



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco

Emisor *Oriente*

Investigación técnica de líneas de conducción. Sesenta y dos kilómetros de túnel para sacar el agua de una cuenca que no tiene salida natural: cómo se estudió, cómo se excavó, cuánto costó y qué queda pendiente.

Equipo

Jordan Aguilar Daniela Sarahy · Flores Cuevas Atan
Josué · Salazar López Juan Fernando

Obras de Infraestructura

Grupo ACV08

19.50230° N 99.07717° O
→ 19.94819° N 99.29565° O

Contenido

Introducción

Introducción	7
El problema del drenaje del Valle de México	8
Qué es el TEO	10
Por qué se hizo	10
Cómo se construyó	11
Cuánto costó	12
Qué resultó	13
Organización del documento	14
Objetivo, alcance y método	16
Justificación	17
Pregunta detonadora	17
Preguntas de investigación	18
Objetivo general	18
Objetivos específicos	19
Alcance	19
Método	20

Parte I · Líneas de conducción

1	Líneas de conducción: definición y componentes	22
	Qué es una línea de conducción	23
	Las cuatro partes de una línea	23
	Gasto: cuánto fluido pasa	24
	Presión y carga	25
	Pendiente	26
	Por origen de la energía: gravedad, bombeo y compresión	26
	Por régimen: a presión y a superficie libre	29
	Diámetro y velocidad	30
	Pérdidas de energía	31
	Rugosidad	31
	Los esquemas de la línea, pieza por pieza	32
	Qué recorre la Parte I	39
2	Tipos y clasificación de las líneas de conducción	41
	Por tipo de fluido	42
	Tres ecuaciones para calcular una conducción	50
	Velocidades y diámetros	52
	Criterios de selección	55

	Normas de hidrocarburos	55
	Qué es una presa y cómo se clasifica	56
	Balance	61
3	Antecedentes de las obras de conducción en México	62
	Tres problemas, tres familias de obras	63
	Primero se levantaron muros contra el agua	64
	Chapultepec y Querétaro: el agua que llega por gravedad	65
	Un túnel de 1608 que se derrumbó por falta de revestimiento	66
	El Gran Canal de 1900 y el suelo que se hundió	67
	Bajar el drenaje hasta donde el suelo ya no se mueve	69
	Un emisor que nunca descansa	75
	Del otro lado: llevar agua desde fuera de la cuenca	76
	Monterrey y Guadalajara: costos que se multiplican	77
	Petróleo por tubo: la conducción a presión	78
	Las tres presas del río Tula	80
	Qué dejó esta historia	81
	Balance	81
4	Estudios y actividades preliminares	82
	Por qué se estudia antes de construir	83
	Panorama: cómo se relacionan los estudios	84
	Topografía y geodesia	84
	Geología y fotointerpretación	87
	Tipos de suelo	90
	Geofísica	92
	Geotecnia: sondeos, ensayos de campo y laboratorio	94
	Geohidrología	102
	Hidrología	102
	Hidráulica	107
	Impacto ambiental y social (MIA)	108
	Factibilidad técnica y costo-beneficio	109
	Riesgo	110
	Derecho de vía y liberación de predios	110
	Actividades preliminares de obra	111
	Del estudio a la obra: escalas, instrumentación e informe	113
	Quién hace cada estudio y en qué orden	115
	Balance	117
5	Excavación, cimentaciones y maquinaria	118
	Excavar, sostener y controlar el agua	119
	Cómo se porta el terreno	121

	Excavación superficial: zanjas, taludes, ademes, agua y rellenos	123
	Lumbreras: el pozo que abre paso al túnel	133
	Cimentaciones	140
	Túneles convencionales: voladura, sostenimiento y aire comprimido	144
	Tuneladoras y escudos	150
	Sin abrir zanja: hincado, microtúneles y perforación direccional	159
	Maquinaria por tarea	162
	Maquinaria innovadora	162
	Criterios de selección por tipo de suelo	164
	Balance	165
6	Materiales	167
	Clasificación de los materiales de construcción	168
	Ocho materiales, cada uno con su lugar	173
	Acero	173
	Hierro dúctil	173
	Concreto simple, reforzado y presforzado	176
	PVC	178
	PEAD	179
	PRFV (poliéster reforzado con fibra de vidrio)	179
	Asbesto-cemento	180
	Revestimientos de túnel	180
	Protección anticorrosiva y catódica	185
	Bancos de materiales	187
	Materiales innovadores	191
	Cuadro comparativo de materiales	193
	Balance	195
7	Dispositivos de control, eficiencia y funcionamiento	197
	Golpe de ariete	197
	Dispositivos de control	197
	Eficiencia de un tipo de obra	209
	Funcionalidad: si la obra sigue sirviendo	210
	Pruebas que se hacen a una conducción	211
	Balance	212
8	Normatividad, calidad, sustentabilidad y mantenimiento	214
	Quién manda en qué	216
	Las leyes	216
	Las normas que tocan la obra	218
	Por qué la Semarnat autoriza una conducción y con qué norma	221
	Calidad: ISO 9001 y control en obra	222

Sustentabilidad y sostenibilidad en infraestructura hidráulica	224
Mantenimiento de conducciones: del plan a la obra	226
Balance	230

Parte II · La línea de conducción del TEO

9	Descripción y ubicación del proyecto	232
	Ficha técnica del TEO	233
	Importancia regional	255
10	Alternativas de solución	259
	Cuánta agua ya no cabía	261
	El antecedente de 1996	262
	El desempate fue de predios	262
	Lo que no se evaluó	263
	Un orden de magnitud	264
	Qué dice la literatura	265
	Por qué profundo y no superficial	265
	Balance	266
11	Estudios del proyecto por disciplina	268
12	Geología y geotecnia del trazo	322
13	Del anteproyecto a la obra: proceso constructivo	405
	El anteproyecto: lo que planteaba la MIA-P de 2008	406
	Ingeniería básica y proyecto ejecutivo: qué cambió del anteproyecto a la obra	408
	Cómo los estudios determinaron el proceso constructivo	411
	Actividades preliminares de la obra	413
	Secuencia general del proceso constructivo	416
	Obra de entrada: la captación en la L-0	418
	Obra de salida: el portal de El Salto	419
	Cartas topográficas del trazo	421
	Bancos utilizados en la obra	423
14	Excavación y maquinaria del túnel	425
15	Lumbreras y cimentaciones	530
16	Materiales y control de calidad	581
17	Funcionamiento de la línea de conducción	614
18	Sustentabilidad, autorización ambiental y normatividad	652
19	Operación, mantenimiento y tratamiento	672

	Lo que dicen los documentos oficiales	673
	Cómo se opera y quién lo opera	675
	Mantenimiento: dos túneles para poder revisarlos	676
	Lo que se dice sobre su efecto	678
	La planta de Atotonilco: 35 m³/s frente a 150	679
	Riego en el Valle del Mezquital	686
	Tula, 6 y 7 de septiembre de 2021	688
	Qué se puede afirmar	691
	Balance	692
20	Gestión, costos y seguridad	693
21	Contexto social y político	729
	El punto de partida: una cuenca cerrada que se hunde	730
	Calderón (2006-2012): decisión, contrato y arranque	732
	Peña Nieto (2012-2018): continuación, recálculo y retraso	735
	López Obrador (2018-2024): conclusión, inauguración y auditorías	738
	Actores: dependencias y empresas	741
	Contexto social del oriente del Valle de México	742
	Contexto social del Valle del Mezquital	746
	Balance social por región	749
22	Lecciones del Drenaje Profundo	751
	Parte A. El sistema que el TEO heredó	752
	Parte B. El TEO frente al mundo	761
23	Conclusión	767
	Pregunta detonadora: ¿puede un túnel de 62 km resolver un problema que el Valle de México arrastra desde hace casi 600 años?	768
	Síntesis	772
Anexos		
	Glosario	773
	Cifras oficiales del TEO	779
	Anexos	784
	Anexo de planos	790
	Anexo de estudios	844
	Anexo de entrevistas	924
	Acervo fotográfico de Fundación ICA	932

O.T. 4062

carso
INFRAESTRUCTURA Y CONSTRUCCION M.R.

20

Introducción

Introducción

Entre 2008 y 2019 se construyó en el Valle de México un túnel de 62.4 km para sacar de la cuenca el agua residual pluvial que su drenaje ya no lograba desalojar. Se llama Túnel Emisor Oriente (TEO), conduce hasta 50 m³/s por gravedad y es la obra de drenaje más larga del país. Esta introducción presenta el problema que le dio origen a la obra, las razones de su construcción, el modo en que se ejecutó, su costo y sus resultados, y explica cómo se organiza el resto del documento.



Figura 25. Trazo del Túnel Emisor Oriente.

Figura 1. Trazo del TEO de Ecatepec a Atotonilco con sus seis tramos

01

El problema del drenaje del Valle de México

El Valle de México es una cuenca cerrada. Hasta el siglo XVI el agua de lluvia y de los ríos se acumulaba en cinco lagos (Texcoco, Xaltocan, Zumpango, Xochimilco y Chalco) que en temporada de lluvias llegaban a formar un solo cuerpo. La ciudad se asentó sobre ese fondo lacustre y desde entonces ha dependido de obras para sacar el agua del valle, no para almacenarla. La zona metropolitana ocupa hoy cerca del 95 % de la superficie que cubrían los lagos, concentra alrededor de una quinta parte de la población del país y produce cerca

de un tercio de su producto interno bruto. Una inundación en esa superficie afecta aeropuerto, Metro, subestaciones y vialidades de las que depende buena parte de la economía nacional.

La solución histórica fue el desagüe artificial hacia la cuenca del río Tula. El Gran Canal funcionaba por gravedad y en 1910 tenía una pendiente de 19 cm por kilómetro y una capacidad de 80 m³/s. Al desagüe superficial se sumó el Drenaje Profundo, un sistema de túneles a gran profundidad cuyo colector final, el Emisor Central, se inauguró en 1975: 49.7 km, 6.5 m de diámetro y 200 m³/s de capacidad (otras fuentes dan 50 km y hasta 220 m³/s, según el año y el estudio; ver capítulos 3 y 10).

Ese sistema se debilitó por una causa que se había previsto mal. La extracción de agua del acuífero hundió el terreno, y el hundimiento le resta pendiente a los canales y a los túneles de gravedad. La capacidad de desalojo del sistema pasó de 280 m³/s en 1975 a 165 m³/s en 2007, mientras la población casi se duplicó. A esa pérdida se sumó un riesgo operativo: el Emisor Central, que concentraba casi toda la capacidad profunda, no había recibido mantenimiento mayor desde 1992 y no podía cerrarse sin dejar al valle sin su salida principal. Cualquier falla en su revestimiento amenazaba con una inundación generalizada, y el sistema carecía de un segundo conducto para revisarlo.

En 2007 la inundación se declaró emergencia nacional y se incorporó al Programa de Sustentabilidad Hídrica del Valle de México, impulsado el 8 de noviembre de ese año. El programa incluía un nuevo emisor profundo y plantas de tratamiento. La ingeniería básica se apoyó en un estudio hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que fijó el diámetro de 7.0 m para una tormenta de diseño de 50 años de periodo de retorno, y en estudios de factibilidad de la trayectoria elaborados por la CFE a solicitud de Conagua.

02

Qué es el TEO

El Túnel Emisor Oriente es un drenaje subterráneo por gravedad de 62.4 km de longitud y 7.0 m de diámetro interior. Recibe el agua en la lumbrera L-0, en el límite entre la Ciudad de México y el Estado de México, y la descarga en el río El Salto, en Atotonilco de Tula, Hidalgo. A lo largo del trazo el túnel baja de la cota 2,203 a la 2,106 msnm, una pendiente de 0.0016 que basta para mover el agua sin bombeo en el recorrido principal. Corre entre 25 y 150 m bajo la superficie, casi todo por debajo del nivel freático, y cruza Ecatepec, Tecámac, Zumpango, Teoloyucan, Huehuetoca y Tepeji del Río, entre otros municipios. Beneficia a casi 21.2 millones de habitantes del área metropolitana.

La obra comprende el túnel, dividido en seis tramos que se excavaron al mismo tiempo; 25 lumbreras (15 de 12 m, 9 de 16 m y 1 de 18 m de diámetro), que sirvieron para armar las tuneladoras, sacar el material y dar acceso al túnel; el portal de entrada con sus compuertas de regulación; la planta de bombeo El Caracol, que mantiene el nivel del agua en el tramo inicial; y la obra de descarga. El revestimiento primario está formado por anillos de dovelas prefabricadas, y el definitivo es de concreto reforzado.

03

Por qué se hizo

Las razones son tres y se refuerzan entre sí. La primera es de capacidad: sumar 150 m³/s a los 165 m³/s disponibles en 2007 daba un sistema de 315 m³/s, capaz de absorber una tormenta con recurrencia de 50 años. La segunda es de redundancia: con dos emisores profundos se puede cerrar uno para

inspeccionarlo y repararlo mientras el otro trabaja. La tercera es el costo de no actuar, que las evaluaciones oficiales calcularon con manchas de inundación sobre la zona metropolitana, la red del Metro y el aeropuerto.

Existían otras opciones. Las obras emergentes de 2007, cuatro plantas de bombeo provisionales, tenían vida útil reducida. La alternativa que Conagua comparó con el TEO fue un segundo Túnel Emisor Central, de capacidad y longitud casi iguales. Se eligió el trazo oriente, y en el capítulo 10 se revisan los criterios de la comparación y lo que no se comparó.

04

Cómo se construyó

El anteproyecto y la Manifestación de Impacto Ambiental son de 2008. La MIA describía 24 lumbreras, cuatro años de construcción y 12,000 millones de pesos de obra; Semarnat emitió su resolutive condicionado el 18 de junio de 2008. El contrato de obra se firmó el 14 de noviembre de 2008 por adjudicación directa y comprendía el proyecto ejecutivo y la construcción. El proyecto ejecutivo, por tanto, se desarrolló mientras se construía.

La excavación se hizo con seis tuneladoras de presión de tierra (EPB), tres Herrenknecht y tres Robbins. El suelo exigió máquinas capaces de cambiar de modo de trabajo: arcilla lacustre con 200 a 350 % de contenido de agua, tobas y basalto con abrasividad Cerchar de hasta 4.2. En el tramo 3, una misma máquina avanzó 12.46 m por día en suelo y 4.85 en roca. El récord de una de las Robbins fue de 30 m por día y 528 m por mes. Las lumbreras se usaron como talleres para cambiar herramientas de corte, y se realizaron cerca de 50 intervenciones hiperbáricas, la primera el 2 de junio de 2013, que fue la primera con una EPB en México; después se pasó a intervenciones a presión atmosférica, más baratas y rápidas.

Las lumbreras profundas se rodearon con muros colados en zanja (muro Milán), excavados con almeja en suelo blando y con hidrofresa en suelo duro. La lumbrera L-12 fue la más complicada. Para el proyecto se estimó un bombeo de 4.6 L/s y durante la obra hubo que extraer más de 600 L/s, con un sistema de abatimiento que operó 873 días y un factor de seguridad por subpresión de 0.11 contra un mínimo de 1.3.

Las lluvias de febrero de 2010 inundaron el tramo 1 y dañaron una tuneladora, lo que obligó a reasignar otra y a construir la lumbrera L-3A. Los primeros 10.1 km, de la L-0 a la L-5, entraron en operación en 2013. La última tuneladora terminó de excavar el 23 de mayo de 2019, con 62,101 m excavados y 41,352 anillos de dovelas colocados. La ASF fija el término de la construcción el 4 de diciembre de 2019, y el 23 de diciembre de ese año se inauguró el túnel y entraron en funcionamiento los 52.3 km restantes. En total se movieron cerca de 4.7 millones de m³ de excavación, se colaron 1.3 millones de m³ de concreto y se colocaron 142,226 t de acero.

05

Cuánto costó

El contrato de obra se firmó por 9,595.6 millones de pesos y 1,402 días. Terminó en 20,702.8 millones y 3,911 días, tras seis convenios: 2.16 veces el monto y 2.8 veces el plazo. Los tres primeros convenios concentran la mayor parte del incremento. Las causas que señalan las auditorías son, sobre todo, geológicas e hidrogeológicas: un terreno distinto del previsto en el estudio con el que se contrató, y un proyecto ejecutivo que se ajustó sobre la marcha.

Monto del contrato

millones de pesos

**Plazo de ejecución**

días naturales

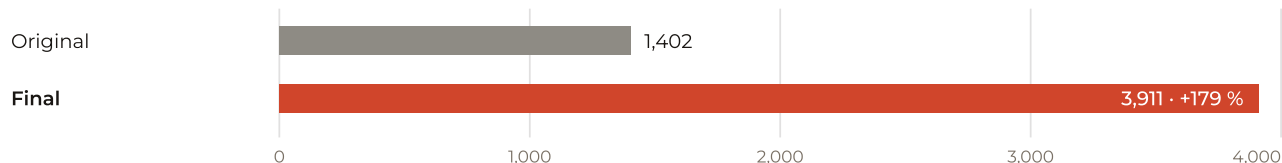


Figura 2. Monto y plazo del contrato, original contra final

La cifra de 20,702.8 millones de pesos es la del contrato de obra y no la del proyecto. El costo total estimado del proyecto, con supervisión, asesorías y otros conceptos, es de 46,263.9 millones de pesos. Ambas cantidades miden alcances distintos y no deben compararse entre sí. La Auditoría Superior de la Federación revisó el gasto en 2012, 2018 y 2021 y encontró en total 211.7 millones de pesos por aclarar: 91.0 en 2018 y 120.7 en 2021. El problema señalado no está tanto en lo que se pagó mal como en el conocimiento del terreno con que se contrató.

06

Qué resultó

La solución técnica fue la que el problema pedía. Un segundo túnel profundo, por gravedad, con capacidad de 150 m³/s, resolvió la falta de capacidad y de redundancia del drenaje, y la tecnología empleada respondió al suelo. La evidencia reunida muestra también deficiencias de planeación. Los estudios geotécnicos previos se quedaron cortos donde más importaba: en la L-12 y en el tramo 5, donde los sondeos hechos durante la obra mostraron presiones de agua hasta 30 m de columna distintas a las del proyecto ejecutivo. La autorización

ambiental se otorgó para una obra de 24 lumbreras y cuatro años; se construyeron 25 lumbreras en once años, algunas a más de un kilómetro de la ubicación que describía la MIA.

Dos asuntos quedan abiertos. El primero es el destino del agua: la planta de tratamiento de Atotonilco trata 35 m³/s en promedio y el túnel puede descargar 150. En tormenta, parte del flujo llega sin tratar al río Tula y al Valle del Mezquital, y la inundación de Tula de septiembre de 2021 no cuenta con un estudio técnico independiente que deslinde causas. El segundo es el de las alternativas: no hay un análisis público que compare el TEO con captación de lluvia, recarga del acuífero o infraestructura verde. Esas medidas no sustituyen un drenaje profundo, pero pudieron reducir el volumen que el túnel debe conducir.

Parte de la información no es pública, como los estudios de factibilidad de la CFE y el proyecto ejecutivo. El Libro Blanco de la obra, publicado por Conagua en noviembre de 2018, es público, pero llega solo hasta junio de ese año, y tampoco existe una serie oficial de desempeño del túnel posterior a 2019.

07

Organización del documento

El documento se divide en dos partes y un conjunto de anexos.

La Parte I, capítulos 1 a 8, reúne los conceptos generales de las líneas de conducción, sin referirse al TEO salvo por remisión. El capítulo 1 define la línea de conducción y sus componentes; el 2 expone los tipos y la clasificación; el 3 recoge los antecedentes de México; el 4 trata los estudios y actividades preliminares; el 5, la excavación, las cimentaciones y la maquinaria; el 6, los materiales; el 7, el control y la eficiencia; y el 8, la normatividad, la calidad y el mantenimiento.

La Parte II, capítulos 9 a 23, aplica esos conceptos al TEO. El capítulo 9 describe la obra y su ubicación; el 10 revisa las alternativas; el 11 presenta los estudios por disciplina; el 12, la geología y la geotecnia; el 13 sigue el proceso del anteproyecto a la obra; el 14 y el 15 detallan la excavación con su maquinaria y las lumbreras con sus cimentaciones; el 16 trata los materiales y la calidad; el 17, el funcionamiento; el 18, la sustentabilidad y la normatividad; el 19, la operación, el mantenimiento y la planta de tratamiento; el 20, la gestión, los costos y la seguridad; el 21, el contexto social y político; el 22, las lecciones del Drenaje Profundo, y el 23 contiene la conclusión.

Los anexos incluyen la normatividad aplicable, los materiales y la maquinaria innovadora, los planos, los estudios, un glosario de términos técnicos y una tabla maestra con las cifras oficiales de la obra. Antes de la Parte I, el apartado "Objetivo, alcance y método" expone la pregunta que guía la investigación, los criterios de selección de fuentes y la forma en que se resolvieron las diferencias entre cifras.

Los capítulos pueden leerse en orden o por separado. Quien necesite los conceptos antes de revisar la obra encontrará lo necesario en la Parte I; quien busque directamente las cifras, las fechas y las decisiones del TEO puede iniciar en el capítulo 9 y consultar la tabla de cifras oficiales al final.



Introducción

Objetivo, alcance y método

01

Justificación

El Túnel Emisor Oriente (TEO) es la obra de drenaje más larga del país y una de las intervenciones de mayor costo en la historia del sistema hidráulico del Valle de México. Su descripción pública suele reducirse a tres cifras: 62 km de longitud, 150 m³/s de capacidad y un costo que superó el doble del contratado. Detrás de esas cifras hay decisiones de ingeniería, de contratación y de política pública que rara vez se presentan juntas: por qué se eligió un túnel profundo, qué estudios lo sustentaron, cómo se resolvió la excavación en un terreno que cambia de arcilla lacustre a basalto, y qué ocurre con el agua una vez que sale del Valle.

La obra permite además estudiar de manera concreta los temas de una línea de conducción: tipos y clasificación, estudios preliminares, excavación y maquinaria, materiales, control de la eficiencia, normatividad y mantenimiento. Un túnel de gravedad de esta escala reúne todos esos temas en un solo caso, con documentación oficial suficiente para contrastar lo planeado con lo ejecutado. Esa disponibilidad de auditorías, evaluaciones y tesis de quienes trabajaron en la obra justifica una investigación documental que ordene la información dispersa, señale sus discrepancias y evalúe la obra con base en los datos.

02

Pregunta detonadora

¿Puede un túnel de 62 km resolver un problema que el Valle de México arrastra desde hace casi 600 años?

La pregunta remite a la serie de obras que comienza con el socavón de Nochistongo (1607-1608) y llega al TEO, y obliga a distinguir entre dos cosas: si la obra cumple su función técnica y si resuelve el problema de fondo. La conclusión del documento (capítulo 23) la responde de forma explícita.

03

Preguntas de investigación

1. ¿Por qué el drenaje del Valle perdió capacidad y por qué se eligió un segundo emisor profundo por gravedad frente a otras alternativas?
2. ¿Qué tecnología, métodos de excavación y materiales se emplearon, y respondieron al terreno encontrado?
3. ¿Qué estudios precedieron a la obra y fueron suficientes frente a lo que mostró la excavación?
4. ¿Cuánto costó la obra y cuánto tardó respecto de lo contratado, y a qué se debió la diferencia?
5. ¿Qué autorizó la evaluación de impacto ambiental, qué sustentabilidad tiene la obra y qué ocurre con el agua a la salida del túnel?
6. ¿Qué tan transparente fue la obra y qué lecciones deja para proyectos futuros?

04

Objetivo general

Analizar el proyecto, la construcción y los resultados del Túnel Emisor Oriente como línea de conducción por gravedad, a partir de la documentación disponible, para valorar si la solución fue técnicamente adecuada y si su planeación, contratación y rendición de cuentas estuvieron a la altura de la obra.

05

Objetivos específicos

1. Exponer los conceptos generales de las líneas de conducción (definición, tipos, antecedentes, estudios preliminares, excavación, materiales, control, normatividad y mantenimiento) que sirven de marco para el análisis.
 2. Describir el TEO: su ubicación, trazo, componentes y datos generales.
 3. Reconstruir la justificación de la obra y las alternativas que se compararon.
 4. Documentar los estudios previos y la geología encontrada, y contrastarlos con el comportamiento del terreno durante la construcción.
 5. Describir el proceso constructivo, la excavación, las lumbreras, la maquinaria y los materiales empleados.
 6. Establecer la evolución de los contratos, los costos y los plazos, con sus causas.
 7. Examinar el funcionamiento, la sustentabilidad, la normatividad aplicable, la operación y el mantenimiento.
 8. Formular conclusiones sustentadas en los datos y las lecciones que deja la obra.
-

06

Alcance

El documento cubre el TEO desde el origen del problema (el hundimiento del Valle y la pérdida de capacidad del Emisor Central) hasta la entrada en operación completa del túnel en diciembre de 2019, con una mirada limitada al periodo posterior en lo que toca a su funcionamiento, la planta de tratamiento de Atotonilco y la inundación de Tula de septiembre de 2021. Se trata por separado la teoría general de las líneas de conducción (Parte I) y la aplicación al caso (Parte II). Los demás elementos del Drenaje Profundo se estudian solo como antecedente y comparación.

Quedan fuera del alcance el diseño estructural y el cálculo detallado de los elementos del túnel, que corresponden al proyecto ejecutivo y no son públicos; la evaluación económica propia de la obra, para la que no existe un análisis costo-beneficio disponible; y el seguimiento de la operación posterior a 2019, para el cual no se dispone de una serie oficial de gastos por evento. Los datos que no son públicos se señalan como tales en los capítulos correspondientes y en el anexo de solicitudes de acceso a la información.

07

Método

La investigación es documental, descriptiva y analítica. Consiste en localizar, leer, contrastar y ordenar la información publicada sobre el proyecto, sin mediciones propias en campo, y en organizarla de lo general (conceptos de líneas de conducción) a lo particular (el TEO), del estudio a la decisión y de la decisión al resultado.

TIPOS DE FUENTES

- Documentos oficiales: informes de auditoría de la Auditoría Superior de la Federación (ASF) de 2012, 2018 y 2021; documentos de Conagua, entre ellos el informe de acciones de drenaje 2007-2012, comunicados y el Libro Blanco de la obra; la Manifestación de Impacto Ambiental y el resolutivo de Semarnat; el Diario Oficial de la Federación; y la Evaluación de Diseño del programa K131.
- Documentos técnicos: tesis de licenciatura y de posgrado de la UNAM redactadas por ingenieros que participaron en las lumbreras, en la supervisión o en la excavación; artículos de la revista de la Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas (AMITOS), memorias de congresos y artículos de revistas técnicas internacionales y de los fabricantes de las tuneladoras.
- Prensa nacional e internacional, usada para el contexto político y los hechos de la obra, y siempre señalada como tal en el texto.

CRITERIOS DE SELECCIÓN Y JERARQUÍA

Se incluyeron las fuentes que aportan datos verificables del TEO o de los conceptos de línea de conducción, con autoría identificable, fecha y posibilidad de localizar la página citada. Se descartaron las que repiten cifras sin indicar su origen. La jerarquía es la siguiente:

1. Fuentes oficiales primarias, que prevalecen en cifras de contrato, monto, plazo, fechas y características de proyecto.
2. Fuentes técnicas (tesis con datos de obra, artículos y memorias), que prevalecen en procedimientos constructivos, parámetros geotécnicos y rendimientos de excavación.
3. Prensa, que se acepta únicamente cuando cita una fuente oficial o documenta un hecho público, y nunca para cifras técnicas.

Entre dos fuentes de igual nivel se prefiere la más reciente y la que ofrece el dato con su unidad, su fecha y su página.

VERIFICACIÓN Y TRATAMIENTO DE LAS DIFERENCIAS ENTRE CIFRAS

Las cifras clave (longitud, diámetro, capacidad, número de lumbreras, montos, plazos y fechas) se contrastaron entre al menos dos fuentes o se confirmaron en una oficial. Cuando las fuentes difieren, el texto adopta una sola cifra y registra la diferencia en un recuadro de dato técnico que indica cuál se usa y por qué. Los criterios aplicados son tres: la fuente de mayor jerarquía, la fecha del documento y la consistencia aritmética, por ejemplo la suma de longitudes de los seis tramos contra la longitud total. Las diferencias por etapa del proyecto, como las 24 lumbreras del anteproyecto frente a las 25 construidas, se tratan como evolución del proyecto y no como error. Las cifras adoptadas se concentran en la tabla de cifras oficiales al final del documento.

Los cálculos propios, como sumas, porcentajes y conversiones, se identifican con las fórmulas y los datos de partida. Cuando un dato no existe en las fuentes consultadas, no se estima: el texto se limita a lo documentado.



Parte I · Líneas de conducción

1 Líneas de conducción: definición y componentes

De dónde sale el agua, por dónde viaja y cómo llega a su destino

Un acueducto prehispánico de dos caños, un oleoducto de 1906 y una tubería de acero de 2,13 m que lleva agua a una ciudad parecen obras sin relación. Las tres hacen lo mismo: llevar un fluido de un lugar a otro sin repartirlo en el camino, y las tres se calculan con las mismas pocas ideas. Este primer capítulo de la Parte I explica esas ideas con palabras sencillas y con ejemplos de obras reales, para que los capítulos siguientes puedan usarlas sin volver a definir las.

01

Qué es una línea de conducción

Una línea de conducción es el conjunto de conductos, estructuras y dispositivos que transporta un fluido de un punto de origen a uno de entrega, sin entregarlo a usuarios en el camino. En agua potable, la conducción lleva el agua de la fuente al tanque de regularización y se diseña para el gasto máximo diario; la tubería que sale del tanque hacia la población se diseña para el gasto máximo horario (Conagua, s. f., libro 12, cap. 1). En alcantarillado la jerarquía va de lo pequeño a lo grande: descargas domiciliarias, atarjeas, colectores, interceptores y, al final, el emisor que lleva el agua a la planta o al sitio de descarga.

CUATRO OBRAS EN CIFRAS

112 km

Oleoducto de Casiano, hacia 1906, con diez estaciones de bombeo

323 km

Acueductos, túneles y canales del Sistema Cutzamala

19 m³/s

Capacidad del Cutzamala; en 2022 suministró 15.68 m³/s

330 m

Desnivel que vence el acueducto El Cuchillo II

Fuente: Álvarez de la Borda (2006, p. 16); ASF (CP 2012, pp. 2-3 y 6); Conagua (2022); ASF (2023, pp. 2-3).

Casi toda conducción contiene los mismos elementos: obra de toma, conducto (tubo, túnel, canal o ducto), piezas especiales, dispositivos de control y seguridad, obras de arte (cruces, sifones, puentes), estructuras de inspección y un sistema de supervisión.

02

Las cuatro partes de una línea

Cada obra tiene sus particularidades, pero todas se pueden leer en cuatro partes, de principio a fin.

1. Captación o inicio: el punto donde el fluido entra a la línea, como la obra de toma de una presa, un manantial, un pozo, un tanque de salida o el colector que recoge una red.
2. Conducción: el conducto mismo, sea tubo, túnel, canal o ducto, con las piezas especiales que cambian su dirección o su diámetro (codos, reducciones, derivaciones).
3. Estructuras: lo que hace posible y segura la conducción, como las plantas de bombeo, los tanques, los pozos de visita y las lumbreras, los cruces y los dispositivos de control (capítulo 7).
4. Descarga o entrega: el punto donde el fluido sale de la línea, sea un tanque de regularización, una planta potabilizadora o de tratamiento, un cauce receptor o una estación de entrega.

OBRA	INICIO	CONDUCCIÓN	ESTRUCTURAS	DESCARGA
Acueducto de Chapultepec, hacia 1465	Albercas de los manantiales	Dos caños de argamasa	El caño de reserva, que se usaba cuando el otro se azolvaba	La ciudad de Tenochtitlan
Oleoducto de Casiano, hacia 1906	16 tanques de 55,000 barriles	Oleoducto de 112 km	Diez estaciones de bombeo	Mata Redonda, en el río Pánuco
Sistema Cutzamala	Tres presas de almacenamiento	323 km de acueductos, túneles y canales	Seis plantas de bombeo y torres de oscilación	Cuatro potabilizadoras
Acueducto El Cuchillo II	Presa El Cuchillo	Tubería de acero de 84 pulgadas y 106 km	Cinco estaciones de bombeo, cuatro tanques de sumergencia y tres torres de oscilación	Potabilizadora San Roque

03

Gasto: cuánto fluido pasa

El gasto es el volumen de fluido que atraviesa una sección del conducto en cada segundo, y se mide en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o en litros por segundo (L/s). Es la primera pregunta de cualquier diseño: cuánto hay que

llevar. El Sistema Cutzamala tiene una capacidad de $19 \text{ m}^3/\text{s}$ y en 2022 suministró $15.68 \text{ m}^3/\text{s}$. El Cuchillo II conduce hasta $5 \text{ m}^3/\text{s}$. El oleoducto de Casiano se calculó para una producción mínima de 3,000 barriles al día, que equivalen a unos 5.5 L/s .

En agua potable no se usa un solo gasto, como se vio arriba. En alcantarillado y en drenaje pluvial el gasto cambia de golpe, entre el estiaje y la tormenta.

El gasto, la velocidad y el área de la tubería están amarrados: para pasar el mismo gasto por un tubo más angosto, el fluido tiene que ir más rápido. Si el Cuchillo II lleva sus $5 \text{ m}^3/\text{s}$ por una tubería de 2.13 m de diámetro, la velocidad es de unos 1.4 m/s ; en un tubo de la mitad del diámetro sería cuatro veces mayor. Esta relación, la ecuación de continuidad, se desarrolla en el capítulo 2.

04

Presión y carga

Un fluido que llena un tubo empuja sus paredes: esa fuerza por unidad de superficie es la presión. En hidráulica se acostumbra expresarla como carga, que es la altura de columna de agua que produciría esa misma presión. Cada metro de columna de agua equivale a unos 9.8 kPa , de modo que 10 m de carga son casi 1 bar .

La carga total en un punto suma tres alturas: la del terreno sobre un nivel de referencia, la de presión y la que corresponde a la velocidad. Si se dibuja a lo largo de la línea, la suma de las dos primeras es la línea piezométrica, que es la altura a la que subiría el agua en un tubito conectado a la tubería. Esa línea decide si el tubo está bien o mal: no puede caer por debajo del conducto, porque se produciría vacío, ni subir más que la presión de trabajo del tubo, porque lo reventaría.

La carga explica por qué algunas obras necesitan tanta energía. Algunas presas del Cutzamala están por debajo de los 2,700 msnm del Valle de México, y las seis plantas de bombeo suman más de 1,600 m de carga. El Cuchillo II vence un desnivel de 330 m.

05

Pendiente

En un canal, un colector o un túnel sin presión no hay quién empuje el agua más que su propio peso, y por eso el fondo tiene que bajar. La pendiente es lo que baja el fondo por cada tramo que avanza, y se expresa en metros por metro, en centímetros por kilómetro o "al millar", que son metros por kilómetro. Una pendiente de 3 al millar baja 3 m en cada kilómetro.

Poca pendiente produce poca velocidad y el sedimento se deposita; demasiada produce velocidades que erosionan las paredes. La historia del Gran Canal del Desagüe muestra qué pasa cuando la pendiente cambia sin que nadie la diseñe: pasó de 19 cm/km en 1910 a casi cero en 1988 porque el suelo se hundió. El acueducto de Querétaro es el ejemplo contrario, una conducción por gravedad que mantiene una pendiente continua y suave y sube sobre arcos para no perder cota al cruzar un valle (ASCE, s. f.).

06

Por origen de la energía: gravedad, bombeo y compresión

El fluido avanza porque algo le da energía: el desnivel entre el origen y el destino, o una máquina. Chapultepec y Querétaro funcionaban por gravedad; el Cutzamala y el Cuchillo II necesitan bombeo porque tienen que subir el agua (capítulo 3).

GRAVEDAD

El fluido se mueve porque la cota de entrada es mayor que la de salida. Todo el diseño consiste en gastar esa energía en pérdidas por fricción sin que sobre ni falte. Si sobra desnivel, se disipa en estructuras de caída, válvulas reductoras o cajas rompedoras de presión; si falta, hay que bombear. No consume energía externa ni depende de equipos, pero obliga a seguir la topografía y fija una capacidad que depende de la pendiente.

BOMBEO

Se añade energía con una bomba. La potencia necesaria crece con el gasto y con la carga que debe vencer, y se divide entre el rendimiento de la bomba; a eso se suma el rendimiento del motor para obtener la potencia eléctrica.

Los rebombes son instalaciones intermedias que elevan la carga para mantener la circulación. El bombeo resuelve el desnivel, pero a cambio de energía continua, mantenimiento mecánico y un riesgo propio: el golpe de ariete por paro de bomba.

Una planta de bombeo grande es una obra civil con su propio plano tipo. La figura siguiente es la planta general de una estación del drenaje profundo con cárcamo circular: alrededor del cárcamo de bombeo, la casa de máquinas con motores diésel, la lumbrera de rejillas, la lumbrera de control, la subestación eléctrica, los tanques de diésel y los patios de maniobras, con los colectores y el interceptor que llegan a ella.

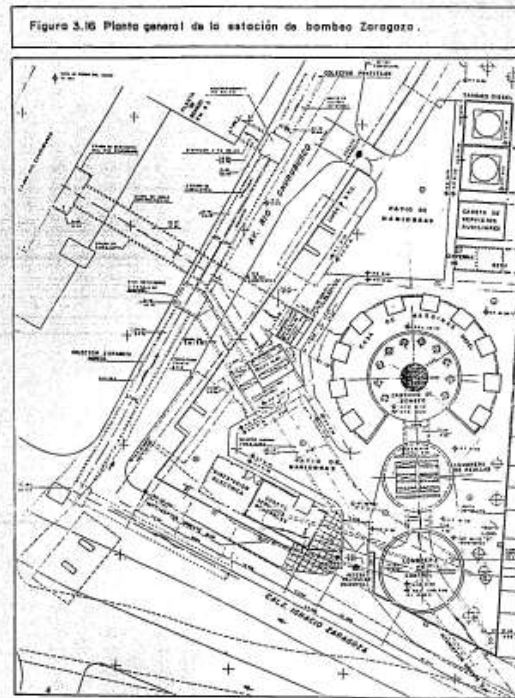


Figura 1.1. Planta general de una estación de bombeo con cárcamo circular del drenaje profundo

COMPRESIÓN

En un gasoducto la bomba equivale al compresor. Como el gas es compresible, su densidad cae con la presión, la velocidad crece a lo largo del ducto y el gradiente de presión no es lineal; las ecuaciones de agua no se aplican directamente y se usan relaciones de flujo compresible, que están en ASME B31.8. La compresión se reparte en estaciones intermedias que reponen la presión perdida.

CRITERIO	GRAVEDAD	BOMBEO
Energía externa	No	Sí, continua
Equipo mecánico	No	Bombas, motores, controles
Capacidad	Fija por pendiente y rugosidad	Ajustable (número de bombas, velocidad variable)
Riesgo hidráulico propio	Transitorio por cierre de válvula	Golpe de ariete por paro o falla eléctrica
Costo de operación	Bajo	Alto
Costo inicial	Alto si el trazo es largo o profundo	Menor en obra civil, mayor en equipo

CRITERIO	GRAVEDAD	BOMBEO
Domina cuando	Hay desnivel disponible	No hay desnivel o hay que subir

07

Por régimen: a presión y a superficie libre

A presión, el conducto trabaja lleno, la presión en cada punto es independiente de la atmósfera y el diseño se hace con la línea de energía y la línea piezométrica. A superficie libre, el fluido tiene una superficie en contacto con la atmósfera y lo mueve la componente del peso a lo largo de la pendiente; el gasto depende de la pendiente y de la geometría de la sección.

