo económico y social, ocasionando la paralización del flujo, operación u otros, esto se a dado debido a las limitaciones que en estos casos presenta el método de apertura de zanjas. Hoy en día esas obras pueden realizarse utilizando alguna de las técnicas de los minitúneles, afectando en lo más mínimo a la infraestructura existente.

4.1 MICROTUNEL BAJO EL CANAL NACIONAL

4.1.1 Antecedentes.

El proyecto consiste en la construcción de un ducto bajo el cauce del Canal Nacional, localizado en la parte sur de la Ciudad de México, para enlazar dos redes de

agua potable. Para esto se recurrirá al empleo de alguna de las técnicas de los microtúneles.

Las necesidades hidráulicas del proyecto requieren que la tubería tenga un diámetro interior de 40 pulgadas (101.6 cm) como mínimo, y una pendiente del 2 % hacia la margen izquierda del canal.

La longitud del microtúnel es de 60 m, aproximadamente, figura 4.1

4.1.2 Estudio Geotécnico.

Se realizó un levantamiento topográfico para definir elevaciones y cadenamientos, así como, dos sondeos mixtos, uno en cada margen del canal, figura 4.1, de donde se obtuvo la estratigrafía del lugar y las propiedades índice y mecánicas del suelo.

En el sondeo SM-1, que se realizó en la margen derecha del canal, se encontró en los primeros 2.60 m un relleno formado por un limo poco arcilloso de color café claro y con gravillas, entre los 2.60 y 3.80 m arena fina y media limosa de color café claro con gravillas; más abajo, entre 3.80 y 5.20 m se encuentra un limo arenoso con gravas de hasta 3/4", y entre 5.20 y 11.0 m aparece una capa de arcilla limo arenosa, figura 4.2.

En el sondeo SM-2 realizado en la margen izquierda del cauce, aparece en los primeros 3.20 m un relleno formado por arcilla con gravas con pedacería de tabique y materia orgánica. Entre los 3.20 y 3.65 m, se halla una arcilla orgánica con gravas; más abajo de 3.65 a 4.40 m yace un limo café oscuro y negro; entre 4.40 y 4.65 m apareció una lente de arena fina y media pumítica; a los 4.65 m inicia un estrato de arcilla de color café verdoso con vetas de arena fina pumítica y entre los 6.80 y 11.20 m aparece la misma arcilla pero estratificada con fósiles y materia orgánica con intercalaciones de limo arenoso, figura 4.6.

De la correlación estratigráfica de los sondeos SM-1 y SM-2 se puede inducir que el microtúnel se construirá a través de un estrato de arcilla limosa con algunas vetas de arena fina pumítica y materia orgánica.

Los resultados de las pruebas de laboratorio aparecen en las figuras 4.2 a la 4.9.

4.1.3 Factor de Seguridad del frente de excavación.

La zona más crítica del proyecto se ha considerado que será por debajo del canal, ya que sólo se cuenta con una cobertura de suelo de 2.0 m, y 2.0 m más de agua y azolve, dónde este último no contribuye a la resistencia del terreno.

Para definir la técnica constructiva enseguida se

evaluará el Factor de Seguridad (FS).

Al estimar la zona de influencia, definida por Z_d y medida a partir de la clave del microtúnel, de los esfuerzos cortantes producidos por la descarga del frente del pequeño túnel al realizarse la excavación, se tiene que la altura $Z_d = 1.70D = 1.70(1) = 1.70$ m, donde D es el diámetro de la sección transversal del microtúnel, lo cual significa en términos prácticos que al provocarse la posible falla del frente de excavación está sucedería dentro de un estrato inestable, ya que es el único estrato resistente que forma la cobertura de la excavación bajo el tramo del canal y que sirve de soporte a las aguas residuales, por lo que en el caso extremo, al suciturse la falla del frente de excavación se canalizarían las aguas del cauce hacia el interior del microtúnel, por lo que para evaluar este riesgo, FS, se ha propuesto el mecanismo simplificado del equilibrio del frente, como se muestra en la figura 4.10.

Para evaluar el FS del frente de la excavación, se empleará la fórmula general del capítulo 2.

Para determinar la resistencia al esfuerzo cortante del prisma 2 (figura 4.10) se emplean los resultados de la prueba a la compresión simple del sondeo SM-2 (figura 4.9) y las siguientes fórmulas:

$$\Delta \sigma_2 = C_2 + \bar{\sigma} \tan \phi_2$$

dónde:

$\Delta \sigma_2$: Resistencia al esfuerzo cortante arriba y al

frente de la clave de la excavación.

$\bar{\sigma} = \sigma - \mu$: Esfuerzo normal efectivo.

σ : Esfuerzo normal total.

μ : Presión neutral del agua.

ϕ_2 : Angulo de fricción interna del material.

C_2 : Cohesión del terreno.

$$\mu = (\sigma I - \sigma III) / 3 \quad (\text{Según ref. 9}).$$

σI : Esfuerzo principal mayor.

σIII : Esfuerzo principal menor (ver figura 4.9).

Al substituir valores en la ecuación de μ se

obtiene lo siguiente:

$$\mu = (2.29 - 0.5) / 3 = 0.60 \text{ kg/cm}^2$$

El valor del esfuerzo normal total según la gráfica de la figura 4.9 es $\sigma = 1.25 \text{ kg/cm}^2$.

Por lo tanto: $\bar{\sigma} = 1.25 - 0.60 = 0.65 \text{ kg/cm}^2$.

El valor de la cohesión del terreno $C_2 = 0.65 \text{ kg/cm}^2$ y

$$\phi = 9.5, \text{ según la figura 4.9.}$$

Por lo tanto: $Sm_2 = 0.65 + 0.65 \tan 9.5 = 0.76$.

Cuando se emplea la técnica de inserción directa el prisma No.3 del mecanismo simplificado del equilibrio del frente no se genera (capítulo 2), debido a que el avance de la excavación se realiza con soporte temporal ($a = 0$) y por consecuencia la resistencia del prisma 3 no se genera ($Sm_3 = 0$).

Por otra parte el valor de c , que se refiere la

fórmula del factor de seguridad, es la cohesión del terreno que se encuentra en el frente de excavación, por lo que se utilizará la cohesión obtenida en el sondeo SM-1 a la profundidad de 6.0 m (fig. No. 4.6), $c = 0.540 \text{ kg/cm}^2$. Así mismo el ángulo de fricción interna, $\phi = 9^\circ$. El valor de K_a se estima igual a 1.0 ($K_a = 1.0$) y $\gamma = 1.338 \text{ ton/m}^3$.

La base del prisma 2 vale:

$$x = A \tan (45^\circ - \phi/2)$$

$$x = 1.0 \tan (45^\circ - 9/2)$$

$$x = 0.85 \text{ m}$$

Substituyendo en la fórmula general del factor de seguridad se obtiene:

$$FS = \frac{\frac{2(7.6-0)}{(1+\frac{0}{0.85})^2} + 2(0) \frac{1.70}{1} + \frac{2(0)}{(1+\frac{0}{0.85})\sqrt{1}} (\frac{1.70}{1}) + \frac{3.4(5.4)}{(1+\frac{0}{0.85})^2\sqrt{1}}}{1.457(2.0) + \frac{2}{3(\frac{2}{1})(1+\frac{0}{0.85})^2}}$$

$$FS = 11.40$$

Para determinar la técnica de microtúnel habría que tomar en cuenta otros factores, aún cuando el FS resultó mucho mayor que 2.0. Hay que considerar que los sondos sólo son representativos y puntuales. Además, el material donde se excavará el microtúnel no es homogéneo presenta erraticidad, lentes de arena, materia orgánica, fósiles e incluso azolve en poca cobertura (tan sólo dos veces el diámetro), esto hace pensar en la posibilidad de un alto flujo por permeabilidad del agua del canal hacia el frente de excavación durante la construcción, que podría ocasionar la tubificación del suelo, provocando graves problemas, por lo que no es recomendable, en principio, que el frente de ataque sea abierto, para evitar un posible flujo de material hacia el interior de la quedada, lo cual se debe tomar en cuenta en la selección del equipo y definición del proceso constructivo.

Las dos alternativas que se podrían sugerir para la construcción del microtúnel son:

- 1) Utilizar un miniescudo de frente cerrado para mantener durante la excavación un gradiente de presión positivo para equilibrar las presiones del suelo y agua.
- 2) Emplear el proceso de inserción directa (Hincado

de tubos), sin extraer el material de la oquedad, sirviendo éste de soporte frontal, hasta que se concluya la excavación por lo menos hasta después de cruzar totalmente el fondo del cauce.

Por razones de disposición de equipo se ha elegido para el proyecto la segunda alternativa.

4.1.4 Proceso Constructivo.

El proceso se refiere a la construcción de la oquedad empleando la técnica de hincar tuberías con el método estático, el cual consiste en lo siguiente:

- 1) Aislar la zona de trabajo, reservar espacios para el almacenamiento de equipo y materiales, con el fin de agilizar las maniobras.
- 2) Construir las lumbreras "A" y "B", de lanzamiento y arribo respectivamente, como se muestra en el plano de la figura 4.11.
- 3) Construcción del emportalamiento y fijación del sello de neopreno perimetral en la entrada de la oquedad.
- 4) Fijar en el fondo de la lumbrera la plataforma

de lanzamiento y los tubos de apoyo debidamente nivelados, como se muestra en la figura 4.12.

- 5) Instalar el sistema de empuje (gatos) sobre la plataforma de lanzamiento, alinear y nivelar con equipo de topográfico de precisión.
- 6) Colocar el tubo piloto, dispuesto a ser insertado por presión en el terreno.
- 7) Acoplar o soldar tubos de 1.50 m de longitud detrás del tubo piloto hasta llegar a la lumbrera de arriba "B".
- 8) Limpiar el interior del microtúnel extrayendo la rezaga (al concluir la comunicación entre ambas lumbreras "A" y "B"), utilizando primeramente el método de limpieza por presión de agua y aire y/o un método mecánico.
- 9) Sellar (calafatear) los emportalamientos de ambas lumbreras para evitar futuras fugas de agua.
- 10) Colocar los acoplamientos entre el microtúnel y las tuberías existentes.
- 11) Sellar las lumbreras con tapas ciegas.

En el proceso constructivo se ha considerado que el tubo piloto será de frente abierto, lo que permite que el material que va entrando al interior de la tubería durante el hincado, establezca el frente de excavación, condición que se ha sugerido como necesaria para prevenir que no falle el frente de ataque.

El sello de neopreno que se ha sugerido dentro del proceso constructivo, es aquel que se coloca perimetralmente en el portal del inicio de la oquedad para prevenir que el suelo y agua fluyan hacia el interior de la lumbrera de lanzamiento durante la ejecución de la obra (figura No. 4.12), ya que se espera que en una condición desfavorable se generen presiones hidrostáticas por la presencia de las aguas del canal.