Un mismo conducto circular puede trabajar de las dos maneras. Una alcantarilla lleva agua a superficie libre mientras el tirante queda bajo la clave; si en tormenta se llena y la carga aguas arriba sigue creciendo, pasa a presión. La transición ocurre con salto hidráulico y flujo mixto, y los modelos de simulación (SWMM) deben representar ambos estados.

Dos números adimensionales ordenan el flujo. El de Reynolds compara las fuerzas de inercia con las de viscosidad y separa el régimen laminar del turbulento; casi todas las conducciones de agua son turbulentas. El de Froude compara la velocidad del flujo con la de una onda en la superficie: abajo de uno el flujo es lento y se controla desde aguas abajo; arriba de uno es rápido y se controla desde aguas arriba. El paso de uno a otro es el salto hidráulico, con fuerte disipación de energía. Por eso las estructuras de descarga se diseñan para que el salto ocurra dentro de un tanque amortiguador y no sobre el cauce.

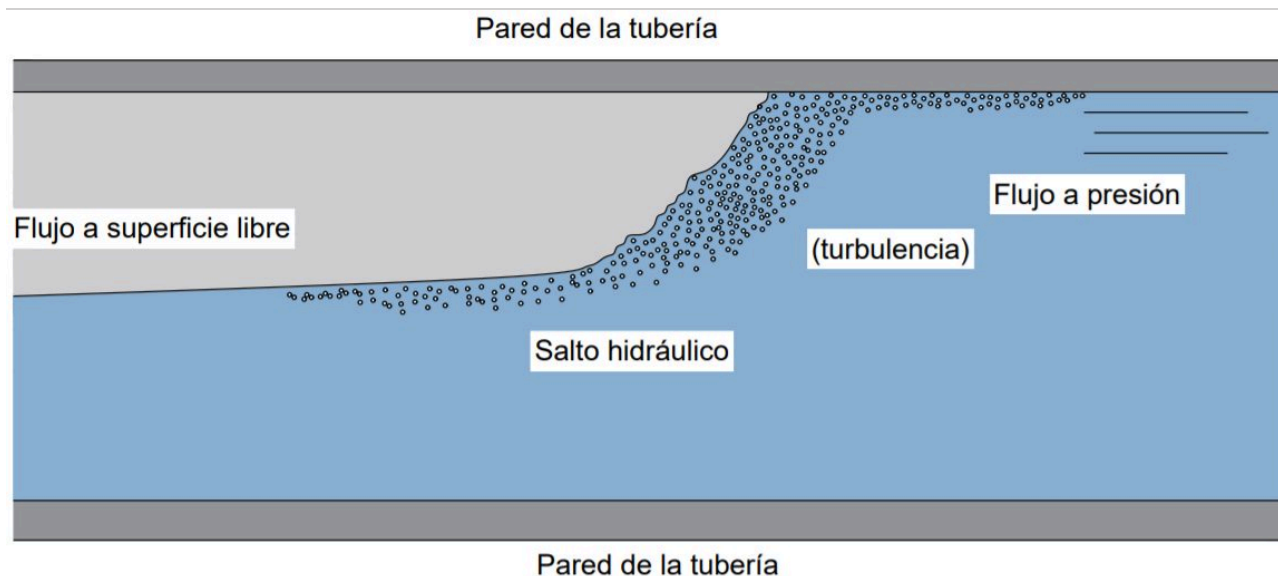


Figura 1.2. Flujo mixto en un conducto

EJEMPLO	FLUIDO	ENERGÍA	RÉGIMEN
Presa a potabilizadora	Agua potable	Gravedad	A presión
Pozos profundos	Agua potable	Bombeo	A presión
Atarjea y colector	Agua residual	Gravedad	Superficie libre
Emisor profundo de gran diámetro	Residual y pluvial	Gravedad	Superficie libre; entrada en carga en avenida extrema
Impulsión de aguas residuales	Agua residual	Bombeo	A presión
Poliducto	Refinados	Bombeo	A presión
Gasoducto	Gas natural	Compresión	A presión

08

Diámetro y velocidad

El diámetro es el ancho interior del conducto. Se escoge para que, con el gasto de diseño, el fluido no vaya tan despacio que se depositen sólidos ni tan aprisa que erosione las paredes o produzca sobrepresiones cuando se cierra

una válvula. Un diámetro pequeño abarata el tubo y encarece la operación, porque la velocidad sube y con ella las pérdidas. Un diámetro grande hace lo contrario.

Con una tubería de acero de 84 pulgadas (2.13 m) y su gasto máximo, el Cuchillo II mantiene una velocidad moderada de 1.4 m/s. En alcantarillado el diámetro mínimo de una atarjea es de 20 cm. Los límites de velocidad por material y los diámetros que existen para cada tipo de tubo están en el capítulo 2.

09

Pérdidas de energía

El fluido no llega con la misma energía con que salió. Parte se gasta por la fricción con las paredes, que crece con la longitud del conducto y con la velocidad y baja con el diámetro. Otra parte se gasta en cada accesorio, válvula o cambio de sección, que son las pérdidas locales. En un tubo a presión las pérdidas se ven como una caída de la línea piezométrica; en un canal, como la pendiente que hay que darle para que el agua llegue.

Cada accesorio, válvula o cambio de sección añade una pérdida que se calcula como una fracción de la carga de velocidad. Una válvula parcialmente cerrada puede modelarse subiendo la rugosidad equivalente del tramo (Conagua, s. f., libro 12, cap. 3), y su coeficiente de pérdida crece mucho al cerrarse. En una línea larga domina la fricción; en plantas de bombeo, cajas de válvulas y cárcamos, las locales pesan mucho.

10

Rugosidad

La pared de un conducto nunca es perfectamente lisa, y esa aspereza frena al fluido. La rugosidad es la medida de esa aspereza. En superficie libre se expresa con el coeficiente de Manning, que es menor mientras más liso es el

material, y en tubos a presión con una altura equivalente de las asperezas. Un tubo de PVC o de polietileno es mucho más liso que uno de concreto, y uno de acero con la pared picada por la corrosión es más áspero que uno nuevo.

La rugosidad no es una propiedad fija. Crece con los años, con el depósito de sedimento y con la corrosión, y por eso la capacidad de una conducción envejecida es menor que la de diseño. En el Emisor Central, el coeficiente de Manning pasó de 0.0126 a valores de entre 0.016 y 0.0221 por el deterioro de la pared. Los valores usuales por material y las ecuaciones que los emplean están en el capítulo 2.

11

Los esquemas de la línea, pieza por pieza

Los conceptos anteriores se reúnen aquí en ocho esquemas que se leen de la fuente al destino, con la explicación técnica que no cabe en una definición.

ANATOMÍA DE UNA LÍNEA POR GRAVEDAD

El esquema muestra por qué una línea por gravedad no necesita energía externa: el nivel de la fuente está más alto que el de la descarga y el desnivel se gasta, kilómetro a kilómetro, en vencer la fricción. La línea piezométrica que se ve sobre el tubo baja de forma continua; mientras quede por encima del tubo, el conducto trabaja con presión positiva y el fluido llega. Cuando el perfil del terreno sube más que esa línea, hay que cambiar el trazo, enterrar menos el tubo o agregar bombeo.

El Acueducto El Cuchillo II sirve de ejemplo de una línea completa: nace en la presa El Cuchillo, avanza 106 km por una tubería de acero de 84 pulgadas (2.13 m) y termina en la potabilizadora San Roque. En el camino tiene cinco estaciones de bombeo, cuatro tanques de sumergencia y tres torres de oscilación. Un acueducto real combina tramos por gravedad y por bombeo, y por eso conviene leerlo en tramos y no como una sola tubería.

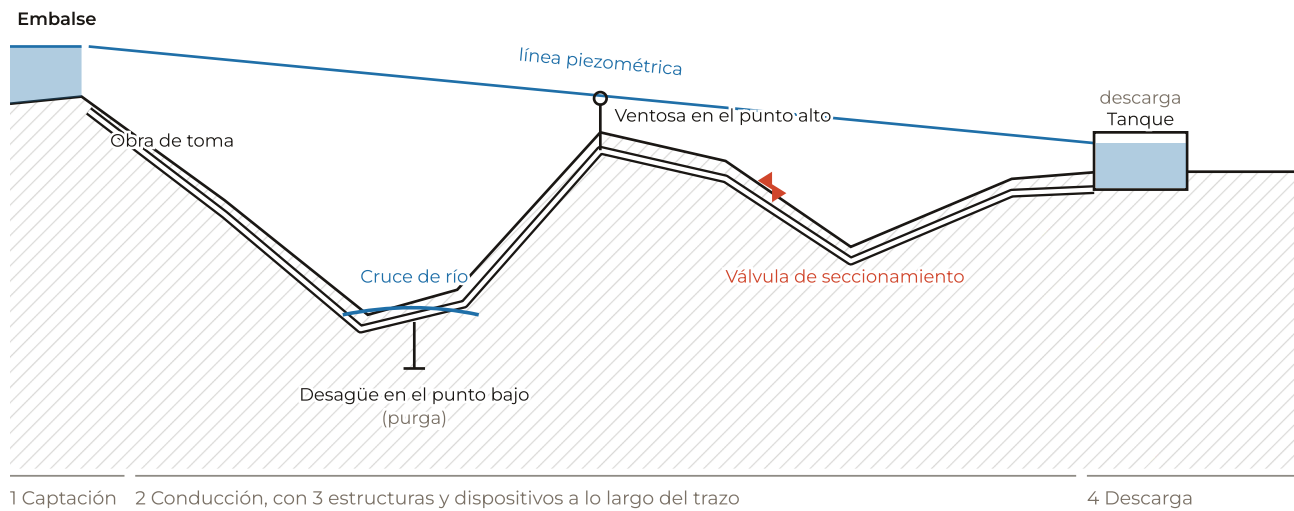
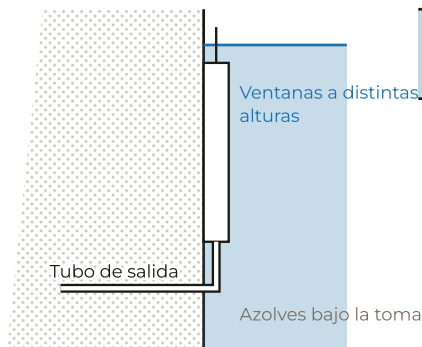


Figura 1.3. Las cuatro partes de una línea por gravedad

OBRAS DE TOMA

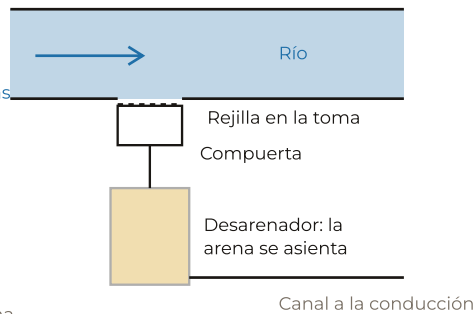
Tres formas de entrar a una línea

Toma en presa



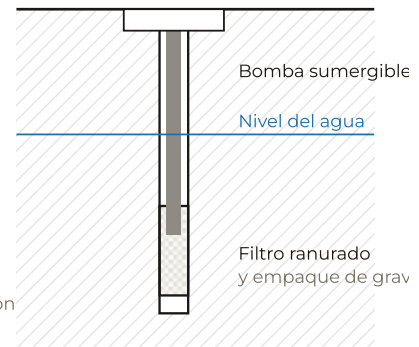
Elige la capa de agua que sale

Derivación en río, vista en planta



Sin almacenamiento: depende del caudal del río

Pozo profundo



Extrae agua subterránea con bombeo

Figura 1.4. Tres obras de toma

La obra de toma es el punto donde el agua pasa de la fuente a la línea. Se diseña para sacar el gasto que pide la conducción sin dejar entrar lo que la daña. Hay tres familias.

1. Toma en presa. Se abre en la cortina o en una torre dentro del vaso, con ventanas a varias alturas. La razón de tener varias ventanas es que el agua cambia de calidad con la profundidad: cerca del fondo hay más sedimento y menos oxígeno, cerca de la

superficie hay más algas. El operador elige la ventana con mejor agua según la época del año. Es el caso de las presas de almacenamiento del Sistema Cutzamala (El Bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria), cuya agua alimenta una conducción de 323 km.

2. Derivación en río. Una obra de cruce eleva el nivel del agua para que entre por una abertura lateral protegida con rejilla. Después pasa por un desarenador, un tanque donde la velocidad baja y la arena se asienta antes de entrar al tubo. En el Cutzamala las presas Tuxpan, Ixtapan del Oro, Chilesdo, Colorines, Tilostoc, El Durazno y Barrage son derivadoras.
3. Pozo profundo. Es una perforación con ademe, tubo de revestimiento, y un filtro frente al estrato que da agua. Siempre necesita bombeo, porque el agua está bajo el terreno, y es la fuente típica de las ciudades sin río cercano.

Dos criterios guían la elección: la calidad y la constancia de la fuente. Las fallas más comunes son el azolve de la rejilla o del desarenador por falta de limpieza y la entrada de aire por una sumergencia insuficiente en la succión, que se vuelve ruido, vibración y pérdida de gasto en la bomba.

LÍNEA DE GRADIENTE HIDRÁULICO Y LÍNEA DE ENERGÍA

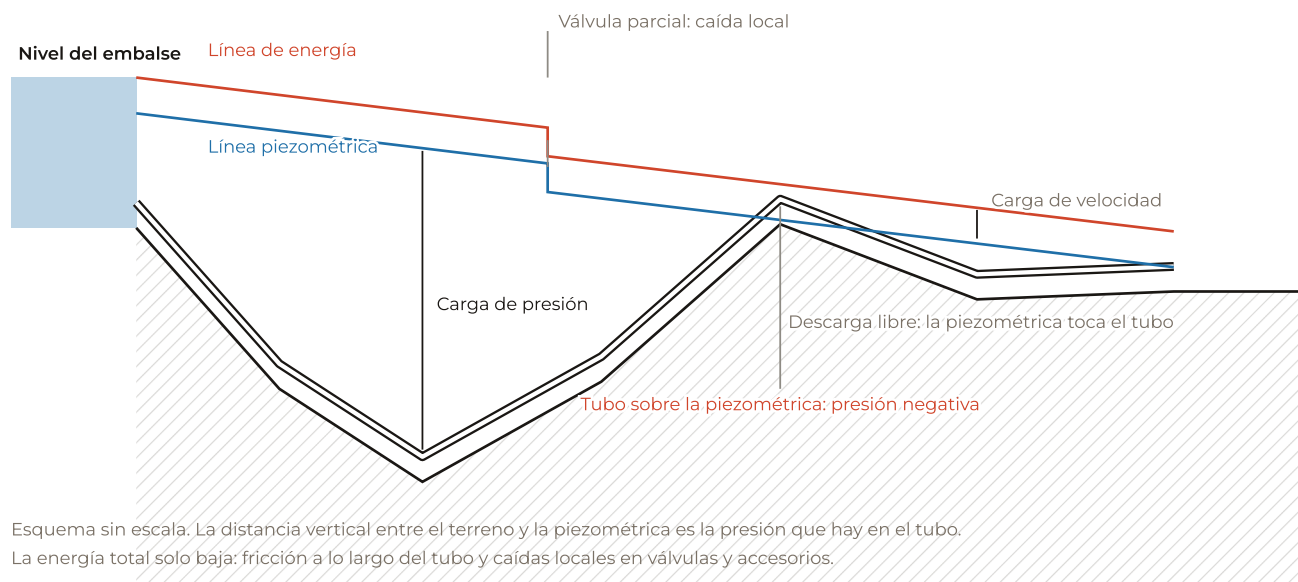


Figura 1.5. Línea de energía y línea piezométrica

Las dos líneas son la forma gráfica de la carga de la que se habló en "Presión y carga". La línea de energía marca la energía total en cada punto; la línea piezométrica, también llamada de gradiente hidráulico, queda debajo de ella una distancia igual a la carga de velocidad. En un tubo de diámetro constante las dos son paralelas y bajan de forma pareja con la fricción. Cada válvula, codo o reducción produce una caída súbita, la pérdida local, y por eso el esquema muestra un escalón en la válvula (Conagua, s. f., libro 12, cap. 3).

La lectura práctica es una sola: la distancia vertical entre el tubo y la línea piezométrica es la presión que hay en ese punto. Donde el tubo sube por encima de la línea, la presión es negativa, el agua puede soltar aire disuelto y el tubo corre riesgo de colapso por succión. La solución es bajar el tubo, subir la carga aguas arriba o aumentar el diámetro. En los puntos altos legítimos se instalan válvulas de admisión y expulsión de aire.

CARGA DISPONIBLE

Cómo se reparte el desnivel de 100 m

metros de carga; valores supuestos para ilustrar, no son de una obra

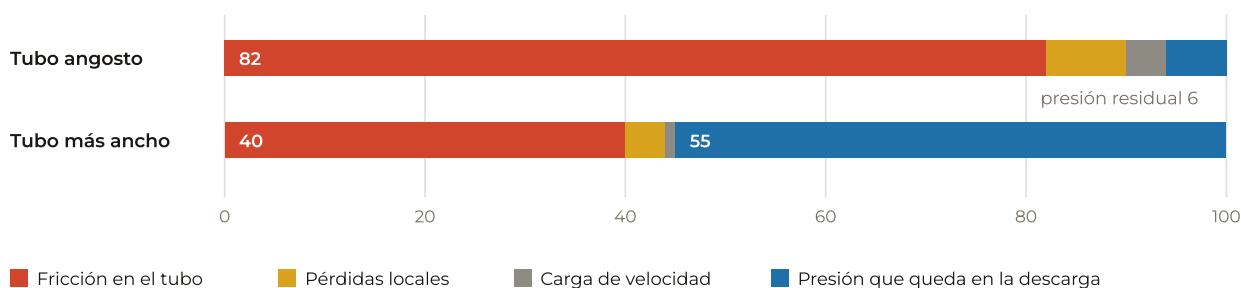


Figura 1.6. Cómo se reparte el desnivel

La carga disponible es el desnivel entre el origen y el destino. Es un presupuesto: cada metro se gasta en una de cuatro cosas, la fricción, las pérdidas locales, la carga de velocidad con que el agua sale y la presión que se desea tener al llegar. En un tubo angosto casi todo se va en fricción y el agua llega sin presión o no llega; en uno ancho sobra presión pero el tubo cuesta más. El diseñador busca el diámetro más barato que todavía deja la presión residual requerida. Los 100 m del esquema son un valor ilustrativo, no el de una obra.

El Cuchillo II lo ilustra: su diámetro de 2.13 m mantiene la velocidad en 1.4 m/s y, por eso, la fricción por kilómetro es pequeña. En alcantarillado el mismo presupuesto se aplica con otra exigencia: el diámetro mínimo de una atarjea es de 20 cm para que el tubo no se tape con sólidos.

REGÍMENES DE FLUJO

Este esquema complementa la figura del flujo mixto ya mostrada. Aquí interesa la clasificación: el número de Reynolds separa laminar de turbulento, y el de Froude separa el flujo lento o subcrítico del rápido o supercrítico. Una conducción de agua casi siempre es turbulenta y a presión; un colector casi siempre es turbulento y subcrítico.

El peligro de diseño está en la zona intermedia. Un emisor que se calcula a superficie libre y se llena en una avenida pasa a flujo mixto, con salto hidráulico, bolsas de aire y oscilaciones de presión que el cálculo de régimen permanente no prevé. Los transitorios se agrupan en tres tipos: cuasi estático, oscilación de masa y golpe de ariete, el más destructivo. El régimen también afecta la rugosidad que debe usarse, como muestra el caso del Emisor Central.

Tres estados del agua en un mismo conducto

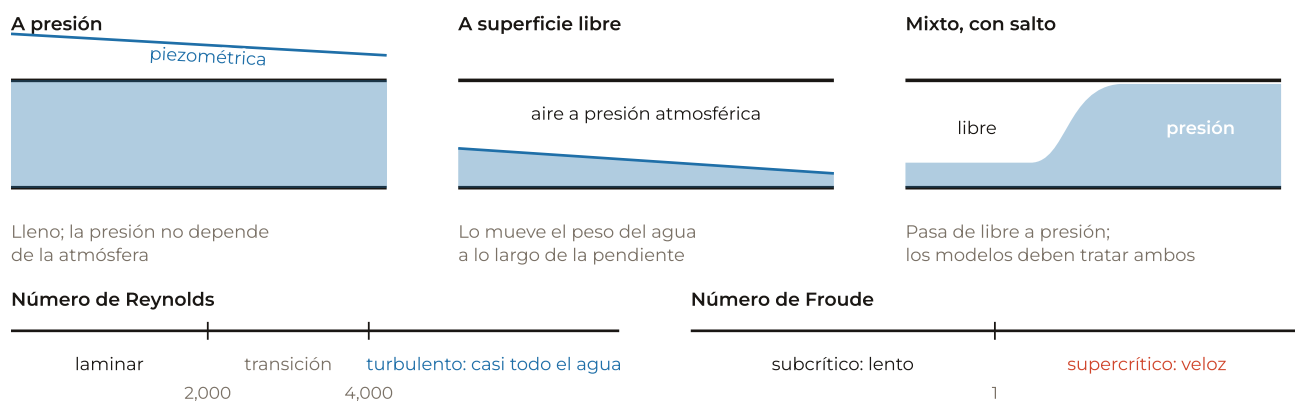


Figura 1.7. Presión, superficie libre y flujo mixto

CRUCES ESPECIALES

Toda línea larga cruza ríos, barrancas, carreteras y vías. Cada obstáculo tiene su solución típica.

- **Sifón invertido.** La tubería baja por debajo del cauce y vuelve a subir; trabaja a presión aunque el resto de la línea sea a superficie libre. Se usa cuando el obstáculo está por debajo del perfil de la línea. Su punto débil es el depósito de sedimento en el fondo, por lo que se suele hacer con dos o más tubos, de modo que uno pueda cerrarse para limpiarlo.
- **Puente tubo.** El tubo cruza apoyado en una estructura. Es la solución cuando el obstáculo es una barranca profunda o un cauce muy ancho. Exige juntas de dilatación y apoyos que resistan el empuje del agua y el viento.
- **Camisa.** Un tubo mayor, casi siempre de acero, aloja al conducto bajo una carretera o vía de tren. Protege al tubo de las cargas y permite reponerlo sin cortar el tránsito.

El acero es el material preferido en estos cruces por su resistencia a la flexión y los golpes y porque sirve como camisa (ver capítulo 6). El sifón consume una parte del desnivel, así que cada cruce resta carga al presupuesto del esquema anterior.

Tres cruces típicos de una línea

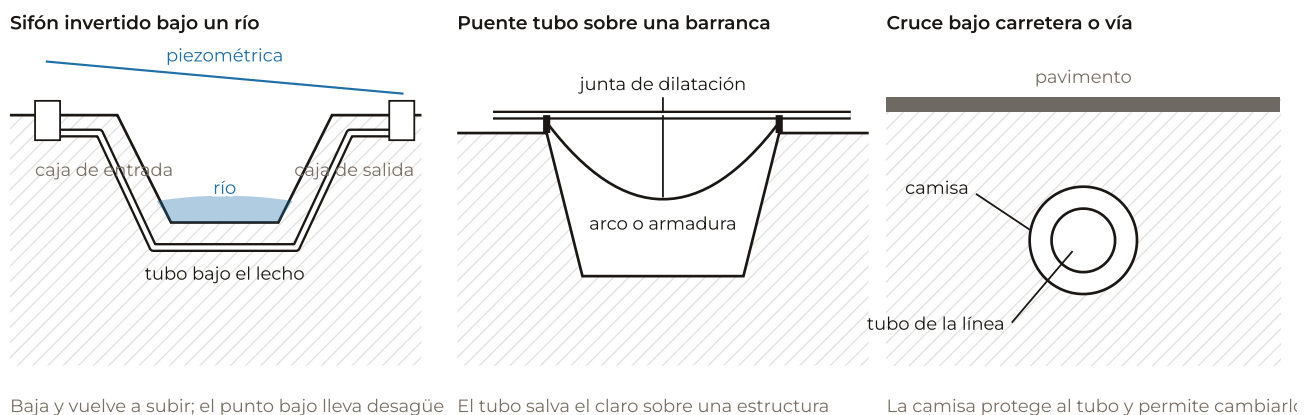


Figura 1.8. Sifón, puente tubo y camisa

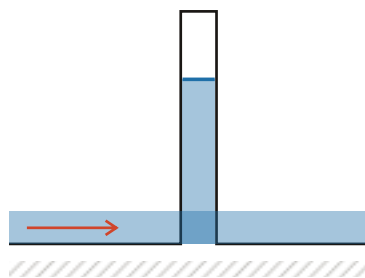
TORRES DE OSCILACIÓN

Una torre de oscilación es un tanque vertical abierto a la atmósfera, conectado a la línea. Funciona como amortiguador: cuando una válvula se cierra o una bomba se detiene, la columna de agua sigue moviéndose y la torre recibe o entrega agua, de modo que el nivel sube o baja en lugar de que la presión se dispare en el tubo. Es la respuesta al transitorio lento, el de oscilación de masa.

Una torre sólo es posible donde la altura que alcanza el nivel es razonable, porque debe quedar por encima de la línea piezométrica. En el Sistema Cutzamala la torre de oscilación de la primera etapa eleva el agua de la cota 2,545 a la 2,702 msnm, y de ahí sigue por gravedad. El Cuchillo II cuenta con tres torres de oscilación y cuatro tanques de sumergencia. Cuando la altura necesaria sería excesiva, la protección contra el golpe de ariete se hace con cámaras de aire o válvulas de alivio, que se tratan en el capítulo 7.

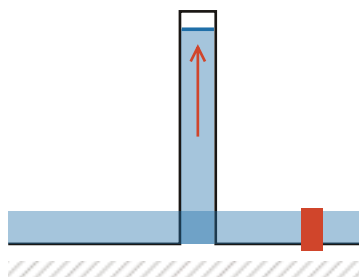
Torre de oscilación: absorbe el golpe de ariete

Operación normal



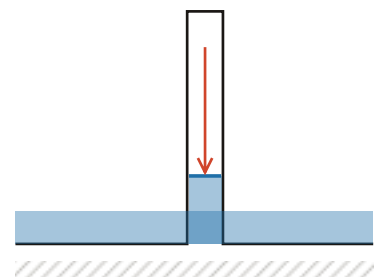
El nivel de la torre marca la piezométrica de la línea

Cierre de la válvula aguas abajo



El agua sube por la torre en vez de comprimirse contra la válvula

Paro de bomba o falla de aguas arriba



La torre cede agua a la línea y evita el vacío

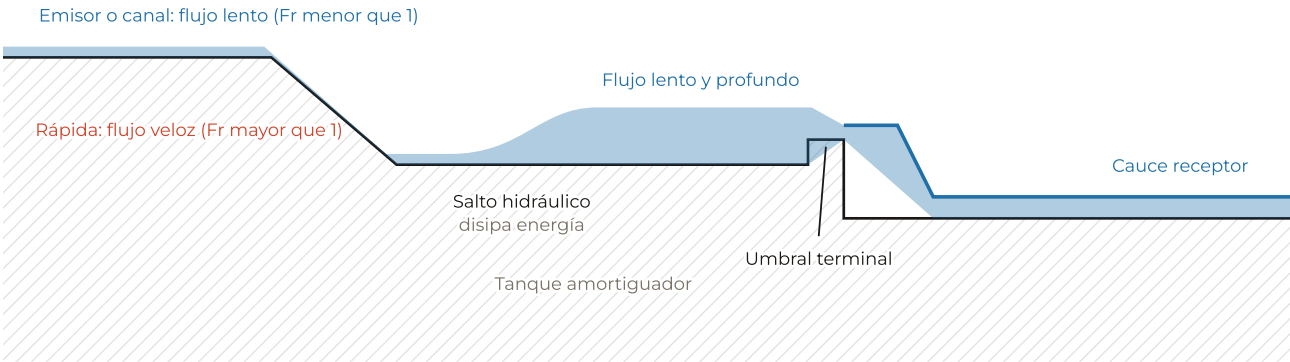
Figura 1.9. Torre de oscilación en tres momentos

ESTRUCTURAS DE DESCARGA

La descarga es la última parte de la línea y no es un simple extremo abierto. Cuando el agua cae por una rápida llega con una velocidad alta que, sin control, socava el cauce receptor. El tanque amortiguador provoca ahí un salto hidráulico, el mismo fenómeno de la transición entre regímenes, y con él disipa la energía; el agua sale sobre un umbral con velocidad baja y el cauce no se erosiona. En una descarga al río se cuida además que el nivel aguas abajo no ahogue la salida ni la deje colgada.

Hay otros finales posibles, según el destino: un tanque de regularización en agua potable, la planta de tratamiento en agua residual o el vaso de una presa. El Sistema Cutzamala termina en cuatro potabilizadoras. Las fallas habituales son la socavación al pie de la estructura y el golpe del chorro contra paredes no previstas, por lo que el diseño suele comprobarse en un modelo a escala.

Descarga con tanque amortiguador, en corte



Esquema sin escala. El salto debe ocurrir dentro del tanque: si ocurre sobre el cauce, el agua veloz lo socava.

Figura 1.10. Descarga con rápida y tanque amortiguador

12

Qué recorre la Parte I

Los capítulos van en el orden en que se decide una obra: primero qué es y cómo se clasifica una conducción, después la historia que explica por qué se diseña como se diseña, el terreno que hay que conocer, cómo se excava y se cimenta, con qué se construye, cómo se controla y se comprueba, y por último bajo qué reglas se autoriza, se opera y se conserva. Esta parte no habla de ninguna obra en particular. La Parte II aplica todo lo anterior al Túnel Emisor Oriente.

CAPÍTULO	TÍTULO	QUÉ RESPONDE
1	Del manantial a la descarga	Qué es una línea de conducción y qué significan sus conceptos básicos
2	Cinco fluidos, un mismo cálculo: cómo se clasifican las líneas de conducción	Cómo se clasifican las conducciones y las presas, y qué ecuaciones y criterios las gobiernan
3	Cuatrocientos años de sacar el agua de un valle sin salida	Qué problemas resolvieron las obras mexicanas y qué dejaron sin resolver
4	Estudios y actividades preliminares: lo que se hace antes de excavar	Qué se estudia antes de excavar

CAPÍTULO	TÍTULO	QUÉ RESPONDE
5	Abrir el terreno sin que se venga encima: excavación, cimentaciones y maquinaria	Cómo se abre el terreno, con qué cimentación y con qué máquinas
6	Un tubo dura lo que dura su material	Con qué se construye y de dónde sale
7	Válvulas, compuertas y pruebas: cómo se controla y se comprueba una conducción	Cómo se controla la conducción, qué tan eficiente es y cómo se comprueba que funciona
8	Cuatro capas de reglas sostienen una obra de conducción	Qué reglas la autorizan, cómo se asegura su calidad y cómo se conserva



Parte I · Líneas de conducción

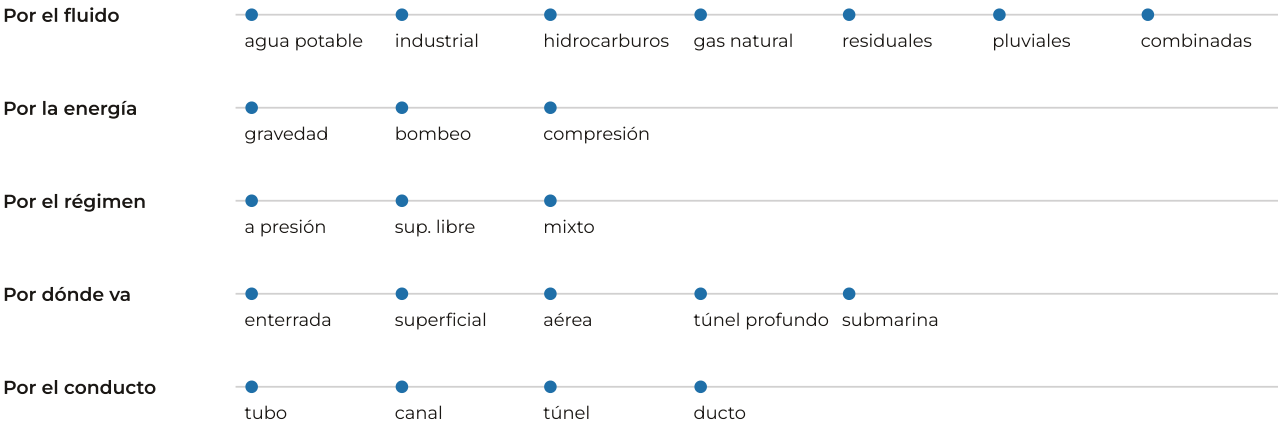
2

Tipos y clasificación de las líneas de conducción

Agua potable, industriales, hidrocarburos, aguas residuales y presas

Toda línea de conducción responde tres preguntas antes de dibujarse: qué lleva, con qué energía y en qué régimen. Con esas tres respuestas ya se sabe qué material conviene, qué dispositivos hacen falta y qué cálculo aplica. Los conceptos básicos (gasto, presión, pendiente, pérdidas, rugosidad) y las clasificaciones por energía y por régimen están en el capítulo 1. Este capítulo clasifica las líneas por el fluido que llevan, compara las industriales, las de hidrocarburos, las de aguas residuales y las de aguas negras, presenta las ecuaciones clave, los criterios para escoger entre alternativas y las normas de hidrocarburos, y cierra con las presas, que regulan el agua que una conducción lleva o recibe. Los dispositivos de control, la eficiencia y el golpe de ariete están en el capítulo 7.

Cinco preguntas ordenan cualquier línea de conducción



Una línea concreta cae en una clase de cada fila. Los materiales, los dispositivos y el cálculo salen de esa combinación.

Figura 2.1. Cinco ejes para clasificar una línea de conducción

01

Por tipo de fluido

Clasificar sirve para saber qué preguntar. En aguas negras la restricción dominante es la velocidad mínima, para evitar azolves. En agua potable, la presión mínima en los puntos altos. En hidrocarburos, la integridad mecánica y la corrosión.

TIPO	FLUIDO	RÉGIMEN HABITUAL	RESTRICCIÓN DOMINANTE	MARCO PRINCIPAL
Agua potable	Agua tratada o de fuente	A presión, gravedad o bombeo	Presión mínima y máxima, calidad, golpe de ariete	Conagua (MAPAS)
Industrial	Agua de proceso, vapor, ácidos, gases	A presión, casi siempre bombeo	Compatibilidad química, temperatura	Normas de proceso; ASME B31.3
Hidrocarburos líquidos	Crudo, gasolinas, diésel, turbosina	A presión, estaciones de bombeo	Integridad mecánica, corrosión, transitorios	ASEA; ASME B31.4; NRF de Pemex

TIPO	FLUIDO	RÉGIMEN HABITUAL	RESTRICCIÓN DOMINANTE	MARCO PRINCIPAL
Gas natural	Gas natural, etano	A presión, compresión	Presión de operación, clase de localización	ASEA (NOM-020-ASEA-2024); ASME B31.8
Aguas residuales	Residual doméstica e industrial	Superficie libre, gravedad	Velocidad mínima y máxima, H ₂ S	Conagua
Pluviales	Escurrimiento de lluvia	Superficie libre; en tormenta puede entrar en carga	Periodo de retorno, gasto pico	Conagua
Combinadas	Residual y pluvial juntas	Superficie libre y entrada en carga	Dilución, desbordes, variación enorme del gasto	Conagua

AGUA POTABLE

Casi siempre trabaja a presión: el conducto va lleno y la carga se mantiene con la altura del tanque o con bombeo. Si la línea es larga hay que revisar la línea piezométrica a lo largo del trazo, porque la presión no puede caer hasta producir vacío ni subir más que la presión de trabajo del tubo.

Ejemplos mexicanos. El Sistema Cutzamala es la conducción potable más grande del país. Tiene 323 km de canalizaciones primarias (206 km de acueductos de tubería metálica y de concreto, 44 km de túneles y 73 km de canales abiertos), seis plantas de bombeo que suman más de 1,600 m de carga y una capacidad de 19 m³/s; en su segunda etapa se usaron líneas de concreto de 2.5 m de diámetro y algunos tramos de acero. En 2022 entregó 15.68 m³/s, alrededor de 26 % de la demanda del Valle de México. El acueducto El Cuchillo II, para Monterrey, es de acero de 84 pulgadas (2.13 m), con 5 estaciones de bombeo, 3 torres de oscilación y 11 torres unidireccionales, y transporta hasta 5 m³/s a lo largo de unos 106 km con 330 m de desnivel; la longitud varía entre 89 y 106 km según la fuente, y se usa el dato de la ASF. En El Zapotillo, el tramo a Guadalajara lleva 2.0 m³/s por 21.1 km hasta la presa El Salto, bombea 3.0 m³/s por 6.8

km y sigue 31.9 km por gravedad. Y el Acueducto de Querétaro, de 1,280 m de arcos de piedra y 23 m de altura máxima, muestra que una conducción por gravedad bien trazada puede operar siglos (ASCE, s. f.).

Ventajas, limitaciones y fallas. La conducción a presión permite trazos que suben y bajan, tubos cerrados que protegen la calidad del agua y diámetros menores que en un canal. Sus limitaciones son el costo de energía cuando hay bombeo, el golpe de ariete y la dependencia de las válvulas de aire. El Zapotillo muestra la otra limitación, la de proyecto: el costo pasó de 7,960 a 19,875.97 millones de pesos y el plazo de 2006-2012 a 2006-2025, según la ASF (2024, p. 3). La duplicación de líneas, como en la tercera etapa del Cutzamala, permite dar mantenimiento sin cortar el servicio.

INDUSTRIALES

Es una categoría amplia sin manual único. El material se elige por compatibilidad con el fluido, la temperatura y la presión: una línea de ácido no puede ser de acero al carbono sin protección. El polietileno sirve para agua potable, riego y "residuos industriales", lo que muestra que el mismo material sirve en dos mundos si el fluido lo permite. El código ASME B31.3 (tuberías de proceso) es la referencia de diseño dentro de planta.

Como ejemplo de líneas industriales, la red de Pemex incluye 7.9 km de acueductos y 364.3 km de quimioductos, es decir, líneas de proceso y de agua dentro de un sistema de hidrocarburos. Las ventajas de una línea industrial son que se diseña a la medida del proceso y se aísla con facilidad; sus limitaciones son la corrosión, la temperatura y el costo de aleaciones especiales. La falla típica es elegir el material por precio y no por compatibilidad con el fluido.

HIDROCARBUROS

Los oleoductos conducen crudo; los poliductos transportan productos refinados distintos, en baches separados, uno tras otro; los gasoductos conducen gas y requieren compresión; los ductos de recolección reúnen la producción de los pozos y suelen ser de menor diámetro. En México la ASEA emite las normas de seguridad de los ductos, Pemex sus normas de referencia (NRF) y los códigos ASME B31.4 (líquidos) y B31.8 (gas) son la referencia técnica de diseño.

Ejemplos mexicanos. Alrededor de 1906, la empresa de Doheny construyó en el valle de Casiano, Veracruz, un oleoducto de 112 km con diez estaciones de bombeo hasta Mata Redonda, en Tampico, calculado para una producción mínima de 3,000 barriles diarios. Tras la expropiación de 1938 se tendieron los oleoductos Poza Rica-Azcapotzalco (1946), Poza Rica-Salamanca (1950), Minatitlán-Salina Cruz (1951) y Tampico-Monterrey (1956). En 1983 la red sumaba 42,213 km, con 52 % de gasoductos, 28 % de oleoductos, 13 % de poliductos y 6 % de ductos petroquímicos. En 2020, Pemex Logística operaba 17,765.2 km: 8,385.8 km de poliductos, 5,216.0 km de oleoductos, 1,982.2 km petroquímicos, 1,583.0 km de gas LP, 364.3 km de quimioductos, 144.6 km de combustoleoductos, 81.2 km de turbosinoductos y 7.9 km de acueductos; el gas natural, a cargo del Cenagas, suma otros 9,167.6 km.

Ventajas, limitaciones y fallas. Un ducto mueve grandes volúmenes de forma continua, con menos riesgo en carretera y costo por barril bajo. A cambio exige derecho de vía, protección catódica, inspección con herramientas de limpieza y un régimen de seguridad estricto, y su falla más común es la corrosión exterior o interior, que ataca el acero enterrado.

AGUAS RESIDUALES Y NEGRAS

El emisor es el conducto que recibe las aguas de un colector o interceptor, no recibe aportaciones en su trayecto y las lleva a la planta de tratamiento. El interceptor corre generalmente paralelo a una corriente natural y el colector recoge las atarjeas. La atarjea mínima en un sistema separado es de 20 cm. "Aguas residuales" y "aguas negras" se usan casi como sinónimos; aquí se usa el primer término y el segundo cuando la fuente lo dice.

PLUVIALES Y COMBINADAS

El gasto pluvial va de casi cero a un pico alto en minutos, así que se diseña con un periodo de retorno ligado a la amenaza a la vida y a los bienes; los métodos de cálculo son el hidrograma unitario, el racional y el racional modificado. Un sistema combinado es más barato de construir y trabaja con una variación de gasto enorme entre estiaje y tormenta.

Ejemplos mexicanos de aguas residuales y pluviales. Los datos más completos son los del drenaje profundo de la Ciudad de México, que sirve de ejemplo de conducto grande y profundo. El Emisor Central mide 50 km con 6.5 m de diámetro y 220 m³/s de capacidad, entre 48 y 217 m de profundidad; el Interceptor Central, 16.1 km con 5 m y 90 m³/s; el Interceptor Oriente, 22.2 km con 5 m y 85 m³/s (longitudes totales tras las ampliaciones al sur; la primera etapa del Oriente midió 10.3 km, ver capítulo 3); el Interceptor del Poniente, 16.5 km con 4 m y 25 m³/s; y el Emisor del Poniente, 12.4 km con 6.35 m y 80 m³/s a solo 6 a 8 m de profundidad. El Emisor Poniente II suma 7.2 m y 112 m³/s. La capacidad del Emisor Central se reporta en 200, 220 y 120 m³/s según el autor y el momento, por el deterioro y el hundimiento; se usa 220 m³/s como dato de proyecto. El Gran Canal del Desagüe, a cielo abierto, vio caer su pendiente de 19 cm/km en 1910 a casi cero en 1988 por el hundimiento del terreno, que es la razón de que el drenaje profundo trabaje por gravedad a gran profundidad.

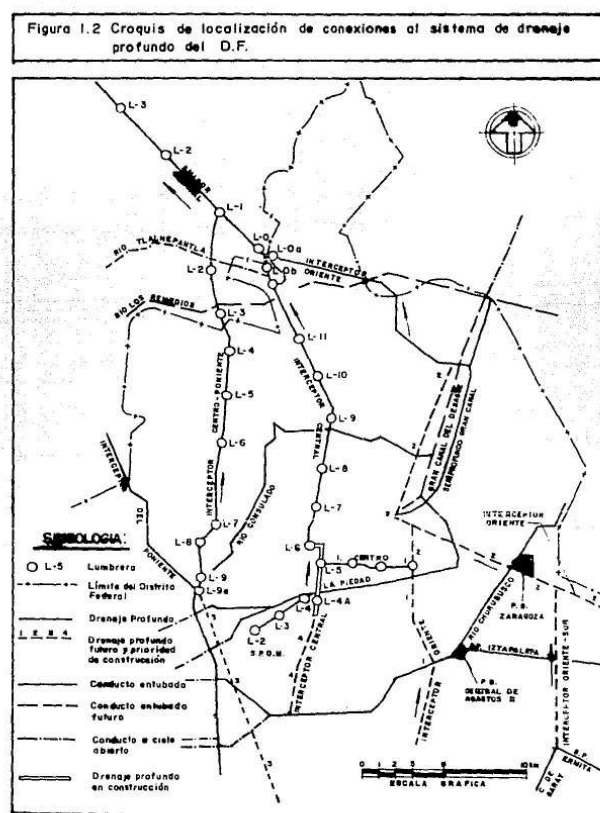


Figura 2.2. Croquis de las conexiones al sistema de drenaje profundo del Distrito Federal

Cuatro maneras de colocar el conducto, en corte transversal

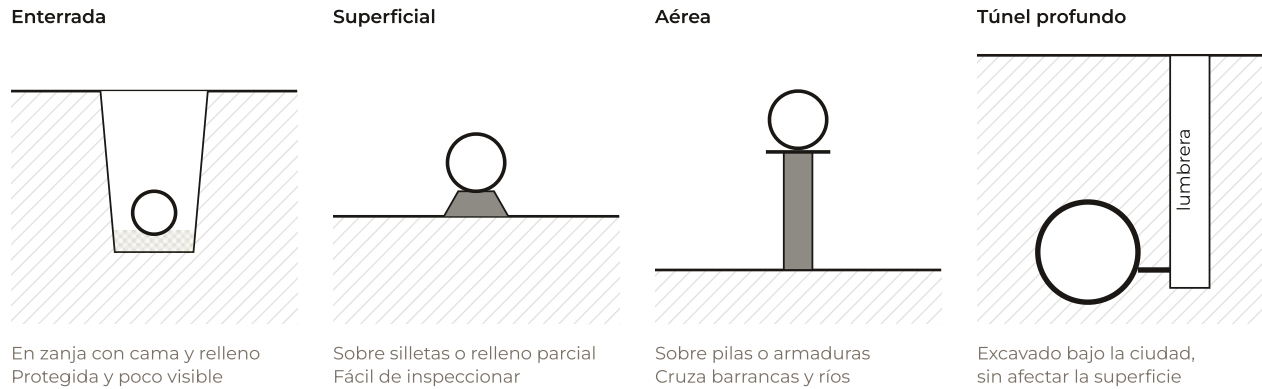


Figura 2.3. Cuatro cortes transversales según la ubicación del conducto

Ventajas y limitaciones. La conducción por gravedad en túnel profundo no gasta energía y no sufre el hundimiento, pero su costo inicial es alto y es difícil de inspeccionar: el Emisor Central trabajó unos 15 años sin revisión y perdió capacidad. Los emisores someros, como el del Poniente, son más baratos y accesibles pero sensibles al hundimiento. Las fallas comunes son el azolve, el deterioro del concreto por sulfuros, que subió n de 0.0126 a entre 0.016 y 0.0221 en el Emisor Central, y los derrumbes.

Bombeo en aguas residuales. Donde no hay desnivel, el agua se sube con plantas de bombeo. El drenaje de la capital no trabaja totalmente por gravedad por esta razón; como ejemplo, se diseñó una planta de cárcamo circular en lumbrera, con nichos radiales para cada equipo.

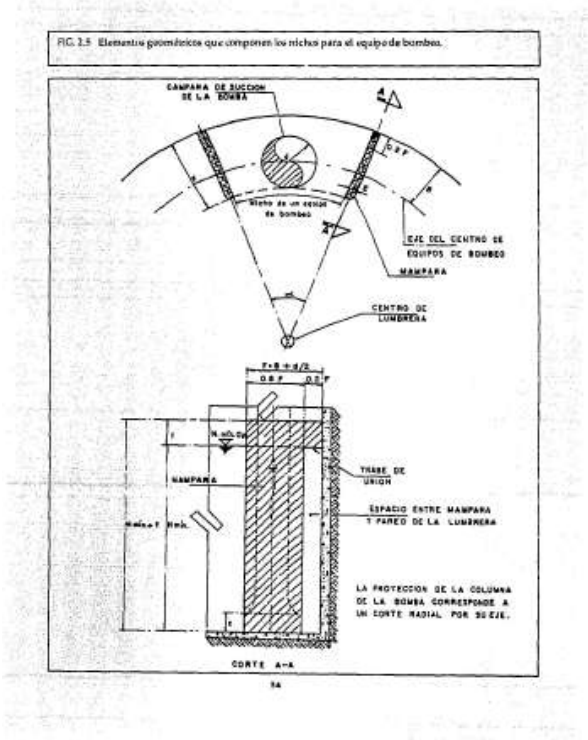


Figura 2.4. Nichos para los equipos de bombeo en un cárcamo circular

CUATRO FAMILIAS FRENTE A FRENTE

Las líneas industriales, de hidrocarburos, de aguas residuales y de aguas negras se diseñan con la misma física y se distinguen por lo que cada una protege. En la tabla se ponen lado a lado los diámetros, los materiales, la forma de calcular las pérdidas y los dispositivos que las controlan.

ASPECTO	INDUSTRIAL	HIDROCARBUROS	AGUAS RESIDUALES	AGUAS NEGRAS
Qué conduce	Agua de proceso, vapor, ácidos, gases	Crudo, refinados, gas natural	Mezcla de agua doméstica, de comercio e industrial	Fracción doméstica sin tratar, con sólidos y materia orgánica
Régimen y energía	A presión, bombeo	A presión, bombeo o compresión	Superficie libre por gravedad; impulsión donde no hay desnivel	Igual que las residuales, con más azolve y sulfuros

ASPECTO	INDUSTRIAL	HIDROCARBUROS	AGUAS RESIDUALES	AGUAS NEGRAS
Diámetros	Los que pida el proceso	Según norma y proyecto de cada ducto	Atarjea de 20 cm como mínimo; colectores y emisores hasta varios metros	Los mismos rangos; mayores en emisores profundos
Materiales	Los compatibles con el fluido y la temperatura: acero, plásticos, aleaciones	Acero al carbono con recubrimiento y protección catódica	PVC, PEAD, concreto y fibrocemento en red; concreto o dovelas en túnel	Concreto con cemento resistente a sulfatos y recubrimientos; PEAD en impulsiones
Pérdidas	Fricción con Darcy-Weisbach más pérdidas locales en accesorios	Fricción con la viscosidad del producto; el gas con relaciones de flujo compresible	Manning, por ser superficie libre	Manning, con un coeficiente que sube con el desgaste de la pared
Dispositivos de control	Válvulas de aislamiento, de retención y de alivio; instrumentos de proceso	Válvulas de seccionamiento, estaciones de bombeo o compresión, medición y trampas de envío y recibo de herramientas de limpieza	Pozos de visita, estructuras de caída, rejillas, compuertas, vertedores	Los mismos, con ventilación y atención a gases
Marco	ASME B31.3 y normas de proceso	ASEA, ASME B31.4 y B31.8, NRF de Pemex	Conagua (MAPAS)	Conagua (MAPAS) y normas de descarga

En hidrocarburos, los límites de velocidad y de caída de presión salen de ASME B31.4 o B31.8 y de la NRF-030-PEMEX, y se fijan por producto. En aguas negras el criterio que más pesa es evitar el depósito de sólidos y la septicidad, que genera ácido sulfhídrico.

Una línea de aguas negras debe cuidarse de lo que sus gases hacen a la pared: la septicidad convierte el sulfuro de hidrógeno en ácido y ataca el concreto, por lo que se prefieren velocidades que impidan el depósito, cementos resistentes a sulfatos y ventilación en los pozos. Una línea pluvial tiene el problema contrario, un gasto pico que dura minutos, y por eso se calcula con un periodo de retorno y se deja margen para entrar en carga.

Tres ecuaciones para calcular una conducción

Las conducciones de agua se calculan con tres relaciones. La primera dice que, con flujo permanente, el gasto que entra es el que sale, así que si el conducto se angosta el agua se acelera. La segunda estima la velocidad en superficie libre a partir de la pendiente, la forma de la sección y la rugosidad de la pared. La tercera calcula la energía que el agua pierde por fricción en un tubo a presión.

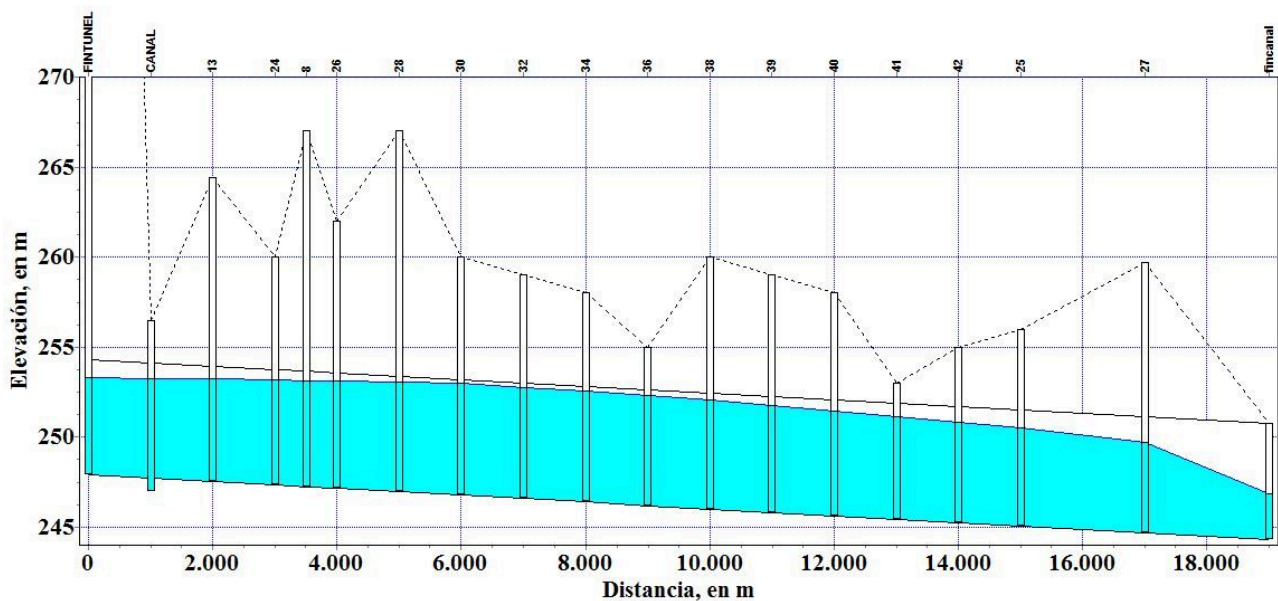


Figura 2.5. Perfil del agua en un emisor y efecto de la rugosidad sobre el tirante

CONTINUIDAD

El gasto es el producto de la velocidad por el área de la sección:

$$Q = V A$$

donde Q es el gasto (m^3/s), V es la velocidad media en la sección (m/s) y A es el área hidráulica (m^2). En una reducción de diámetro el área baja con el cuadrado, de modo que la velocidad sube mucho: si el diámetro baja a dos tercios, la velocidad se multiplica por 2.25.

MANNING

Es el estándar en superficie libre y, por extensión, en conductos de gran diámetro:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

donde V es la velocidad media (m/s), n es el coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional), $R_h = A/P_m$ es el radio hidráulico (m), con A el área hidráulica (m²) y P_m el perímetro mojado (m), y S es la pendiente de la plantilla (m/m). En sección circular llena el radio hidráulico es $D/4$, y el gasto sale de multiplicar la velocidad por el área.

Cuanto más lisa la pared, menor n y más gasto para la misma pendiente. Los valores de uso común son estos:

MATERIAL	N
Concreto	0.012
Concreto con revestimiento de PVC o PEAD	0.009
Acero soldado con recubrimiento interior	0.011
Acero sin revestimiento	0.014
Fibrocemento	0.010
Polietileno de pared sólida	0.009
Polietileno corrugado o estructurado	0.012
PVC (pared sólida o corrugada)	0.009
PRFV	0.009
Túneles de concreto liso del drenaje profundo, proyecto de 1975	0.010 (con C = 160)

Una sección circular no rinde más al llenarse del todo: el gasto máximo ocurre hacia 94 % del diámetro, de modo que no conviene proyectar justo a tubo lleno. Por ejemplo, un colector de 0.60 m con pendiente de 3 al millar conduce unos 0.36 m³/s a tubo lleno, y un túnel de 6 m de concreto liso con pendiente de 1.6 al millar, unos 114 m³/s. Los límites de velocidad del MAPAS se pensaron para la red de alcantarillado y no para túneles con dovelas, así que en un túnel el proyecto fija su propio criterio de velocidad máxima y de abrasión.

DARCY-WEISBACH

Es la de base física más sólida y vale para cualquier fluido newtoniano a presión. La pérdida por fricción crece con la longitud del tubo y con el cuadrado de la velocidad, y baja con el diámetro:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

donde h_f es la pérdida por fricción (m), f es el factor de fricción de Darcy (adimensional), L es la longitud del tramo (m), D es el diámetro interior (m), V es la velocidad media (m/s) y g es la gravedad (9.81 m/s²).

El factor f depende de la rugosidad relativa de la pared y del régimen, y se obtiene de la ecuación de Colebrook-White o de su versión gráfica, el diagrama de Moody. El MAPAS advierte tres cosas. Las rugosidades de su Tabla 3.1 son de tubería nueva y no son ordenanza de la Conagua: la responsabilidad es del diseñador, que debe preferir las especificaciones del fabricante. La rugosidad crece con los años y la corrosión, según el criterio de Genijew. Y la pared es la variable más sensible: pasar n de 0.012 a 0.016 aumenta la pérdida 78 %, porque la pérdida crece con el cuadrado de n (Conagua, s. f., libro 12, cap. 3).

La fórmula empírica de Hazen-Williams, de uso común en agua a presión, se aplicó con $C = 160$ "para grandes tuberías de concreto liso" a los interceptores Central y Oriente. Su límite es que C se trata como constante cuando depende del diámetro, el material y la edad. En una misma tubería las tres fórmulas difieren hasta 40 % en la pérdida, y casi toda la diferencia viene del coeficiente elegido y no de la fórmula.

03

Velocidades y diámetros

Cada límite de velocidad atiende un problema distinto. La mínima evita el depósito de sólidos y, en agua residual, la septicidad que genera sulfuro de hidrógeno. La máxima evita la erosión de paredes y estructuras y, en tubos a

presión, limita las sobrepresiones por cierre de válvula.

MATERIAL	VELOCIDAD MÁXIMA (M/S)	VELOCIDAD MÍNIMA (M/S)
Acero (sin revestir, revestido y galvanizado)	3	0.3
Concreto reforzado	5	0.3
Concreto simple	5	0.3
Fibrocemento	5	0.3
PEAD	5	0.3
PVC	5	0.3
PRFV	3	0.3

Velocidad máxima permitida por material

m/s, MAPAS Alcantarillado sanitario, Tabla 3.2; la mínima es 0.3 m/s en todos

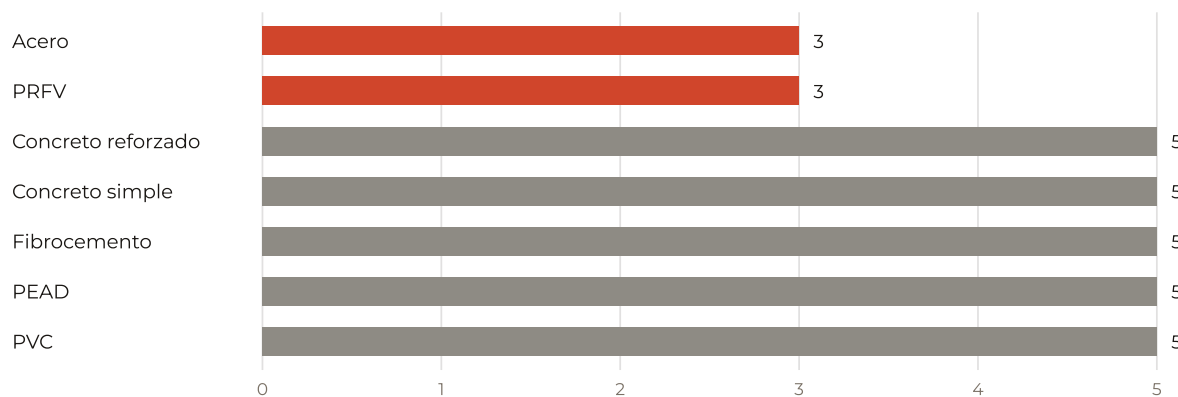


Figura 2.6. Velocidad máxima permitida por material

El diámetro se decide por gasto, velocidad admisible y costo. Con la continuidad se obtiene el diámetro mínimo para una velocidad máxima y se escoge el diámetro comercial inmediato superior; por ejemplo, $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en acero con 3 m/s pide al menos 0.46 m .

TIPO DE LÍNEA	MATERIAL O ELEMENTO	DIÁMETROS
Agua potable	PVC	50 a 630 mm
Agua potable	PEAD	12 a 1,000 mm
Agua potable	Fibrocemento	75 a 2,000 mm
Agua potable	Hierro fundido	100 a 1,600 mm

TIPO DE LÍNEA	MATERIAL O ELEMENTO	DIÁMETROS
Agua potable	Concreto presforzado	760 a 2,750 mm
Agua potable	Acero	50.4 a 355.6 mm; galvanizado 50.4 a 152.4 mm
Alcantarillado	Atarjea	Mínimo 20 cm
Alcantarillado	Distancia entre pozos de visita	125 m (hasta 61 cm), 150 m (61 a 122 cm), 175 m (122 a 305 cm)
Drenaje profundo	Túneles de concreto	3.1 a 7.2 m
Industrial	Varios	Según el proceso
Hidrocarburos	Acero al carbono	Según norma y proyecto

El escalón de diámetros de los túneles no es libre: lo fija el escudo disponible. La tecnología de excavación condiciona la hidráulica, tema del capítulo 5.

Diámetros interiores a una misma escala

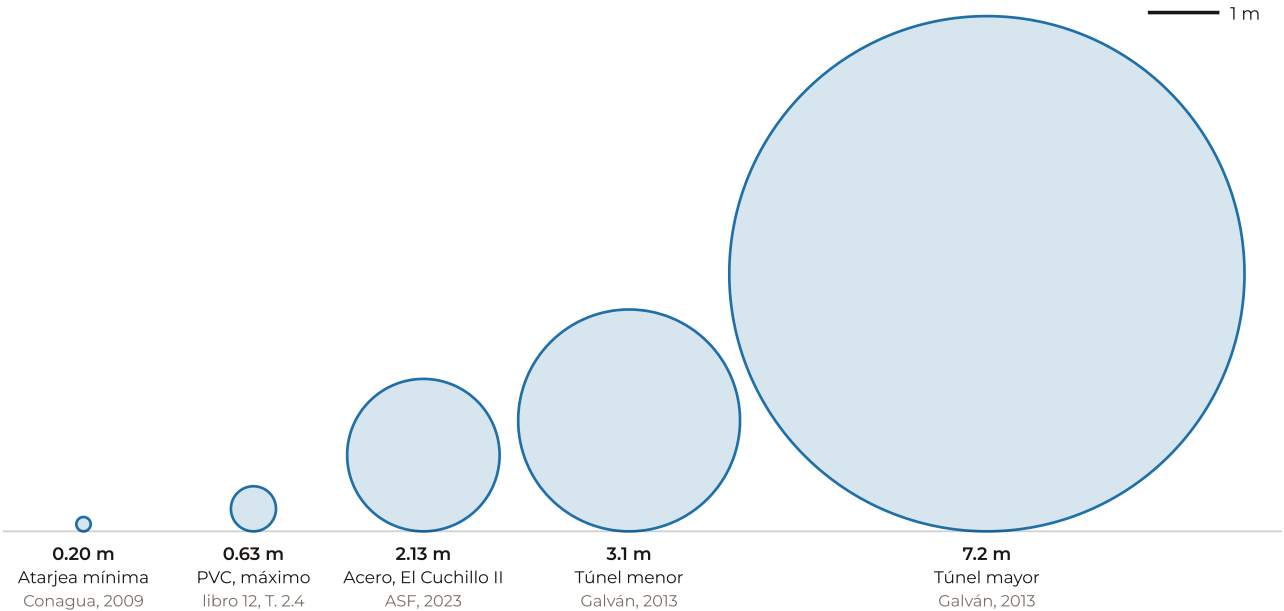


Figura 2.7. Diámetros de conductos a escala

04

Criterios de selección

DECISIÓN	CRITERIO QUE LA JUSTIFICA	ALTERNATIVA QUE SE DESCARTA
Gravedad en vez de bombeo	Hay desnivel suficiente para vencer las pérdidas	Bombeo (energía, riesgo de paro)
Superficie libre en vez de presión	Hay sólidos, el gasto varía mucho, se quiere acceso y no hay que subir	Tubería a presión (azolve, costo en diámetros grandes)
Sección circular	Resistencia estructural, capacidad hidráulica y compatibilidad con escudos	Herradura o rectangular
Material liso o con revestimiento	Conservar n bajo y proteger de abrasión y gases	Concreto sin protección en agua agresiva
Compuerta o mariposa para aislar	Apertura y cierre total	Válvula de asiento (más cara, para regular)
Admisión y expulsión de aire en puntos altos	La piezométrica puede caer bajo el tubo o hay aire atrapado	Aire sin control (colapso, golpe de ariete)
Caída escalonada o lumbrera con colchón	Desnivel brusco que no puede ser caída libre	Caída libre (erosión, H ₂ S)
Cierre lento y retención con dispositivo	Tubería rígida de alta celeridad	Cierre rápido (Joukowsky)

05

Normas de hidrocarburos

NORMA	MATERIA	ESTADO
NOM-020-ASEA-2024	Transporte de gas natural por ductos terrestres	Publicada en el DOF el 1 de septiembre de 2025; vigor desde el 28 de febrero de 2026; sustituye a la NOM-007-ASEA-2016
NOM-007-ASEA-2016	Transporte de gas natural, etano y gas asociado al carbón mineral	Sustituida por la NOM-020-ASEA-2024

NORMA	MATERIA	ESTADO
NOM-003-ASEA-2016	Distribución de gas natural y gas LP por ductos	Vigente; DOF 18 de agosto de 2017, vigor desde el 4 de febrero de 2018
NOM-009-ASEA-2017	Integridad de ductos de recolección, transporte y distribución	Vigente; DOF 25 de enero de 2019, vigor desde el 24 de julio de 2019; ciclo de vida completo
NRF-030-PEMEX	Ductos terrestres de hidrocarburos	Pemex la actualiza por ediciones; el contrato indica cuál aplica
ASME B31.4	Ductos de líquidos y lodos	Edición 2022
ASME B31.8	Transmisión y distribución de gas	Edición 2022

06

Qué es una presa y cómo se clasifica

Las presas y las conducciones son dos mitades de un sistema. Una presa regula el agua que luego viaja por una conducción (Cutzamala, Cuchillo, Zapotillo), y una conducción puede terminar en el vaso de otra: el Emisor Central descarga cerca de la presa Requena, en el río Tula.

Una presa es el conjunto de estructuras cuyo fin es almacenar artificialmente los escurrimientos de una corriente.

COMPONENTE	FUNCIÓN
Vaso	Zona donde se almacena el agua
Cortina	Obstáculo que represa el agua hasta la elevación necesaria
Obra de toma	Extrae el agua; tubería incrustada perpendicular al eje, sobre el volumen de azolves
Obra de excedencias (vertedor)	Desaloja el exceso sin peligro para la cortina
Obra de control	Compuertas que gobiernan los excedentes
Obra de desvío	Desvía el cauce durante la construcción, de preferencia en estiaje

El vaso se define por niveles. La capacidad muerta queda bajo la toma más baja; la de azolves guarda el sedimento de la vida útil; la útil regula escurrimientos entre el mínimo de operación y el inicio de excedentes; la de regulación de avenidas va del nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO) al de aguas máximas extraordinarias (NAME). Los dos últimos son los que las fichas de la Conagua reportan como capacidad.

La capacidad de azolves se dimensiona para la vida útil dividiendo el volumen reservado entre el aporte anual de sedimento. Con 8 hm³ reservados y 0.2 hm³ al año resultan 40 años.

Una presa es el conjunto de estructuras cuyo fin es almacenar artificialmente los escurrimientos de una corriente

Una presa azolvada por completo, como la de Las Cañas, pierde su función de almacenar aunque la cortina esté entera. Y el vertedor de cresta libre descarga con la ley de la carga a la 3/2:

$$Q = C L H^{3/2} \quad \Rightarrow \quad H = \left(\frac{Q}{C L} \right)^{2/3}$$

donde Q es el gasto descargado (m³/s), C es el coeficiente de descarga (aproximadamente 2.0 en unidades SI para cresta ancha), L es la longitud de la cresta (m) y H es la carga sobre la cresta (m). Con el gasto de diseño de 1,700 m³/s de un vertedor libre como el de la presa Endhó y una cresta supuesta de 150 m, la carga es de 3.2 m. Esa carga es la que sube el nivel sobre la cresta en la avenida de diseño, y por eso el borde libre de la cortina se mide desde el NAME y no desde el NAMO.

La clasificación por funcionamiento y objetivo ordena las presas así.

CRITERIO	CLASE	QUÉ HACE	EJEMPLO MEXICANO
Función	Almacenamiento	Guarda agua para abastecimiento, energía, control de avenidas, recreación	Cutzamala: El Bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria
Función	Derivación	Eleva el nivel para derivar el agua, sobre todo a riego y agua potable	Cutzamala: Tuxpan, Chilesdo, Colorines; La Llave, Michoacán, para 115 ha

CRITERIO	CLASE	QUÉ HACE	EJEMPLO MEXICANO
Objetivo	Aprovechamiento	Almacena y deriva	Mocúzari, río Mayo: 70,000 ha de riego y 12,500 kW
Objetivo	Estructura de defensa	Evita inundar zonas de riego o estratégicas	Presas del poniente del Valle de México
Diseño hidráulico	Con o sin vertedor	Según tenga obra de excedencias	Requena, vertedor mixto de 335 m ³ /s; Endhó y Taxhimay, libres

Por el material de la cortina se distinguen las de tierra, enrocamiento y materiales graduados, que se consideran flexibles, y las de material cementado (concreto y mampostería), rígidas, según la convención de ingeniería de presas (Vásquez, s. f., p. 6). Por la forma del eje en planta, el eje es recto o curvo. El concreto se divide en gravedad, que resiste con su peso; arco, que transmite la carga a las laderas; y contrafuertes.

En resumen, una presa se clasifica según la pregunta que se haga, y cada pregunta da una clasificación distinta que conviene no mezclar.

CRITERIO	PREGUNTA QUE RESPONDE	CLASES
Material de la cortina	De qué está hecha y cómo resiste	Flexibles: tierra, enrocamiento y materiales graduados. Rígidas: concreto (gravedad, arco, contrafuertes) y mampostería
Forma del eje	Cómo se traza en planta	Recto o curvo
Funcionamiento	Qué hace con el agua	Almacenamiento o derivación
Objetivo	Para qué sirve	Aprovechamiento o estructura de defensa
Diseño hidráulico	Cómo desaloja el exceso	Con vertedor (libre, controlado o mixto) o sin él
Tamaño	Qué tan grande es	Gran presa (ICOLD) o presa pequeña

CLASE DE CORTINA	CARACTERÍSTICA	EJEMPLO MEXICANO	DATOS VERIFICADOS
Enrocamiento con corazón impermeable	Núcleo de arcilla, respaldos friccionantes, chapa de roca	Mocúzari (Adolfo Ruiz Cortines), Sonora; El Infiernillo, Michoacán y Guerrero	Mocúzari: corazón apoyado en granito sano con trinchera de hasta 20 m de profundidad; corona de 10 m; cuatro zonas; tres diques de 908, 371 y 1,640 m; 1,015 millones de m ³ . El Infiernillo: de unos 145 a 150 m de altura según la fuente
Enrocamiento con cara de concreto	La impermeabilidad la da una losa de concreto en el talud aguas arriba	Aguamilpa, Nayarit	187 m de altura, con corona a la elevación 260 m
Bordo de tierra con enrocamiento	Tierra compactada, enrocamiento aguas arriba contra el oleaje	La Llave, Michoacán	580,000 m ³ , de ellos 145,000 de azolves; 77.71 ha de embalse
Concreto, gravedad	Rígida, resiste por peso propio	Las Cañas, Michoacán	Azolvada por completo
Concreto, gravedad con arco	Eje recto y un arco en la margen derecha	Huites, río Fuerte, Sinaloa	13,356 m ³ de concreto en un día, 13 de octubre de 1994, récord nacional

La cortina de gravedad se diseña para que el peso del concreto resista el empuje del agua. Las dos revisiones básicas son el deslizamiento y el volteo, por metro de longitud de cortina:

$$FS_d = \frac{\mu \sum V}{\sum H} \quad FS_v = \frac{M_r}{M_o}$$

donde FS_d es el factor de seguridad al deslizamiento, μ es el coeficiente de fricción en el desplante, $\sum V$ es la suma de fuerzas verticales (kN/m), $\sum H$ es la suma de fuerzas horizontales (kN/m), FS_v es el factor de seguridad al volteo, M_r es el momento resistente respecto del pie de aguas abajo (kN·m/m) y M_o es el momento de volteo (kN·m/m). Para una sección triangular de 30 m de altura y 24 m de base, sin subpresión, el volteo sobra (3.13) pero el deslizamiento queda en 1.37, por debajo de los valores de 1.5 o más que suelen pedirse, y con la subpresión del agua bajo la base bajaría todavía.

Ahí se ve por qué el tipo de cortina depende de la cimentación: sobre roca sana con fricción alta una sección de gravedad cumple, y sobre un terreno de menor resistencia se prefiere una cortina de materiales sueltos, más ancha y flexible.

Por tamaño, la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) llama gran presa a la que mide 15 m o más desde el cimiento hasta la corona, o a la que mide entre 5 y 15 m y almacena más de 3 millones de m³. Mocúzari y Huites son grandes por su magnitud; La Llave es una presa pequeña de aprovechamiento local.

Más ejemplos de presas y sus clases. El Cutzamala funciona con una combinación de presas de captación y almacenamiento (Villa Victoria, Valle de Bravo, El Bosque) y de derivación (Tuxpan, Chilesdo, Colorines), y una torre de oscilación que eleva el agua de 2,545 a 2,702 msnm antes del tramo por gravedad. El Zapotillo muestra el límite de decisión: el convenio de 2005 fijó una cortina de 80 m, se propuso subirla a 105 m y la Suprema Corte, el 7 de agosto de 2013, la dejó en 80 m; en 2021 se modificó el proyecto para demoler seis ventanas vertedoras de 12 por 9 m desde los 40 m de altura y no inundar Temacapulín.

Ventajas y limitaciones por tipo. Las cortinas de enrocamiento y de tierra aceptan cimentaciones menos resistentes y usan materiales cercanos, pero necesitan un vertedor independiente porque no soportan que el agua pase por encima, y un núcleo o cara que las impermeabilice. Las de concreto en gravedad resisten por peso propio y toleran verter por la cresta, pero piden roca sana y mucho concreto. Las de arco aprovechan las laderas y ahorran concreto, pero exigen un cañón angosto y estribos firmes. Las fallas más comunes son el azolve, como en Las Cañas, el tubificado o erosión interna en las de tierra y la subpresión en las de concreto.

Balance

Los ejemplos del capítulo muestran que la elección del coeficiente pesa más que la elección de la fórmula. En obra, el concreto que llega a la pared no es el de la tabla, y la rugosidad que cuenta es la que deja la cimbra y el paso de los años.

Los tres ejes (fluido, energía y régimen) bastan para decidir el tipo de conducción. El costo de operar una conducción de bombeo durante décadas casi nunca aparece en la comparación inicial, y debería pesar más que el costo de la obra civil.



LAGO DE ZUMPANGO

LAGO DE XALTOCAN

CUAUTITLAN

LAGO DE TEXCOCO

Parte I · Líneas de conducción

3 Antecedentes de las obras de conducción en México

Cuatro siglos de sacar el agua de un valle sin salida

El Valle de México no tiene desembocadura natural. Desde el albarradón de 1449 hasta el Drenaje Profundo, cada obra de desagüe resolvió un problema y dejó otro: la que se hundió, la que se derrumbó, la que se quedó corta. Esa historia, junto con la de los acueductos, los ductos de petróleo y las presas, explica qué es una línea de conducción en México y por qué se diseña como se diseña.

LAGO XOCHIMILCO

LAGO CHALCO

TLALMANA

AMECA

SAN BUENAVENTUR

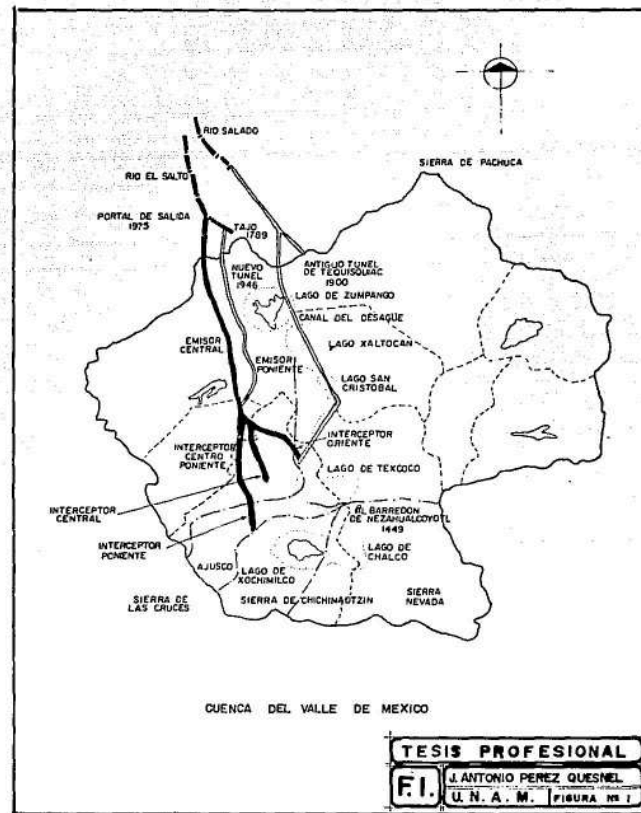


Figura 3.1. Cuenca del Valle de México con sus salidas artificiales y el Drenaje Profundo

01

Tres problemas, tres familias de obras

Una línea de conducción lleva un fluido (agua, aguas residuales, hidrocarburos) de un origen a un destino sin repartirlo en el camino. En México casi todas las grandes nacieron para resolver uno de tres problemas.

PROBLEMA HISTÓRICO	FAMILIA DE OBRAS	EJEMPLOS DE ESTE CAPÍTULO
Llevar agua limpia a una ciudad que no la tiene cerca	Acueductos y sistemas de abastecimiento	Chapultepec, Querétaro, Cutzamala, El Cuchillo, Zapotillo
Sacar agua sobrante o sucia de una cuenca cerrada	Desagües, canales, túneles y emisores	Nochistongo, Gran Canal, Tequisquiac, Drenaje Profundo
Mover petróleo, gas y derivados entre campos, refinerías y consumo	Ductos de hidrocarburos	Oleoducto de Casiano, red actual de Pemex

Hay un patrón que se repite: casi todas las soluciones se quedaron cortas por el crecimiento de la población o por un fenómeno no previsto, el hundimiento del suelo en el caso de la Ciudad de México. Las fechas y cifras de este capítulo se contrastaron con al menos dos fuentes o con una oficial; donde las fuentes discrepan, un recuadro dice qué cifra se usa y por qué.