4.1.5 Fuerzas Resistivas.

Durante la inserción de la tubería en el terreno se generan fuerzas friccionantes y de adherencia que se oponen a su desplazamiento. Es muy importante la evaluación de tales fuerzas resistivas para el diseño de la estructura de atraque, selección del equipo de corte y empuje, y adaptación del proceso constructivo.

Ya que el material por el que se realizará la tubería es principalmente arcilla saturada, se considera

que durante la inserción sólo se generarán fuerzas de adherencia.

Evaluación de las Fuerzas Resistivas.

En el anexo No. 3 se presenta un estudio para la evaluación de las fuerzas resistivas, donde se emplea la siguiente fórmula empírica:

$$W_R = \left(\sigma_x \left(1 + \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right) 2LD + (Gp) \right) f$$

Datos del proyecto:

- Diámetro interior de la tubería (ademe) : 40" (101.6 cm).
- Diámetro exterior de la tubería (ademe) : 41" (104.14 cm).
- Longitud de la tubería: 58.0 m aproximadamente.
- Material de fabricación de la tubería: Acero.
- Profundidad a la clave (promedio): 5.0 m.
- Peso volumétrico del suelo, $\gamma = 1.405 \text{ ton/m}^3$.
- Cohesión, $c = 0.8 \text{ kg/cm}^2$ (figura No. 4.9).
- Angulo de fricción interna, $\phi = 9^\circ$ (figura No. 4.9).
- Peso volumétrico por metro lineal de tubo: 1066.0 kg/m.

Se considera un empuje pasivo (la estructura tubo durante su inserción empuja contra el terreno), $K_p = 1.0$

$$\sigma_x = 1.405(5) = 7.025 \text{ ton/m}^2$$

$$\sigma_x = 1.00(7.025) = 7.025 \text{ ton/m}^2$$

El peso total de la tubería, G_p es:

$$G_p = 1066.0(58) = 61828.0 \text{ kg} = 61.83 \text{ ton}$$

Pero debido a que la tubería se hincará con el material dentro, G_p será entonces:

$$G_p = 61.83 + 45.55(1.405) = 125.80 \text{ ton}$$

El coeficiente que domina es el de adherencia, f_a , según la tabla del anexo 3, $f_a = 0.30$, el cual podría reducirse hasta 0.15 utilizando inyección de bentonita entre los tubos y el terreno (fuera y dentro de la tubería).

Sustituyendo los valores anteriores se tiene lo siguiente:

$$W_x = (7.025(1 + \frac{7.025}{7.025})^2(58)(1.0) + 125.80)(0.15) = 263.34 \text{ ton}$$

Pero considerando que se presenten fuerzas adhesivas dentro y fuera de la tubería W_e puede duplicarse, por lo que :

$$W_x = 526.68 \text{ ton}$$

El resultado anterior significa que el sistema de gatos hidráulicos deberá tener tal capacidad de empuje y por otra parte, el atraque de la lumbrera de lanzamiento deberá resistir la reacción de 526.68 ton que le transmitirán los gatos, por lo que se hará un análisis de la capacidad de carga del terreno donde se apoyará la estructura de atraque y de la misma, así como también del sistema de empuje.

4.1.6 Capacidad de carga del terreno.

A continuación se realizará una revisión de la capacidad de carga del terreno que se encuentra detrás de la estructura de apoyo (de atraque).

Para la revisión de la falla del terreno en presencia de las cargas que le transmitirán los gatos hidráulicos se aplicará la teoría de Terzaghi.

Considerando que el muro trasero de la lumbrera servirá de atraque y que además se puede colocar este más abajo de la losa de fondo, empotrado, se puede evaluar la capacidad de carga contra la falla local y general con la fórmula de Terzaghi para una zapata cuadrada:

$$q_c = 1.3cN_c + \gamma D_f N_q + 0.4\gamma B N_\gamma$$

(Ref. 7, pág., 25)

dónde:

$$c = 0.8 \text{ kg/cm}^2 = 8.0 \text{ ton/m}^2$$

$$\gamma = 1.405 \text{ ton/m}^3$$

$$D_f = 0.0$$

$$B = 3.0 \text{ m}$$

Para estos valores de resistencia los factores de capacidad de carga resultan:

Falla general

$$N_c = 8.0$$

$$N_q = 3.0$$

$$N_\gamma = 0.0$$

Falla local

$$N_c' = 7.0$$

$$N_q' = 2.0$$

$$N_\gamma' = 0.0$$

Falla general

$$q_c = 1.3(8)(8) + 1.405(0)(3) + 0.4(1.405)(3.0)(0) = 83.2 \text{ ton/m}^2$$

Falla local

$$q_c = 1.3(8)(7) + 1.405(0)(2) + 0.4(1.405)(3.0)(0) = 72.8 \text{ ton/m}^2$$

4.1.7 Diseño de la Estructura de Atraque y Sistema Hidráulico de Empuje.

El máximo empuje, (E), requerido para insertar la tubería en el terreno es de 526.28 ton. Para empujar se cuenta con un par de gatos hidráulicos de 10" (25.40 cm); la presión (P) necesaria para desarrollar la fuerza de empuje se determina de la forma siguiente:

$$P = \frac{E}{A_t}$$

dónde:

P = Presión máxima de calibración que desarrolla el sistema hidráulico.

E = Fuerza de empuje que transmiten los gatos a la tubería, misma que reacciona en la estructura de atraque.

A_t = Area hidráulica de la sección trasversal de los gatos.

$$A_t = 2(\pi)(r)^2 = 2(3.1416)(12.70)^2 = 1013.417 \text{ cm}^2$$

$$P = \frac{526280}{1013.417} = 519.31 \text{ kg/cm}^2 = 7386.17 \text{ lb/pulg}^2$$

Para desarrollar la presión de 7386.17 lb/pulg² es suficiente con una bomba de caudal variable de 10,000 lb/pulg³, que es aún una bomba comercial.

La reacción del empuje es sobre la estructura de atraque, que en este caso será de concreto armado. En seguida se calcula el área mínima del muro de atraque para que el empuje desarrollado no lleve a la falla al terreno.

$$A_m = \frac{E}{q_c}$$

dónde:

A_m = Área mínima del muro de atraque.

E = Reacción del empuje contra el muro.

q_c = Capacidad de carga (se considera la falla local).

$$A_m = \frac{526.28}{72.80} = 7.23 \text{ m}^2$$

El muro de atraque será la parte trancera de la lumbrera "A", que es de 3.0 x 6.8 m incluyendo la parte del muro empotrado, el cual ofrece una área de apoyo de 20.4 m², suficiente para no sobrepasar la capacidad de carga del terreno.

Para prevenir que los gatos se incrusten en el concreto o fallen en su apoyo por aplastamiento, es necesario que los dos cilindros se apoyen antes del muro en una placa metálica como se aprecia en la figura No. 4.12, la placa es de 2" (5.08 cm) de espesor. El área mínima de la placa se calcula en base al criterio de aplastamiento.

Para que no falle el muro de atraque de concreto es necesario que los esfuerzos transmitidos en la zona de contacto no sean mayores a $0.25 f'c$, por lo tanto se tiene que:

$$P = \frac{E}{A_p} = 0.25 f'c$$

$$A_p = \frac{E}{0.25 f'c}$$

dónde:

A_p = Área mínima de la placa.

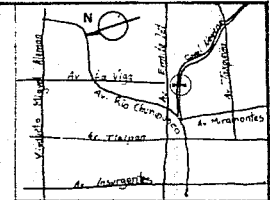
$f'c$ = Resistencia del concreto.

$$A_p = \frac{526280.0}{0.25(250)} = 8420.48 \text{ cm}^2 = 0.842 \text{ m}^2$$

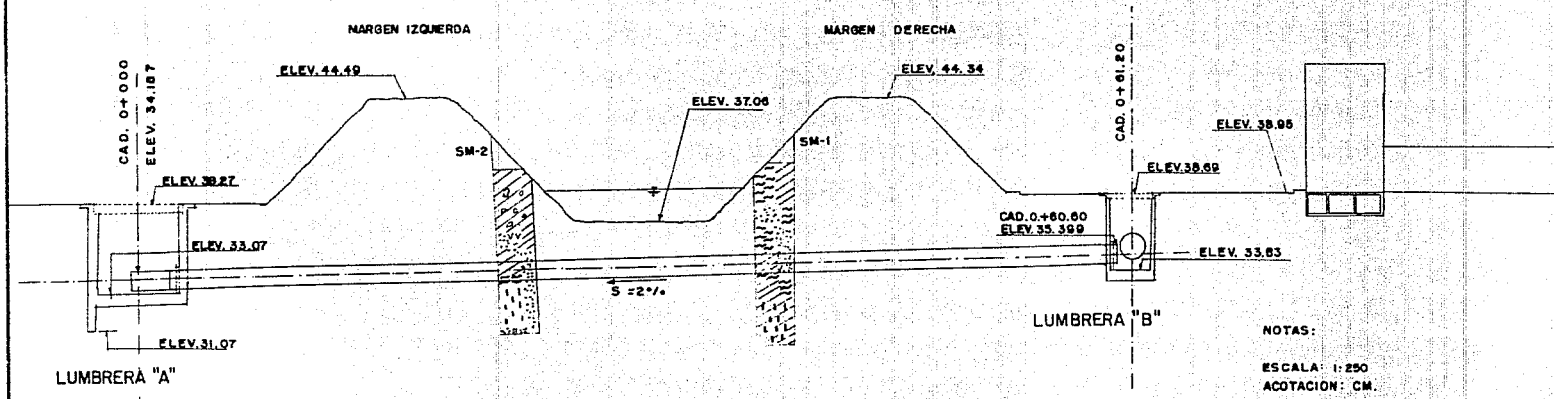
Por lo que es suficiente un muro de concreto de 3.0 x 6.8 m y placas de acero de 0.842 m².

MICROTUNEL CANAL NACIONAL

CORTE LONGITUDINAL



CROQUIS DE LOCALIZACION

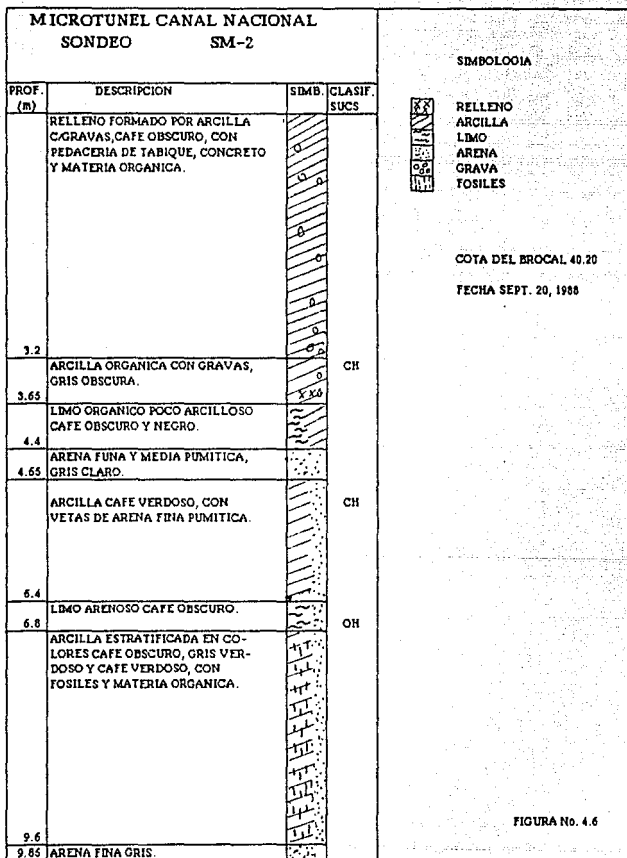


NOTAS:
 ESCALA: 1:250
 ACOTACION: CM.

SIMBOLOGIA

	RELLENO		ARENA
	ARCILLA		GRAVA
	LIMO		FOSILES

Figura 4.1 Microtúnel Canal Nacional. Corte longitudinal. Estratigrafía.



MICRO TUNEL CANAL NACIONAL

SONDEO SM-1

TABLA DE LIMITES DE CONSISTENCIA

PROF.	w	L.L.	L.P.	I.P.	Cr.	CLASIF
m	%	%	%	%	-	SUCS
4.05	71.50	49.50	32.20	17.30	-1.27	ML
5.73	94.10	109.50	49.20	60.30	0.26	CH
6.60	83.50	76.10	43.00	33.10	-0.22	OH
7.70	145.10	169.00	55.30	113.70	0.21	CH
9.90	126.70	125.70	45.70	80.00	-0.04	CH
11.10	81.20	80.50	41.30	39.20	-0.02	OH

w CONTENIDO NATURAL DE AGUA
 L.L. LIMITE LIQUIDO
 L.P. LIMITE PLASTICO
 I.P. INDICE PLASTICO
 Cr. CONSISTENCIA RELATIVA $(L.L.-w)/I.P.$

Figura 4.3

MICROTUNEL CANAL NACIONAL

SONDEO SM-1 COMPRESION SIMPLE

PROF.	Ss	ei	w	Gi	σ_r	σ_r	γ_h	γ_s	CLASIF.
m			%	%	kg/cm ²	%	kg/m ³	kg/m ³	SUCS
2.11	2.58	1.14	43.7	98.7	0.55	2.59	1731	1205	—
3.33	2.38	0.88	37.1	99.8	0.17	1.42	1731	1263	SM
3.95	2.64	1.77	65.1	97.4	0.24	2.36	1576	954	ML
5.1	2.58	1.15	43.1	96.8	0.04	0.9	1720	1203	ML
6.3	2.2	2.82	126.8	99.1	0.18	8.02	1307	576	CH
7.1	2.5	2.21	84.7	95.9	0.17	2.04	1440	780	CH
8.1	2.28	3.11	133.9	98.2	0.11	1.89	1298	555	CH
9.1	2.14	1.99	101.5		0.17	2.12	1442	716	CH
10.1	2.4	1.87	62.8	80.4	0.08	1.99	1360	835	CH
11.1	2.5	2.28	85.1	93.3	0.14	2.69	1410	762	OH

Ss DENSIDAD DE SOLIDOS
 ei RELACION DE VACIOS INICIAL
 w CONTENIDO NATURAL DE AGUA
 Gi GRADO DE SATURACION INICIAL
 σ_r RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE
 σ_r DEFORMACION A LA RUPTURA
 γ_h PESO VOLUMETRIC HUMEDO
 γ_s PESO VOLUMETRIC SECO

Figura 4.4

MICROTUNEL CANAL NACIONAL
 SONDEO SM-2 PROFUNDIDAD: 5.10 m.
 COMPRESION TRAXIAL RAPIDA

S _s	e	w	G	LL	I _p	ESFUERZO PRINCIPAL			PESO VOLUMETRICO			CLASIFICACION S.U.C.S
						σ ₁	σ ₂	σ ₃	γ _{sat}	γ _d	γ _h	
		%	%	%	%	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	
	2.24	98.9	98.2			10.08	0.5	1.91	872	1338		
2.18	1.06	88.2	98.1			17.46	1.0	2.54	735	1338	CH	
	2.2	95.8	94.9			13.75	2.0	3.34	682	1335		

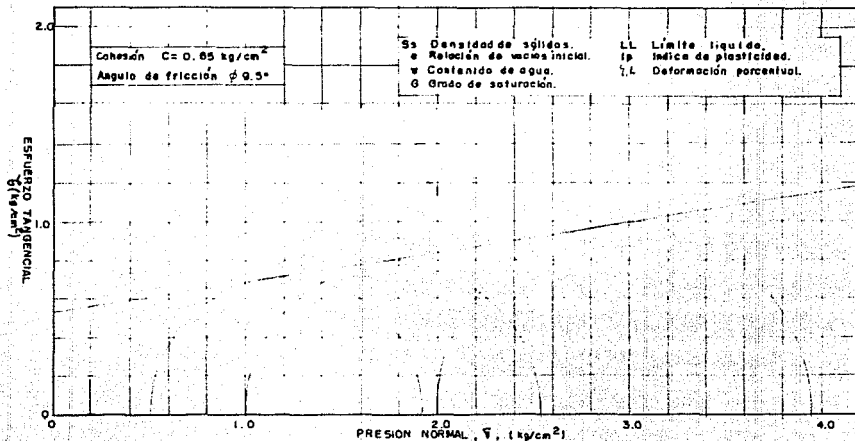
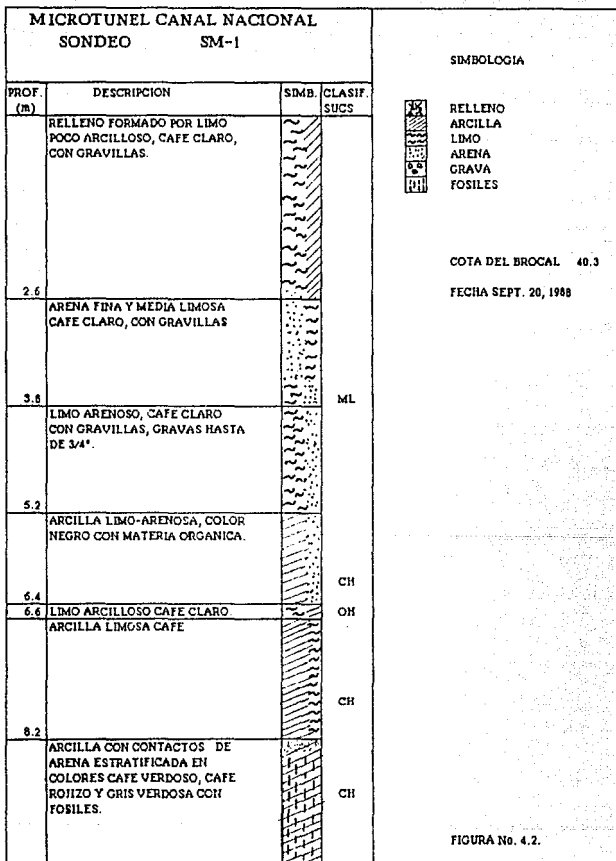


Figura 4.5



MICRO TUNEL CANAL NACIONAL
SONDEO SM-2

TABLA DE LIMITES DE CONSISTENCIA

PROF.	w	L.L.	L.P.	I.P.	Ct.	CLASIF.
M	%	%	%	%	-	SUCS
3.33	53.50	101.60	43.60	58.00	0.83	OH
5.10	79.30	67.90	30.70	37.20	-0.31	CH
6.40	78.40	80.40	42.10	42.10	0.05	MH
7.00	247.90	258.40	106.60	106.60	0.07	OH

w CONTENIDO NATURAL DE AGUA
L.L. LIMITE LIQUIDO
L.P. LIMITE PLASTICO
I.P. INDICE PLASTICO
Ct. CONSISTENCIA RELATIVA (L.L.-w)/I.P.

Figura 4.7

MICROTUNEL
CANAL NACIONAL
 SONDEO SM-2
 COMPRESION SIMPLE

PROF.	Ss	ei	w	Gi	σ_r	δ_r	γ_h	γ_s	CLASIF.
m			%	%	kg/cm ²	%	kg/m ³	kg/m ³	SUCS
3.33	2.42	1.74	70.10	97.00	1.09	3.94	1499	882	OH
5.10	2.50	2.14	71.70	83.60	0.38	2.07	1366	795	CH
6.80	2.50	3.42	148.20	99.60	0.62	3.82	1291	520	MH

Ss DENSIDAD DE SOLIDOS
 ei RELACION DE VACIOS INICIAL
 w CONTENIDO NATURAL DE AGUA
 Gi GRADO DE SATURACION INICIAL
 σ_r RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE
 δ_r DEFORMACION A LA RUPTURA
 γ_h PESO VOLUMETRICO HUMEDO
 γ_s PESO VOLUMETRICO SECO

Figura 4.8

MICROTUNEL CANAL NACIONAL
 SONDEO SM-2 PROF: 5.10 m.
 COMPRESION TRAXIAL RAPIDA

S _s	e	w	G	LL	I _p	γ/L	ESFUERZO PRINCIPAL		PESO VOLUMETRICO		CLASIFICACION S.U.C.S
							MEJOR	PEOR	SECO	HUM.	
—	—	%	%	%	%	%	$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_3$	γ_d	γ_{sat}	
							$\frac{kg}{cm^2}$	$\frac{kg}{cm^2}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{kg}{m^3}$	
2.53	1.94	66.60	99.50			5.84	0.5	1.04	0.807	1.403	
											CH
	1.90	66.6	91.6			7.86	2.0	4.44	0.870	1.469	