Figura 3.2. Obras de agua del Valle de México, del albarradón de 1449 al Drenaje Profundo

02

Primero se levantaron muros contra el agua

Tenochtitlan se fundó en un islote y vivió bajo riesgo de inundación desde el principio. Una gran crecida llevó a construir un dique que separaba las aguas salobres de Texcoco de las dulces del lago de México.

El albarradón, de más de 12 km y 4 m de ancho, iba de la Sierra de Guadalupe al Cerro de la Estrella. Otra fuente lo describe como un dique de madera y piedra de 15 km, encargado por Moctezuma Ilhuicamina a Nezahualcóyotl.

Una sucesión de inundaciones y respuestas parciales llevó al siglo XVII. En 1521, durante el sitio de Tenochtitlan, se abrieron boquetes en el albarradón para el paso de los bergantines. En 1555-1556, tras otra inundación, el virrey Velasco mandó el albarradón de San Lázaro, "el más próximo a la Ciudad". Una presentación oficial de 2008 lo rotula con 1499; se usa la fecha que respaldan dos descripciones.

Los diques protegían un tramo, pero no bajaban el volumen de agua del valle. Las lluvias de 1604 y 1607 los rebasaron. Entonces cambió la pregunta: ya no cómo contener el agua, sino cómo sacarla.

Dato técnico (decisión, razón y alternativa descartada): se decidió abrir una salida artificial de la cuenca (1607), porque los diques no reducían el volumen de agua. Se descartó seguir elevando albarradones, la opción de menor costo inicial.

03

Chapultepec y Querétaro: el agua que llega por gravedad

El abastecimiento de Tenochtitlan dependía de los manantiales de Chapultepec. Hacia 1465, con Axayácatl como rey, se llevó el agua de las albercas a la ciudad en una obra de un año. El agua corría por uno de dos caños de argamasa; el otro quedaba de reserva para cuando uno se azolvara. Es lo que hoy se llama línea redundante, y reaparece cinco siglos después en el Sistema Cutzamala.

Un segundo acueducto, reedificado por Moctezuma II, entraba por la arquería de la Tlaxpana y San Cosme. En la época colonial el marqués de Montes Claros terminó el de la Calzada de Chapultepec, en 1620.

El Acueducto de Querétaro es la conducción colonial mejor documentada. La sociedad estadounidense de ingenieros civiles (ASCE) lo declaró monumento histórico de la ingeniería.

DATO	VALOR
Diseño	1723, Juan Antonio de Urrutia y Arana, marqués de la Villa del Villar del Águila
Construcción	1726 a 1738; servicio desde el 17 de octubre de 1738
Tramo de arcos	1,280 m de longitud, 23 m de altura máxima, 74 arcos de medio punto
Función	Llevar agua de manantiales de montaña al punto más alto de la ciudad

La lección técnica es hidráulica: conducción por gravedad en superficie libre que salva un valle con una estructura elevada. Pendiente continua y suave, y un tramo elevado para no perder cota. El mismo principio, a otra escala, rige los canales del Desagüe y los túneles de gravedad.

04

Un túnel de 1608 que se derrumbó por falta de revestimiento

La cuenca era cerrada, endorreica: sus lagos recibían el escurrimiento de las sierras y no tenían salida. La cuenca se ubica entre 98°11' y 99°30' de longitud oeste y entre 19°03' y 20°11' de latitud norte, con unos 110 por 80 km y 9,600 km².

Enrico Martínez proyectó el socavón de Nochistongo, la primera salida artificial: una sección de 10.5 m² y unos 7 km de longitud, abierta en 11 meses con 42 lumbreras (la más profunda de 46 m) y 60,000 indígenas. El agua salió por primera vez el 18 de

septiembre de 1608. El fracaso tuvo una causa: faltaron fondos para revestirlo.

Con esa sección y esa longitud salen unos 73,500 m³ de roca y suelo en cerca de once meses, sin contar las lumbreras.

Los derrumbes lo taparon en pocos años y en 1630 se ordenó abrirlo como tajo a cielo abierto. Se abrió como tajo en 1789; una presentación oficial da 1788, y se usa 1789. La primera lección de esta historia es que en terreno blando un túnel sin revestimiento definitivo no es una obra terminada.

05

El Gran Canal de 1900 y el suelo que se hundió

En 1856 se abrió un concurso con premio de doce mil pesos oro. Ganó la propuesta de Francisco de Garay: un Gran Canal y un túnel en Tequisquiac. Ambos se inauguraron en 1900, con Porfirio Díaz.

DATO	VALOR
Longitud del Gran Canal	47.5 km
Primer túnel de Tequisquiac	24 lumbreras de 22 a 93 m, separadas unos 400 m; tobas limo-arenosas y mucha agua
Población y capacidad de diseño	500,000 habitantes; 17 m ³ /s
Segundo túnel de Tequisquiac	1937 a 1946

El canal funcionaba por gravedad. Como la ciudad extraía agua de pozos profundos, la arcilla se consolidó y el terreno bajó.

DATO DE HUNDIMIENTO	VALOR
Hasta 1936	Unos 5 cm/año
1938 a 1948, centro del entonces D. F.	18 cm/año
Después	30 a 50 cm/año

DATO DE HUNDIMIENTO	VALOR
Terreno respecto del lago de Texcoco	En 1910, 1.90 m arriba; hoy, 10 m abajo
Promedio y máximo	10 y 40 cm/año
Estaciones de bombeo, 1952-1956	29

Los canales y colectores perdieron su pendiente de diseño, aparecieron columpios y contrapendientes, y hubo que bombear y sobreelevar los bordos. La pendiente del Gran Canal pasó de 19 cm/km en 1910 a casi cero en 1988. Esa pérdida tiene un efecto directo sobre el gasto, porque en la ecuación de Manning (capítulo 2) el gasto es proporcional a la raíz de la pendiente:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{S_2}{S_1}}$$

donde Q_1 y Q_2 son los gastos antes y después (m^3/s) y S_1 y S_2 son las pendientes correspondientes (m/m), con la misma sección y la misma rugosidad.

Con los valores de la figura, 19 cm/km en 1910, 12 en 1950 y 10 en 1970, el canal conducía 79 % de su gasto original en 1950 y 73 % en 1970, y si la pendiente cae a 1 cm/km el gasto baja a 23 %. Un hundimiento diferencial de 4.5 m entre un extremo y otro bastaba para quitarle la mitad de su pendiente.

El Emisor del Poniente, tercera salida artificial, venía del plan de 1954 de la Dirección General de Obras Hidráulicas del Departamento del Distrito Federal. Se empezó en 1964, mide 32.2 km, tiene capacidad de 30 m^3/s y se hizo para no sobrecargar el Gran Canal.

Dato técnico (decisión, razón y alternativa descartada): se decidió construir un sistema que no dependiera de la pendiente superficial, porque el hundimiento destruía la conducción por gravedad y obligaba a bombear cada vez más. Se descartó seguir ampliando el Gran Canal y los bombeos, que se hicieron entre 1952 y 1956 y no resolvieron el problema de fondo.

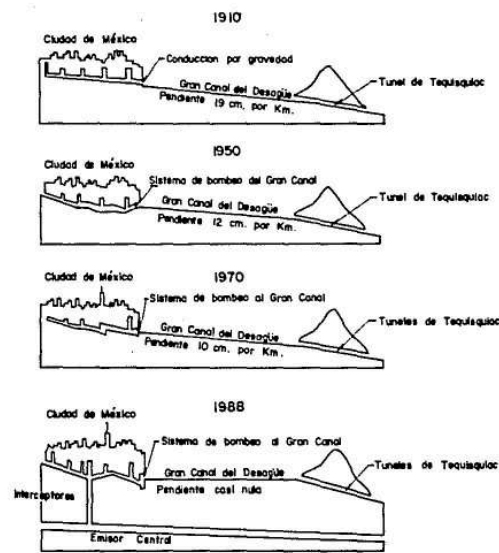


FIG. 2.1 EL HUNDIMIENTO DE LA CIUDAD DE MEXICO

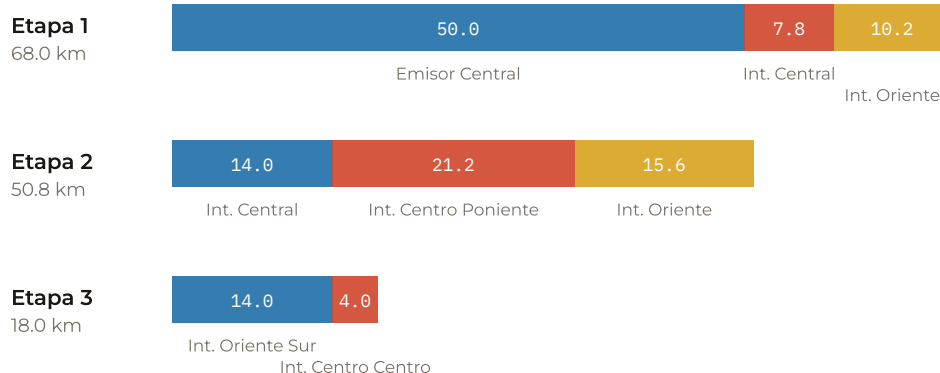
Figura 3.3. Pérdida de pendiente del Gran Canal del Desagüe entre 1910 y 1988

06

Bajar el drenaje hasta donde el suelo ya no se mueve

El Drenaje Profundo se pensó para no depender de la pendiente superficial ni del bombeo. Va por debajo de la arcilla, en terreno estable, y opera por gravedad. Es la cuarta salida artificial del Valle.

Tres etapas planeadas del Drenaje Profundo: 136.8 km de túneles



Longitudes en km del plan descrito por Amos del Arco y Torres (1981, pp. 17-19). Las barras comparten escala.

Figura 3.4. Cómo crecieron los túneles del Drenaje Profundo, por etapas

AÑO	HECHO
1954	Plan de la Dirección General de Obras Hidráulicas
17 de marzo de 1967	Inicio de las obras del plan maestro
1975	Fin de la primera etapa: interceptores Central y Oriente, Emisor Central
1977-1981	Segunda etapa: ampliación al sur de los interceptores Central y Oriente
1979-1981	Interceptor Centro-Poniente
1992	El Emisor Central empieza a recibir aguas negras

Las lumbreras de diseño van de 25 a 225 m de profundidad y están separadas de 1 a 4 km.

ELEMENTO	LONGITUD	DIÁMETRO	CAPACIDAD
Emisor Central	50 km	6.5 m	220 m ³ /s
Interceptor Central (primera etapa)	14.9 km	5.0 m	90 m ³ /s
Interceptor Oriente (primera etapa)	10.3 km	5.0 m	85 m ³ /s
Interceptor Centro-Poniente	16.5 km	n/d	n/d

Las longitudes de la tabla corresponden a la primera etapa. Con las ampliaciones al sur de la segunda etapa, los interceptores Central y Oriente alcanzan 16.1 y 22.2 km en total, que son las cifras que se usan al describir el sistema completo.

Con el diámetro y la capacidad se comprueba la velocidad media: a tubo lleno, 220 m³/s en 6.5 m de diámetro implican unos 6.6 m/s. Es alta para una conducción de concreto y confirma que 220 m³/s es una capacidad máxima de proyecto, con el túnel trabajando casi lleno, y no un gasto de operación normal.

Las lumbreras de diseño van de 25 a 225 m de profundidad y están separadas de 1 a 4 km

Diámetros de los túneles del drenaje profundo, a una misma escala

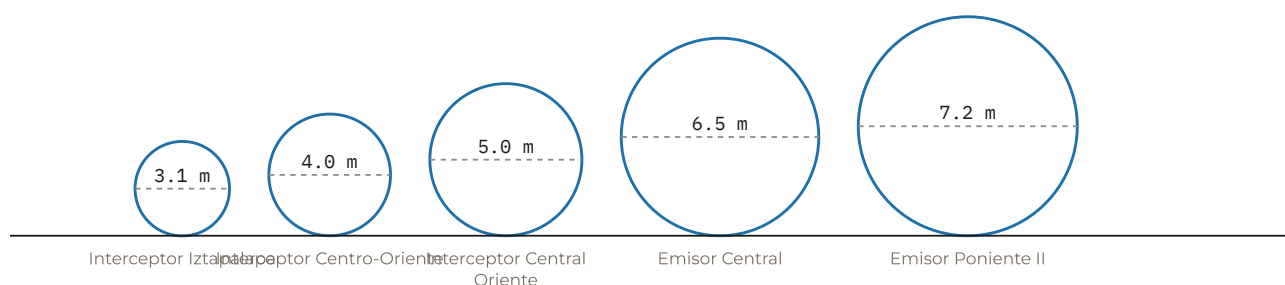


Figura 3.5. Diámetros de los túneles del Drenaje Profundo a una misma escala

El método dependió del terreno. En suelo duro se excavó a sección completa o media sección, con ademe primario de concreto lanzado o marcos metálicos, porque el terreno aguantaba un lapso sin soporte. En la zona lacustre se usaron escudos de frente abierto, con aire comprimido y de frente presurizado, porque la arcilla blanda y las arenas saturadas piden soporte inmediato. Las lumbreras iban de 6 hasta unos 15 m de diámetro; en suelo blando se usaron "lumbreras flotadas", una innovación desarrollada en México. El aire comprimido data de 1830, cuando Thomas Cochrane lo empleó bajo el nivel freático; en el Interceptor Central, en la ampliación sur de 1977, se limitó a 0.5 a 1.3 kg/cm² por el riesgo de enfermedad descompresiva. El capítulo 5 retoma estos métodos.

La historia del Drenaje Profundo incluye, desde el inicio, problemas de estabilidad de la excavación.

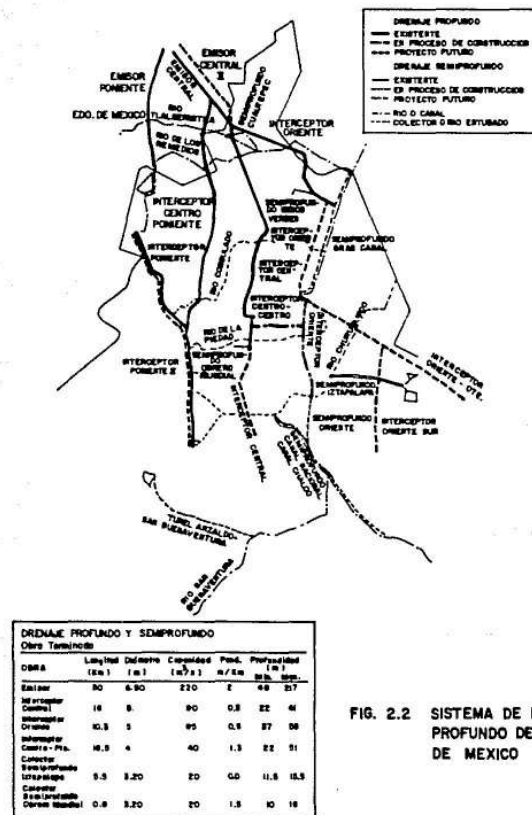


Figura 3.6. Sistema de drenaje profundo y semiprofundo de la Ciudad de México con su tabla de datos

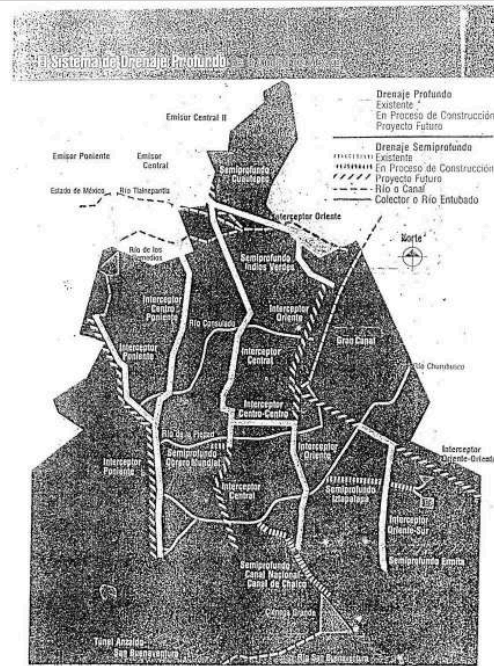


Figura 3.7. Drenaje profundo existente, en construcción y proyectado, con el Emisor Central II

ANATOMÍA DE UNA FALLA DE FRENTE: EL DERRUMBE DE LA LUMBRERA 7

El derrumbe de 1972 en el Emisor Central sirve para ver qué le pasa a un túnel profundo cuando el terreno no se comporta como se esperaba. La falla ocurrió en el frente sur de la lumbrera 7 del Emisor Central, en el cadenamamiento 15+804.22 del emisor, que equivale al 0+794.50 contado desde la lumbrera. El emisor tiene unos 49.4 km de desarrollo, de 6 m de diámetro interior, con 22 lumbreras y un desnivel de 140 m entre la ciudad y el portal de salida, de modo que descarga por gravedad hacia el río Tula.

Qué falló. El tramo atraviesa formaciones volcánicas y sedimentarias muy variadas, con rocas ígneas y también tobas arenosas, y que el problema típico de estas últimas es la pérdida de cohesión cuando el agua entra por fracturas o fisuras: el material que parecía firme se vuelve incapaz de sostenerse y cae al túnel. En el frente de la lumbrera 7 el material era de la formación Tarango, y el marco colado que quedaba junto al frente se hundió, sobrefatigado, al venirse el material. Antes de la falla no hubo indicio alguno de que pudiera ocurrir, y por eso no se había previsto ningún sistema de seguridad.

Cómo se investigó. Primero hubo que saber cuánto material estaba suelto y hasta dónde llegaba la zona afectada. Se hicieron sondeos desde el frente y desde la superficie. En el primero, la distancia a la zona derrumbada quedó entre 6 y 10 m del frente, y detrás el material era muy compacto; el sondeo de superficie no encontró zonas débiles, solo confirmó por el material que salía que se trataba de la toba Tarango. Es un buen ejemplo de por qué un sondeo vertical no basta para descartar una debilidad local: lo que importa en un túnel es lo que hay en la bóveda, a lo largo del eje, no el perfil promedio de un punto.

Cómo se trató. La solución fue consolidar los materiales alrededor del hueco con inyección de lechada y, una vez firme el terreno, recuperar el frente. Se planteó en dos fases y por "aureolas", anillos sucesivos de barrenos alrededor de la cavidad, numeradas de 1 a 7, que se perforan en ese orden; las dos primeras casi al mismo tiempo. El objetivo era doble: consolidar el material derrumbado para poder reexcavarlo y evitar que la inyección regresara y saliera por el talud. Las presiones llegaron hasta 20 kg/cm² en el primer metro del barreno de la primera aureola, y en las siguientes podían alcanzar presiones de rechazo mayores. Donde había caídos continuos se usó una lechada de agua, cemento y bentonita (100 litros de agua, 50 kg de cemento y 3 kg de bentonita), y en otros casos solo agua con cemento. Los planos finales muestran un muro de concreto en el frente, una galería piloto de control y sondeos de control para comprobar que la zona tratada había quedado consolidada.

Qué enseña. Tres cosas que se repiten en toda la Parte I. La primera, que el ademe primario no sustituye al conocimiento del terreno: el marco colado se fatigó donde el suelo cambió sin aviso. La segunda, que el agua es el agente que convierte una toba competente en material suelto, de modo que el manejo del agua pesa tanto como la resistencia nominal. La tercera, que reparar sale más caro y tarda más que explorar: la inyección en siete aureolas con control posterior es una obra en sí misma. Esa lógica de exploración previa y verificación continua es la del capítulo 4.

Una línea que no puede detenerse. La falla importa también por la función del emisor. Una línea que debe operar siempre deja poco margen para reparaciones: cuando se derrumba un frente en construcción solo se pierde tiempo, pero cuando falla un tramo ya

en servicio la ciudad queda expuesta.

07

Un emisor que nunca descansa

Diseñado para lluvia, el Emisor Central recibe aguas negras desde 1992 por la pérdida de pendiente del Gran Canal. Según la presentación oficial de 2008, desaloja más del 70 % de las aguas residuales y pluviales del valle y llevaba catorce años sin mantenimiento por no poder salir de servicio. La capacidad del sistema pasó de 280 m³/s en 1975 a 165 m³/s en 2006, cuando hacían falta 315 m³/s.

Una simulación estima 164.14 km² bajo agua si el Emisor Central se bloqueara en lluvias. La razón técnica de una segunda salida es esa: poder darle mantenimiento a la salida principal sin exponer a la ciudad. La capacidad que falta en 2006 es la diferencia entre los 315 m³/s que habría que desalojar y los 165 m³/s disponibles: 150 m³/s, casi la mitad de la demanda.

Capacidad del sistema de drenaje

m³/s, por componente

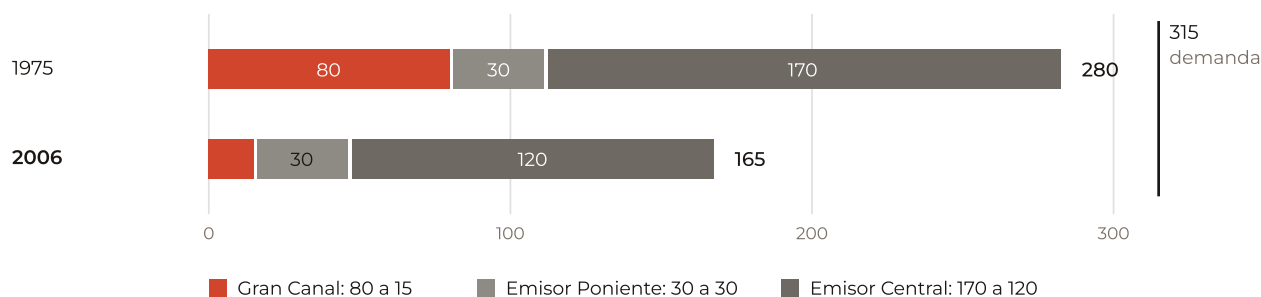


Figura 3.8. Capacidad del sistema de drenaje en 1975 y en 2006, por componente

08

Del otro lado: llevar agua desde fuera de la cuenca

Cuando los acuíferos del Valle de México y del Valle de Toluca se sobreexplotaron, la solución fue traer agua de otra cuenca. A fines de los sesenta se identificó el aprovechamiento de los afluentes altos del Cutzamala; las obras empezaron en 1976 y el sistema se inauguró el 3 de mayo de 1982. El reto principal fue el bombeo: algunas presas están por debajo de los 2,700 msnm del Valle.

ETAPA	PERIODO	QUÉ INCLUYÓ	APORTE
Primera	Desde 1982	Presas Villa Victoria, una planta de bombeo, planta potabilizadora Los Berros, torre de oscilación de 2,545 a 2,702 msnm	4 m ³ /s
Segunda	1983-1992	Plantas de bombeo 2, 3 y 4, presa Valle de Bravo, túnel Agua Escondida, líneas de concreto de 2.5 m	6 m ³ /s más
Tercera	1993-2010	Líneas paralelas, presas Chilesdo y Colorines	9 m ³ /s más; total de 19
Cuarta	Sin trabajos en 2012	Prevista, no desarrollada	n/a

DATO DEL SISTEMA	VALOR
Presas de almacenamiento	3
Plantas de bombeo	6, con más de 1,600 m de carga sumada
Canalizaciones	323 km: 206 de acueductos, 44 de túneles, 73 de canales
Potabilizadoras	4, con 20 m ³ /s
Capacidad	19 m ³ /s
Reparto de 1982	11 m ³ /s Estado de México, 8 m ³ /s Distrito Federal
Suministro en 2022	15.68 m ³ /s, cerca de 26 % de la demanda del Valle

La tercera etapa repite la idea de los dos caños de Chapultepec: duplicar la línea para darle mantenimiento sin cortar el servicio.

Monterrey y Guadalajara: costos que se multiplican

El Cuchillo I llegó a Monterrey en 1994, con un solo ducto de unos 5 m³/s. El Cuchillo II sí tiene descripción en la auditoría de la ASF a la Cuenta Pública 2022.

DATO	VALOR
Decreto de emergencia por sequía	29 de julio de 2022
Convenio Sedena, Semarnat-Conagua y Nuevo León	14 de agosto de 2022, modificado el 30 de noviembre
Costo	10,444.0 millones de pesos: 4,743.0 federales y 5,701.0 estatales
Tubería	Acero de 84 pulgadas (2.13 m)
Componentes	1 bombeo auxiliar, 5 estaciones de bombeo, 4 tanques de sumergencia, 3 torres de oscilación, 11 unidireccionales
Longitud y desnivel	106 km y 330 m
Gasto y destino	Hasta 5 m ³ /s, de la presa El Cuchillo a la potabilizadora San Roque

Con el gasto y el diámetro se verifica el orden de magnitud de la velocidad: 5 m³/s en 2.13 m dan 1.4 m/s, una velocidad moderada. La línea trabaja holgada en cuanto a abrasión y golpe de ariete, y el costo de operación está en la carga que vence el bombeo, no en la fricción.

El Zapotillo muestra cuánto se desvía una obra grande.

HECHO	DETALLE
Convenio del 1 de septiembre de 2005	Conagua, Jalisco y Guanajuato; cortina de 80 m
Ampliación	Se acordó subir la cortina a 105 m
Controversia constitucional 93/2012	La Corte la dejó en 80 m, sentencia del 7 de agosto de 2013

HECHO	DETALLE
Modificación de noviembre de 2021	Demoler seis ventanas vertedoras de 12 por 9 m desde los 40 m de altura, para no inundar Temacapulín, Acasico y Palmarejo
Acueducto a Guadalajara	2.0 m ³ /s por 21.1 km a la presa El Salto; bombeo de 3.0 m ³ /s por 6.8 km; 31.9 km por gravedad
Costo y plazo	7,960.0 millones y 2006-2012, contra 19,875.97 millones y hasta diciembre de 2025

Tres lecciones. El costo y el plazo se multiplican, de 7,960 a 19,876 millones, un factor de $19\,876/7\,960 = 2.5$, y de 6 a 19 años. La altura de una presa puede decidirla un tribunal y no un cálculo hidrológico. Y una conducción puede construirse por tramos funcionales cuando el proyecto completo no avanza.

10

Petróleo por tubo: la conducción a presión

Hacia 1906 la empresa de Doheny construyó en el valle de Casiano, al norte de Veracruz, 16 tanques de 55,000 barriles y un oleoducto de 112 km con diez estaciones de bombeo hasta Mata Redonda, en el río Pánuco. Se calculó para una producción mínima de 3,000 barriles al día. Es una conducción a presión con bombeo intermedio, lo contrario del desagüe por gravedad.

Un barril equivale a 0.159 m³, de modo que el gasto mínimo de diseño de 3,000 barriles al día equivale a unos 5.5 L/s. En una tubería de 0.20 m de diámetro supuesto la velocidad media sería de 0.18 m/s, baja para un hidrocarburo, lo que explica que el diseño se hiciera para un mínimo de producción y se ampliara después con más bombeo.

AÑO	HITO
Hacia 1906	Oleoducto de 112 km a Mata Redonda, Tampico
18 de marzo de 1938	Expropiación petrolera
1946	Poza Rica-Azcapotzalco

AÑO	HITO
1950	Poza Rica-Salamanca
1951	Minatitlán-Salina Cruz
1956	Tampico-Monterrey
1983	Red de 42,213 km: 52 % gasoductos, 28 % oleoductos, 13 % poliductos, 6 % petroquímicos

La red actual de Pemex Logística suma 17,765.2 km sin gas natural. El gas natural, a cargo del CENAGAS, agrega 9,167.6 km.

TIPO DE DUCTO	LONGITUD (KM)
Acueductos	7.9
Combustoleoductos	144.6
Gas LP	1,583.0
Oleoductos	5,216.0
Poliductos	8,385.8
Petroquímicos	1,982.2
Quimioductos	364.3
Turbosinoductos	81.2
Total	17,765.2

La suma de los renglones da 17,765.0 km, y los 0.2 km de diferencia son de redondeo de la fuente. La cifra de 1983 incluye una red de gas mucho mayor y no es comparable. Los 7.9 km de acueductos son lo que Pemex reporta como conducciones de agua; las líneas de agua de proceso, vapor y aguas residuales dentro de las plantas industriales se inventarían en cada instalación.

Las tres presas del río Tula

La clasificación de las presas por material, funcionamiento y tamaño está en el capítulo 2. Requena, Endhó y Taxhimay están en la cuenca que recibe el agua que sale del Valle de México y son un buen ejemplo de cómo se compara una presa con otra.

DATO	REQUENA	ENDHÓ	TAXHIMAY
Año	1919	1951	1912
Ubicación	Tepeji del Río, Hidalgo	Tula de Allende y Tepetitlán, Hidalgo	Villa del Carbón, Estado de México
Capacidad al NAMO	51.57 millones de m ³	182.90 millones de m ³	39.91 millones de m ³
Vertedor	Mixto, 335 m ³ /s controlados	Libre, 1,700 m ³ /s	Libre, 750 m ³ /s
Obra de toma	12 m ³ /s	60 m ³ /s	14 m ³ /s
Cuenca de aportación	456 km ²	2,038 km ²	401 km ²
Uso principal	Riego	13,000 ha del Distrito de Riego 003 Tula y, por trasvase, del 100 Alfajayucan	Riego
Capacidad del cauce aguas abajo	240 m ³ /s, hacia Tula de Allende	n/d	81 m ³ /s

La relación entre la capacidad y la cuenca de aportación indica cuánta lámina de escurrimiento llena el vaso: Requena, 113 mm; Endhó, 90 mm; Taxhimay, 100 mm. Requena es la que llena con la lámina mayor de las tres.

Esas cifras explican dos vínculos. Las presas de almacenamiento y derivación son el lado de entrada de las conducciones de agua potable; Requena y Endhó son el lado de salida del drenaje. Y el cauce receptor limita cuánto puede descargarse aguas abajo: Requena entrega a un cauce de 240 m³/s. Endhó riega además 13,000 ha con agua residual, un tema que se retoma en la Parte II.

12

Qué dejó esta historia

LECCIÓN

EVIDENCIA

Un túnel en terreno blando necesita revestimiento definitivo	Nochistongo se derrumbó sin él
La conducción por gravedad superficial no resiste el hundimiento	Gran Canal de 19 a casi 0 cm/km
La capacidad se agota antes que la vida útil	Gran Canal de 80 a 15 m ³ /s; Emisor Central de 170 a 120 m ³ /s
Conviene duplicar la línea para darle mantenimiento	Chapultepec con dos caños; Cutzamala con líneas paralelas
Las obras grandes cuestan y tardan más de lo previsto	Zapotillo de 7,960 a 19,876 millones

13

Balance

El mismo error se repite con cuatro siglos de diferencia: se diseña la obra contra el problema de hoy y no contra el de dentro de treinta años.

Nochistongo se hizo para sacar la lluvia de 1607 y no se revistió; el Gran Canal se hizo para una ciudad de 500,000 habitantes que se hundía mientras tanto; el Emisor Central se diseñó para lluvia y terminó recibiendo aguas negras todo el año.

Lo que falla casi nunca es lo que se calculó, sino lo que se supuso estable. La lección más útil es la de la pendiente: con la ecuación de Manning se ve que un hundimiento que parece pequeño puede quitarle a un canal más de una cuarta parte de su gasto.

La respuesta del Túnel Emisor Oriente a esta historia se describe en los capítulos 9, 10 y 13 de la Parte II.



Parte I · Líneas de conducción

4

Estudios y actividades preliminares

Lo que hay que saber del terreno, del clima y del entorno antes de excavar.

Una tuneladora no corrige un error de suelo sobre la marcha. Por eso una obra de construcción gasta años en papel antes de mover tierra: unos estudios responden dónde pasa, sobre qué terreno, cuánta agua, a qué costo ambiental, si conviene y qué puede fallar, y unas actividades preliminares dejan el sitio listo para que entre la máquina.

Este capítulo explica cada estudio como se hace en cualquier obra lineal subterránea: qué mide, con qué equipo, cómo se entrega y qué decisión de proyecto mueve. Los ejemplos de entrega (registros, perfiles, memorias, planos) provienen de otras obras o usan valores supuestos que se indican como tales. Lo que se hizo en el Túnel Emisor Oriente se cuenta en la Parte II.

01

Por qué se estudia antes de construir

Si la zanja de una tubería superficial sale mal, se rellena y se vuelve a abrir. Si un escudo de varios metros de diámetro entra en un suelo que no se conoce, el error cuesta meses y millones. Los estudios preliminares son la parte más barata de la obra y la que más ahorra.

La ley mexicana lo exige. La Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas obliga a las dependencias a considerar, al programar una obra, los estudios de preinversión que definan su factibilidad técnica, económica, ecológica y social (LOPSRM, art. 21, fr. I). La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) pide autorización previa de impacto ambiental para las obras hidráulicas, las vías generales de comunicación y los ductos (art. 28, fr. I), y el Reglamento en materia de evaluación del impacto ambiental baja el supuesto a cada tipo de obra hidráulica en su artículo 5, apartado A.

02

Panorama: cómo se relacionan los estudios

Los estudios se agrupan en cuatro familias que se alimentan entre sí. Las del sitio (topografía, geología, geofísica, geotecnia y geohidrología) describen el terreno y el agua que hay debajo. Las del agua que se conduce (hidrología e hidráulica) dicen cuánta llegará y cómo debe correr. Las de viabilidad (impacto ambiental, factibilidad y riesgo) deciden si la obra se puede y se debe hacer. Y las del predio (derecho de vía) aseguran que el terreno esté libre. Después de ellas vienen las actividades preliminares de obra, que preparan físicamente el sitio.

No se hacen en línea recta. Se parecen más a una espiral de tres vueltas. En la primera se define el problema: hidrología gruesa, topografía regional y una factibilidad preliminar, que es la vuelta más barata. En la segunda se acota la solución: topografía de detalle, geología, geofísica, hidráulica preliminar y manifestación de impacto ambiental, y aquí se fija el trazo. En la tercera se diseña: mecánica de suelos en cada sitio, hidráulica en modelo, riesgo y proyecto ejecutivo. Algunos estudios siguen durante la obra, como la instrumentación y las verificaciones geotécnicas.

03

Topografía y geodesia

La topografía mide el terreno para dibujarlo y replantear sobre él. La geodesia lo hace sobre la forma de la Tierra y sostiene a la topografía con una referencia común. Sin esa referencia, dos cuadrillas medirían en sistemas distintos y dos frentes de túnel que avanzan uno hacia el otro no se encontrarían. En una conducción por gravedad la topografía decide además la pendiente: un túnel de drenaje no tiene bomba que compense un error, y si la rasante se desvía el agua se detiene o se acelera de más.

En México el marco oficial es la Norma Técnica del Sistema Geodésico Nacional, publicada en el DOF el 23 de diciembre de 2010, que obliga a referir toda estación geodésica horizontal al ITRF2008, época 2010.0, con el elipsoide GRS80 (SNIEG, ficha técnica de la norma). El marco se materializa en la Red Geodésica Nacional Activa y en la Pasiva del INEGI. El paso de ITRF92 a ITRF2008 mueve las coordenadas del orden de 0.3 m (INEGI, El cambio de ITRF). Es un valor despreciable en cartografía de ciudad y no lo es en el enlace de dos frentes de túnel, por eso en obra subterránea cada plano declara su datum y su época.

El trabajo de campo se arma en tres capas. La primera es la red de control: puntos materializados con mojoneas, con coordenadas horizontales y cota, amarrados a la red del INEGI con receptores GNSS de doble frecuencia. La segunda es la poligonal y la nivelación: se parte de dos puntos de la red, se miden ángulos y distancias con estación total, y las cotas se transportan con nivel de precisión o con GNSS. La tercera es el levantamiento de detalle: secciones transversales del eje, planos de cada sitio de portal o lumbrera y curvas de nivel de la franja del trazo, complementados con fotogrametría o con modelos digitales de elevación de sensores remotos, y con imágenes de satélite rectificadas con puntos de control para ver accesos, cuerpos de agua y bancos de materiales.

El marco se materializa en la Red Geodésica Nacional Activa y en la Pasiva del INEGI

La calidad se controla con dos números: la precisión relativa de la poligonal, que compara el error de cierre con el perímetro medido, y la tolerancia de cierre de la nivelación, que crece con la raíz de la distancia nivelada. Un

circuito que excede la tolerancia se repite, y para un túnel por gravedad el proyecto fija ese límite antes de medir porque un error de pocos centímetros en cota equivale a decenas de metros de posición a lo largo de una pendiente suave.

De la red geodésica al túnel, en tres capas

Red geodésica

RGNA, mantenida por el INEGI

Poligonal

dos puntos de partida

Lumbrera

enlace subterráneo

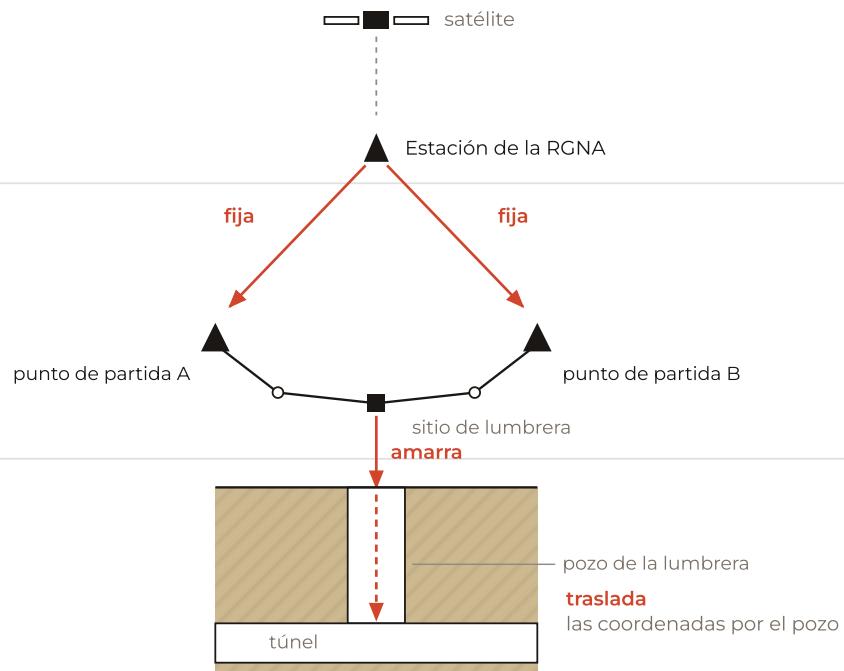


Figura 4.1. De la red geodésica al túnel, en tres capas

Lo que se entrega es una red de control con coordenadas y cotas en monografías de cada vértice, planos topográficos del trazo y de cada sitio, modelo digital de elevación, perfil del terreno a lo largo del eje y la tabla de cadenamientos de portales y lumbreras. Durante la obra la topografía sigue entregando registros. El de la figura siguiente es un formato de verificación topográfica de un escudo: anillo, cadenamiento, giro, elevación y pendiente reales contra proyectadas, y las holguras entre faldón y anillo medidas en siete puntos.