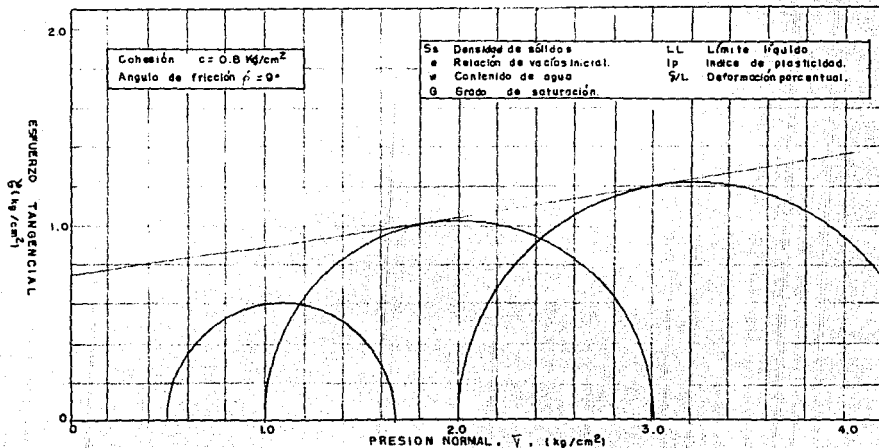


FIGURA 4.9

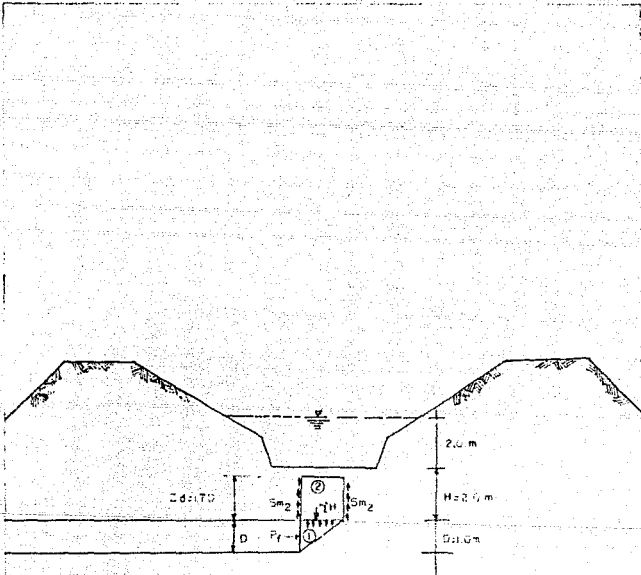


Figura 4.10 Mecanismo simplificado del equilibrio del frente

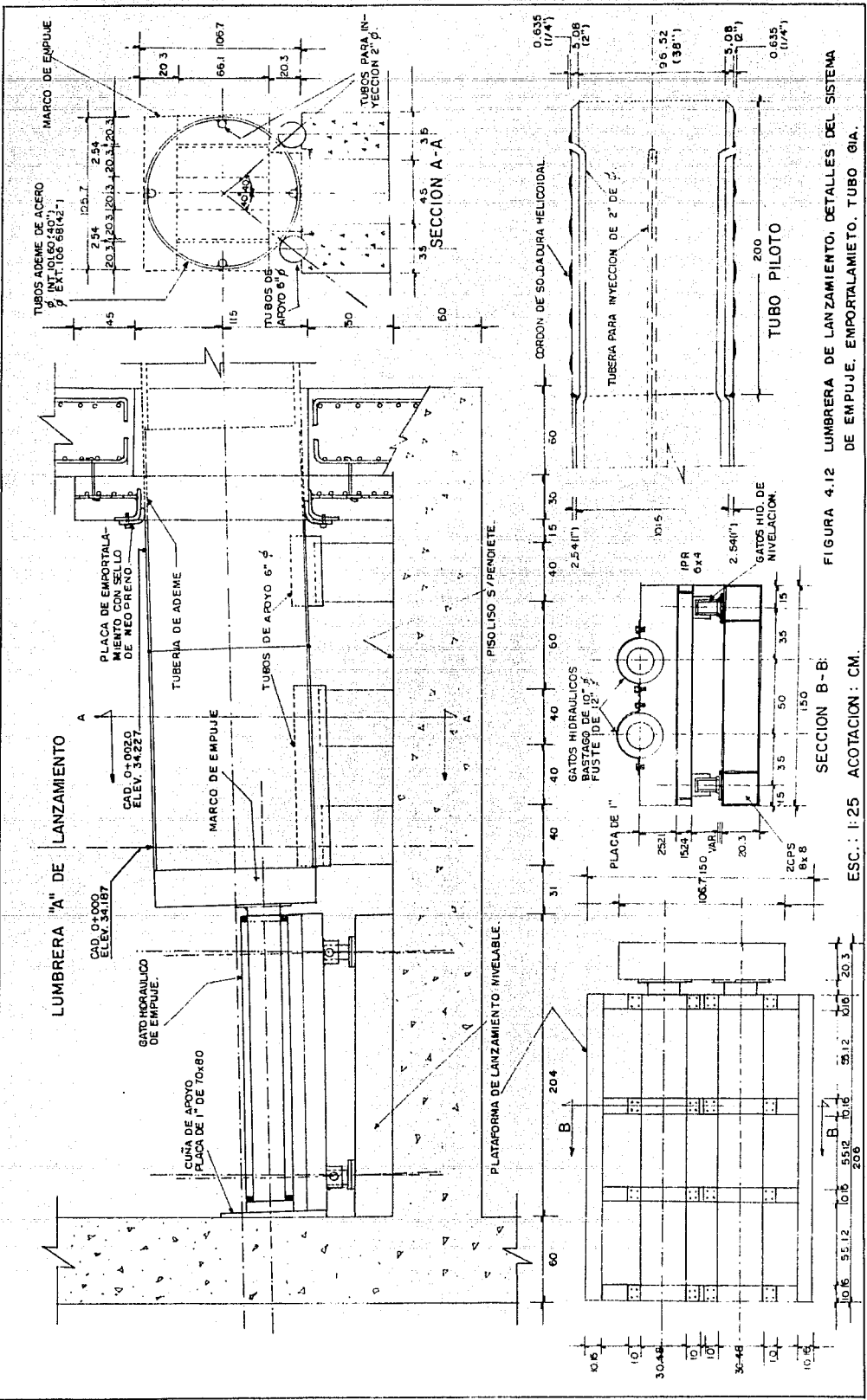


FIGURA 4.12 LUMBRERA DE LANZAMIENTO, DETALLES DEL SISTEMA DE EMPUJE, EMPORTALAMIENTO, TUBO GUA.

SECCION B-B: ESC.: 1:25 ACOTACION: CM.

4.2 TECHOS SUBTERRANEOS PARA EL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO Y DE ABERES, BELGICA.

Una de las soluciones que se han elegido para la construcción de algunos tramos del ferrocarril metropolitano de la ciudad de México ha sido el Cajón Superficial, basado en excavaciones a cielo abierto.

4.2.1 Etapas constructivas para el Cajón superficial del Metro en la Ciudad de México.

- 1.- Construcción de Muros de Milán o pantallas a lo largo del cajón subterráneo.
 - a) Construcción longitudinal de brocales.
 - b) Excavación de zanjas para muros Milán y estabilización con mezcla de bentonita.
 - c) Armado y colado de los muros.
- 2.- Extracción del material del cajón desde la superficie incluyendo el pavimento hasta el fondo del mismo y reubicación temporal de servicios subterráneos. A su vez se van colocando los troqueles, para mantener estables las paredes de la excavación.
- 3.- Construcción de la losa de fondo.
- 4.- Construcción de muros definitivos.
- 5.- Construcción de la losa de techo.
- 6.- Relleno y reparación de los servicios subterráneos, teléfonos, agua potable, drenaje, etc.

- 7.- Pavimentación.
- 8.- Reconstrucción de áreas verdes, banquetas, atargeas, semáforos, postes, etc.,.

En este procedimiento se puede apreciar claramente el tradicional método de apertura de tajos a cielo abierto, "zanjas", para realizar una obra subterránea, la cual cada vez más se torna inadecuada, porque afecta o interrumpe las actividades socio-económicas del lugar, daña los servicios urbanos y además, perjudica a la estética del lugar, entre otros. Y aún más inadecuado se vuelve cuando hoy en día hay que cruzar por debajo de otros cajones subterráneos, donde las nuevas excavaciones son de mayor profundidad, aumentando con ésto el tiempo y costo de la obra.

4.2.2 Construcción de Cajones Suterráneos con Microtúneles en la Ciudad de México.

El método de excavación de tajos a cielo abierto para la construcción del metro en zonas urbanas se podría modificar con la aplicación de las técnicas de los microtúneles, como sucedió en el metro de Ambéres, Bélgica.

En la ciudad de México este nuevo procedimiento constructivo podría desarrollarse como se describe en las siguientes etapas:

ETAPA 1. ESTUDIO DE EXPLORACION PARA LA UBICACION REAL DE LOS SERVICIOS ENTERRADOS.

Es indispensable tener un levantamiento, lo más aproximado, de las estructuras enterradas en servicio y en desuso, para poder llevar el desarrollo de la técnica de los microtúneles con la mayor eficiencia; además, es importante no dañar tales estructuras de servicios con el paso del micro-excavador. Por este motivo se tendrá que realizar un levantamiento de detalle de las estructuras enterradas, con el empleo de instrumentos de geofísica moderna, todo esto, independientemente de los planos que contengan información, que en este caso solo servirán de guías. El resultado de esta exploración será la ubicación real, profundidad, dimensión, etc., del ducto o tubería enterrada u obstáculo existente. Y con esta información se podrá definir la profundidad más adecuada para el Cajón Subterráneo, donde durante el proceso constructivo se afecte en menor medida a los servicios domiciliarios; o en su defecto, servirá para tomar decisiones a cerca de la interrupción parcial, devio definitivo u otra, de éstos.

ETAPA 2. PROTECCION DE SERVICIOS ENTERRADOS.

Con esta etapa da inicio la construcción del Cajón Subterráneo bajo la técnica de Techos Subterráneos.

El objetivo que se persigue en esta etapa es mantener en operación los servicios domiciliarios, proveer su operación permanente ante su posible destrucción durante las etapas de excavación.

ETAPA 3. CONSTRUCCION DE TRINCHERAS LONGITUDINALES Y PREPARATIVOS PARA LA EXCAVACION DEL TECHO SUBTERRANEO.

1) Excavar la trinchera de lanzamiento (1) y la trinchera de arriba (2) hasta el nivel de la losa de techo; durante estas excavaciones se deberán proteger los servicios enterrados.

2) Soporte de las paredes y del fondo de la excavación (3). Se puede lograr con tablaestacado con o sin troquelamiento o con el colado de muros de concreto monolíticamente con la losa de fondo, este último caso podría ser la solución cuando la trinchera se empleará para el alojamiento de las tuberías y ductos de servicios. Es prudente que al colar la losa de fondo está lleve el nivel indicado para facilitar la nivelación de la estructura de lanzamiento, empleada en el microtuneleo. Durante esta etapa también se deberán construir los brocales (4) para guiar la almeja excavadora de las trincheras de los Muros Milán.

3) Fijación de la estructura de atraque. Es conveniente

fabricar la estructura de atraque en módulos de tamaño manejable, que cubran un tramo de apoyo de por lo menos 25 metros. Una de las ventajas de colar los muros y losa de fondo monolíticamente, es que el muro exterior serviría de atraque, evitando maniobras.

4) Es importante la prevención de sistemas de control del abatimiento de las aguas freáticas.

ETAPA 4. EXCAVACION DE LA LOSA DE TECHO (5).

Cuando se llegue a esta etapa de construcción ya se habrá elegido la técnica de microtuneleo; donde lo más conveniente es el empleo de una máquina excavadora para lograr avances de techo de por lo menos 25 metros por día, lo que significa colocar una tubería transversal por hora. Para lograr este rendimiento se tendría que emplear una máquina como la IRONMOLE, sólo que en lugar de emplear tuberías de uso temporal durante la excavación, se emplearían los mismos tubos permanentes, para ahorrar tiempo, y para la extracción de la rezaga se podrán emplear mangueras de fácil manejo. En este caso no se requiere unir los tubos de acero con soldadura, lo que ahorra tiempo. El equipo de excavación requiere de 3 metros de ancho de la trinchera, para poder colocar tubos de 2 metros de longitud, empleando un metro para el sistema de empuje, el cual deberá ser telescópico

para ahorrar espacio.

ETAPA 5. EXCAVACION DE ZANJAS PARA LA CONSTRUCCION DE LOS MUROS MILAN (6).

La excavación de zanjas se llevará a cabo con almeja guiada siguiendo el procedimiento para Muros Milán.

ETAPA 6. COLOCACION DE ACERO DE REFUERZO EN TUBOS Y LAS ZANJAS PREPARADAS PARA MUROS MILAN.

1) Colocar el acero de refuerzo dentro de los tubos (7).

2) Colocar acero de refuerzo dentro de las zanjas longitudinales, (8).

3) Unir el acero de refuerzo del Muro Milán con el de los tubos.

ETAPA 7. COLADO MONOLITICO DE TUBOS-TECHO Y MUROS MILAN.

Primeramente, colar el interior de los tubos (9) atacando por ambos extremos de cada tubería y de dentro hacia afuera, para garantizar en mayor medida que estos queden completamente llenos.

Cuando se haya concluido el colado de los tubos se procede a aplicar el procedimiento de colado de Muros Milán

(10) para concretar la etapa. De esta forma los grupos de tubos pasan a formar la futura losa del cajón, la cual ha quedado monolíticamente colada con los muros.

ETAPA 8. RELLENAR O TAPAR LAS TRINCHERAS.

En esta etapa es importante ir rellenando las trincheras longitudinales (11), así como proceder a la reparación de algún servicio enterrado que haya sido dañado y concluir con la pavimentación (12) para dejar en servicio nuevamente la vialidad que había sido parcialmente interrumpida.

En algunos tramos las mismas trincheras podrán ser empleadas para alojar las nuevas redes de tuberías y conductos enterrados e incluso la trinchera longitudinal podrá emplearse para alojar los sistemas de ventilación del cajón, en estos casos la trinchera deberá taparse con losas prefabricadas (11) y sobre éstas pavimentar (12).

ETAPA 9. EXCAVACION DEL TUNEL.

En esta etapa los trabajos se realizan únicamente dentro del cajón subterráneo, para lo cual se ubica o se construye un acceso que afecte lo menos posible las estructuras vecinas, vialidades y a las actividades socio-económicas.

Los trabajos consisten en ir excavando como se aprecia en la figura 4.13:

- 1) Construir un acceso poco conflictivo.
- 2) Excavar la media sección superior del cajón, con avances predefinidos (13), dependiendo de las deformaciones que se detecten con las mediciones de la instrumentación.
- 3) Excavar la media sección inferior, también, en avances definidos por las mediciones de la instrumentación (14).
- 4) Inmediatamente después de haber excavado se deberá armar y colar la losa de fondo de la excavación (15).
- 5) Colar los muros definitivos (16).
- 6) Sellar la losa de techo.

4.2.3 Construcción de Techos Subterráneos en el Metro de Amberes, Bélgica.

En el proyecto del Metro de Amberes, Bélgica, se utilizaron las técnicas de los microtúneles para excavar aproximadamente 20 km para insertar tubos de diámetros variados de 1 a 2 m, los cuales sirvieron de techado para una docena de estaciones y algunas centenas de metros de túneles.

Aplicaciones específicas y notables:

Se construyeron estaciones fuera de la zona de influencia de los cimientos de los inmuebles. En este caso, se hincaron tubos en forma transversal de asbesto-cemento o acero de 1.5 m de diámetro, excavados apartir de galerías longitudinales de aproximadamente 2.5 x 2.5 m de sección, situadas de 3 a 5 m de profundidad del nivel del pavimento.

FASES DE EJECUCION

- 1) Excavación de galerías longitudinales.
- 2) Instalación de marcos enlazados, tipo jaula, en las galerías longitudinales, figura 4.15.
- 3) Inserción de tuberías transversales desde las galerías longitudinales, figura 4.14.
- 4) Colocación del acero de refuerzo dentro de las tuberías que forman el techo subterráneo y colado con concreto de alta resistencia, figura 4.16.
- 5) Construcción de muros de carga y excavación bajo los tubos transversales, figuras 4.17 y 4.18.

Excavaciones en dirección longitudinal o transversal sin galerías longitudinales, desde los cajones ya construidos; esta fué una variante de excavación fuera de la zona de influencia de los cimientos de las casas. Un ejemplo típico es la construcción de un túnel debajo de una vialidad.

Este tramo fué realizado como a continuación se describe:

A partir de un cajón subterráneo, se cavaron 3 tubos de 1.8 m de diámetro, de 125 m de longitud. Entre los tubos utilizados para cubrir la longitud de 125 m se colocaron 2 veces 2 tubos de 1.5 m de diámetro con curvatura espacial, dónde el radio en el plano horizontal es del orden de 650 m y en el plano vertical de 1000 m. Posteriormente se procedió a la construcción de los muros laterales y ha excavar el cajón.

Se insertaron tuberías bajo los cimientos de los inmuebles importantes para reducir asentamientos diferenciales, durante la excavación del cajón subterráneo toda una serie de precauciones son impuestas:

1) El Empresario debe tener la experiencia suficiente en estos métodos y demostrar el rango de los asentamientos, dentro del cual la estructura (inmueble) no sufriría daños irreversibles.

2) El material debe ser fácilmente excavable con el equipo elegido.

3) El espesor de los tubos debe ser el óptimo y calculado de manera que las deformaciones bajo presiones de tierras y sobrecargas se situen en el orden de magnitud de decimas de mm.

4) Se requiere de una precisión de ± 2.5 mm sobre el diámetro exterior del tubo, para evitar este defecto los tubos de asbesto-cemento son rectificadas maquinamente por su parte exterior.

5) Es preferible no utilizar un equipo cortante para dirigir el empuje de los tubos, para no contrafallar al terreno.

6) Al hacer correcciones de dirección no se debe olvidar conservar el nivel de la plantilla de tubos.

7) Las excavaciones deben ser continuas, sin parar.

8) Los tubos se insertan alternativamente, es decir, la serie 1, 3, 5 y después la serie 2, 4 y 6.

Para esta importante obra fueron insertados 2,045 m de tubos, de los cuales aproximadamente 1,020 m quedaron en la zona de influencia de las cimentaciones.

La aplicación más espectacular es la excavación del cajón subterráneo bajo la Estación Central (Antwerpen Central Station), figuras 4.19, 4.20 y 4.21.

La losa del techado definitivo fué realizada con tubos longitudinales de 1.4 m de diámetro, cavados a partir de una galería transversal (ver fase 1 y 2 en la figura 4.). Con el fin de reducir los bufamientos y los asentamientos bajo la estación central, donde las cargas son del orden de 30 ton/m² y hay fachadas de piedras agrietadas. Se tuvieron que seguir los criterios de 3 cm, 1/10 y 1/1000 respectivamente para los asentamientos totales, diferenciales y desplazamientos angulares, todos previstos para la ejecución total de la obra.

Esto requiere de un refinamiento complementario y una división clara de fases de ejecución, llevadas a cabo con estricto control.

En la fase 3 de la figura 4.20 la losa de techado es construida.

En la fase 4, se construyeron galerías bajo la losa, para que desde ahí se realice la fase 5, donde se construyen los muros laterales.

Después de la ejecución de los muros laterales son instalados gatos hidráulicos de alta presión entre la losa de techo y los muros laterales, para compensar el hundimiento eventual durante las fases de ejecución restantes, figura 4.21.

La evolución de las técnicas de abatimiento N. A. F. permite llevar el nivel de aguas hasta una profundidad que no afecte a los trabajos subterráneos.

Posteriormente es excavado el cajón y construidos la losa de fondo y el muro central. Los gatos hidráulicos son retirados hasta que se ha concluido el grueso de la obra.

4.2.4 Cierre hermético de tuberías.

Inevitablemente entre los tubos que se han insertado en el terreno quedan huecos o separaciones, las que varían entre 5 y 30 cm. Para esto, inmediatamente después de terminada la excavación es inyectada la zona, con el fin de estabilizar las tierras superficiales, pero en tal caso el techo no es impermeable.

Para asegurar el cierre hermético de la losa de techo, han sido estudiados y probados diferentes métodos.

Metódo 1

El método 1, figura 4.22, es el más caro, pero el más decorativo. En todos los métodos los tubos son primero limpiados a fondo, posteriormente, se coloca la materia plástica esponjosa con una película de aluminio que posee

cualidades de cierre hermético, al funcionar como una pantalla húmeda en las juntas laterales, después de esto, la junta es revestida enteramente por dos capas de pegamento a base de resina acrílica.

Por último, la losa de techo puede ser terminada en su totalidad con la aplicación de una capa final decorativa, hermética y acústica.

Las juntas transversales son tratadas también con el fin de obtener un cierre hermético perfecto.

Metódo 2.

El Método 2, prevé el montaje de placas inoxidable de 2 mm de espesor entre dos tubos.

Después, las placas son rellenas con inyección de un mortero cemento-bentonita.

Hay otros dos métodos que se aplican solamente en tubos de acero.

Metódo 3.

El método 3, prevé el levantamiento inferior de

los tubos. Después, se aplica una capa adherente, los revestimientos se colocan y después un mortero con cemento se aplica para formar un tapón entre los tubos. Posteriormente se puede proceder a la aplicación de una capa hermética sobre toda la superficie.

Metodo 4.

El método 4, prevé la soldadura de placas de acero entre los tubos así como la soldadura de juntas transversales y el espacio así creado es inyectado con mortero (Ref. 17, páginas.: 268-272).

4.2.5 Ventajas del método de Techos Subterráneos.

Las ventajas que ofrece este método son las siguientes:

1) Afecta por muy poco tiempo el tránsito vehicular y además en forma parcial, ya que los trabajos que requieren mayor tiempo se ejecutan en el interior del cajón.

2) Daña en menor grado la infraestructura de servicios subterráneos. Además, las mismas trincheras longitudinales generan un nuevo espacio, donde sin mayor dificultad se pueden alojar nuevas tuberías de servicios.

3) No destruye todo el pavimento.

4) Favorece a la estabilidad de estructuras, ya que no se abren las grandes zanjas a cielo abierto con esto se evita el gasto que implica el troquelamiento de grandes excavaciones.

5) Pueden alcanzarse cajones más profundos que con el método convencional de excavaciones a cielo abierto, sin necesidad de emplear métodos tan costosos y lentos, como lo es el de excavar en módulos para lograr excavaciones más profundas.

6) Desde los nuevos espacios subterráneos abiertos a lo largo de la vialidad se pueden realizar los cruces con otras vialidades y estructuras, sin cortar la circulación.

7) Entre otras compete económicamente con la técnica tradicional de apertura de zanjas.

Figura 4.13 Etapas de construcción de Cajones Subterráneos con Microtúneles.

(1) y (2) Excavación de trincheras longitudinales.

(3) Colado de muros y loso de fondo.

(4) Brocales.