Con esto se decide la rasante y la pendiente de una conducción por gravedad; la longitud entre lumbreras, porque la lumbrera se coloca donde hay predio, acceso y espacio para una planta; y el enlace subterráneo, donde la cuadrilla que baja por una lumbrera traslada coordenadas por el pozo y el error permisible de cierre se fija en el proyecto, no se improvisa en obra. El INEGI mantiene la red de control. El promovente contrata a un contratista topográfico o lo hace con personal propio.

[illegible]

FIG. 4.35 REGISTRO DE DATOS TOPOGRAFICOS

Figura 4.2. Registro de verificación topográfica de un escudo en un túnel del Drenaje Profundo

04

Geología y fotointerpretación

La geología de ingeniería describe qué rocas y suelos hay, cómo están dispuestos y qué problemas dan: fallas, fracturas, cavidades, gases, aguas. Un túnel necesita geología en el anteproyecto, en el proyecto, en la construcción y hasta en la operación.

Los métodos se dividen en indirectos y directos. Los indirectos se apoyan en fotografías aéreas verticales o en la medida de una propiedad física del terreno. Los directos permiten ver y muestrear el material. En la práctica se encadenan en cinco pasos:

1. Fotointerpretación. Se lee tono, textura y rasgos del relieve en fotografías aéreas, a escalas de 1:2,000 a 1:5,000 para detalle y de 1:25,000 a 1:50,000 para reconocimiento.
2. Reconocimiento de campo. Además de la geología da accesos, recursos y ambiente de la zona.
3. Levantamiento geológico detallado. Fija unidades, alteración, contactos, rumbo y echado de los estratos, fallas y juntas, a escalas de 1:100 a 1:5,000 en obras grandes.
4. Trincheras y pozos a cielo abierto. Dan espesores de rellenos y la roca subyacente a bajo costo, ligados al plano topográfico y levantados con brújula y cinta.
5. Socavones exploratorios. De costo alto, dan la observación más directa y permiten pruebas de campo; Charhi los califica entre las exploraciones más recomendables en túneles.

La posición del túnel respecto de los estratos importa tanto como el tipo de roca. La figura siguiente compara seis disposiciones de estratos en la sección de un túnel; el criterio de la fuente marca como adecuadas las posiciones a, d y e inadecuadas las b y f.

El entregable es un plano geológico, perfiles geológicos a lo largo del eje, la descripción de unidades y una lista de riesgos geológicos por tramo, con la propuesta de dónde perforar. El perfil geológico es el documento que más se consulta en obra: muestra el eje del túnel sobre las unidades, la posición de cada sondeo, el nivel del agua y las fallas. El de la figura siguiente corresponde a un túnel de conducción en rocas volcánicas e indica con colores de punto qué sondeos son del proyecto ejecutivo y cuáles de estudios complementarios de otras entidades.

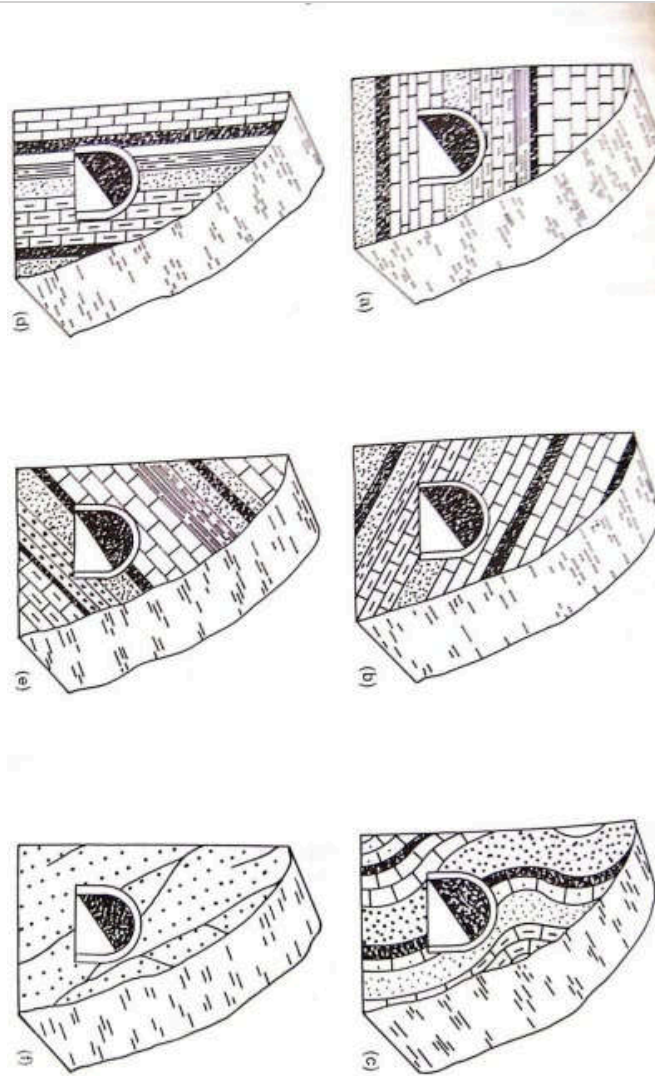


Figura 4.3. Seis posiciones de un túnel respecto de la estratificación, adecuadas e inadecuadas

De la geología salen los tramos del trazo y la tecnología de excavación. Arcillas lacustres, depósitos aluviales y rocas volcánicas piden máquinas y revestimientos distintos, y cada cambio de unidad es un posible cambio de tramo. La geología la hacen la CFE, el Servicio Geológico Mexicano, universidades y consultoras de geotecnia.

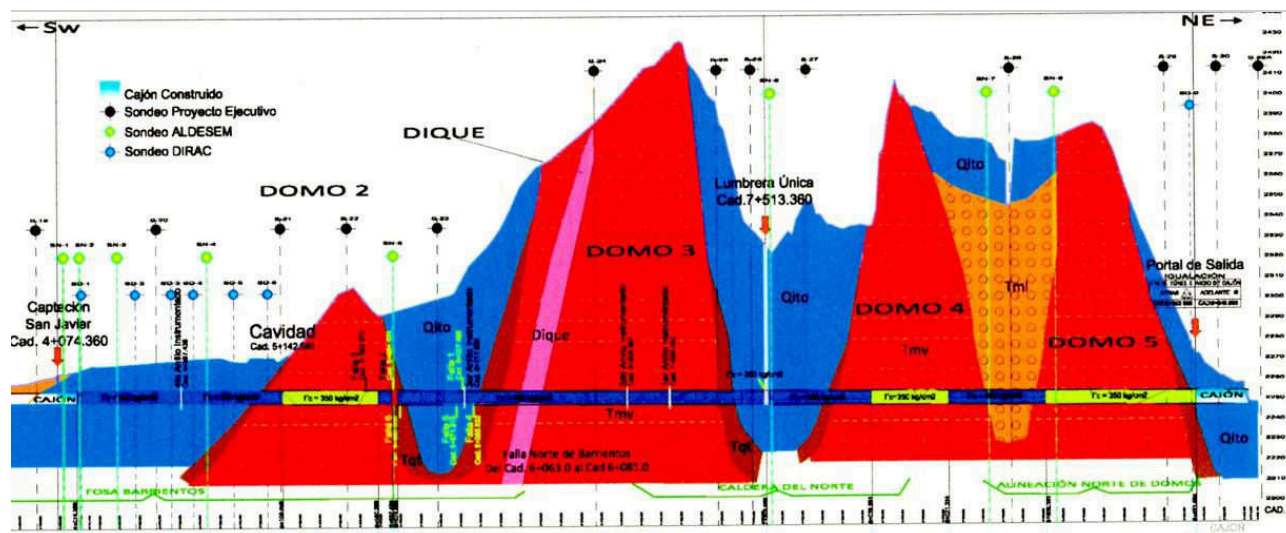


Figura 4.4. Perfil geológico con sondeos de un túnel de conducción en roca volcánica

05

Tipos de suelo

Describir el suelo con un lenguaje común es el primer paso de la geotecnia. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS, ASTM D2487) agrupa los suelos por el tamaño de sus partículas y por su plasticidad, y es el que se usa al clasificar las muestras de un sondeo; en el Interceptor Central, por ejemplo, las muestras se clasificaron cada 50 cm con las pruebas de campo del SUCS. La Tabla 4.1 resume los grupos y lo que significan para quien excava. El comportamiento del frente, que depende además del agua, se desarrolla en el capítulo 5.

TABLA 4.1. GRUPOS DEL SUCS Y SU RELEVANCIA AL EXCAVAR

GRUPO (SÍMBOLO)	QUÉ ES	CÓMO SE RECONOCE	IMPLICACIÓN AL EXCAVAR
Gravas (G)	Partículas gruesas, de 4.75 mm en adelante	No se amasan; se ven a simple vista	Alta permeabilidad; entra agua con rapidez y el frente puede desmoronarse
Arenas (S)	Partículas de 0.075 a 4.75 mm	Se desmoronan en seco; sin plasticidad	Sin cohesión, fluyen bajo el agua; piden abatir o presurizar

GRUPO (SÍMBOLO)	QUÉ ES	CÓMO SE RECONOCE	IMPLICACIÓN AL EXCAVAR
Limos (M)	Partículas finas de baja plasticidad	Se desmenuzan al secar; sensación sedosa	Pierden resistencia con el agua; poco estables en talud
Arcillas (C)	Partículas finas plásticas	Se amasan y forman hilos	Cohesivas e impermeables; se asientan y se expanden con la humedad
Orgánicos (O) y turbas (Pt)	Suelos con materia vegetal	Color oscuro, olor	Muy compresibles; se evitan o se sustituyen en cimentaciones

Mientras el SUCS sirve en cualquier lugar, cada región tiene su geología particular. En el Valle de México la zonificación geotécnica sigue los lineamientos de Marsal y Mazari. Se divide en tres zonas: la de Lago, con grandes espesores de arcillas blandas muy compresibles bajo una costra superficial endurecida; la de Transición, donde alternan estratos arcillosos lacustres con suelos gruesos aluviales, y la de Lomas, con tobas, cenizas, lahares, arenas pumíticas y basaltos de las erupciones de la sierra de las Cruces. La frontera entre Transición y Lago se fija donde desaparece la serie arcillosa inferior, aproximadamente donde la Capa Dura está a 20 m de profundidad.

TABLA 4.2. ZONAS GEOTÉCNICAS DEL VALLE DE MÉXICO Y ESPESORES CARACTERÍSTICOS

ZONA O SUBZONA	ESTRATIGRAFÍA CARACTERÍSTICA	ESPESORES (M)	RASGO QUE IMPORTA AL EXCAVAR
Lago virgen	Costra superficial, serie arcillosa superior, capa dura, serie arcillosa inferior	Costra de 1.0 a 2.5; serie superior de 38 a 40; capa dura de 1 a 2; serie inferior de 8 a 10	Suelos que casi no han perdido sus propiedades; bombeo y sobrecargas recientes
Lago Centro I y II	Las mismas capas, con historia de cargas muy variable	En Centro II: costra de 6 a 10; serie superior de 20 a 25; capa dura de 3 a 5; serie inferior de 6 a 8	Arcillas fuertemente consolidadas junto a arcillas muy blandas en antiguos canales
Transición alta	Costra aluvial sobre suelos blandos y estratos arcillosos que cubren los depósitos de las Lomas	Costra de 8 a 10; suelos blandos de 4 a 6	Irregularidad por depósitos aluviales de antiguas barrancas

ZONA O SUBZONA	ESTRATIGRAFÍA CARACTERÍSTICA	ESPESORES (M)	RASGO QUE IMPORTA AL EXCAVAR
Transición baja	Serie arcillosa superior con intercalaciones limoarenosas	Materiales compresibles hasta 20 de profundidad	Mantos colgados y cambios fuertes de espesor en distancias cortas
Lomas	Tobas, cenizas, lahares, arenas pumíticas, basaltos	No aplica	Estabilidad de cortes que depende de la compacidad, cementación y fracturamiento

En la zona de Lomas, las arenas pumíticas se sostienen en taludes verticales por la cohesión aparente que da su poca humedad, de modo que mojarlas o secarlas puede hacer fallar el corte, y la estabilidad de excavaciones en basaltos depende de los planos de fracturamiento y no de la resistencia de la roca. Los sondeos de cono de las subzonas Lago, Lago Centro y Transición, que se muestran más adelante en este capítulo, son el insumo con el que se confirma cada sitio.

06

Geofísica

La geofísica estima la estratigrafía a partir de propiedades físicas medidas desde la superficie, sin perforar. Es un procedimiento que ganó importancia por su rapidez y economía, y exige la participación de un especialista. Una perforación revisa un punto. La geofísica llena el espacio entre puntos con una interpretación que luego se verifica.

Se usan tres familias de métodos. La sísmica de refracción genera una perturbación en un punto, con golpe o con carga, y mide el tiempo en que la onda longitudinal llega a una línea de geófonos; el equipo es un generador de onda, el tendido de geófonos y el registrador. Con el quiebre de la gráfica tiempo-distancia se obtiene el espesor de la capa superficial. Los métodos eléctricos miden la resistividad. En el sondeo eléctrico vertical (SEV) se separan los electrodos de corriente de manera sucesiva: a mayor separación,

mayor profundidad investigada. El arreglo más usado es el de Wenner, y el equipo se compone de fuente, voltímetro, amperímetro y cuatro electrodos. La gravimetría mide la aceleración de la gravedad con un gravímetro muy sensible; la diferencia respecto del valor esperado se llama anomalía de Bouguer y puede delatar una masa densa o una cavidad.

La tomografía de resistividad eléctrica pone electrodos en línea, a separación constante, y arma una sección con muchas lecturas. En un túnel del Emisor Poniente II se usó para buscar una cavidad sobre el eje: se tendieron seis líneas paralelas de 28 electrodos, separadas 1 m, y el resultado en planta delimitó una anomalía de unos 9 m de ancho a 22 m de profundidad. La geofísica sirvió ahí para decidir dónde perforar y dónde inyectar, no para sustituir las calas.

Se entregan secciones geofísicas con unidades de resistividad o velocidad, la profundidad de contactos y una propuesta de sitios de sondeo. La geofísica no da parámetros de diseño por sí sola: se calibra con perforaciones. Decide dónde perforar y cuántos sondeos hacen falta. En túneles, el levantamiento geológico y algún método geofísico determinan el número de perforaciones a lo largo del eje.

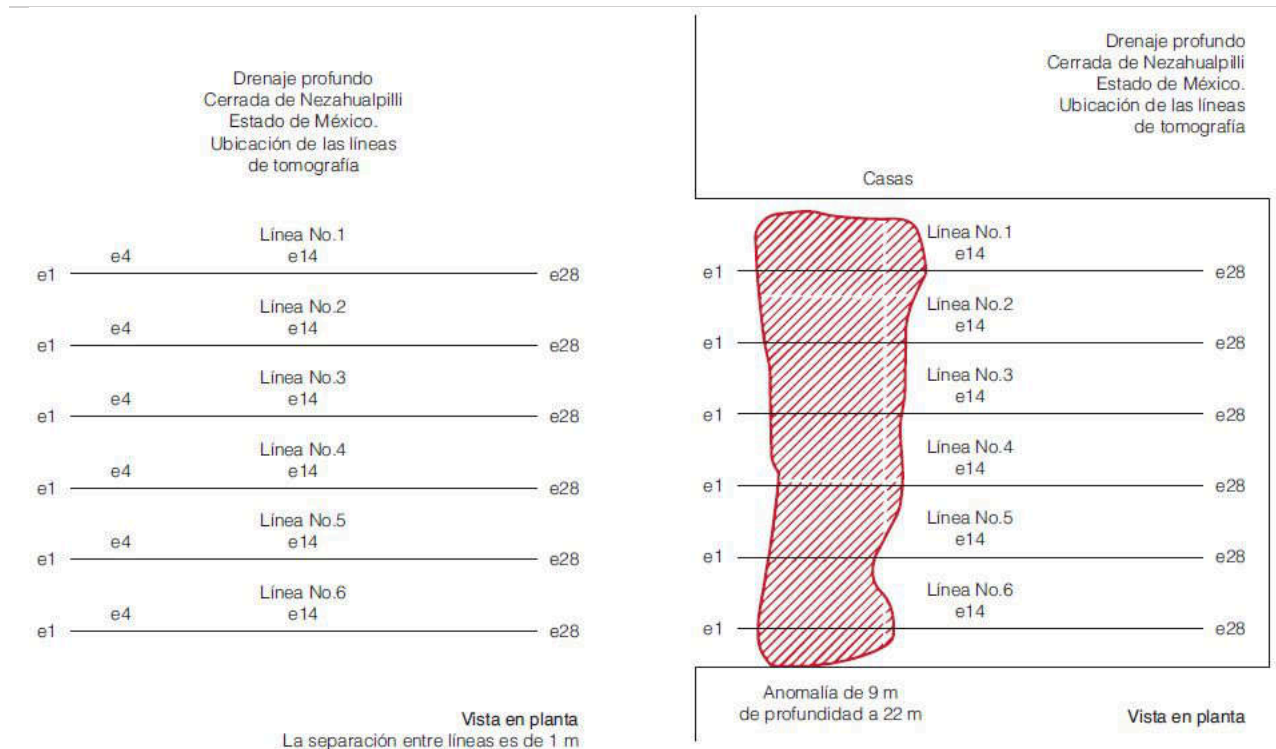


Figura 4.5. Seis líneas de tomografía eléctrica y la anomalía detectada sobre el eje de un túnel

07

Geotecnia: sondeos, ensayos de campo y laboratorio

La geotecnia convierte la descripción en números: peso volumétrico, resistencia, compresibilidad, permeabilidad, módulos. Es el estudio que más pesa en el diseño de lumbreras, revestimientos y cimentaciones.

Un programa de exploración busca estratigrafía y propiedades índice, mecánicas e hidráulicas, y debe planearse para obtener la máxima información al menor costo. Se combinan tres técnicas.

1. Prueba de penetración estándar (SPT). Se hinca a percusión un tubo muestreador y se cuentan los golpes necesarios; el número de golpes N se correlaciona con la resistencia al corte, y el tubo rescata muestras alteradas para clasificar el suelo y hacer pruebas índice. Las tablas de Terzaghi y Peck, de 1968, relacionan N con la consistencia de las

arcillas y la compacidad de las arenas. Normas de referencia: ASTM D1586, NMX-C-431-ONNCCE-2002 y el procedimiento LMS-039 de la CFE.

2. Sondeo selectivo o mixto. Alterna SPT con muestreo inalterado: tubo Shelby de pared delgada en suelos blandos, Shelby dentado en materiales más competentes y barriles NQ o Denison en suelos muy duros o roca. Normas: ASTM D1587 para tubos de pared delgada y ASTM D2113 para barrenación en roca. La calidad de una muestra depende del procedimiento de hincado, del tipo de muestreador, del gasto del fluido de perforación, de la forma de separar la base de la muestra y del método de estabilizar las paredes del sondeo.
3. Instrumentación de campo. Con la información de los sondeos se instalan estaciones piezométricas, por ejemplo cinco piezómetros abiertos tipo Casagrande en estratos drenantes, más pozos de observación para el agua freática superficial.

La prueba de penetración de cono (CPT) completa el cuadro. Se hince a velocidad constante un cono instrumentado y se registra de manera continua la resistencia de punta, la fricción lateral y, con piezocono, la presión de poro. No recupera muestra, pero da un perfil continuo; su norma de referencia es ASTM D5778. Alcanza decenas de metros en suelos blandos y no sirve a las profundidades de una lumbrera de 100 m o más, donde se explora con perforación rotatoria.

El resultado de un CPT es una gráfica de resistencia de punta contra profundidad, y su lectura es visual: las arcillas blandas del lago dan resistencias bajas y casi constantes, y las capas duras aparecen como picos hacia la derecha. En el Valle de México se dispone de sondeos de cono eléctrico de las subzonas Lago Virgen, Lago Centro I y II y Transición Alta, junto con una estratigrafía típica de Transición Alta con arcilla limosa, arena gruesa, limos y arcillas lacustres y la secuencia de tobas. Los tramos donde el cono no pudo penetrar se marcan "avance con broca".

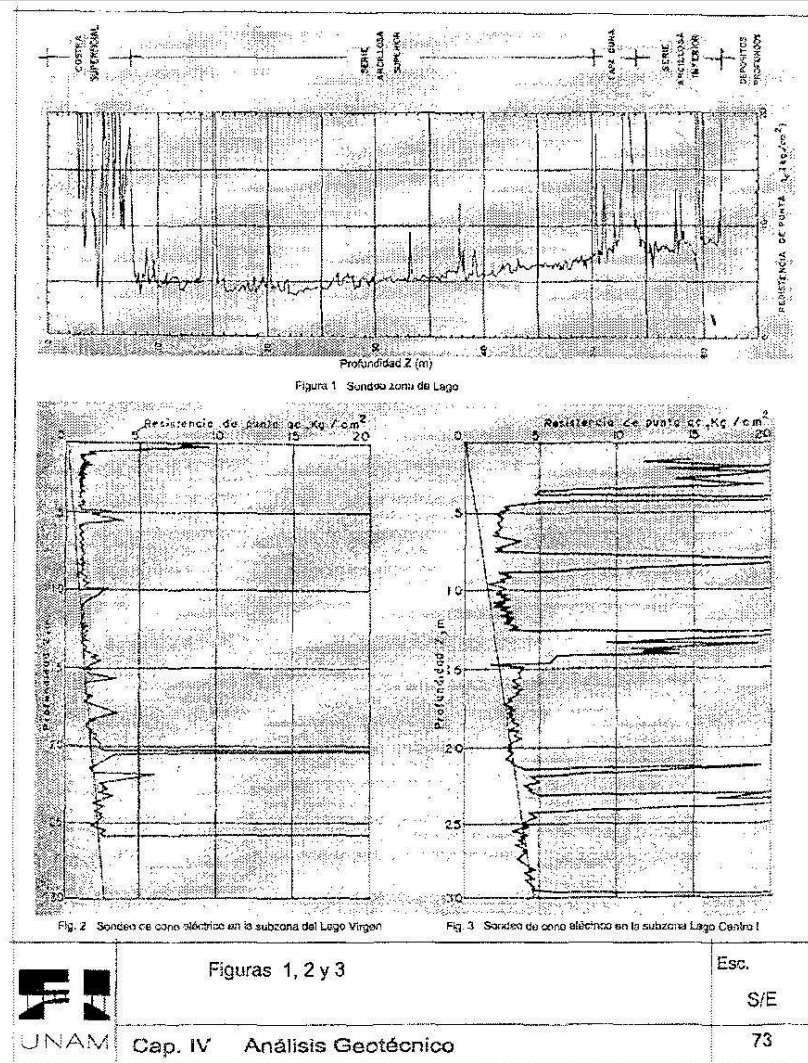


Figura 4.6. Sondeos de cono eléctrico en las subzonas Lago, Lago Virgen y Lago Centro I del Valle de México

Cuando el suelo es blando, el muestreo cambia de instrumento. En el Interceptor Central los estratos blandos se muestrearon con tubo Shelby hincado a presión, de 1 m de largo y 3½ o 4 pulgadas de diámetro, y los más resistentes con barril giratorio tipo Denison; donde no se muestreó, se avanzó con broca tricónica.

Un registro de sondeo mixto reúne en una hoja la profundidad, la herramienta usada, la recuperación, el N, la descripción del material y el nivel del agua. La Tabla 4.3 muestra cómo luce uno; los valores son supuestos para el ejemplo y no pertenecen a ninguna obra. Con el N se estima de manera aproximada la resistencia de una arcilla (un N de 12 golpes

corresponde a una arcilla firme, con una resistencia a compresión simple del orden de 1.5 kg/cm²); es una cifra para decidir cuánto muestrear, y para diseñar se usan resultados de laboratorio.

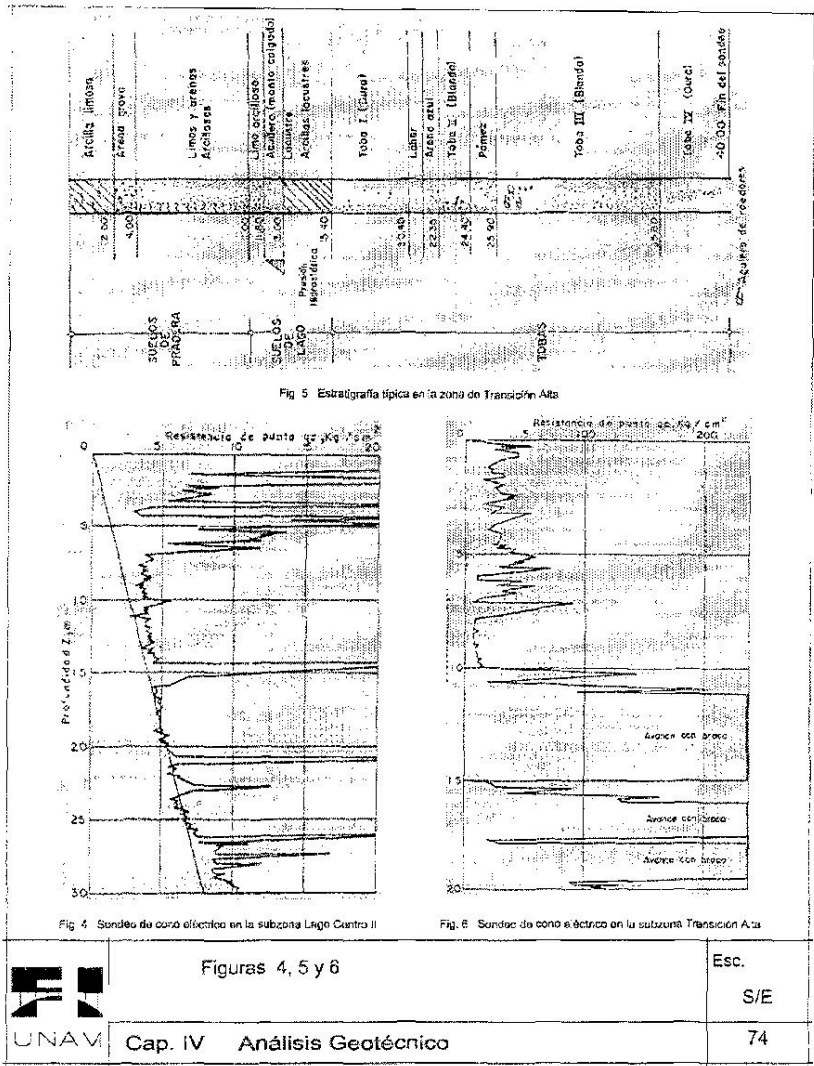


Figura 4.7. Estratigrafía típica de la zona de Transición Alta y sondeos de cono en Lago Centro II

TABLA 4.3. REGISTRO DE UN SONDEO MIXTO (EJEMPLO ILUSTRATIVO CON VALORES SUPUESTOS). SONDEO SM-1, BROCAL EN COTA 0.00 M, NIVEL FREÁTICO A 4.2 M.

PROF. (M)	HERRAMIENTA	RECUPERACIÓN (%)	N (GOLPES)	DESCRIPCIÓN	HUMEDAD (%)
0.0 a 1.0	Pala	100		Relleno de arcilla café con gravas	38
1.0 a 1.6	SPT	80	6	Arcilla café, consistencia media	62
1.6 a 3.2	Shelby	95		Arcilla gris verdosa muy blanda	240

PROF. (M)	HERRAMIENTA	RECUPERACIÓN (%)	N (GOLPES)	DESCRIPCIÓN	HUMEDAD (%)
3.2 a 3.8	SPT	75	2	Arcilla con lentes de ceniza volcánica	280
8.0 a 8.6	SPT	90	24	Limo arenoso café claro, compacto	34
14.0 a 15.0	Baril NQ	70		Toba arenosa, RQD de 55 %	18

El RQD de la última fila es la proporción de la corrida que se recupera en piezas de núcleo mayores de 10 cm; con 55 % cae en la clase de roca regular, de 50 a 75 %.

Las muestras se etiquetan, se protegen y se llevan al laboratorio de mecánica de suelos. Se obtienen primero las propiedades índice: clasificación visual y al tacto, contenido de agua, densidad de sólidos, granulometría y límites de consistencia, con las que el suelo se clasifica en el SUCS. Después vienen las propiedades mecánicas: compresión simple y triaxial no consolidada no drenada (UU), cuyos resultados se interpretan con el criterio de Mohr-Coulomb. Para compresibilidad se hacen ensayos de consolidación unidimensional con anillo flotante, drenando la muestra por ambas caras con piedras porosas. Las normas de referencia son ASTM D4318 para límites de consistencia, D2487 para el SUCS, D2166 para compresión simple, D2850 para triaxial UU y D2435 para consolidación.

La primera de las tres ecuaciones que se conservan en este capítulo describe cuánto corte aguanta un suelo. En palabras: la resistencia al corte de un suelo es su cohesión más la fricción, y la fricción crece con la presión que lo aprieta; es el criterio de falla de Mohr-Coulomb en esfuerzos efectivos:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

donde τ_f es la resistencia al corte (kPa), c' es la cohesión efectiva (kPa), σ' es el esfuerzo normal efectivo sobre el plano de falla (kPa) y φ' es el ángulo de fricción efectivo. Con $c' = 10$ kPa, $\sigma' = 200$ kPa y $\varphi' = 28^\circ$ (valores supuestos) resulta $\tau_f = 10 + 200(0.5317) = 116.3$ kPa. En la triaxial UU, los círculos de Mohr tienen todos el mismo diámetro y la envolvente es una recta horizontal que corta el eje en la resistencia no drenada.

La tabla de resultados de laboratorio es la forma más común de entrega. La figura siguiente es una de un tramo de un interceptor del Drenaje Profundo: por muestra, la profundidad promedio, el contenido de agua, los límites líquido y plástico y el índice de plasticidad. Las humedades de 100 a más de 300 % y los índices de plasticidad de 100 a 260 describen el suelo del antiguo lago, y ese contraste es lo que se ve a primera vista en la tabla.

Con todo ello se entrega un perfil estratigráfico con N, unidades geotécnicas y una tabla de parámetros. La Tabla 4.4 muestra el formato de la tabla de parámetros, con valores supuestos.

TABLA 4.4. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS POR UNIDAD (EJEMPLO ILUSTRATIVO CON VALORES SUPUESTOS).

UNIDAD	MATERIAL	ESPESOR (M)	PESO VOLUMÉTRICO (KN/M ³)	SU (KPA)	E50 (MPA)	PERMEABILIDAD K (M/S)
UG-1	Arcilla lacustre	28	12	40	4	1×10^{-9}
UG-2	Limo arenoso compacto	12	17	150	22	5×10^{-7}
UG-3	Arena con gravas	20	19		60	2×10^{-4}

Un ejemplo real de cómo se escribe la estratigrafía de un tramo: en el tramo L8 a L7 del Interceptor Central hay un relleno de 1 m, un estrato resistente de limo y arena con humedad de 30 a 75 % y cohesión media de 6 t/m², una arcilla compresible de unos 25 m de espesor con 350 % de humedad y cohesión de 2 a 2.5 t/m² en los primeros 12 m, y debajo capas resistentes poco compresibles hasta la profundidad explorada de 60 m.

Con los parámetros se calculan la estabilidad de fondo de excavación, el empuje sobre el revestimiento y los asentamientos. La geotecnia decide el procedimiento constructivo y cuánto muestrear: el comportamiento del SPT permite reducir el número de pruebas de laboratorio en estratos parecidos.

VALORES DE LIMITES DE CONSISTENCIA						
Muestra	Profundidad promedio	W (%)	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P. (%)	Cr
1	0.80	65.24	65.49	39.24	26.25	0.00
4	2.45	135.80	241.76	54.99	186.77	0.56
5	3.55	154.34	291.04	55.97	243.07	0.58
9	7.15	308.06	328.84	68.84	260.00	0.07
13	10.75	250.86	183.33	59.45	123.88	0.00
16	13.55	230.09	308.02	63.42	244.60	0.31
19	16.15	244.26	276.42	67.53	208.89	0.15
22	18.85	171.29	163.43	48.76	114.67	0.00
23	19.95	104.52	101.68	51.48	50.20	0.00
24	20.35	125.91	107.40	47.20	60.20	0.00
25	20.75	30.43	52.40	32.94	19.46	1.12
26	22.35	258.18	77.90	24.54	50.36	0.00
27	23.35	323.28	324.22	92.45	231.77	0.00
29	25.15	162.07	237.16	72.43	164.73	0.45
30	26.05	78.87	202.73	32.63	169.90	0.72
31	26.95	35.99	42.45	18.25	24.20	0.26
32	27.85	138.96	159.60	59.08	100.57	0.20
33	28.75	260.76	308.32	81.86	226.46	0.21
34	30.05	76.99	40.62	23.72	16.90	0.00

Página 34

Figura 4.8. Valores de límites de consistencia por profundidad en un tramo de interceptor

EXPLORACIÓN DIRECTA: POZOS, SOCAVONES Y PERFORACIONES

La exploración se divide en métodos indirectos, como la fotointerpretación y la geofísica, y métodos directos, los que permiten ver el terreno o sacar una muestra de él. Los directos son más caros por metro, pero son los que fijan los parámetros de diseño, porque los indirectos solo se vuelven confiables cuando se calibran contra ellos.

Reconocimiento y levantamiento. El primer paso es la visita al sitio, que conviene complementar con un estudio fotogeológico y una recopilación de datos de predios cercanos: además de informar sobre accesos y recursos locales, da el ambiente geológico que orientará los estudios siguientes. Después viene el levantamiento geológico detallado,

que identifica las unidades de roca o suelo presentes, su grado de alteración, sus contactos, su rumbo y echado, y los accidentes estructurales: fallas, fracturas, juntas y plegamientos. Para la fotointerpretación se usan escalas de 1:2,000 a 1:5,000 en trabajos de detalle y de 1:25,000 a 1:50,000 en reconocimiento.

Tajos y pozos a cielo abierto. Son la exploración más barata. Sirven para conocer el espesor y la naturaleza de un relleno, la roca que está debajo, su alteración, sus fracturas y sus contactos. Para que el dato entre al plano geológico, la excavación debe estar ligada al plano topográfico o fotogramétrico y levantarse con brújula y cinta por paredes y piso, con el detalle suficiente para dibujar el perfil exacto; si hace falta, se sacan muestras cúbicas para laboratorio.

Socavones y pozos interiores. Son más costosos que los tajos y que las perforaciones, pero permiten observar el material a profundidades alejadas de la superficie, y entregan información sobre resistencia, permeabilidad, comportamiento de la roca y número y distribución de barrenos. Además son lugares adecuados para pruebas de campo, como módulo de elasticidad, resistencia y permeabilidad. Se cuentan entre las exploraciones más recomendables para túneles y obras subterráneas. Su levantamiento parte de referencias ligadas al plano topográfico y registra tablas, piso y techo: accidentes estructurales, contactos y unidades litoestratigráficas.

Perforaciones en suelo. En la zona lacustre la calidad de la muestra depende de cinco factores: cómo se hinca el muestreador (a presión, rotación o percusión), el tipo de muestreador (de pared gruesa para muestras alteradas o de pared delgada, tipo Shelby o Denison, para inalteradas), el gasto de agua o lodo de perforación, la forma de separar la base de la muestra del terreno y el método de estabilizar las paredes, con lodo o con ademe. Los diámetros que recomienda son 2 1/8 y 1 5/8 pulgadas, el primero porque permite el examen visual y las pruebas de laboratorio, e incluso dejar testigos para estudios posteriores.

Cuántos y dónde. No es posible fijar reglas generales para la distribución y la profundidad, porque dependen de la obra y del terreno. Lo que las define es esto: el levantamiento geológico y alguna prueba geofísica indican dónde el terreno cambia, y ahí

se concentran las perforaciones, no en una malla regular. En un túnel la profundidad debe llegar siempre a la plantilla, y si la topografía impide perforar desde la superficie se perfora desde el frente de ataque, incluso en abanico.

La cara oculta: lo que un sondeo no ve. El derrumbe del Emisor Central lo muestra. En una zona de tobas y rocas ígneas, un sondeo de superficie no detectó la debilidad que se encontró en el frente; solo confirmó la consistencia de la toba Tarango. Las perforaciones desde el propio frente, a 6 a 10 m, fueron las que acotaron la zona derrumbada. La enseñanza para el programa de exploración es sencilla: los sondeos verticales dicen qué hay debajo de un punto, pero un túnel es una línea, y entre un sondeo y otro puede haber lentes de arena, fracturas con agua o contactos que cambian el comportamiento de la bóveda. Por eso se combinan métodos.

MÉTODO	QUÉ ENTREGA	COSTO RELATIVO	CUÁNDO CONVIENE
Fotointerpretación	Rasgos morfológicos y estructurales	Bajo	Reconocimiento, antes de salir a campo
Geofísica	Velocidades o resistividades por capa	Moderado	Decidir dónde perforar
Tajos y pozos a cielo abierto	Espesor, alteración, contactos	Bajo	Rellenos y roca somera
Socavones y pozos interiores	Observación directa y pruebas in situ	Alto	Túneles y obras subterráneas
Perforaciones con muestreo	Muestras alteradas e inalteradas	Alto por metro	Suelo blando, parámetros de diseño

08

Geohidrología

La geohidrología estudia el agua subterránea: dónde está, cómo se mueve, a qué presión y cuánta entrega una excavación. En una obra profunda en acuífero es el estudio que más sorprende cuando falla. Se hace en cuatro pasos. Primero el marco hidrogeológico: unidades acuíferas, sistema libre,

semiconfinado o confinado, y estado de explotación del acuífero, con los datos de la Conagua. Después el censo de aprovechamientos, con pozos existentes, profundidad, caudal y niveles. Luego la piezometría, que configura el nivel estático y el perfil de presión de poro en cada sitio con piezómetros abiertos, neumáticos o de cuerda vibrante. Y por último las pruebas de permeabilidad: en suelo, pruebas tipo Lefranc en tramos de la perforación; en roca, pruebas Lugeon con obturadores; a escala mayor, pruebas de bombeo.

La elección del piezómetro depende de la permeabilidad del terreno, porque un tubo abierto responde lento en un suelo poco permeable. Una gráfica relaciona la permeabilidad con el tiempo de respuesta de cada instrumento: en un suelo de permeabilidad de 10^{-7} cm/s, un tubo abierto tarda del orden de días en dar el 90 % de la respuesta, y un piezómetro de diafragma responde en horas. La figura siguiente muestra el piezómetro abierto de Casagrande con su filtro de arena, sellos de bentonita y tubo poroso.

Con esas pruebas se estima el gasto que entrará a una excavación o a un pozo de abatimiento (ecuación de Thiem), la permeabilidad del tramo (Lefranc y Lugeon) y el riesgo de subpresión. La subpresión es la que más importa: el fondo de una excavación se levanta cuando la presión del agua debajo es mayor que el peso del suelo que queda encima; el factor de seguridad es el cociente de ambos.

$$FS = \frac{\gamma h}{\gamma_w h_w}$$

donde FS es el factor de seguridad contra falla de fondo, γ es el peso volumétrico del suelo sobre el estrato permeable (kN/m^3), h es su espesor (m), $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$ es el peso volumétrico del agua y h_w es la carga piezométrica sobre la base de ese suelo (m). Con $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, $h = 20 \text{ m}$ y $h_w = 30 \text{ m}$ (valores supuestos), $FS = 340/294.3 = 1.16$. Un factor de 1.16 queda por debajo de los valores que suelen pedirse para una excavación profunda y obliga a abatir la presión del acuífero o a poner un elemento de retención en el fondo.