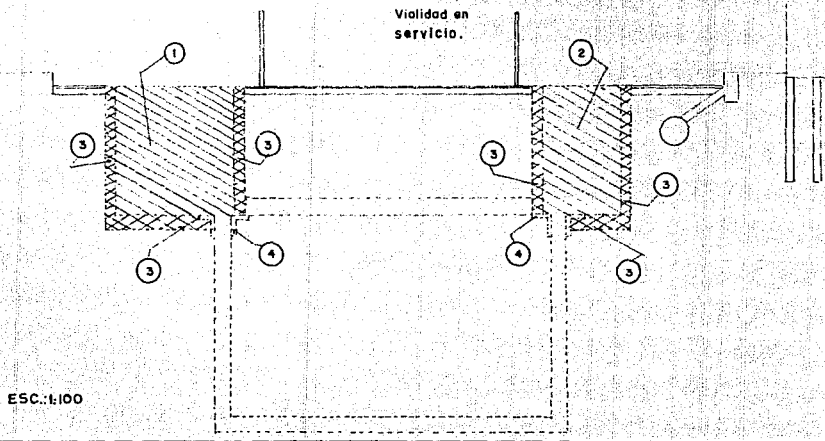


Figura 4.13 Etapas de construcción de Cañones Subterráneos con Microtúneles.

(5) Excavación del Techo Subterráneo.

(6) Excavaciones para Muros Millan.

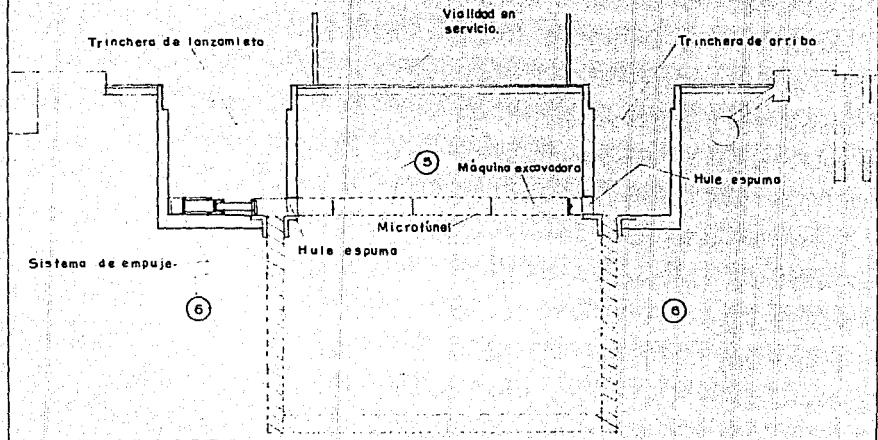


Figura 4.13 Etapas de construcción de Cajones Subterráneos con Microtúneles.

- | | |
|--|--|
| (7) Acero de refuerzo en tubos. | (14) Excavación de la media sección inferior con avances predefinidos. |
| (8) Acero de refuerzo en zanjas. | (15) Armar y calar la losa de fondo. |
| (9) Colado del Techo Subterráneo. | (16) Colar muros definitivos. |
| (10) Colado de Muros Millan. | (17) Sellar el Techo Subterráneo. |
| (11) Cerrar trincheras. | |
| (12) Pavimentación. | |
| (13) Excavación de la media sección superior con avances predefinidos. | |

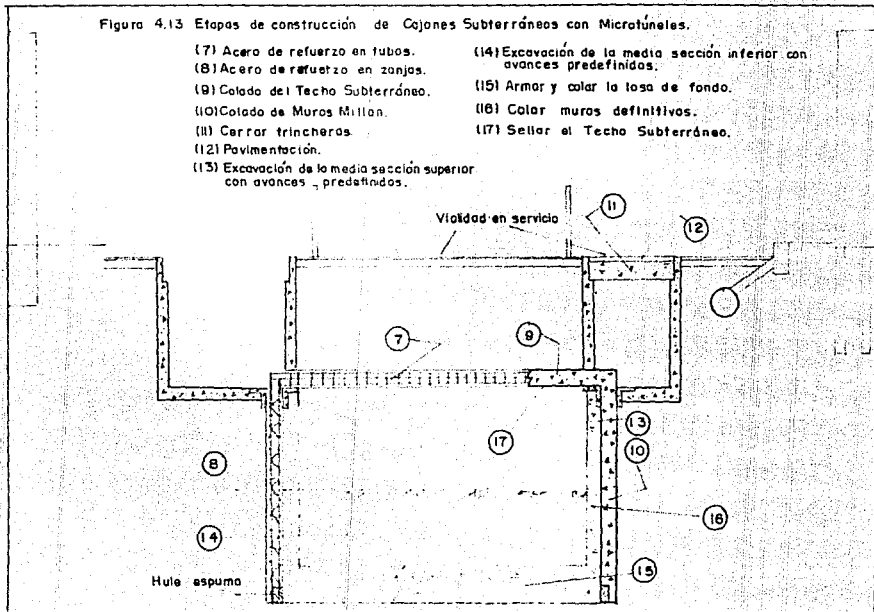




Figura 4.14 Inserción de una tubería en el terreno.
Ref. 18, pág. 268.

Figura 4.15 Refuerzo tipo -- jaula, colocado en las galerías longitudinales.
Ref.18,pág.268.

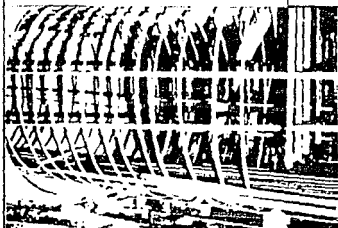


Figura 4.16 Acero de refuerzo, se introduce dentro de las tuberías después de su inserción, para después ser colados.
Ref.18,pág.268.

Figura 4.17 Excavación bajo los tubos transversales.
Ref. 18, pág. 268.



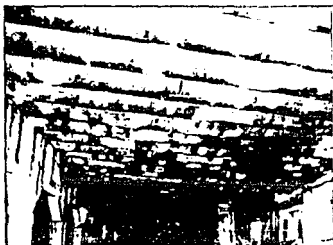


Figura 4.18 Cajón subterráneo, en la parte superior los tubos formando el techo. Ref.18, pág.269.

Figura 4.19 Estación central de Amberes, Bélgica. Ref. 18, pág.270.

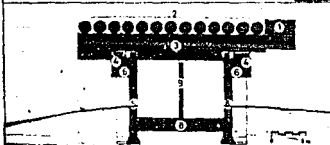
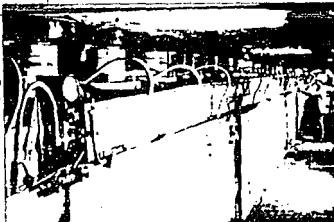


Figura 4.20 Sección transversal de la estación central. La numeración indica la secuencia de construcción. Ref. 18, pág.270.

Figura 4.21 Sistema de gatos hidráulicos, utilizados para nivelar el hundimiento eventual de la losa de techo. Ref.18, pág.271.



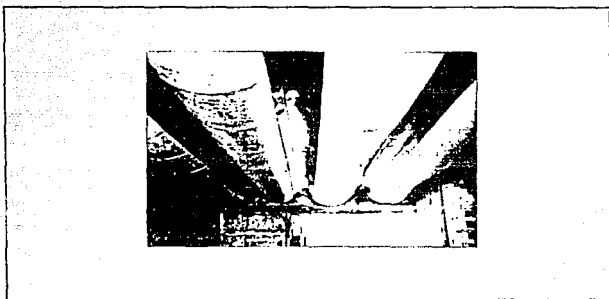


Figura 4.22 Techo subterráneo después de la aplicación del sello hermético.
Ref. 18, pág. 271.

CONCLUSIONES

Minitúnel o Microtúnel es toda oquedad abierta artificialmente bajo el terreno para comunicar dos o más puntos alejados, por medio de la excavación o perforación con algún equipo o máquina, sin necesidad de abrir zanjas longitudinales, donde el hombre desarrolla el proceso constructivo desde el exterior de la oquedad, por las pequeñas dimensiones de éstos.

Las técnicas para los Microtúneles han surgido principalmente de una necesidad urbana, para el alojamiento de tuberías y conductos bajo el terreno, sin destruir, durante la construcción, grandes áreas superficiales, sin causar molestias a transeuntes y vecinos, etc.; y como una nueva opción frente a las técnicas tradicionales, ofreciendo mejores alternativas para la utilización de los espacios subterráneos.

La tecnología de los microtúneles ha sido bien aceptada en los países Europeos, Japón, Estados Unidos y Canadá. En México, ya se han dado las primeras experiencias en los cruces subterráneos más importantes durante la

construcción de la línea 8 del metro, en la Ciudad de México, aún cuando se aplicó el método más simple, el de inserción directa, sin embargo, se logrón construir un Techos Subterráneos sin afectar a otras infraestructuras.

Las experiencias de los constructores de microtúneles demuestran que el enemigo número uno durante la construcción son los obstáculos que no se ven; por lo que la Tecnología de los Microtúneles tendrá mayores alcances y aplicaciones en cuanto se logre el desarrollo de instrumentos más eficientes de exploración.

En un proceso constructivo típico de un Microtúnel se distinguen las tres etapas básicas: Excavar (cortar el suelo o roca), rezagar (extraer el material producto del corte) e insertar (colocar la tubería bajo el terreno).

El éxito de la construcción de un microtúnel urbano exige lo siguiente:

- 1) Ubicación precisa de las estructuras urbanas enterradas que pueden ser un obstáculo durante la construcción o en su defecto pueden ser dañadas.

- 2) Estudio de Exploración Geotécnica.

3) Selección de la Técnica de Microtúnel apropiada.

4) Operación correcta del equipo.

Entre otros aspectos es importante visualizar a futuro el efecto de la nueva oquedad sobre otras estructuras en operación.

El desarrollo de diferentes técnicas del microtuneleo responde a las necesidades de excavar en diferentes tipos y condiciones de terrenos:

MIMIESCUDOS: Recomendables para excavar en suelos finos, arcillas y limos; y en suelos granulares como arenas finas de origen volcánico; bajo suelos sumergidos o saturados.

MAQUINAS AUGER: Pueden excavar en suelos duros y granulares, arenas con gravas y en tobas.

PERFORADORES HORIZONTALES CON SISTEMA DE CORTE SUAVE: Cualquier material, desde una arcilla blanda hasta una roca dura.

PERFORADORES HORIZONTALES CON BROCA DE CORTE: Suelos blandos y duros.

PERFORADORES PERCUSIVOS: Pueden perforar en suelos con alta relación de vacíos, estructurados; normalmente el agua les afecta.

TUBERIAS HINCADAS: En cualquier suelo blando poco consolidado.

MAQUINAS BURSTING: Recomendable para la renovación de tuberías de concreto sin acero.

REFERENCIAS

- (1) B.I. Vozdvizhenski, Perforación de Exploración. Traducido del ruso por T.V. Lonshakova. Editorial Mir. URSS, - 1982.
- (2) Cornejo Alvarez, L., Mecánica de Túneles, cap. 5, Las - Técnicas del microtúnel. Editorial Roeda. España, 1988.
- (3) COVITUR, Criterios de Análisis Y Diseño Geotécnico de - Túneles. Manual de Diseño y Construcción de Túneles, -- cap. C., México.
- (4) Juárez Badillo, E. y Rico, A., Mecánica de Suelos. Tomo I. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tercera edi--- ción. Editorial Limusa. México, 1974.
- (5) Juárez Badillo, E. y Rico, A., Mecánica de Suelos. Tomo II. Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos. Se- gunda edición. Editorial Limusa. México, 1979.
- (6) Paone, J., Bruce, W. E. y Morrell, R. J., Rapid Excava- tion, Problems & Progress, cap.9. Horizontal Holes for Underground Power Lines. Conference of Proceedings of - the Tunnel and Shaft. Sociedad de Ingeniería Minera. Mi- nneapolis, May, 1968.
- (7) Rico, A. y Del Castillo H., La Ingeniería de suelos en las vías terrestres. Vol. 2. Primera edición. Editorial Limusa. México, 1977.
- (8) Silva Echartea, C. y León. Manual de Diseño de Obras -- Civiles. Sección B, Tema 2, Capítulo 2. Propiedades Fí- co Mecánicas de los Suelos. CFE, Instituto de Investiga

- ciones Eléctricas. México 1969.
- (9) Taméz González, E. Estabilidad de Túneles Excavados en Suelos. Curso Victor Hardy 85. Tomo 1. Túneles y Excavaciones Subterráneas. AMITOS. México, 1985.
 - (10) Especificaciones del Tubo Hincado para el Entronque Reforma-Chivatito, Ciudad de México. ISME. DGCOH DDF. México, 1988.
 - (11) Microtunnelling, volume 2, number 3;
 - (12) Microtunnelling, volume 2, number 3; Autumn, 1986.
 - (13) Microtunnelling, volume 3, number 1; Spring, 1987.
 - (14) Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports. Les Conduites Enterrees. Recommandations pour la Coordination des V.R.D. dans les Operations D'aménagement. Francia, 1984.
 - (15) Okumura Corporation, Construction and Enginnering; Okumura Circulation Automatic Mechanical Shield/Super-Mini (OCAMS/sa). Japan, 1985.
 - (16) Tracto-Techniques S.A. Il y a mieux... Cleon, France.
 - (17) Tunnels and Tunnelling, October, 1988.
 - (18) Tunnels et Ouvrages Souterrains. Organo Oficial de la AFTES. No. 78, Nov-Dec; France, 1986.
 - (19) Tunnels et Ouvrages Souterrains. Organo Oficial de la AFTES. No. 80, Mars-Avril; France, 1987.
 - (20) Underground, April, 1986.
 - (21) Underground, December, 1986.
 - (22) Underground, March, 1987.
 - (23) Underground, June, 1987.

- (24) Underground, July, 1987.
- (25) Underground, Sept., 1987.
- (26) Underground, December, 1987.
- (27) Información obtenida verbalmente y por experiencias personales.

ANEXO 1
OPERACION EQUILIBRADA DE MINIESCUDOS
CON CORTADOR DE DISCO Y FLUJO DE LODOS

En este anexo se presenta el análisis del equilibrio dinámico de los miniescudos para su avance seguro y eficiente bajo el subsuelo.

Tal equilibrio consiste en mantener cada uno de los sistemas sincronizados:

- En el sistema hidráulico los flujos de agua y lodo se deben mantener en condiciones de fluidez, principalmente el lodo (rezaga), con densidad apropiada para su desplazamiento eficiente por la tubería de descarga, lo cual se debe lograr en cada instante de la operación de la máquina para evitar su atascamiento bajo el terreno.

- El sistema oleohidráulico es importante calibrarlo a la presión requerida por las condiciones del terreno; y al gasto de aceite solicitado por los mecanismos de la máquina (velocidad de desplazamiento del gato de empuje).

- En el sistema de corte, regular la velocidad de giro del cortador, y con esto controlar la cantidad de material

que deberá entrar a la cámara de lodos para ser extraída (ver figura A.1).

El análisis está basado en la siguiente observación:

El suelo que entra a la cámara de lodos depende de las revoluciones (vueltas) del cortador, y las vueltas que deberá dar el disco cortador dependen a su vez de la velocidad de avance de la máquina minixcavadora, la cual es proporcionada directamente desde el gato de empuje, el que es calibrado para desplazarse a velocidad constante. Además, se supone para el análisis que las ventanillas del miniescudo se mantienen en una apertura constante.

Con ese equilibrio se asegura que el cortador excave y permita el acceso al material a la cámara de lodos, y de esta forma abrir paso al recorrido del miniescudo, sin ejercer empujes innecesarios sobre los mecanismos del disco cortador.

Para encontrar el equilibrio de operación de la máquina se auxilia el análisis en la ley de continuidad de la hidráulica de fluidos en tuberías:

$$Q_D = Q_S + Q_E$$

donde: Q_D : Flujo de descarga al tanque de rezaga.

Q_S : Flujo de suministro hacia la cámara de lodos.

Q_E : Flujo de suelo excavado que entra a la cámara de lodos.

Ver figura A.1 a), b) y c).

Estos gastos están restringidos por la velocidad mínima y máxima del fluido lodoso, para evitar en un extremo la sedimentación o acumulación de grumos, y en el otro la turbulencia del fluido; además, la mezcla de lodo queda restringida por la viscosidad y densidad.

La densidad y viscosidad de operación se han determinado a partir de observaciones físicas; por ejemplo, para los lodos arcillosos con bajos contenidos de arena fina (de 5 a 10%) se puede realizar la excavación con densidad del flujo de suministro de 1.02 a 1.07 y de descarga entre 1.10 y 1.15 (observación realizada en los túneles del drenaje profundo de la ciudad de México).

Conocida la densidad del fluido de suministro, ρ , (en el caso de los miniescudos con flujo de lodos es usada agua con densidad de 1.0) y el peso volumétrico del suelo, γ ; y por otra parte, conocida la cantidad de material que puede entrar a la cámara de lodos por unidad de tiempo, Q_E , se puede establecer una relación para obtener el gasto óptimo de suministro que genere la densidad de operación normal del sistema

(la cual puede comprobarse físicamente):

MATERIAL	GASTO (m ³ /min)	$\rho \cdot \gamma'$ (ton/m ³)	PESO (ton/min)*
AGUA	Q_S	1.0	$Q_S(1.0)$
SUELO	Q_E	γ'	$Q_E(\gamma')$
	Q_S+Q_E		$Q_S(1.0)+Q_E(\gamma')$

$$\rho_D = \frac{Q_S(1.0)+Q_E(\gamma')}{Q_S+Q_E}; \text{ ver figura A.1 a) y b).}$$

Donde: Q_S : Flujo de suministro.

Q_E : Flujo de excavación.

ρ : Densidad del agua.

γ' : Peso volumétrico del suelo.

ρ_D : Densidad de la descarga lodosa.

*Son las toneladas de material que pasa en un minuto por una sección.

La densidad de descarga, ρ_D , se determina físicamente con equipo de laboratorio de campo, por lo que en la fórmula anterior es un dato conocido, por lo tanto, se puede establecer una relación de los flujos, que deberá prevalecer durante toda la excavación del miniescudo de la forma siguiente:

$$\rho_D = \frac{Q_S(1.0) + Q_E(\gamma)}{Q_S + Q_E};$$

$$\rho_D(Q_S + Q_E) = Q_S + Q_E(\gamma);$$

$$\rho_D Q_S + \rho_D Q_E = Q_S + Q_E \gamma;$$

$$\rho_D Q_S - Q_S = Q_E(\gamma) - \rho_D Q_E;$$

$$Q_S(\rho_D - 1) = Q_E(\gamma - \rho_D);$$

de donde se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{Q_S}{Q_E} = \frac{\gamma - \rho_D}{\rho_D - 1.0}$$

Durante la operación de los miniescudos con flujo de lodos es muy importante que se mantenga constante o lo más cerca que se pueda esta relación, para mantener siempre en la cámara de lodos un gradiente positivo de presión. Además, la relación constante mantiene la densidad de descarga de lodo en forma uniforme.

Debido a que Q_E no puede medirse en forma directa, para fines prácticos la fórmula anterior se puede escribir así:

$$\frac{Q_S}{Q_D - Q_S} = \frac{\gamma - \rho_D}{\rho_D - 1.0}$$

Para fines de diseño de un miniescudo con cortador de disco, es importante conocer la velocidad angular en rpm con que deberá girar, ya que, la cantidad de material de excavación que puede entrar a la cámara de lodos depende directamente de esta velocidad:

De la figura A.1 b) se obtiene la siguiente relación:

$$Q_E = \frac{A_c(d)}{t}$$

Donde: A_c : Área de la sección transversal del pequeño-túnel.

d : Desplazamiento lineal de la máquina hacia - el interior del suelo.

t : Tiempo del desplazamiento lineal.

Q_E : Flujo del material que entra a la cámara de lodos.

Esta relación indica que el material que entra a la cámara de lodos correspondiente al desplazamiento [$A_c(d)$], se realiza en un tiempo t .

Por otra parte de la figura A.1 a) se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_E = v_a (A)$$

Donde: v_a : Velocidad angular.

A : Área total de compuertas ($A=A_1+A_2$),

A_1 : Área de la compuerta 1.

A_2 : Área de la compuerta 2.

Por lo tanto, igualando estas dos últimas ecuaciones se obtiene:

$$\frac{A_c(d)}{t} = v_a (A);$$

$$v_d = \frac{d}{t};$$

$$A_c(v_d) = v_a(A)$$

De donde se obtiene la ecuación para determinar la velocidad angular del cortador, a partir de parámetros medibles fácilmente:

$$v_a = \frac{A_c}{A} v_d$$

Donde v_d es la velocidad de desplazamiento del Mini-escudo.

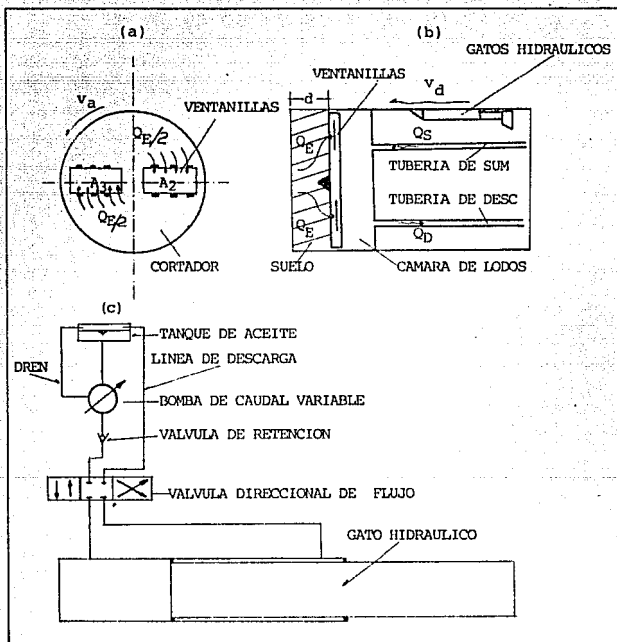


Figura A.1 Diagramas para el análisis del equilibrio dinámico de los miniescudos con cortador de disco y flujo de lodos. Ref. 27.