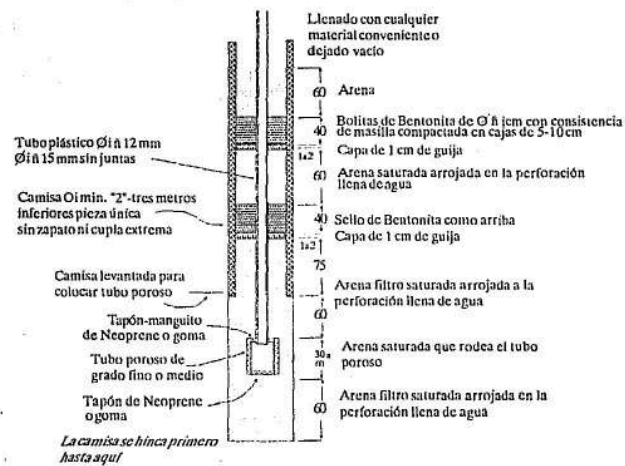


FIG. 10.- Piezómetro abierto tipo Casagrande (según A. Casagrande, 1949).

Figura 4.9. Piezómetro abierto tipo Casagrande con filtro de arena y sellos de bentonita

El entregable es un mapa de niveles estáticos, un perfil piezométrico por sitio, valores de permeabilidad por tramo y una estimación del caudal de bombeo para la excavación. Decide el sistema de abatimiento, la profundidad de los elementos de retención y el riesgo de subpresión.

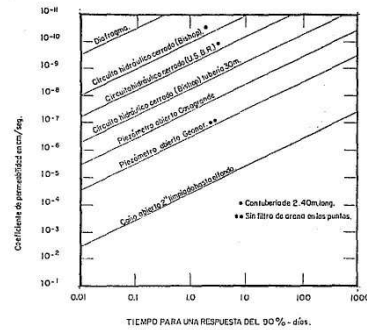


FIG.-14.
Retardo aproximado de los distintos tipos de piezómetros (según Hvorslev, 1955; Peabody, 1961; Brooker y Lindberg, 1965, y otros).

Figura 4.10. Retardo aproximado de distintos piezómetros según la permeabilidad del suelo

09

Hidrología

La hidrología determina la lluvia de diseño y el caudal que llegará a la obra. Sus tres entradas son la cuenca, la serie de precipitaciones y el riesgo aceptado. Se mide la precipitación con pluviómetros y pluviógrafos y los niveles con estaciones hidrométricas, cuya operación en México corresponde a la Conagua. Con las series se ajustan distribuciones de probabilidad para asignar periodo de retorno a cada lámina. Una lluvia puntual se convierte en lluvia sobre un área con un factor de reducción por área, que para el Valle de México se expresa como una función logarítmica del área de la cuenca. La lluvia pasa luego por un modelo lluvia-escurrimiento: fórmula racional en cuencas pequeñas, o hidrogramas

unitarios y modelos como EPA SWMM, que organiza el flujo en capas de atmósfera, superficie, aguas subterráneas y transporte. La curva masa y el hietograma muestran la distribución de la lluvia en el tiempo.

La Conagua publica las referencias de método para sistemas de agua y alcantarillado en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS), que liga el periodo de retorno de diseño con el uso de suelo de la zona.

La tercera ecuación del capítulo aclara una confusión frecuente. Un periodo de retorno T significa una probabilidad anual de $1/T$, no una tormenta cada T años. La probabilidad de que ocurra al menos una vez en la vida útil sale de complementar la probabilidad de que no ocurra ningún año:

$$P = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

donde P es la probabilidad de excedencia en el horizonte considerado, T es el periodo de retorno (años) y n es el número de años de vida de la obra. Para $T = 50$ años y $n = 25$ años, $P = 1 - 0.98^{25} = 0.397$: una obra diseñada para una tormenta de 50 años tiene 39.7 % de probabilidad de verla superada en 25 años.

La lluvia no cae pareja, y por eso el estudio incluye mapas de isoyetas, las curvas de igual precipitación. En la figura siguiente se ve el Valle de México para una tormenta de 30 min y periodo de retorno de 5 años: las láminas van de 21.8 mm en el suroeste a 38.8 mm en el poniente, con curvas de 30, 32, 34, 35 y 36 mm. Una misma tormenta de diseño no representa igual a toda la cuenca. La tormenta del 4 de septiembre de 1988 muestra la variabilidad dentro de un mismo evento: el promedio sobre el Valle fue de 38.4 mm con periodo de retorno estimado de 13 años, pero las zonas sur, surponiente y norponiente registraron 58.1, 53.8 y 45.2 mm con periodos de 70, 52 y 34 años.

Se entregan hietogramas e hidrogramas de diseño, caudal máximo para el periodo de retorno elegido, volúmenes para regulación y, en un túnel de gravedad, la curva de operación ante tormentas históricas. Decide la sección, la pendiente y la capacidad de las

obras de captación. Una decisión de riesgo tiene costo: cada salto de período de retorno agranda la obra. Conagua, el IMTA, el Instituto de Ingeniería de la UNAM y las consultoras hacen este estudio.

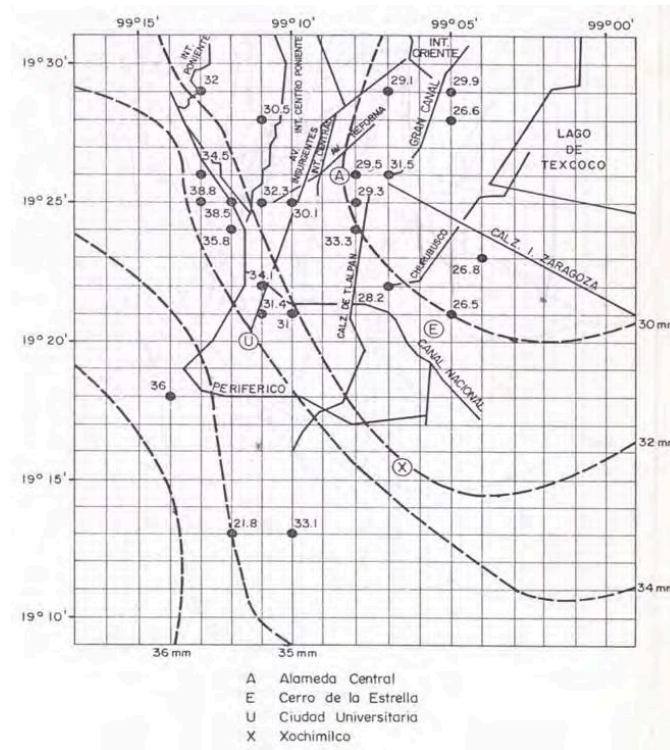


Figura 4.11. Isoyetas de una tormenta de 30 minutos y periodo de retorno de 5 años en el Valle de México

Hidráulica

Con el caudal de la hidrología, la hidráulica dimensiona la sección, la pendiente y las estructuras de entrada y de descarga. En conducciones por gravedad el punto de partida es la ecuación de Manning; en conducciones a presión, Darcy-Weisbach o Hazen-Williams. El desarrollo con ejemplos está en el capítulo 2.

Los estudios hidráulicos importantes se hacen en modelos. Los modelos matemáticos (HEC-RAS, EPA SWMM) simulan el flujo. Los modelos físicos a escala, por ejemplo 1:30, se usan donde el flujo es tan complejo que el cálculo no basta, como en una descarga con vertedor y rápida. Un modelo físico se construye con la semejanza de Froude, que conserva la relación entre inercia y gravedad y obliga a que los gastos del modelo guarden con los del prototipo una proporción igual a la escala geométrica elevada a la potencia $5/2$. Con una escala 1:30, un gasto de prototipo de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ se ensaya con unos 9 L/s en el laboratorio.

Se entregan perfiles del agua, tirantes, velocidades, niveles máximos y la geometría de las estructuras, con los que se decide la sección, la pendiente y las obras de descarga. Lo hacen el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el IMTA y consultoras, y lo revisa la Conagua.

11

Impacto ambiental y social (MIA)

La Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) es el documento con que el promovente describe obra, entorno, impactos y medidas, para que la Semarnat autorice, niegue o condicione. La exige la LGEEPA para las obras hidráulicas, las vías generales de comunicación y los ductos (art. 28, fr. I).

Una consultora ambiental, contratada por el promovente, prepara el documento en una de dos modalidades, regional o particular (Reglamento de la LGEEPA en materia de evaluación del impacto ambiental, art. 10; el artículo 11 enumera los casos de modalidad regional). La Semarnat, por la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental (DGIRA), la revisa. El contenido se organiza en descripción del proyecto, vinculación con normas y planes, caracterización del sistema ambiental, identificación y evaluación de impactos, y medidas de prevención y mitigación. El trabajo de campo incluye inventarios de flora y fauna, calidad del agua y suelo, ruido y revisión del uso de suelo en cada sitio de lumbrera. Una obra de conducción tiene impactos propios: los bancos de tiro para el

material excavado, el abatimiento de acuíferos durante la construcción y el destino del agua que se conduce. El estudio social entra por dos vías: el diagnóstico de comunidades afectadas y la gestión de predios y de molestias de obra.

El producto es el documento, el resolutivo con sus condicionantes y un programa de vigilancia ambiental. Decide si la obra puede hacerse, dónde se disponen los bancos de tiro, cómo se maneja el agua del abatimiento y el destino de la rezaga. Puede cambiar el trazo. Una MIA suele traer un plano de cada sitio con fotografía aérea, que sirve de línea base para comparar después de la obra.

12

Factibilidad técnica y costo-beneficio

La factibilidad técnica responde si la obra se puede construir con la tecnología y el terreno disponibles. El análisis costo-beneficio responde si conviene a la sociedad. El segundo es requisito para programas y proyectos de inversión federal: los Lineamientos para la elaboración y presentación de los análisis costo y beneficio se publicaron en el DOF del 30 de diciembre de 2013, con fundamento en el artículo 34 de la Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria (LFPRH), que exige una evaluación que demuestre un beneficio social neto.

Se definen alternativas (trazos, diámetros, tecnologías), se estiman costos de inversión, operación y mantenimiento, y se valoran beneficios, como inundaciones evitadas o población protegida. Con una tasa social de descuento se calculan indicadores de rentabilidad: el valor presente neto y la tasa interna de retorno. Un ejercicio de sensibilidad prueba qué pasa si suben los costos o se atrasa la obra.

Se concluye con una recomendación (construir, posponer, cambiar), un presupuesto base, un calendario y un esquema de financiamiento. Decide si la obra se registra en la cartera de inversión, con qué alcance y bajo qué presupuesto.

13

Riesgo

El estudio de riesgo cierra el conjunto. Identifica amenazas, como hundimiento del terreno, sismo, falla de una lumbrera o desbordamiento a la salida, calcula su probabilidad y sus consecuencias, y define medidas. En una obra de drenaje, una pregunta típica es qué población se afecta si la obra no opera. El riesgo es el producto de la probabilidad anual del evento por su consecuencia, medida en pesos, en personas afectadas o en días sin servicio, y se compara con el costo de la medida que lo reduce. Cenapred, universidades y consultoras suelen hacer este estudio, y lo revisan la dependencia y Protección Civil.

14

Derecho de vía y liberación de predios

El derecho de vía es la franja de terreno, superficial o subterránea, que debe estar libre y a disposición del promovente para construir y operar. Un túnel profundo necesita derecho de vía superficial en lumbreras, portales y caminos de acceso; la franja del eje, a decenas de metros de profundidad, plantea otra pregunta jurídica: qué parte del subsuelo requiere constituir servidumbre, y eso se resuelve en el proyecto jurídico de cada obra.

La liberación sigue cuatro pasos. Se identifican los predios con topografía y con información catastral y agraria, y los sistemas de información geográfica integran cartas del Registro Agrario Nacional para ubicar parcelas y ejidos y su situación legal. El área jurídica negocia con los propietarios. Cuando no hay acuerdo procede la expropiación por causa de utilidad pública, conforme a la Ley de Expropiación. Y se paga la indemnización y se toma posesión.

El contrato de obra puede dejar esa gestión a la dependencia. Un ejemplo de bases de contratación: la Comisión tramita permisos, licencias, derechos de bancos de materiales y la liberación de derechos de vía y expropiación de inmuebles antes de los trabajos. Hay otro caso: cuando la obra usa un derecho de vía ya existente. La Autopista San Mateo-Constituyentes aprovechó el derecho de vía de una línea de alta tensión de la CFE, y la autoridad facultada para autorizar obras sobre él era la SCT.

El producto es un plano de afectaciones, un expediente por predio y la liberación del frente de obra en fechas. Decide el calendario. Un predio sin liberar retrasa una lumbrera, y una lumbrera retrasa dos frentes. En un trazo largo, el derecho de vía es una ruta crítica igual que la excavación.

15

Actividades preliminares de obra

Cuando los estudios están hechos y el predio está libre, empieza la preparación física del sitio, antes de la primera excavación. Son tareas conocidas en toda obra civil y cada una resuelve un problema distinto. La Tabla 4.5 las ordena en la secuencia en que suelen ejecutarse.

TABLA 4.5. ACTIVIDADES PRELIMINARES DE UNA OBRA LINEAL Y DE SUS SITIOS

ACTIVIDAD	EN QUÉ CONSISTE	CÓMO SE HACE	PARA QUÉ SIRVE
Trazo y referenciación	Marcar en campo el eje y los niveles del proyecto	Equipo topográfico; se trazan y se referencian todos los niveles con respecto al alineamiento horizontal	Replantear el proyecto; es la base de cuantificar la excavación
Nivelación	Fijar las cotas de proyecto en cada punto	Niveletas cada 20 m y escantillón; a la cota de plantilla de proyecto se suman 5 cm de cama más el espesor del tubo	Dar pendiente y profundidad correctas

ACTIVIDAD	EN QUÉ CONSISTE	CÓMO SE HACE	PARA QUÉ SIRVE
Desmonte	Deshierbe y tala de la zona de trabajo	Herramienta manual en desmontes ligeros; tractores y retroexcavadoras en desmontes altos; el producto se acarrea fuera del ancho de corona y su destino lo fija la autoridad ambiental	Dejar el terreno limpio y despejar el paso
Despalme	Retirar la capa de suelo con materia vegetal	Tractor de cuchilla frontal que ataca el terreno perpendicular al eje y coloca el material a los costados; el espesor varía por zona	Quitar el suelo que no sirve para apoyar estructuras ni rellenos
Reubicación de servicios	Desviar, proteger o reubicar instalaciones que estorban	Se gestionan con la entidad dueña: líneas de alta tensión, líneas de baja tensión y redes subterráneas, con presupuesto y permiso previos	Evitar daños y suspensiones, y cumplir con el dueño de cada servicio
Delimitación y accesos	Cerrar el área y adecuar las entradas	Tapiales o enrejados donde la topografía lo permite; nivelaciones en los accesos	Seguridad y control de contaminantes en área urbana
Campamento e instalaciones	Oficinas, talleres, almacenes, patio de materiales y servicios	En un escudo presurizado: subestación eléctrica, planta de emergencia, patio de dovelas, compresor, cisterna y planta de lodos	Poner en marcha la maquinaria y mantener un ciclo ágil

El desmonte y el despalme van juntos antes de cualquier terraplén o plataforma, y su producto se acarrea fuera de la zona de obra bajo la supervisión de las autoridades correspondientes. La reubicación de servicios es, en cambio, un trámite antes que un trabajo: en una autopista urbana se previó pedir a la compañía de energía la relocalización o protección de las líneas de alta tensión y la reubicación de las de baja tensión de 23 kV o menos antes de iniciar cualquier obra, y a falta de autorización por escrito no se podía empezar. Si hay instalaciones subterráneas en el área, el desvío es inevitable (p. 52 del PDF). Los caminos de acceso, por su parte, se reducen en esa obra a nivelaciones en la entrada, porque el sitio ya estaba comunicado; en una lumbrera alejada, el camino se construye antes de que llegue la primera máquina.

Para una zanja o un corte, la nivelación tiene un ritual sencillo: la forma más común de verificar la profundidad es fabricar niveletas y escantillones, colocar las niveletas a cada 20 m, tirar un reventón al centro de la zanja y afinar el fondo con el escantillón, sumando 5 cm de cama a la cota de plantilla del proyecto. La obra recibe así un fondo listo para la plantilla.

16

Del estudio a la obra: escalas, instrumentación e informe

ESCALAS Y PRECISIÓN DE LOS PLANOS

La escala se elige según el trabajo. Las fotografías aéreas van de 1:2,000 a 1:5,000 en detalle y de 1:25,000 a 1:50,000 en reconocimiento, y los levantamientos geológicos de una obra grande se dibujan de 1:100 a 1:5,000. En topografía, los planos de un sistema de alcantarillado del Emisor Central se dibujaron a 1:2,000 en horizontal y 1:200 en vertical en los perfiles, con poligonal perimetral de cierre 1:10,000 más una secundaria, y curvas de nivel a cada metro en terreno plano (pendiente menor de 5 %) o a cada 0.5 m si la pendiente es mayor. En una obra por gravedad esa equidistancia importa, porque el perfil del terreno sobre el eje se lee de las curvas.

UN CASO EN QUE LOS SONDEOS NO ALCANZARON

En un colector del Drenaje Profundo, el escudo presurizado se bloqueó al hallar basalto donde solo se esperaban arenas y arcillas. Se hicieron 37 sondeos en el tramo afectado y con ellos se trazó un perfil estratigráfico que mostró el basalto, la arena volcánica y las capas de arcilla por segmentos. El basalto no pasaba de unos 50 m, y con eso se decidió construir dos lumbreras. Un sondeo adicional antes de excavar cuesta menos que un paro con el escudo atrapado.

INSTRUMENTACIÓN COMO CONTINUACIÓN DEL ESTUDIO

El estudio no termina al empezar la obra: la instrumentación lo continúa y comprueba lo supuesto. Se recomiendan referencias de nivel superficial a lo largo de todo el trazo, a cada 20 m, con secciones transversales de al menos 40 m a cada lado del eje cada 80 m, medidas con aparatos topográficos de precisión nominal de 0.05 mm. En zona urbana se agregan referencias en las edificaciones vecinas, con piezas de latón fijadas con resina epóxica, al menos una estación piezométrica cada 750 m (celdas Casagrande en capas permeables y piezómetros neumáticos en estratos poco permeables) y convergencias medidas con extensómetro de cinta invar, con precisión nominal de 0.01 mm en distancias menores de 10 m. En un túnel del Interceptor Oriente-Sur, a febrero de 1992 se habían instalado seis bancos de nivel de referencia fuera de la zona de influencia, 60 bancos superficiales sobre el eje a no más de 25 m, 57 en cinco secciones transversales y 85 testigos en edificios.

QUÉ DEBE CONTENER EL INFORME

Un informe de estudios para un túnel de conducción trae, como mínimo: la descripción de la obra y de la zona; el plano de ubicación de sondeos, pozos y líneas geofísicas ligado al plano topográfico; las columnas estratigráficas con clasificación de los suelos; los resultados de laboratorio y de campo por sondeo; el perfil geológico-geotécnico a lo largo del eje, con las propiedades por tramo; los niveles piezométricos y las pruebas de permeabilidad; y las recomendaciones para el procedimiento constructivo y para el diseño del revestimiento. Los estudios de impacto ambiental se entregan aparte, como la MIA descrita arriba, y los hidrológicos como hietogramas, gastos y volúmenes de regulación.

Quién hace cada estudio y en qué orden

Los estudios se ejecutan en el orden que muestra la Tabla 4.7, con vueltas entre los pasos 3 al 6: la geofísica sugiere dónde perforar, la perforación calibra la geofísica y los resultados pueden obligar a otra geofísica. Para túneles rige una regla de cierre: si la topografía es tan accidentada que no se puede perforar en superficie, se hacen perforaciones desde el frente de excavación, incluso en abanico.

TABLA 4.6. QUIÉN HACE Y QUIÉN REVIS A CADA ESTUDIO

ESTUDIO	QUIEN SUELE HACERLO	QUIEN LO REVIS A O AUTORIZA
Topografía y geodesia	Contratista especializado; CFE, INEGI para la red geodésica	Dependencia promovente
Geología y geofísica	CFE, Servicio Geológico Mexicano, empresas privadas	Dependencia promovente
Mecánica de suelos	CFE, laboratorios y empresas de geotecnia	Dependencia; supervisor
Hidrología	Conagua, IMTA, Instituto de Ingeniería UNAM, consultoras	Conagua
Hidráulica	Instituto de Ingeniería UNAM, IMTA, consultoras	Conagua
Impacto ambiental	Consultora ambiental contratada por el promovente	Semarnat (DGIRA)
Factibilidad	Dependencia, consultoras económicas	Hacienda, para registro en cartera
Riesgo	Consultoras, universidades, Cenapred	Dependencia y Protección Civil

TABLA 4.7. ORDEN DE EJECUCIÓN DE LOS ESTUDIOS PRELIMINARES Y DEPENDENCIAS

ORDEN	ESTUDIO	DEPEND E	ENTREGA PRINCIPAL	DECISIÓN QUE HABILITA
1	Topografía y geodesia	Red geodésica del INEGI	Red de control, planos, modelo de elevación	Corredor posible, pendiente

ORDEN	ESTUDIO	DEPENDENCIA	ENTREGA PRINCIPAL	DECISIÓN QUE HABILITA
2	Hidrología	Cuenca y series de lluvia	Caudal de diseño	Capacidad de la obra
3	Geología y fotointerpretación	Planos del paso 1	Plano y perfil geológico	Tramos y tecnología preliminares
4	Geofísica	Geología	Secciones de resistividad o velocidad	Dónde perforar
5	Geotecnia	Geofísica	Perfil y parámetros por sitio	Procedimiento constructivo, revestimiento
6	Geohidrología	Geología y sondeos	Niveles, permeabilidad, caudal de bombeo	Abatimiento, subpresión
7	MIA y estudio social	Trazo definido	Resolutivo y condicionantes	Si se puede construir y cómo
8	Derecho de vía	Planos topográficos	Predios liberados	Calendario de frentes
9	Factibilidad y costo-beneficio	Todo lo anterior	Recomendación y presupuesto	Construir, posponer, cambiar

Cuatro dependencias explican casi todo el orden. La geofísica va antes que las perforaciones, porque dice dónde perforar. La hidrología va antes que la hidráulica, porque entrega el caudal que ésta dimensiona. La MIA necesita un trazo definido pero se presenta antes del proyecto ejecutivo. La factibilidad usa casi todo, así que se actualiza al final. Las actividades preliminares de obra cierran la secuencia, porque necesitan predios liberados y servicios resueltos.

El costo también ordena. Una perforación profunda vale mucho más que una prospección geofísica: la geofísica sirve para gastar menos en perforaciones, no para sustituirlas.

Balance

Para quien está en residencia de obra, el estudio que más pesa no es el más sofisticado, sino el que llega convertido en un número que se puede verificar con un instrumento: un nivel piezométrico que se lee cada semana, una cota que se comprueba con un nivel, un registro de sondeo que se compara con lo que sale en el frente.

La geohidrología es el estudio de mayor valor de la lista y también el que más se recorta. Un estimado de bombeo que sale de pruebas en tramos largos parece suficiente en el escritorio, y la diferencia con la realidad se paga con equipos de bombeo y con meses. Antes de aprobar una lumbrera profunda en un acuífero conviene exigir el perfil piezométrico completo con sus pruebas, más que la memoria de cálculo.

Entre las actividades preliminares destaca la reubicación de servicios: parece trámite y es de las que más detienen un frente, porque depende de un tercero que no trabaja con el calendario de la obra. Los ejemplos con valores supuestos sirven para entender el método, no para diseñar; en un proyecto real cada cifra sale del informe del sitio.

Lo que se hizo con cada estudio en el Túnel Emisor Oriente está en los capítulos 11 y 12 de la Parte II.

or Oriente

Túnel Emisor Oriente



México

Parte I · Líneas de conducción

5

Excavación, cimentaciones y maquinaria

Cómo se abre el terreno, cómo se sostiene y con qué equipos

Excavar una conducción es quitarle el apoyo al terreno que estaba en equilibrio. El agua busca caminos nuevos, los edificios vecinos se mueven y el suelo tiene que sostenerse mientras se abre. Después, lo que se construye debe volver a apoyarse en ese mismo terreno, para que no se hunda ni emerger. Este capítulo sigue ese orden. Primero, explica los tipos de excavación superficial y subterránea y cómo se porta el suelo; luego recorre la excavación a cielo abierto, con el corte de una zanja con tubería, y las lumbreras; después las cimentaciones, que son lo que sostiene a la obra una vez excavada; sigue con los túneles convencionales y mecanizados, los métodos sin zanja y la maquinaria de cada uno, incluida la innovadora; y termina con una tabla para elegir según el suelo.

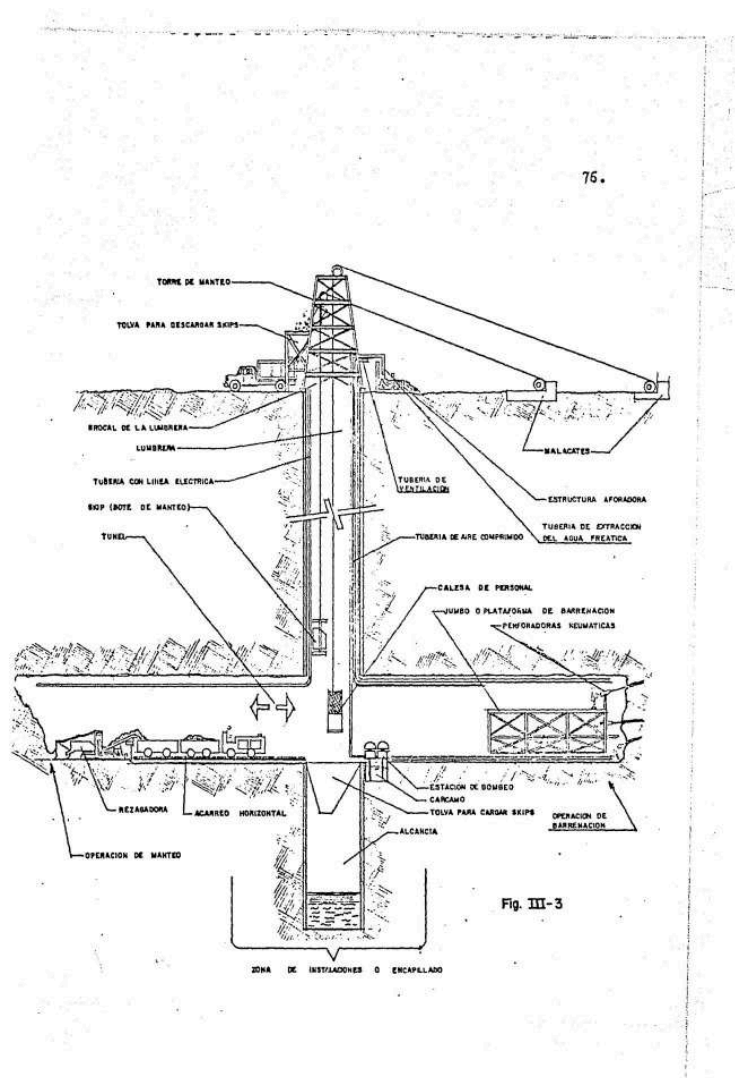


Fig. III-3

Figura 5.1. Instalaciones de superficie y túnel de una lumbrera con torre de manto

01

Excavar, sostener y controlar el agua

Los túneles de un drenaje urbano se abren a profundidad, en zona habitada y en terrenos de calidades muy distintas. El hueco continuo puede causar roturas, deformaciones y filtraciones, y obliga a métodos específicos y a una secuencia ordenada. Tres ideas se repiten en todo el capítulo. El método lo decide

el terreno y el agua, no el gusto del constructor, y puede cambiar a mitad del trazo. Excavar y sostener son una sola decisión. Y el agua es la variable que más complica: se abate, se contiene o se equilibra con presión.

Las excavaciones se clasifican según lo que se quiera decidir.

CRITERIO	CATEGORÍAS	DECISIÓN QUE AYUDA A TOMAR
Posición respecto a la superficie	A cielo abierto (zanja, corte, tajo, lumbrera, portal); subterránea (túnel, galería); mixta (<i>cut and cover</i>)	Costo, afectación, derecho de vía, profundidad
Forma de romper el terreno	Manual; herramienta mecánica; explosivos; tuneladora o escudo	Rendimiento, seguridad, alteración del terreno
Sostenimiento del frente	Abierto; soporte mecánico; presurizado con aire, con lodo o con el propio material (EPB)	Asentamientos y agua
Forma de instalar la conducción	Tubería en zanja; revestimiento detrás del frente; tubería hincada; tubería jalada por perforación guía	Costo por kilómetro, diámetro, curvatura

Con el primer criterio se separan los dos grandes grupos. La excavación superficial se hace desde la superficie y deja el hueco abierto mientras se construye; la subterránea avanza por dentro del terreno y deja la superficie intacta. La tabla siguiente resume los métodos de cada grupo y el apartado donde se desarrollan.

TABLA 5.1. MÉTODOS DE EXCAVACIÓN SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA

GRUPO	MÉTODO	QUÉ SE ABRE	DÓNDE SE EXPLICA
Superficial	Zanja con taludes o ademada	Tubería enterrada de poca profundidad	A cielo abierto
Superficial	Corte o tajo	Canales, cajones y estructuras de planta grande	A cielo abierto
Superficial	Lumbrera y portal	Pozo vertical de acceso al túnel	Lumbreras
Subterránea convencional	Voladura o herramienta mecánica con sostenimiento	Túneles cortos, secciones no circulares, roca	Túneles convencionales
Subterránea mecanizada	Escudo, topo o tuneladora con dovelas	Túneles largos de sección circular	Tuneladoras y escudos

GRUPO	MÉTODO	QUÉ SE ABRE	DÓNDE SE EXPLICA
Subterránea sin zanja	Hincado, microtúnel, perforación direccional	Cruces y tramos cortos	Sin abrir zanja

El tamaño de la sección y la longitud cuentan. Las tuneladoras dan rendimientos muy altos, pero solo se amortizan a partir de cierta longitud, porque diseñar, fabricar, transportar y montar la máquina puede tomar dos años; además piden radios de curvatura amplios y sección circular.

02

Cómo se porta el terreno

Toda la clasificación de métodos descansa en cómo reacciona el suelo cuando se le quita el apoyo. Los grupos de suelo (gravas, arenas, limos, arcillas) y la zonificación del Valle de México se explican en el capítulo 4; aquí interesa su comportamiento. Se distinguen seis comportamientos, que vienen de la clasificación clásica de Terzaghi para túneles.

COMPORTAMIENTO	QUÉ OCURRE	MATERIALES TÍPICOS	IMPLICACIÓN PARA EL MÉTODO
Firme (<i>firm ground</i>)	Avanza 1 a 3 m sin sostener el frente	Arcillas duras y cementadas	Frente abierto; sostenimiento detrás
Desmoronable (<i>raveling</i>)	Se desprenden trozos del techo y de la parte alta del frente; puede formar chimenea	Arenas poco cohesivas, limos no plásticos	Sostenimiento rápido o soporte parcial
Movedizo (<i>running</i>)	Inestable hasta el ángulo de reposo	Arena seca o limpia, grava suelta	Soporte del frente
Fluyente (<i>flowing</i>)	La filtración empuja el suelo al túnel como líquido viscoso	Arenas y gravas saturadas	Equilibrar agua y tierra con aire, lodo o EPB
Fluye bajo presión (<i>squeezing</i>)	Se mueve gradualmente hacia el túnel sin desmoronarse	Arcillas blandas	Presión de frente y revestimiento inmediato

COMPORTAMIENTO	QUÉ OCURRE	MATERIALES TÍPICOS	IMPLICACIÓN PARA EL MÉTODO
Expansivo (<i>swelling</i>)	Aumenta de volumen con el agua; presiones medidas de hasta 1.00 MPa	Arcillas firmes a duras	Revestimiento diseñado para el hinchamiento

La sección del túnel también responde al terreno. La figura siguiente muestra tres secciones de herradura en tres calidades de terreno, bueno, medio y malo, y un túnel gemelo con revestimiento circular: a peor terreno, la sección se redondea, el espesor del revestimiento crece y aparece una plantilla curva que cierra el anillo.

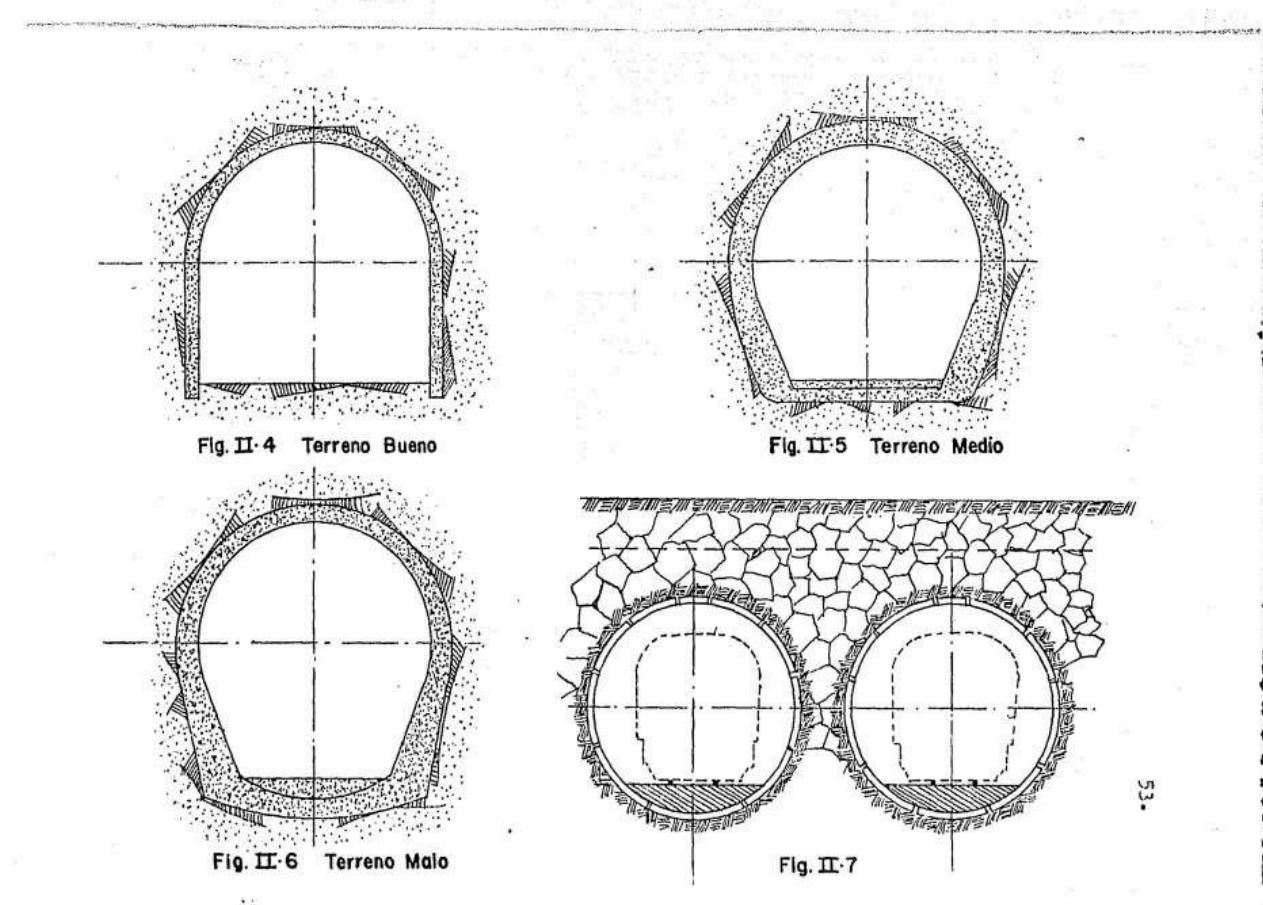


Figura 5.2. Secciones de túnel según la calidad del terreno

La clasificación de campo por compacidad y consistencia sirve para describir lo que se ve en el frente o en un sondeo, por ejemplo arcillas muy duras que se marcan con la uña del pulgar, pero no sustituye al laboratorio.

Antes de elegir método hay que completar los estudios que se muestran en la tabla.

INFORMACIÓN REQUERIDA	DECISIÓN A LA QUE SIRVE
Estratigrafía y propiedades de cada estrato	Clasificar el terreno y escoger el tipo de frente
Nivel freático y presiones de agua, incluidos acuíferos confinados	Abatir, contener o equilibrar
Profundidad y recubrimiento sobre la clave	Presión de frente y asentamientos
Diámetro, longitud y curvatura del trazo	Tuneladora, convencional o hincado
Construcciones, servicios y cimentaciones cercanos	Asentamientos admisibles
Bloques, boleos, gas, roca dura o cavidades	Herramientas, atascos, ventilación
Plazo y frentes disponibles	Número de máquinas y rendimiento
Destino de la rezaga y del agua extraída	Evacuación, bancos de tiro, plantas de tratamiento

03

Excavación superficial: zanjas, taludes, ademes, agua y rellenos

Es la excavación más antigua y común, y aplica también a lumbreras, portales y obras de captación de un túnel. Una zanja es larga y angosta, típica de tuberías; un corte o tajo es amplio, con taludes, y aloja canales, cajones o estructuras de planta grande.

ALTERNATIVA	CUÁNDO CONVIENE	LIMITACIONES
Zanja con taludes abiertos	Suelo firme, poca profundidad, espacio amplio	Derecho de vía ancho; revisar el talud con agua y tiempo
Zanja ademada (entibado, puntales, cajón de acero)	Zanjas profundas o angostas	Menor rendimiento; el ademe se retira o se pierde
Corte con muros temporales (tablestaca, muro Milán, pilotes)	Zona urbana, suelo blando, freático alto	Costo alto, equipo especializado

ALTERNATIVA	CUÁNDO CONVIENE	LIMITACIONES
Cajón en zanja y cubierto (<i>cut and cover</i>)	Conducciones someras de gran sección	Interrumpe la superficie
Túnel (microtúnel, escudo)	Gran profundidad, tránsito intenso, suelo blando con agua	Costo de arranque; lumbreras o pozos

CORTE TRANSVERSAL DE UNA ZANJA CON TUBERÍA

El corte transversal de una zanja es el dibujo que más se consulta en una obra de tubería, porque junta en una sola vista lo que se excava y lo que se rellena. El corte se describe con cuatro dimensiones que fijan el proyecto: el colchón, que es la altura de tierra entre el lomo del tubo y la superficie; el ancho de la zanja; la profundidad, medida de la superficie al fondo; y la plantilla o cama bajo el tubo. El colchón mínimo depende de la resistencia del tubo a las cargas exteriores y se define caso por caso con tres factores: el material de la tubería, el tipo de terreno y las cargas vivas probables.

Cada zona que rodea al tubo tiene un nombre y una función. La plantilla o cama es un piso de material fino sobre el fondo de la zanja, conformado con la concavidad necesaria para ajustarse a la superficie exterior del tubo, en un ancho de al menos el 60 % de su diámetro exterior; su espesor es de 10 cm y el espesor mínimo bajo el eje vertical de la tubería es de 5 cm. Si el fondo es inestable y no da apoyo firme y constante, se sobreexcava y se rellena con un material adecuado que haga de plantilla. En roca o tepetate duro se prepara el fondo con tierra o arena suelta de al menos 10 cm; en tubería de acero, si el terreno lo permite, no hace falta plantilla. Las cavidades para alojar campanas y copias de las juntas se excavan con cuidado, para que el tubo se apoye en toda su longitud.