- a) Cortador de disco dentado y ventanillas de apertura constante.
- b) Flujos que intervienen en la excavación con miniescudo.
- c) Diagrama oleohidráulico del sistema de empuje.

ANEXO 2
CALCULO DE LOS PARAMETROS DE DIRECCION
PARA LA TECNICA DE PERFORACION
DIRECCIONAL CON SISTEMA DE CORTE SUAVE

Los cálculos técnicos realizados en este anexo se refieren a la Técnica de Perforación Direccional con sistema de corte suave. El objetivo es determinar el ángulo de inclinación de la plataforma de lanzamiento, para lograr que la perforación se realice con un radio de curvatura en el plano vertical y se obtenga el alcance y profundidad requeridos por el proyecto (para el cruce de cauces caudalosos).

Normalmente se cuenta con los siguientes datos topográficos para el análisis:

- Las distancias horizontales S y d : donde S es medida entre los puntos de inicio y el punto definido por la intersección de la curva y la línea horizontal; y d es una distancia complementaria, como se muestra en la figura siguiente.

- El desnivel h : medido entre el nivel del punto inicial y final del proyecto.

- Desnivel entre la línea horizontal y el punto más bajo de la curva (H), el cual se obtiene gráficamente.

A partir de estos datos topográficos se obtienen los valores de los siguientes parámetros:

- Radio de curvatura (R).
- Longitud de la curva (L) medida entre los puntos A y B, y la longitud total de la curva por recorrer en el plano vertical (L_T).
- Angulo de inclinación de la plataforma de lanzamiento (ϕ).

El procedimiento de cálculo (propuesto) es el siguiente (basado en el croquis presentado en este anexo):

Radio de curvatura (R)

$$R = \frac{H}{2} + \frac{S^2}{8H}$$

Longitud de la curva (L)

$$L = \frac{R\pi\beta^{\circ}}{180^{\circ}}$$

donde: $\beta^{\circ} = 2 \text{ SEN}^{-1}((S/2)/R)$

Longitud de curva complementaria (L')

$$L' = \frac{R\pi\beta'}{180^{\circ}}$$

donde: $\beta' = 2 \text{ SEN}^{-1}((P/2)/R)$

por lo tanto: $L_T = L + L'$

Angulo de inclinación de la plataforma de lanzamiento

(ϕ),

$$\phi_c = \text{COS}^{-1}((S/2)/R)$$

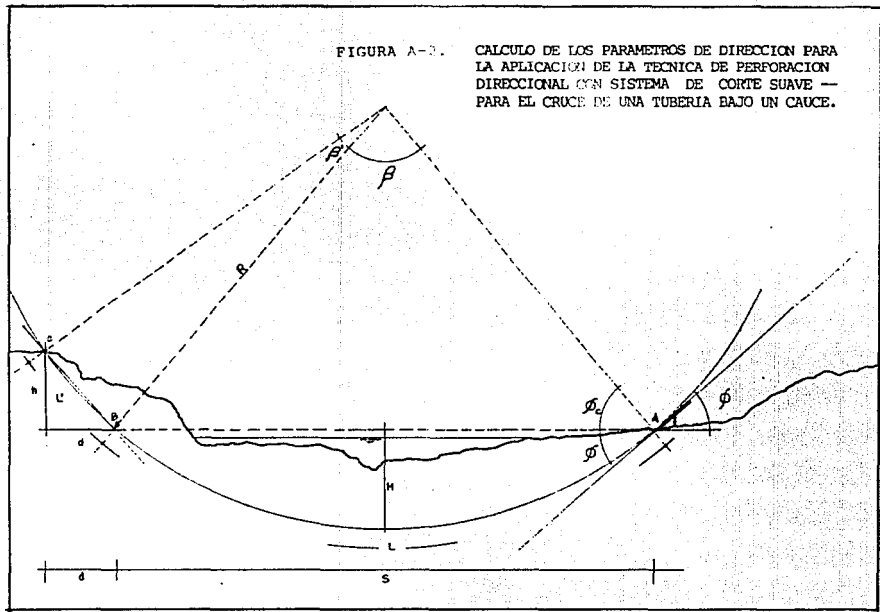
de donde se deduce que:

$$\phi = 90 - \phi_c$$

Este ángulo se mide a partir de la línea tangencial que se genera en el punto de inicio de la curva.

FIGURA A-2.

CALCULO DE LOS PARAMETROS DE DIRECCION PARA LA APLICACION DE LA TECNICA DE PERFORACION DIRECCIONAL CON SISTEMA DE CORTE SUAVE PARA EL CRUCE DE UNA TUBERIA BAJO UN CAUCE.



ANEXO 3

**FUERZAS RESISTIVAS AL PROCESO DE INSERCIÓN DE TUBERIAS
(CASO DE APLICACION)**

En casi todas las técnicas de excavación o perforación de minitúneles interviene el proceso de inserción o hincado de tuberías en el terreno (Pipe-Jacking), consiste en el deslizamiento de la tubería (que funciona como revestimiento o ademe) por la oquedad que va abriendo la máquina excavadora o el tubo piloto.

Uno de los principales problemas que se generan durante la inserción de las tuberías en el subsuelo es la generación de fuerzas resistivas que se oponen al desplazamiento.

En este anexo se estudian las fuerzas resistivas proponiendo condiciones particulares:

La fricción entre la tubería hincada y el terreno se desarrolla a lo largo de todo el contorno externo; esta condición es la más crítica durante la inserción de tuberías.

Con la utilización de máquinas de mayor diámetro que las tuberías se contribuye a reducir las fuerzas resisti-

vas, la fricción y adherencia, permitiendo utilizar equipos de empuje de menor capacidad.

El tiempo puede llegar a ser un factor determinante en la inserción de una tubería en el terreno; ya que por ejemplo, las arcillas expansivas ante el desconfinamiento provocado por la apertura de una oquedad se mueven hacia el espacio vacío (que genera el fuste de la máquina al avanzar) empujando contra la estructura de soporte (tubería), adicionándose como una carga que se opone a la inserción de la tubería en el suelo.

En la referencia 7 se presenta una fórmula empírica para calcular las fuerzas friccionantes que se oponen al avance de la máquina; si en esta fórmula se considera el largo del escudo como la longitud de la tubería, se podría aproximar el valor de la fuerza resistiva que se opone al avance de la tubería, considerando que la tubería está en su totalidad en contacto con el terreno:

$$W_E = \left[\sqrt{V_x} \left(1 + \frac{\sqrt{V_x}}{\sqrt{V_z}} \right) 2LD + G_p \right] f$$

donde: W_E : Es la fuerza de adherencia o fricción entre la superficie exterior de la tubería y el terreno.

$\sqrt{V_z}$: Presión vertical ejercida por el terreno sobre

la tubería.

\sqrt{x} : Presión horizontal ejercida por el terreno sobre la tubería.

L: Longitud de la tubería y máquina excavadora.

D: Diámetro de la tubería.

G_p : Peso de la tubería.

f: Coeficiente de fricción o adherencia entre la tubería y el terreno.

Si se hace analogía con la teoría de los pilotes hincados, el valor de f para suelos arcillosos se puede considerar según la tabla siguiente:

Material de la tubería	Consistencia de la arcilla	Adherencia (f_a)
Concreto	Blanda	0.00-0.35
	Firme	0.35-0.45
	Dura	0.45-0.70
Acero	Blanda	0.00-0.30
	Firme	0.30-0.40
	Dura	-----

En suelos arenosos se puede utilizar la siguiente

fórmula para obtener el coeficiente de fricción:

$$f_f = K_o \cdot H \cdot \gamma \cdot \delta$$

donde: f_f : Coeficiente de fricción.

K_o : Coeficiente de empuje de tierras (0.4 para arenas sueltas y 0.6 para arenas compactas).

γ : Peso volumétrico.

H: Profundidad de la oquedad.

δ : Angulo de fricción entre el suelo y la tubería (considerado como $2/3\phi$).

CASO DE APLICACION

Se pretende construir un paso subterráneo bajo una avenida altamente transitada, utilizando el método de hincar tuberías, que es una de las técnicas de los minitúneles. Las características del suelo y las condiciones geométricas de la oquedad se presentan en seguida:

Tipo de suelo: arcilla blanda.

N.A.F.: a 8 metros de profundidad.

γ : 1.5 ton/m³.

K_p : 1.0 (se considera el valor del empuje pasivo, ya que la estructura (tubo) empuja o pre-

siona contra el terreno durante la inserción).

$$\phi: 0.00$$

$$\sqrt{z}: (\gamma H) = 9.0 \text{ ton/m}^2.$$

$$\sqrt{x}: (K_p H) = 9.0 \text{ ton/m}^2.$$

$$H: 6.0 \text{ m.}$$

Diámetro exterior de la tubería: 40" (101.60 cm).

Diámetro interior de la tubería: 36" (91.60 cm).

Longitud de la oquedad (L): 45.0 m.

Peso por metro lineal de la tubería: 0.75 ton/m.

Peso total de la tubería: 33.75 ton.

Peso por metro lineal del suelo que está dentro de la tubería: 0.40 ton/m.

Peso total del suelo que está dentro de la tubería: 18.0 ton (a los 45.0 m).

$f_a = 0.35$ (ya que la tubería es de concreto).

Sustituyendo estos valores en la fórmula se obtiene el valor de la fuerza de adherencia que se opondrá a la inserción de la tubería de concreto:

$$W_E = \left[9.0 \left(1 + \frac{1}{1} \right) 2(45) (1.016) + (18 + 33.75) \right] 0.35 = 594.2 \text{ ton.}$$

Este valor solo representa la fuerza de adherencia generada entre la pared exterior de la tubería y la arcilla.

Cuando se inserta una tubería en el suelo el material va entrando dentro de ésta, generando en el interior fuerzas de adherencia; por lo que la fuerza de empuje necesaria para hincar 45.0 m de tubería de concreto, de 40" de diámetro, en arcilla blanda, es de aproximadamente dos veces el valor calculado anteriormente: 1200 ton.

Suponiendo que se cuenta para la inserción de la tubería con 2 gatos hidráulicos de 20" (50.8cm) de diámetro, se pretende saber cuál deberá ser la capacidad (en cuanto a la presión) de la unidad hidráulica, para desarrollar por lo menos 1200 ton de empuje:

Area de la sección transversal de cada gato:

$$A = 0.1013 \text{ m}^2$$

Area total por ambos gatos:

$$A_t = 0.2026 \text{ m}^2$$

La presión necesaria para desarrollar 1200 toneladas de empuje con dos gatos de 20" de diámetro será:

$$P = \frac{1.200}{0.2026} = 5923 \text{ ton/m}^2 \text{ (8416.92 lb/pulgada}^2\text{)}$$

En el mercado de la industria Oleo-hidráulica se --
pueden encontrar unidades hidráulicas de 10000 lb/pulg², -
por lo cual, sí es posible realizar tal obra.