El corte transversal de una zanja es el dibujo que más se consulta en una obra de tubería, porque junta en una sola vista lo que se excava y lo que se rellena

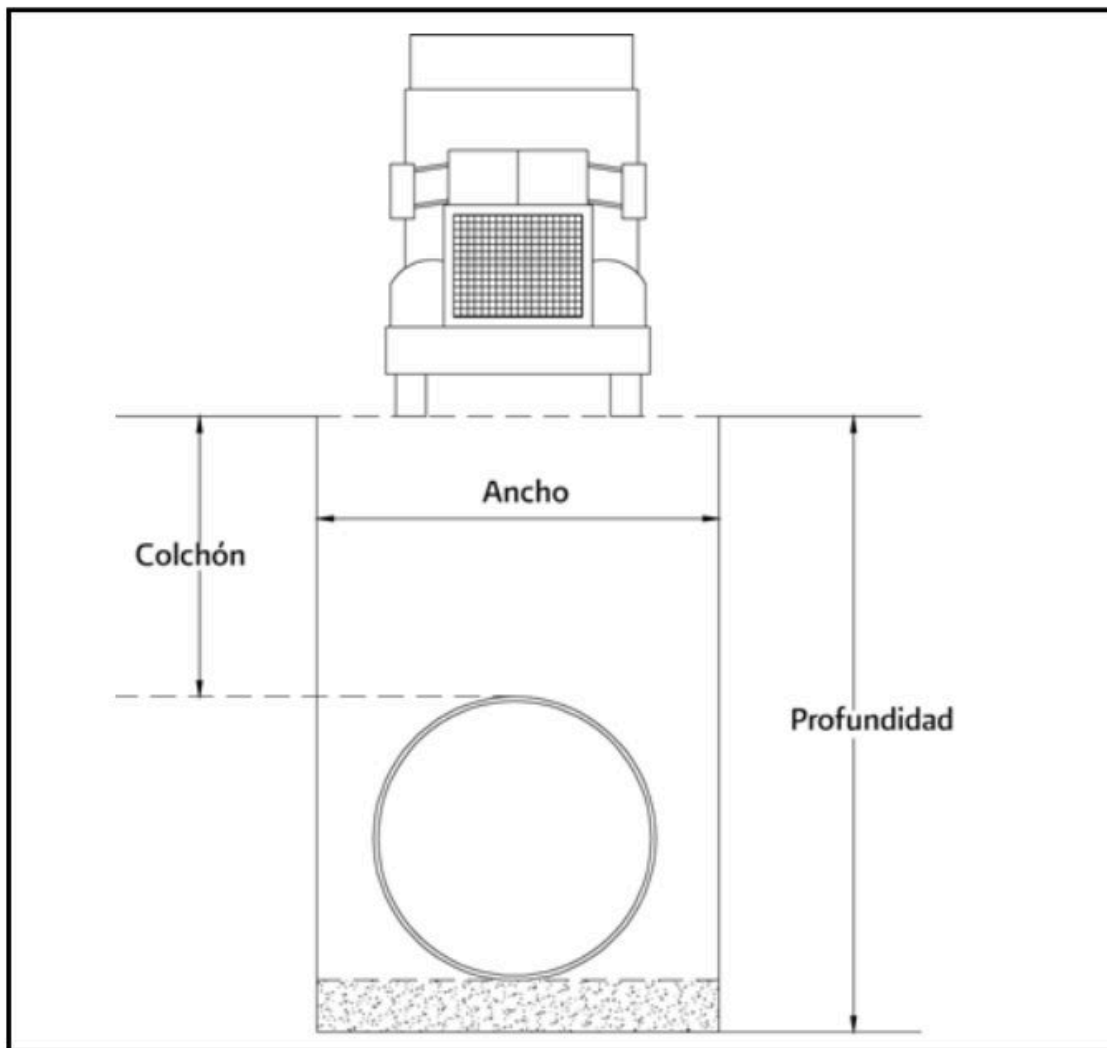


Figura 5.3. Características de una zanja

El acostillamiento, o acostillado, es el relleno lateral que se coloca a ambos lados del tubo, desde la plantilla hasta cierta altura. Se hace con material granular fino, compactado con pisón de cabeza angosta para que el material quede apretado entre la tubería y las paredes

de la zanja. En tubería rígida se continúa hasta la mitad del tubo y en tubería flexible hasta 30 cm arriba del lomo, siempre en capas que no pasan de 15 cm y con una compactación de 88 a 93 % de la prueba Proctor estándar. Sobre el acostillado va el relleno final, en dos casos: en lugares libres de tránsito, tierra sin cribar de calidad aceptable (sin rocas mayores de 30 cm), dejando un lomo sobre el nivel del terreno para que asiente; en calles pavimentadas, todo el relleno se compacta de 88 a 93 % con material de la excavación o de banco, como el tepetate. Entre una etapa y otra se hace la prueba de hermeticidad de la línea, y el relleno debe colocarse tan pronto se instale y pruebe la tubería para reducir el riesgo de daño.

La figura siguiente es la zanja estándar de un tubo de concreto. Tiene encamado inferior, acostillado a cada lado, relleno sobre el tubo y paredes de excavación que se abren hacia arriba. El encamado medio, bajo el tercio central del tubo, se coloca sin compactar para que el tubo se asiente y reparta la carga; el exterior y el acostillado se compactan igual.

Para el tubo de concreto el manual distingue cuatro tipos de instalación según el material de las zonas de apoyo y su compactación. Entre más exigente es la instalación, menos resistencia necesita el tubo; entre menos exigente, más resistente debe ser el tubo. La Tabla 5.2 resume los requisitos de compactación.

TABLA 5.2. TIPOS DE INSTALACIÓN DE UN TUBO DE CONCRETO Y COMPACTACIÓN MÍNIMA

TIPO	ESPESOR DEL ENCAMADO	ACOSTILLADO Y ENCAMADO EXTERIOR	LADO INFERIOR
1	Do/24, no menor de 75 mm	95 % en SW	90 % en SW, 95 % en ML o 100 % en CL
2	Do/24, no menor de 75 mm	90 % en SW o 95 % en ML	85 % en SW, 90 % en ML o 95 % en CL
3	Do/24, no menor de 75 mm	85 % en SW, 90 % en ML o 95 % en CL	85 % en SW, 90 % en ML o 95 % en CL
4	No se requiere, salvo sobre cimientos de roca	Sin compactación, salvo en CL (85 %)	Sin compactación, salvo en CL (85 %)

Cuando hay cimientos de roca, el encamado mínimo sube a Do/12, no menor de 150 mm. En tubería de polietileno o de PVC las zanjas se dimensionan con tablas de ancho mínimo, plantilla mínima y colchón mínimo por diámetro, que da el manual para cada

material. La protección de la zanja, cuando no hay espacio para talud, se hace con apuntalamiento en zanjas poco profundas, ademe de madera, o tablestacado de madera o acero en excavaciones profundas con agua subterránea; el ancho de zanja con ademe es el de las tablas más el espesor del ademe.

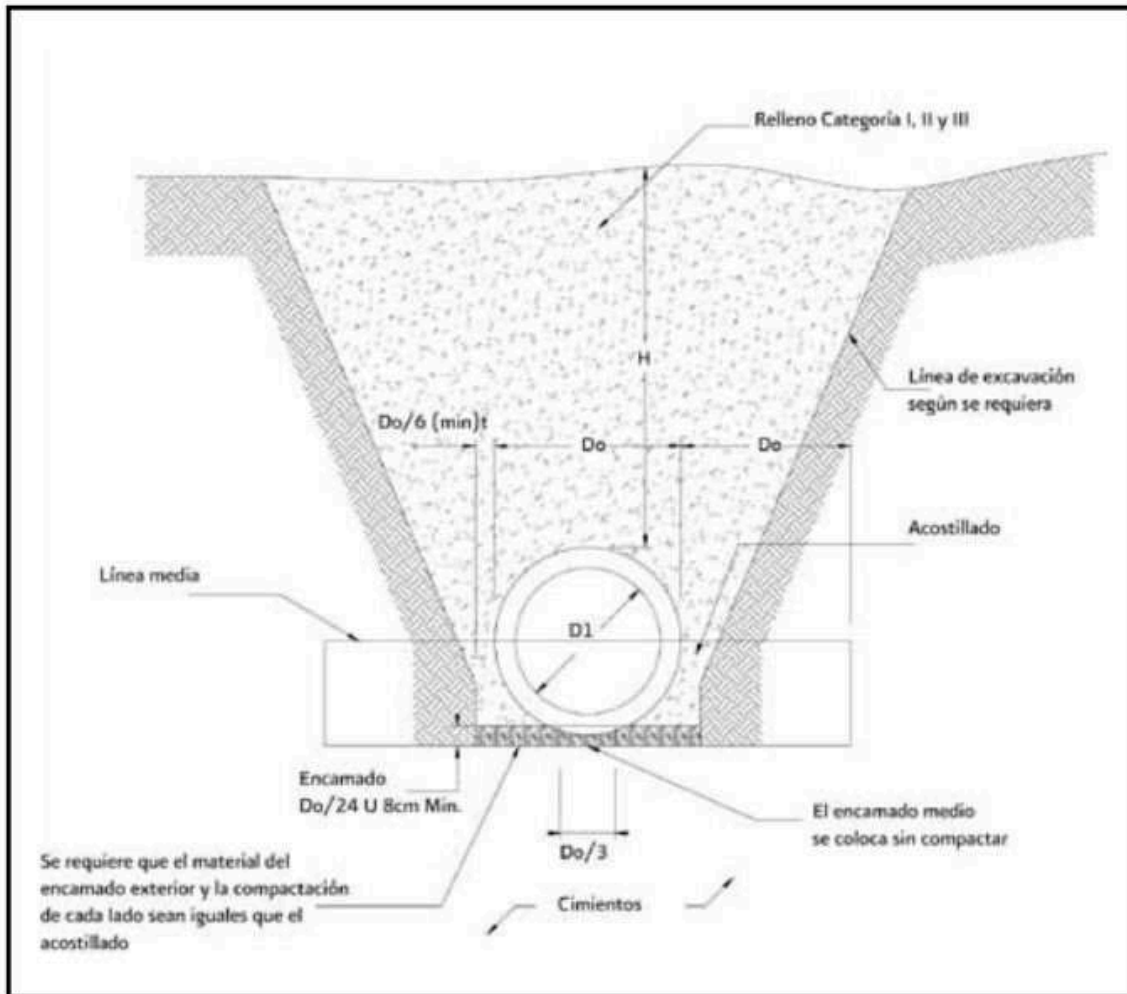


Figura 6.7 Zanja estándar

Figura 5.4. Zanja estándar de un tubo de concreto

TALUDES

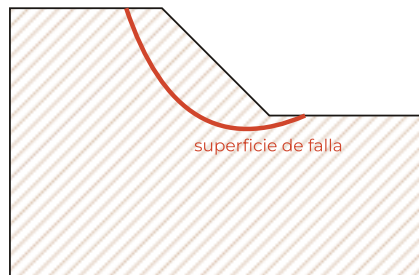
Un talud es estable cuando la resistencia al corte supera los esfuerzos que tratan de deslizarlo. Depende de la inclinación, la altura, el peso volumétrico, la cohesión, el ángulo de fricción y, sobre todo, del agua. En sismo, el análisis seudoestático representa la acción con una fuerza estática igual al peso del suelo cercano al talud por un coeficiente sísmico.

Hay dos formas habituales de calcular el factor de seguridad. Para una superficie de falla circular, el método de Fellenius divide la masa deslizante en dovelas y compara la resistencia con el momento actuante; el método de Bishop simplificado mejora el reparto de fuerzas entre dovelas y da valores algo mayores. Para un talud largo y poco profundo, el modelo de talud infinito basta como estimación. Con valores supuestos (cohesión de 10 kPa, peso volumétrico de 17 kN/m³, superficie de falla a 3 m, talud de 30° y fricción de 28°) el talud infinito da un factor de seguridad de 1.37, que cumple para un talud temporal sin agua; con el suelo saturado y flujo paralelo al talud, la presión de poro lo baja cerca de la mitad. Los mínimos que se piden dependen de si el talud es temporal o permanente y del daño que causaría su falla.

El esquema siguiente separa las tres formas de falla que se revisan con más frecuencia. En la circular, típica de suelos cohesivos, la masa gira sobre una superficie curva y por eso se divide en dovelas para calcularla. En la plana, el suelo se desliza sobre una superficie paralela al talud y de poco espesor, que es el caso del modelo de talud infinito. En la tercera, el agua es la que baja el factor de seguridad: la presión de poro resta fricción a la superficie de falla, de modo que un talud estable en seco puede dejar de serlo después de una lluvia. Por eso en obra se corta el talud con una inclinación menor en la época de lluvias, se aleja el material excavado y la maquinaria del borde, y se desvía el agua superficial antes de que entre a la zanja.

Superficie circular

Se divide la masa en dovelas (Fellenius, Bishop)

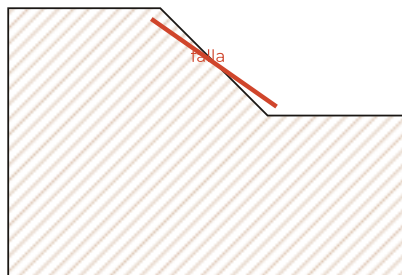


Suelo cohesivo

Esquema sin escala. Elaboración propia con Uzárraga Díaz (2013, p. 91).

Talud largo y poco profundo

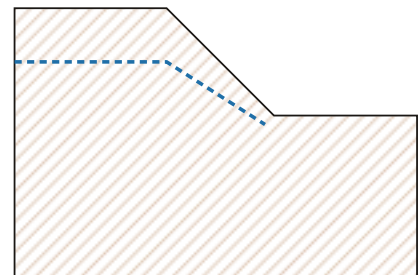
Modelo de talud infinito



La falla corre paralela al talud

Con agua

La presión de poro baja el factor de seguridad



Suelo saturado con flujo paralelo al talud

Figura 5.5. Tres formas de falla de un talud

ADEMES

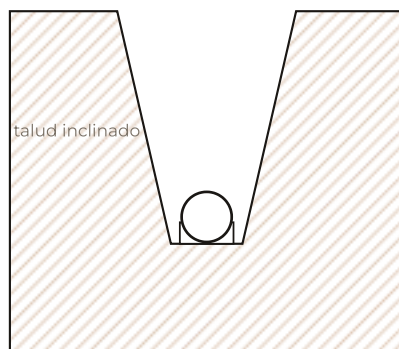
Cuando no hay espacio para taludes o el suelo no se sostiene, se contiene la excavación.

1. Entibado con puntales o troqueles: placas contra las paredes sostenidas por puntales. En un hincado se usaron cuatro troqueles de tubo con una carga constante de 10 t cada uno.
2. Tablestacas: láminas de acero hincadas una junto a otra. Son rápidas y recuperables, pero el ruido y la vibración del hincado no se permiten en zona urbana.
3. Muros Milán: paredes de concreto colado en zanja con lodo; son la solución de las lumbreras profundas (más abajo).
4. Pilotes: forman pantallas y se evitan cuando la vibración no es tolerable.

La elección entre talud, ademe y tablestaca se resume en el esquema siguiente. El talud abierto es lo más barato, pero pide ancho de derecho de vía y suelo firme; el ademe con puntales sirve en zanjas angostas o profundas, con el costo de un rendimiento menor y de que el ademe se retira o se pierde; la tablestaca de acero resiste el agua y se recupera, pero el ruido y la vibración del hincado la excluyen de zonas urbanas. Un error común es retirar los puntales al mismo ritmo que se rellena sin revisar la compactación junto a la pared, lo que deja huecos que después se asientan bajo el pavimento.

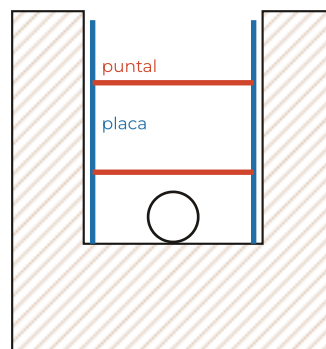
Talud abierto

Suelo firme, poca profundidad, espacio amplio



Ademe con puntales

Zanja angosta o profunda; el ademe se retira o se pierde



Tablestaca

Zanja profunda con agua; el ruido y la vibración limitan su uso urbano



Esquema sin escala. Elaboración propia con Conagua (2009, pp. 85-86) y Uzárraga Díaz (2013, p. 30).

Figura 5.6. Tres formas de contener una zanja

El empuje que debe tomar un ademe se estima con la teoría de Rankine. En palabras: el suelo empuja la pared con una presión que crece con la profundidad, y el empuje total es el área del triángulo que forma esa presión, es decir, la mitad del producto del coeficiente de empuje activo, el peso volumétrico y la altura al cuadrado. El coeficiente de empuje activo de un suelo granular baja conforme crece su ángulo de fricción.

$$E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

donde E_a es el empuje activo por metro de longitud de muro (kN/m), K_a es el coeficiente de empuje activo (adimensional), γ es el peso volumétrico del suelo (kN/m³) y H es la altura de la excavación contenida (m). Con $\varphi = 28^\circ$, $\gamma = 18$ kN/m³ y $H = 4$ m (valores supuestos), $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2) = 0.361$ y $E_a = 52.0$ kN/m, con una presión de 26.0 kPa a 4 m de profundidad. En zanjas además con puntales la distribución real no es triangular sino más uniforme, y los puntales se diseñan con envolventes de presión aparente, como las de Peck.

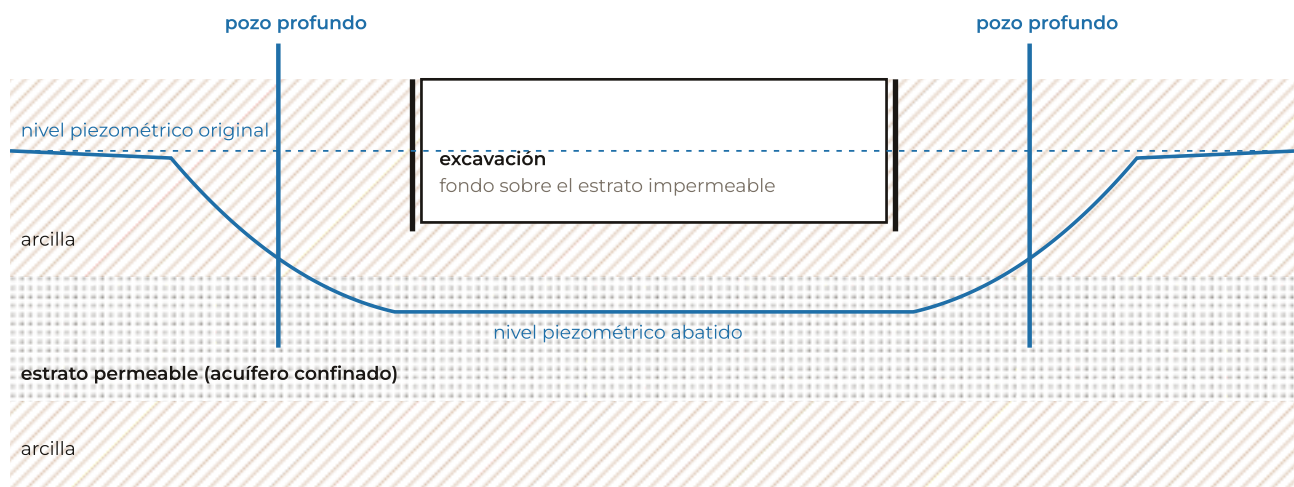
AGUA SUBTERRÁNEA

Quien excava bajo el nivel freático tiene tres opciones combinables: abatir con bombeo, contener con una barrera impermeable (muro Milán, pantalla, inyección, congelación) o equilibrar con contrapresión (aire, lodo, presión de tierra del escudo). El abatimiento es lo más barato y lo que más efectos colaterales trae: pérdida de presión de poro y hundimientos diferenciales, en un valle donde la explotación de acuíferos ya indujo abatimientos piezométricos de 20 m o más. Por eso en zona urbana se prefiere el muro Milán con abatimiento limitado y controlado.

Los sistemas son los pozos profundos perimetrales, que abaten la presión del estrato permeable antes de excavar, y el bombeo de achique dentro de la excavación. Las puntas filtrantes (*well points*) sirven para abatimientos someros en suelos granulares, y los pozos de alivio liberan la presión de un estrato confinado bajo el fondo. En una zanja con agua, el achique deja circular el agua por el fondo hasta un sumidero desde el que una bomba la extrae; en tuberías de gran diámetro puede dejarse un tubo de drenaje con juntas abiertas cubierto de gravilla bajo el nivel de la plantilla.

La ley de Darcy da el gasto de extracción, y el gasto de un pozo completo en acuífero confinado se calcula con la ecuación de Thiem. El factor de seguridad por subpresión, o falla de fondo, compara el peso del suelo entre el fondo de la excavación y el estrato drenante con la presión del agua en la base de ese suelo, y se pide un mínimo de 1.3. Una excavación de 25 m con el estrato drenante a 33 m y sin bombeo da un factor de 0.58, muy por debajo de 1.3, y obliga a abatir el nivel piezométrico hasta unos 22 m de profundidad antes de profundizar. La subpresión puede levantar el fondo aunque las paredes estén bien contenidas, y se resuelve abatiendo la presión con pozos, no solo achicando el agua que ya entró.

La secuencia es la siguiente: se perforan los pozos profundos hasta el estrato permeable antes de excavar, se bombea hasta que el nivel piezométrico baja por debajo del fondo proyectado, se excava por etapas vigilando con piezómetros que la presión siga abajo y se mantiene el bombeo hasta que la losa de fondo y el peso de la estructura equilibren la subpresión. Su ventaja es que ataca la causa de la falla de fondo; su limitación es que el abatimiento se extiende más allá de la excavación y puede inducir hundimientos en edificios vecinos, y por eso se combina con muros que lo limitan. El principio se ve en el esquema siguiente.



Se bombea el estrato confinado antes de excavar para bajar la presión bajo el fondo.
Esquema sin escala. Elaboración propia con Uzárraga Díaz (2013, p. 30) y González Ramírez (2023, p. 36).

Figura 5.7. Pozos de abatimiento que bajan la presión del agua bajo el fondo de una excavación

RELLENOS

La excavación se rellena en capas y la compactación de cada una decide si la tubería sufrirá asentamientos o cargas concentradas. La secuencia general es tender, humedecer, compactar y verificar en laboratorio antes de cubrir. Una obra carretera documenta una secuencia aplicable por analogía: material extraído con tractor y *ripper*, tendido en capas de 20 cm, riego hasta la humedad óptima, compactación, capa de transición de 40 cm y subrasante de 30 cm con partículas de hasta 3 pulgadas. El grado de compactación se mide contra la prueba Proctor, que fija el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima: es el cociente, en porcentaje, entre el peso volumétrico seco medido en campo y el máximo de laboratorio. Con 16.2 y 17.0 kN/m³ el grado es de 95.3 %.

MAQUINARIA DE CIELO ABIERTO

EQUIPO	FUNCIÓN	EJEMPLO EN OBRA
Excavadora hidráulica sobre orugas	Excavar, cargar camiones, abrir zanjas amplias	Núcleo de lumbreras en suelo firme
Retroexcavadora	Excavar zanjas y cargar	Núcleo de lumbrera y rezaga en contenedores con grúa
Tractor con <i>ripper</i>	Aflojar suelo duro o tepetate	Banco de tepetate
Tractor de cuchilla frontal	Despalmar y mover material	Despalme perpendicular al eje
Cargador frontal	Cargar camiones y mover rezaga	Caterpillar 955 en el Emisor Central
Camión de volteo	Acarrear rezaga a bancos de tiro	Tiro asignado por la dependencia
Pipa	Riego para humedad óptima y control de polvo	Terraplenes y caminos
Grúa sobre orugas	Izar equipo, armados, anillos y almejas	Base de la hidrofresa

Las zanjadoras de rueda o de cadena y las motoconformadoras completan el parque de una obra de tubería superficial; su rendimiento lo da el fabricante. Las actividades que preceden a la excavación (trazo, nivelación, desmonte, despalme y reubicación de servicios) se explican en el capítulo 4.

Lumbreras: el pozo que abre paso al túnel

Una lumbrera es un pozo vertical, generalmente circular, que comunica la superficie con un túnel. Tiene mayor diámetro que el túnel, permite bajar el equipo, sacar la rezaga durante la obra y dar mantenimiento en operación, y a veces sirve de cárcamo de bombeo. Tiene dos retos: no mover las construcciones vecinas durante la obra y que la emersión aparente de la estructura, por la consolidación del suelo, tampoco las afecte después. Por función son de ensamble, por donde baja el escudo para armarlo abajo, o de servicio, para rezaga, herramienta y personal. Una lumbrera en roca se recomienda de 6 m; en arcilla puede llegar a 12 m, y las más difíciles cruzan suelos con mucha agua, sobre todo las arcillas lacustres.

PROCEDIMIENTO	CÓMO FUNCIONA	CONDICIÓN TÍPICA	VENTAJA	LIMITACIÓN
Convencional	Núcleo por secciones con retroexcavadora; concreto lanzado con fibras, a veces con anillos metálicos; revestimiento definitivo reforzado	Suelo firme; explosivos si hay roca o grava cementada	Sencillez, equipo común	No sirve en arcilla blanda saturada
Flotada	Brocal, zanja circular por paneles, núcleo excavado bajo lodo, tanque flotante sobre el que se construye y se sumerge	Zona lacustre, desde los años sesenta	Se construye en superficie; sin extrusión de juntas ni falla de fondo	Inestabilidad rotacional y escape de lodos al sumergirla
Anillos prefabricados	Excavación bajo lodo y descenso de anillos de concreto con losa de fondo colada con tremie	Arcilla blanda; hasta 16 m de diámetro y 30 m de profundidad	Ahorro de 10 a 30 % en costo y cerca de 30 % en tiempo	Áreas grandes para fabricar y almacenar

PROCEDIMIENTO	CÓMO FUNCIONA	CONDICIÓN TÍPICA	VENTAJA	LIMITACIÓN
Muro Milán	Paneles colados en zanja con lodo; núcleo excavado con apoyos intermedios	Suelo blando (almeja) o duro (hidrofresa)	Pantalla perimetral y soporte anular	Equipo especializado y planta de lodos
Excavación vertical mecanizada (VSM)	Cabeza rotatoria en brazo telescópico, bajo agua o lodo	Suelos blandos o firmes	Poco espacio de montaje	Hasta 9.6 m de diámetro y 160 m de profundidad, con experiencia en Europa

La lumbrera convencional lleva conectores por cortante en los perfiles metálicos cuando después se cuela un segundo revestimiento. La flotada fue de las técnicas más usadas en el Valle desde 1960 y sus problemas de sumergimiento motivaron los anillos.

LUMBRERA FLOTADA

El procedimiento tiene cuatro momentos: perforaciones o zanja perimetral con lodo bentonítico bajo un brocal, excavación del núcleo con almeja bajo lodo, construcción en superficie de un tanque de flotación con la estructura de la lumbrera encima, y descenso del conjunto mientras se construye hacia arriba y se llena de agua o lastre. Las figuras siguientes muestran la secuencia y el instante de la inmersión.

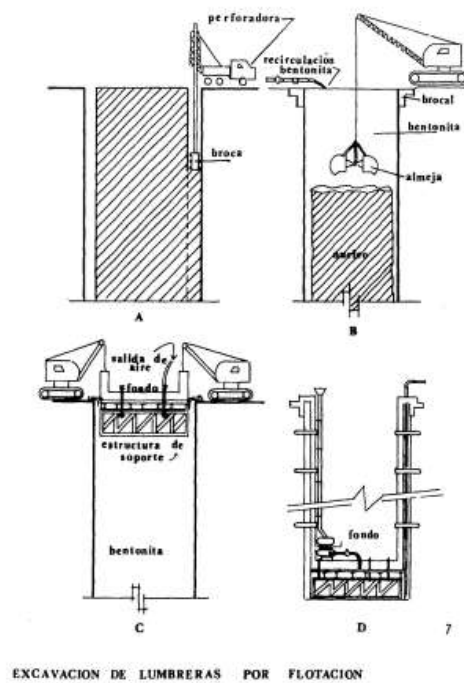


Figura 5.8. Excavación de una lumbrera por flotación

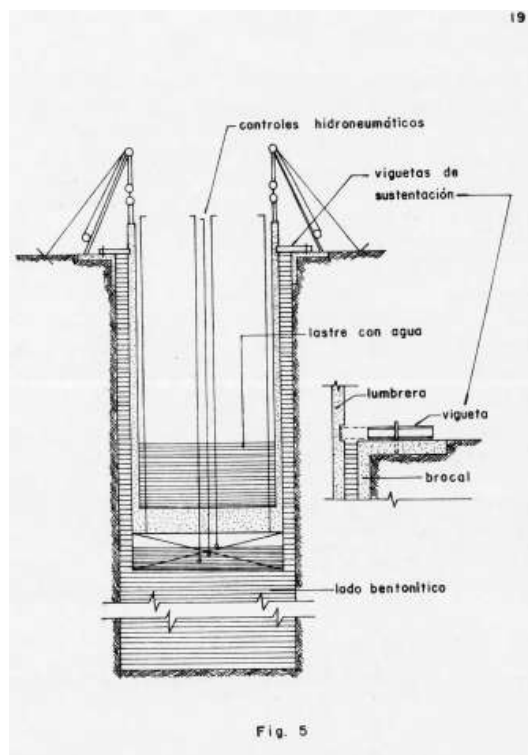
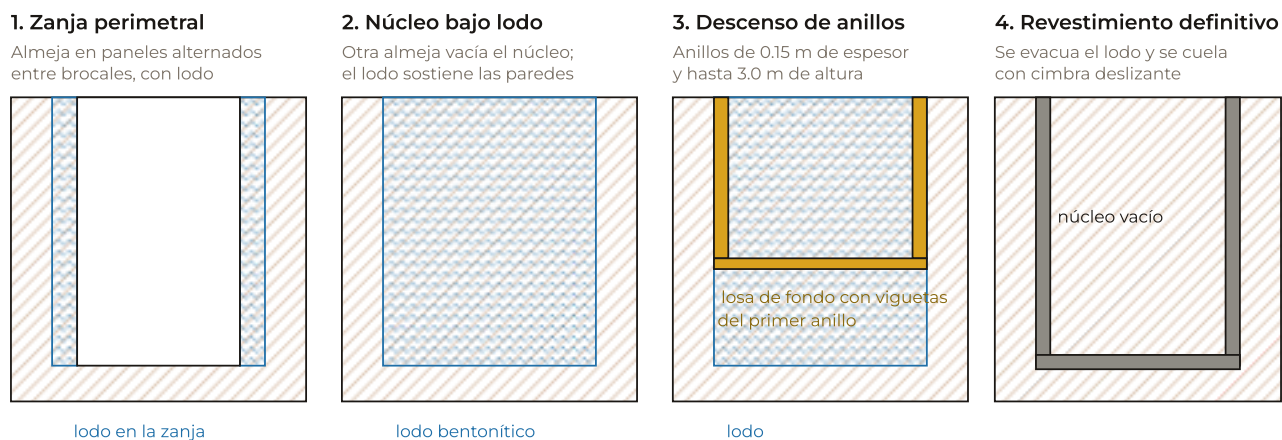


Figura 5.9. Lumbrera flotada con tanque lastrado, lodo bentonítico y viguetas de sustentación

LUMBRERA DE ANILLOS

En los anillos, dos brocales guían una almeja que excava la zanja perimetral en secuencia alternada con lodo bentonítico, y otra almeja mayor vacía el núcleo. Los anillos son esbeltos, generalmente de 0.15 m de espesor y hasta 3.0 m de altura. El primero lleva vigas radiales que arman la losa de fondo y vigas verticales huecas que guían a los siguientes; tras bajar dos o tres se cuela la losa y luego se baja el resto. El espacio anular se rellena con mortero y bentonita y, cuando alcanza resistencia, se evacua el lodo y se construye el revestimiento definitivo con cimbra deslizante. En la excavación la estabilidad la dan el lodo y la geometría circular; el lodo es una mezcla de bentonita y agua al 10 % con densidad de 1.03 a 1.07 g/cm³, al que se añade barita hasta 1.10 g/cm³, valor que no debe bajar.



Corte esquemático, sin escala. Elaboración propia con Ramírez de Arellano de la Peña (2012, pp. 9-10).

Figura 5.10. Cuatro pasos de una lumbrera de anillos

La ventaja del sistema es que los anillos se fabrican en superficie con control de calidad y no hay que esperar el fraguado del concreto dentro del pozo; la limitación es que necesita un patio amplio para fabricarlos y almacenarlos. Frente a la lumbrera flotada, evita la inestabilidad rotacional y el escape de lodos durante la inmersión, y las obras que lo adoptaron reportaron un ahorro de 10 a 30 % en costo y cerca de 30 % en tiempo, con diámetros de hasta 16 m y profundidades de hasta 30 m. Los errores típicos son dejar

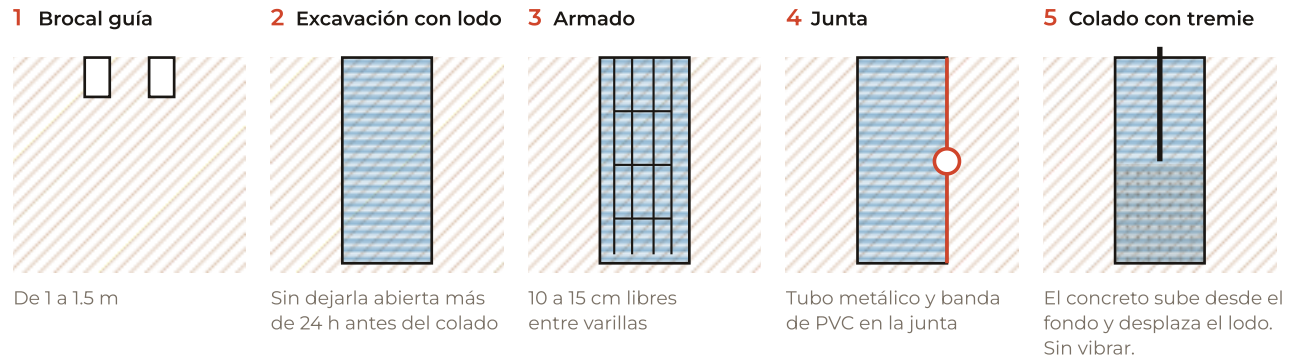
bajar el nivel del lodo, desalinear un anillo respecto al anterior, que se corrige con las vigas verticales huecas que sirven de guía, y no rellenar a tiempo el espacio anular con mortero y bentonita.

El lodo sostiene la pared mientras su presión supere la del agua y el empuje del suelo: la presión neta es la columna de lodo menos la columna de agua a la misma profundidad. Con el nivel freático a 2 m bajo el brocal, el lodo a 0.5 m bajo el borde y densidad de 1.10 t/m^3 , la presión neta hacia el suelo a 30 m de profundidad es de 4.45 t/m^2 . Es positiva y forma sobre la pared un enjarre impermeable que transmite al suelo la presión del lodo. Si el nivel del lodo baja hasta igualarse con el del agua, la ventaja desaparece y la zanja puede cerrarse, y por eso el nivel se vigila de forma continua.

MURO MILÁN

El muro Milán o diafragma colado en sitio es una pared de concreto en una trinchera estabilizada con lodo. Sirve donde el espacio urbano no admite ruido ni vibración, donde el abatimiento debe ser limitado y donde se requieren paredes verticales. En lumbreras funciona como tablestacado perimetral que, bien ejecutado, da soporte anular aunque los paneles sean planos. Se ejecuta en cinco operaciones.

1. Brocal o muro guía, de 1 a 1.5 m de altura, que guía la excavación y asegura la estabilidad superficial.
2. Excavación de tramos con lodo; la zanja no debe quedar excavada y estabilizada más de 24 horas antes del colado. Anchos de 0.50 a 1.50 m; con *kelly* se llega a 65 m y con hidrofresa a más de 100 m. Los paneles se hacen primero impares y luego pares, de 2 a 20 m, con 5 a 6 m como valor común.
3. Armado con 10 a 15 cm libres entre varillas para el paso del concreto y unos 10 cm más angosto que la pared; se amarra al brocal para evitar flotación.
4. Juntas con tubos metálicos que moldean un machihembrado y a veces una banda de PVC como sello; se extraen al concluir el colado.
5. Colado con tubería tremie, sin vibrar nunca, bajo agua o lodo y sin interrupciones.



Rayado ocre: suelo. Rayado azul: lodo. Punteado: concreto. Esquema sin escala.

Figura 5.11. Los cinco pasos de un muro Milán

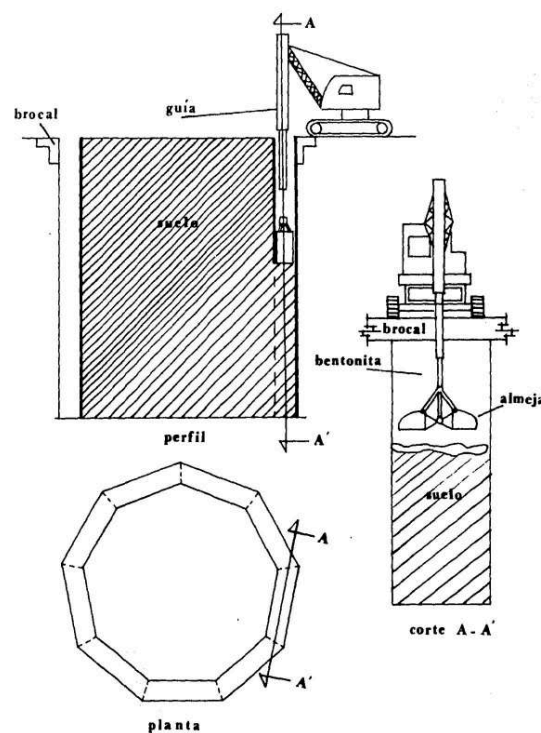
Se controlan el nivel y la calidad del lodo, la verticalidad y el espesor, el armado, el concreto y el encaje de paneles. Terminados los muros se construye la trabe de coronamiento, se excava el núcleo hasta la cota donde va un anillo de rigidez para el paso de la tuneladora y se cuela la losa de fondo.

La almeja libre autoguiada fue de las primeras máquinas para zanjas profundas: dos quijadas operadas por cables y un cuerpo metálico que da alineamiento y verticalidad; va en una draga o grúa y su alcance depende del cable; requiere brocales como guía. La hidrofresa excava de forma continua, como una perforadora de circulación inversa: en la base de una armadura hay cuatro discos verticales de corte en dos ejes paralelos que giran en sentido opuesto por pares, y una bomba sumergible sube el material con el lodo, donde se separan los sólidos. Su máquina base es una grúa sobre orugas reformada con verticalidad ultrasónica. El fabricante especifica una desviación máxima de 0.3 % y la máquina corta suelos muy duros y roca de hasta 100 kg/cm². La almeja se elige en suelo blando y la hidrofresa en suelo duro o a gran profundidad; la segunda favorece los tiempos, pero depende de una planta de lodos.

El lodo bentonítico es el ademe líquido: su columna presiona las paredes e impide que se forme una superficie de falla. Los valores de control habituales son densidad de 1.07 a 1.15 t/m³, viscosidad Marsh de 40 a 60 s, arena menor de 3 % y pH de 7 a 9.5; se prepara 24 horas antes en una planta con mezclador coloidal y su nivel no baja de 0.50 m

respecto a los brocales. La planta incluye desarenadora, mezcladora de bentonita, separador de finos y floculación con decantadores, y recicla el lodo; el primero se hace con 70 kg de bentonita sódica por 973 litros de agua.

Dato técnico: la densidad mínima del lodo es 1.07 en los muros y 1.10 en los anillos. No son contradictorias: cada aplicación tiene su especificación, y en el ejemplo anterior se usó 1.10 para quedar del lado de la seguridad.



9

EXCAVACION DE LUMBRERAS CON ALMEJA GUIADA

Figura 5.12. Excavación de una lumbrera con almeja guiada dentro de un anillo de brocal

BATACHES

Son tramos alternados que se excavan, sostienen y revisten antes de abrir los contiguos, para limitar el tiempo sin soporte. La idea es la de los paneles alternados del muro Milán, aunque ahí el panel se cuela de inmediato.

ELECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO

CONDICIÓN DEL SITIO	PROCEDIMIENTO INDICADO	RAZÓN	ALTERNATIVA QUE SUELE DESCARTARSE
Suelo firme, sin agua	Convencional con concreto lanzado	Equipo común y rápido	Muro Milán (más costoso)
Arcilla blanda lacustre y espacio para anillos	Anillos prefabricados	Menor costo y tiempo, sin flotación	Lumbrera flotada
Zona urbana, ruido restringido, agua a presión	Muro Milán con almeja o hidrofresa	Contención con abatimiento controlado	Tablestacas hincadas
Suelo duro, gran profundidad	Muro Milán con hidrofresa	Corta suelo duro y roca blanda	Almeja
Poco espacio y gran profundidad	VSM	Montaje reducido	Muro Milán

05

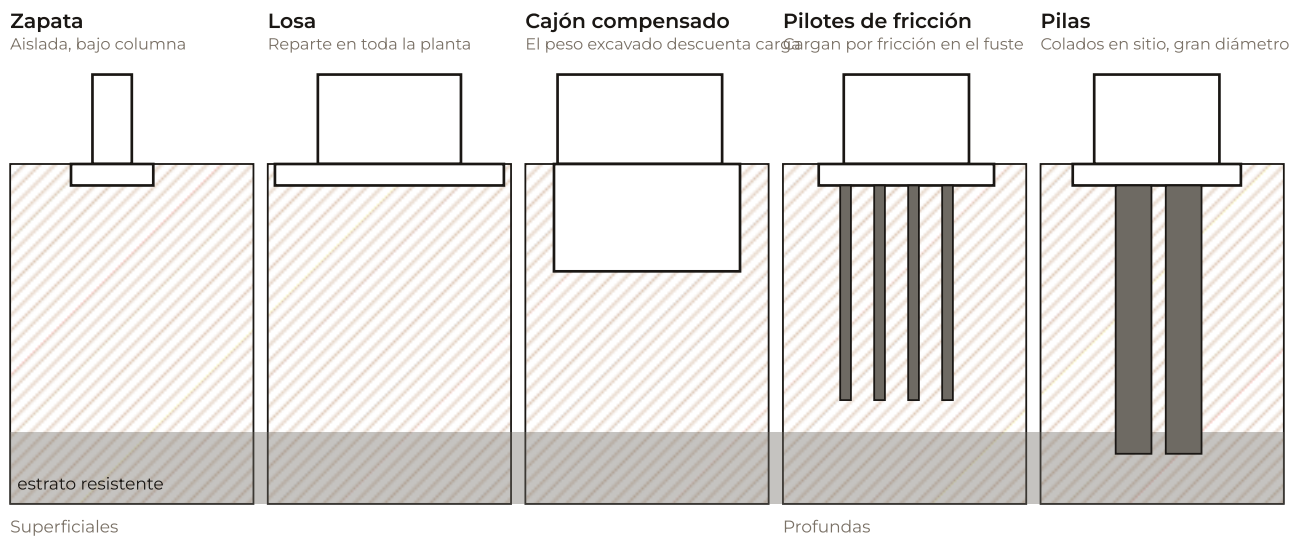
Cimentaciones

Una cimentación es la parte de una estructura que transmite sus cargas al terreno. Se clasifica por la profundidad a la que apoya. Las superficiales (zapatas y losas) reparten la carga en un área cercana a la superficie; las profundas (pilotes, pilas, cajones y muros Milán que trabajan como cimienta) la llevan a estratos resistentes o la reparten por fricción a lo largo de su fuste. La elección la decide el suelo, y en la Ciudad de México, donde las arcillas lacustres son muy compresibles, la historia de la cimentación es la historia de buscar cómo no hundirse con el terreno.

Para elegir entre las cinco, la regla práctica es la profundidad a la que aparece un estrato capaz de cargar el edificio sin asentarse más de lo admisible, y la compresibilidad de lo que queda arriba. Una zapata es la solución más simple y barata: sirve en suelo firme y cargas moderadas, pero concentra el esfuerzo bajo cada columna y es la que más sufre asentamientos diferenciales. La losa reparte la carga en toda la planta y los asentamientos

se vuelven más uniformes, a cambio de más concreto y acero. El cajón compensado es la losa llevada al extremo: se excava un volumen cuyo peso iguala el del edificio, de modo que el esfuerzo neto sobre el terreno casi no cambia, y es la solución clásica en arcillas blandas, con el costo de excavar bajo el nivel freático, controlar la expansión del fondo y contrarrestar la subpresión. Los pilotes de fricción no buscan un estrato duro, sino repartir la carga por adherencia en un fuste largo dentro de la arcilla; su capacidad ya no se calcula con fórmulas dinámicas sino con pruebas de campo, y su problema característico es la fricción negativa cuando el terreno se hunde alrededor. Las pilas, por último, son de gran diámetro y se cuelan en sitio, con verticalidad comúnmente no mayor de 3 % y colado continuo con tremie si la perforación se estabilizó con lodo.

Los valores de referencia de las fuentes son pocos pero útiles. Para zapatas, un factor de seguridad mayor de 2 en la capacidad de carga. Para cajones, un factor de 1.3 contra la falla por subpresión. Un ejemplo real de la Ciudad de México se da más abajo, en losas y cajones. La lección para una conducción es la misma: lo que se excava descarga al terreno, y lo que se construye encima lo vuelve a cargar, de modo que el equilibrio entre ambos decide si la estructura sube, baja o se queda quieta.



Esquema sin escala. Elaboración propia con Marsal (2012, pp. 17-20) y Reyes Spíndola Tamayo (1999, pp. 108-110).

Figura 5.13. Cinco cimentaciones

CIMENTACIONES SUPERFICIALES

Las zapatas son ensanchamientos de concreto reforzado bajo columnas o muros, aisladas o corridas. La capacidad de carga crítica del suelo se estima con las fórmulas de Terzaghi, conocidos el peso volumétrico efectivo y la resistencia al corte, y se ha obtenido buen resultado siempre que se adopte un factor de seguridad mayor de 2; los valores admisibles que resultan pueden dar asentamientos diferenciales que dañan al propio edificio y a los vecinos. Una zapata se construye excavando y nivelando el desplante, con topografía que revisa los niveles, habilitando el acero en un sitio aparte, armando, cimbrando y colando en una sola sesión con vibrado para evitar agrietamientos y con curado por aditivos que sellan la superficie.

Las losas de cimentación y los cajones se usan cuando hay que reducir el incremento de presión en el subsuelo. Se excava un volumen de tierra cuyo peso se descuenta de la carga del edificio; si el peso excavado iguala al de la estructura la cimentación es compensada, y si lo supera es sobrecompensada. La excavación descarga al terreno y provoca expansiones no uniformes de las arcillas, que agrietan taludes y fondo; para limitarlas se excava por partes, en zanjas y celdas ademadas. Tres edificios con cimentaciones rígidas de trabes y losas lo ilustran: el sobrecompensado se levantó en promedio 10 cm respecto al terreno circundante tras dos años y medio de expansión, el compensado se asentó por recompresión del subsuelo, y el tercero, que no controló las expansiones, quedó con un exceso de carga sobre el subsuelo por cambios de especificaciones y errores en la estimación de las cargas.

CIMENTACIONES PROFUNDAS

Los pilotes transmiten las cargas pesadas a estratos más firmes o por fricción. En la arcilla compresible de la Ciudad de México se usan pilotes de fricción largos y dispositivos que regulan la carga para que el edificio se asiente con la velocidad del terreno; la capacidad de carga, que se calculaba con fórmulas dinámicas, hoy se determina con pruebas de campo, y las expresiones de Meyerhof resultan más aceptables que las de Engineering News, que son conservadoras. Un problema asociado es la fricción negativa, que aparece cuando el hundimiento general del terreno por bombeo arrastra hacia abajo al pilote a lo largo de los estratos que atraviesa.

Las pilas son pilotes de gran diámetro colados en el sitio. Su procedimiento, descrito en una autopista urbana, es el siguiente: el topógrafo marca cada punto, la perforadora excava hasta la profundidad del plano ejecutivo, con un ademe corto para emboquillar en rellenos, se revisa la verticalidad (que comúnmente no debe pasar de 3 %), una grúa baja el armado ya habilitado, se vuelve a revisar el centrado y se cuela de forma continua por vertido directo, bomba o tubería tremie. El armado de la pila sale sobre el nivel de colado para ligarse con la zapata de la subestructura. Si la perforación se estabiliza con lodo bentonítico, el colado se hace con tremie bajo el lodo.

Los cajones de cimentación son cajas huecas cerradas que flotan sobre el terreno por empuje del agua; por eso necesitan lastre cuando hay subpresión, y el muro Milán puede servir de lastre para contrarrestarla. El muro Milán, además, se usa como elemento de capacidad de carga en cimentaciones profundas, como pantalla plástica impermeable y como estructura de retención.

CIMENTACIÓN DE LUMBRERAS Y ESTRUCTURAS DE CONDUCCIÓN

Una lumbrera es una cimentación de gran tamaño con un problema propio: casi siempre es sobrecompensada, porque el peso de suelo que se saca es mayor que el de su estructura. Eso genera expansiones por descarga y cambia la relación de preconsolidación del suelo bajo la lumbrera; durante el hundimiento regional, el suelo alrededor se asienta mientras el de abajo se recomprime menos, y la estructura parece emerger. Esa emersión aparente genera fricción negativa sobre los muros, que debe tomarse en cuenta en el diseño estructural. Los problemas típicos de las lumbreras en la ciudad son el riesgo de falla de fondo por la poca resistencia de las arcillas, la falla por subpresión en estratos muy permeables, la extrusión de juntas constructivas y la emersión aparente (p. 51 del PDF). A medida que las lumbreras de la ciudad se han hecho más profundas han llegado a desplantarse sobre la capa dura, y ahí se presenta la emersión aparente (p. 51 del PDF).

Estos problemas explican cada elemento de la cimentación de una lumbrera. La losa de fondo, que se cuela bajo lodo con tubería tremie sobre el anillo de rigidez de la excavación, cierra la caja y resiste la subpresión. Los muros Milán o los anillos forman el

cuerpo y trabajan como contención, como cimiento por fricción y, si hace falta, como lastre. La flotación del procedimiento flotado es, en el fondo, el mismo principio de la compensación: un cajón que se sumerge al ritmo en que se retira el lodo.

Las estructuras de conducción siguen la misma lógica. Los túneles en suelo blando apoyan sobre el terreno que atraviesan y su pendiente cambia con el hundimiento regional, que genera "cambios progresivos en la pendiente de obras de conducción, tanto superficiales como subterráneas". Por eso, durante la operación se lleva un registro de niveles topográficos a lo largo de las estructuras para ver su comportamiento con relación al subsuelo y a las estructuras vecinas, como el metro o las edificaciones con cimentación profunda. Las conexiones túnel-lumbrera son el punto donde se juntan el movimiento de la lumbrera y el del túnel, y por eso se analizan con metodologías específicas.

06

Túneles convencionales: voladura, sostenimiento y aire comprimido

Antes de las tuneladoras, el frente se atacaba con explosivos o herramienta mecánica, la rezaga se sacaba con carga y transporte y la excavación se sostenía con ademes. Estos métodos siguen vigentes en túneles cortos, secciones no circulares y roca. Se distinguen dos fases, excavación y revestimiento. En terreno de calidad media se ataca a plena sección o por partes, con zonas (bóveda, destroza, cuneta) y túneles piloto. El método de las dos galerías, o austriaco clásico, abre una galería de cuneta, un contrapozo y una galería superior, y usa un solo camino para la rezaga.

El Nuevo Método Austriaco (NATM) es una filosofía de excavación por etapas que aprovecha la capacidad del terreno de sostenerse, con concreto lanzado, pernos y marcos ligeros inmediatos y vigilancia de deformaciones con instrumentación. Cada etapa se corrige con lo que miden los convergímetros y los extensómetros.

PERFORACIÓN Y VOLADURA

El ciclo del Emisor Central tiene seis etapas: barrenación según un diagrama por tipo de roca; carga con cebo y cartuchos, con el barrenado sin llenar del todo y el resto con taco inerte; conexión del circuito con estopines eléctricos, en serie, paralelo o series paralelas; prueba con galvanómetro; protección contra electricidad extraña (estática, radio, corrientes dispersas); y retiro, detonación y ventilación, con un máximo de 30 minutos para recuperar visibilidad.

Los barrenos se dibujan en una plantilla y cada uno lleva el orden de detonación. En la figura siguiente, el diagrama de una sección con cuña: los barrenos de cuña abren la cavidad inicial, los ayudantes y los de descarga ensanchan, y los de tabla, techo y piso fijan el contorno.

El circuito de disparo se verifica con la ley de Ohm: el voltaje que debe entregar la fuente es la corriente total por la resistencia del circuito. Un circuito en paralelo de 80 estopines requiere 201.44 V y 8,057.6 W, y uno de 10 series de 30 estopines en paralelo basta con 15 A y 161.94 V; las series paralelas detonan muchos estopines con menos voltaje y corriente, pero hay que verificar que la fuente de la obra entregue esa energía.

La ventilación es primordial. Se inyecta aire fresco al frente, se extrae por el tubo, o se inyecta durante la actividad y se extrae después de cada voladura. El reglamento minero de la época pedía al menos 20 % de oxígeno, hasta 0.01 % de CO, 0.50 % de CO₂ y 1.00 % de metano, y 1.5 m³ de aire por minuto por persona; el Emisor Central consideró 200 ft³/min por hombre y 70 por caballo de fuerza diésel. El caudal de aire fresco se calcula sumando personas y motores; con 20 personas y 150 HP resulta del orden de 410 m³/min. Las normas actuales de la STPS para espacios confinados y minería fijan sus propios límites de gases y deben consultarse al proyectar.

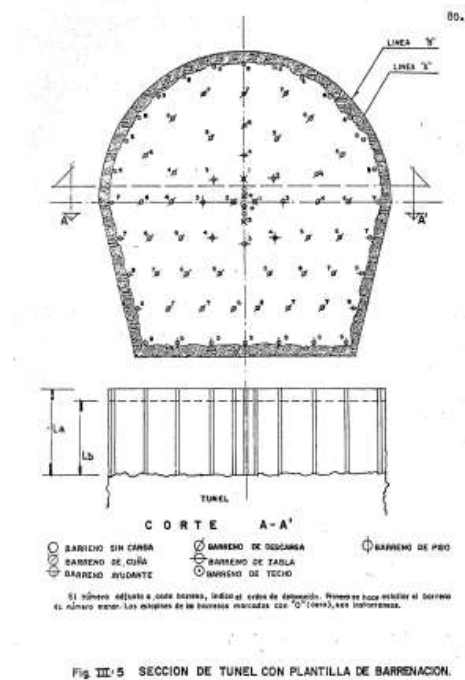


Fig. III-5 SECCIÓN DE TÚNEL CON PLANTILLA DE BARRENACIÓN.

Figura 5.14. Plantilla de barrenación de la sección de un túnel con el orden de detonación

REZAGA, ACARREO Y MANTEO

Tras la voladura se carga en vagonetas (rezaga), se transporta a la base de la lumbrera (acarreo) y se iza con skips y malacate (manteo). El Emisor Central usó una rezagadora Conway, un Caterpillar 955 y una pala Yumbo, y carros mineros con tres locomotoras (de tránsito, de frente y de alcancía). No hay procedimiento universal: la elección depende de recursos, espacio y longitud de acarreo y debe ser congruente con el ciclo de excavación.

SISTEMA	DESCRIPCIÓN	USO PREFERENTE
Vagonetas sobre rieles con locomotoras	Carros mineros movidos por locomotoras	Túneles largos con vía
Bandas transportadoras	Evacuación continua	Rendimientos altos, sección con espacio
Camiones de volteo	Acarreo sobre el piso	Sección amplia y poca longitud
Botes o skips con malacate	Cubo izado por la lumbrera	Manteo en lumbrera con torre
Bombeo	Tuberías y bombas	Escudos de lodos, material con mucha agua

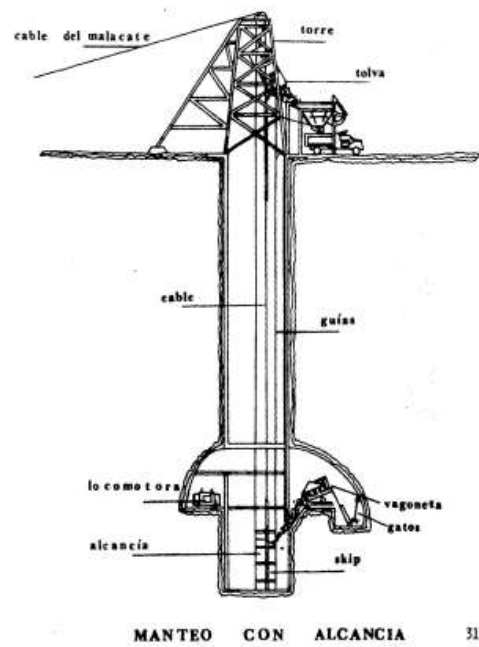


Figura 5.15. Manteo con alcancía

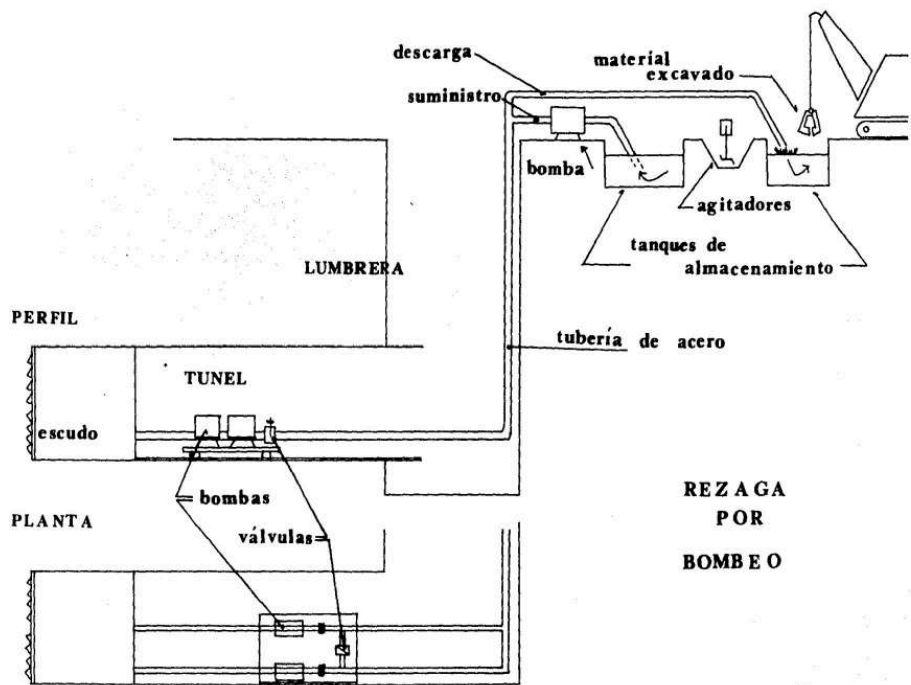


Figura 5.16. Rezaga por bombeo

SOSTENIMIENTO

En el Emisor Central se usaron cuatro tipos de sostenimiento. Marcos metálicos con retaque de madera: columnas sobre planilla nivelada, cabezal de dos arcos, bloques de madera contra el terreno (castigo), tabloncillos entre marcos (tupido) y tornapunta si hay empujes laterales. Pernos de soporte: anclas con mecanismo expansivo en roca firme, con placa en la cara, que se revisan tras cada voladura. Concreto lanzado: ademe provisional rápido, incluso antes de retirar la rezaga, con presión del orden de 5.0 kg/cm^2 y rebote máximo de 50 %. Y tratamientos del terreno, en especial la inyección de suelos.

ESCUDO ABIERTO CON AIRE COMPRIMIDO

En las arcillas blandas del Valle, el escudo con aire comprimido permitió la profundidad requerida. Un escudo abierto de 6.10 m, con cachucha y tablero de madera, usaba aire para dar presión de soporte uniforme, secar el frente y apoyar la cachucha. Avanzó ocho metros por día en tres turnos y, en casos extraordinarios, diez a doce. Exige esclusas, una para personal y otra para equipo y rezaga, cada una con dos puertas; si la descompresión excede de 90 minutos se añade una cámara de descanso a presión constante. Se puso en operación en México por primera vez en 1974.

La presión de aire que equilibra el agua en el frente se estima con la carga hidrostática en el eje del túnel: con el nivel freático 8 m sobre el eje es de unos 78.5 kPa, es decir 0.8 kg/cm^2 . Es el orden de las presiones de trabajo que se reportan en obra, de 0.7 a 1.2 kg/cm^2 , y de ellas depende el tiempo de descompresión de cada persona, como muestra la tabla de la figura siguiente: a 1.2 kg/cm^2 y más de 8 horas de trabajo la descompresión dura 182 minutos.

Se abandonó porque estabilizaba mal el frente en arenas, con hundimientos y daños, porque bajo presión baja el rendimiento y sube el costo, y porque la inyección química es cara y no estabiliza del todo. Se buscaron máquinas que presurizaran solo la zona de trabajo, para que el personal permaneciera a presión atmosférica.

Los tiempos de descompresión que se utilizaron durante la excavación del Tramo L8-L7 se presentan resumidas en la siguiente tabla:

RESUMEN DE LOS TIEMPOS DE DESCOMPRESION APLICADOS DURANTE LA EXCAVACION DEL TRAMO L8-L7 UTILIZANDO UN ESCUDO DE FRENTE ABIERTO Y AIRE COMPRIMIDO.

		PRESION DE TRABAJO (KG/CM2)						TIEMPO DE DESCOMPRESION (MINUTOS)
		0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	
TIEMPO TRABAJADO (HORAS)	0.5	6	7	8	8	8	12	
	1.0	6	7	8	8	8	14	
	1.5	6	7	8	10	12	25	
	2.0	6	7	8	12	19	29	
	3.0	6	7	9	13	24	58	
	4.0	6	7	12	28	53	96	
	5.0	6	13	33	56	76	121	
	6.0	6	21	48	69	86	128	
	7.0	12	35	56	77	96	134	
	8.0	12	35	61	88	116	140	
más de	8.0	24	51	73	112	125	182	

Figura 5.17. Tiempos de descompresión aplicados en un tramo con escudo de frente abierto y aire comprimido

MÉTODO	TERRENO	VENTAJA	LIMITACIÓN PRINCIPAL
Voladura con marcos, pernos y concreto lanzado	Roca o tepetate duro	Flexibilidad de sección, sin máquinas especiales	Riesgo para personal, ventilación, ciclo discontinuo
Dos galerías	Calidad media, secciones grandes	Un solo camino de rezaga	Rendimiento bajo
Escudo abierto con aire	Arcilla blanda bajo el freático	Soporte uniforme, 8 a 12 m/día	Salud del personal, esclusas, costo

07

Tuneladoras y escudos

Una tuneladora o TBM excava a sección completa y colabora en colocar el sostenimiento. Una cabeza giratoria con herramientas de corte, accionada por motores hidráulicos eléctricos, rompe el terreno; el empuje lo dan gatos que reaccionan contra el último anillo o zapatas móviles (*grippers*) contra la pared; detrás va el equipo de apoyo (*back up*) con transformadores, ventilación, mortero y rezaga. Se agrupan en la hincapié de tubos y en los túneles revestidos con dovelas; Se clasifican por terreno.

TIPO	TERRENO	CÓMO SOSTIENE EL FRENTE	LIMITACIÓN
Topo (roca dura, grippers)	Roca dura y media	No sostiene; los grippers dan el empuje	No sirve en suelo inestable
Escudo de roca dura	Igual, con más seguridad	Sostenimiento dentro del escudo, coloca dovelas	Menor rendimiento en roca sana
Doble escudo	Geología cambiante	Dos sistemas de empuje (grippers y gatos)	Máquina compleja
EPB	Terrenos cohesivos de baja permeabilidad	El suelo excavado, acondicionado con espuma	Poco apto en arenas y gravas limpias sin acondicionar
Hidroescudo (Mixshield)	Terrenos no cohesivos con agua a presión	Lodo bentonítico a presión	Requiere planta de lodos
Duales o mixtas	Terreno variable	Cambio de modo con la máquina detenida	Programación detallada; justificar su uso

La historia explica cada tipo. El escudo se atribuye a Marc I. Brunel (1818), con un primer escudo rectangular bajo el Támesis entre 1835 y 1843; en 1831 se patentó el aire comprimido bajo el freático y en 1869 aparece el escudo cilíndrico con gatos hidráulicos. Los de lodos nacen en los sesenta; en 1966 se construyó uno para los túneles de drenaje

de la Ciudad de México, con 3 atm de presión de agua. Los de tierras se desarrollan en Japón desde 1966. Cada tipo responde a un problema: el aire a la presión del agua, el lodo a los riesgos del aire y el EPB a la planta de lodos.

EPB

Se usa sobre todo en terrenos cohesivos de baja permeabilidad. El terreno cortado pasa a la cámara, se mezcla con suelo plastificado y la fuerza de los cilindros se transmite por el mamparo a ese suelo, que apoya el frente. Para servir de apoyo necesita deformación plástica, consistencia de pastosa a suave, baja fricción interna y baja permeabilidad, y como casi nunca las tiene se acondiciona con espuma. La presión del frente debe aproximarse a la de tierra en reposo: si sube de más, se levanta el suelo delante; si baja, entra a la cámara y hay asentamientos. Se regula con la velocidad del sinfín (más rápido, baja la presión) y con la de avance (más rápido, sube), y se mide con sensores en el mamparo. La espuma se hace con aire y líquido espumante, se inyecta en la rueda, los estatores y el sinfín, y reduce adherencias y desgaste.

La presión de soporte objetivo en la cámara es, en palabras, el empuje efectivo de tierras en reposo más la presión del agua al nivel del eje. El empuje efectivo se obtiene multiplicando el esfuerzo vertical efectivo por el coeficiente de empuje en reposo, que se estima restando a 1 el seno del ángulo de fricción efectivo.

$$p_c = K_0 \sigma'_v + u$$

donde p_c es la presión objetivo en la cámara a la altura del eje (kPa), K_0 es el coeficiente de empuje en reposo, σ'_v es el esfuerzo vertical efectivo al nivel del eje (kPa) y u es la presión del agua al nivel del eje (kPa). Con el eje a 25 m de profundidad, peso volumétrico de 17 kN/m³, nivel freático a 5 m y fricción de 28° (valores supuestos), el esfuerzo vertical total es 425 kPa, la presión del agua 196 kPa, el esfuerzo efectivo 229 kPa y $K_0 = 0.531$, de donde $p_c = 318$ kPa, unos 3.2 bar. En obra la presión se mantiene en una banda alrededor de ese valor, con un margen por encima para cubrir las variaciones del avance y por debajo del valor que levantaría el terreno; la presión activa de Rankine fija el límite inferior y la presión pasiva el superior.

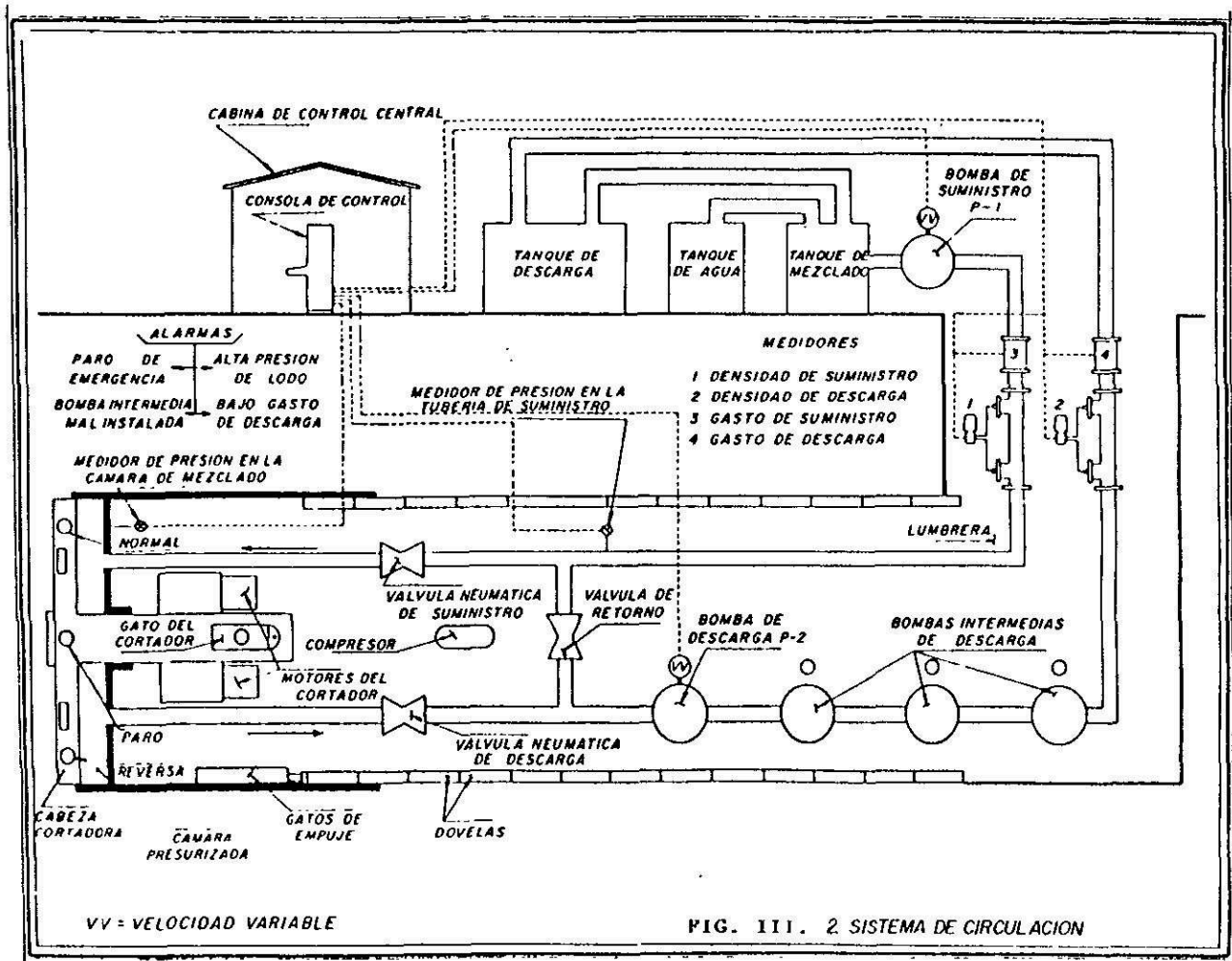


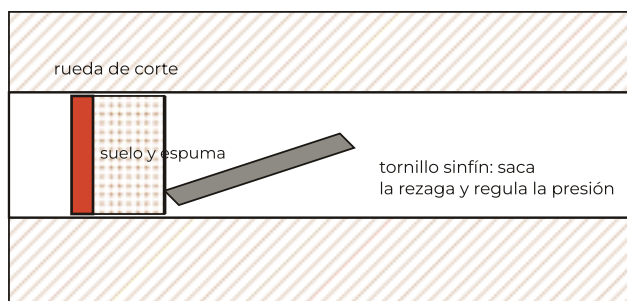
Figura 5.18. Sistema de circulación de lodos de un escudo de frente presurizado

HIDROESCUDO Y MIXSHIELD

Asegura el frente con la rueda y un lodo bentonítico a presión, que además lleva la rezaga por tuberías a una planta exterior que lo recicla. Es apropiado bajo presión de agua, como cruces de ríos; los bloques grandes se retiran del circuito a mano. La bentonita es tixotrópica: se fluidifica al agitarla y gana consistencia en reposo. El Mixshield trabaja como hidroescudo, EPB, con aire o abierto. En el Drenaje Profundo, un escudo de 4.00 m inyectaba lodo ligero de densidad máxima 1.06 g/cm^3 y desalojaba lodo pesado bombeable de 1.12; el anillo se colocaba cuando las densidades de entrada y salida se igualaban, señal de cámara limpia; el hueco anular de 0.925 m^3 por metro se inyectaba al mismo tiempo. Una variante es el escudo balanceado, que recircula el lodo dentro del propio escudo.

EPB: presión de tierra

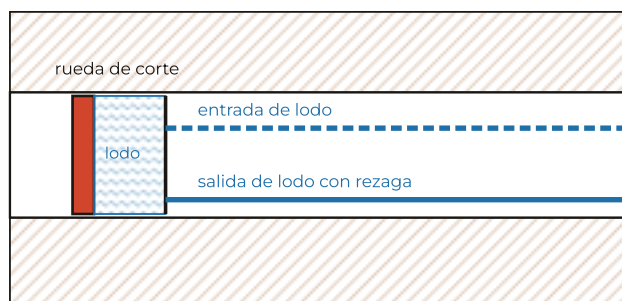
El suelo cortado se acondiciona con espuma y llena la cámara: apoya el frente por presión de tierra



Terreno cohesivo de baja permeabilidad.
Pide banda o sinfín y tren de rezaga.

Hidroescudo: lodo a presión

Un lodo bentonítico presurizado sostiene el frente; la rezaga sale suspendida en el lodo por tubería hacia una planta de lodos en superficie



Terreno no cohesivo con agua a presión.
Pide planta de lodos en superficie.

Corte longitudinal esquemático, sin escala. Elaboración propia con Ríos Manrique (2009, pp. 66-86).

Figura 5.19. Comparación de un escudo EPB y un hidroescudo

La diferencia práctica entre ambos está en lo que hay detrás de la rueda. En el EPB el propio suelo es el fluido de soporte: se necesita que sea plástico y poco permeable, o que se acondicione con espuma hasta serlo, y la rezaga sale como una pasta que el sinfín entrega a una banda o a un tren. En el hidroescudo el soporte es un lodo de bentonita, que forma una película sobre el frente y permite sostenerlo aun en arenas y gravas con agua a presión, pero obliga a una planta de separación de lodos en superficie, que ocupa espacio, consume energía y cuesta. De ahí la regla de elección: terreno cohesivo y poco permeable, EPB; terreno granular y agua a presión, hidroescudo; terreno que cambia a lo largo del trazo, máquina de doble modo como el Mixshield, siempre que el cambio de modo justifique la complejidad.

Los ejemplos reales muestran cómo se llegó a esa división. En 1970, Mitsubishi construyó dos escudos de lodos de 7.29 m de diámetro para los túneles ferroviarios bajo la bahía de Tokio, y en 1973 se diseñó en Japón otro de 5.05 m guiado con láser, que avanzaba un metro cada 20 minutos y completaba un ciclo de un metro de avance en una hora, con colocación de segmentos de 20 a 30 minutos. En 1974, un consorcio alemán construyó el hidroescudo del colector de Hamburgo, de 4.50 m de diámetro, que cruzaba arenas y gravas con estratos de arcilla y turba bajo el puerto, con 16 m de columna de agua sobre la solera. Son los casos en que el aire comprimido ya no bastaba: la presión de

agua era demasiado alta para que el personal trabajara a presión, y el lodo permitió que quedara a presión atmosférica. Entre sus limitaciones, los bloques grandes de roca o boleas tapan la cámara y se retiran del circuito a mano, y el escudo de tierras nació en Japón precisamente para evitar la planta de lodos en terrenos donde el suelo se pudiera acondicionar.

Los volúmenes que controla el operador salen de un balance de masa entre lo que entra y lo que sale de la cámara: el volumen de sólidos extraído se compara con el volumen teórico de la sección por el avance. Si el medido supera al teórico, el escudo está sobreexcavando y se esperan asentamientos. Con un diámetro de 6.24 m y un avance de 1.5 m el volumen teórico es de 45.9 m³.

COMPONENTES

Con base en un escudo de lodos de 6.24 m:

1. Rueda de corte: de radios, con fácil acceso al frente pero poco soporte, o de frente cerrado tipo tambor. El porcentaje de abertura equilibra impedir la entrada de material saturado y permitir que penetre con facilidad. La del escudo citado es de disco plano, con 24 aletas de ranura y 72 cuchillas.
2. Escudo o cuerpo, que protege al personal hasta instalar el revestimiento. El citado mide 7.3 m de largo, aloja 2.25 m de revestimiento y tiene 24 gatos distribuidos en el anillo con un empuje total de 2,990 t.
3. Cola del escudo, donde se ensamblan las dovelas, con tres sellos perimetrales (dos de neopreno y uno de cerdas de alambre) y grasa a presión.
4. Erector de dovelas, con movimiento circular, radial y axial a control remoto.
5. Tornillo sinfín y bandas, que evacúan en EPB.
6. Cámara de excavación y mamparo, con sensores de presión, puertas, válvulas y clinómetros.
7. Tren de equipo (*back up*): cabina del operador, polipasto de dovelas, unidad hidráulica, transformador, bombas de mortero y equipo de espuma.

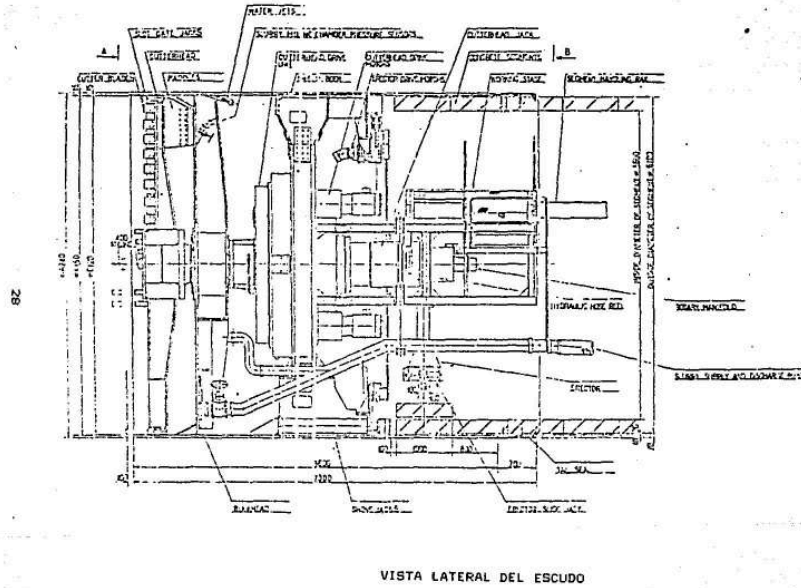


Figura 5.20. Vista lateral de un escudo de frente presurizado de 6.24 m con sus componentes

HERRAMIENTAS DE CORTE

Se agrupan en fijas (cinces, picas, rastreles) y de giro libre (discos). Los discos se usan en roca y los cinces en suelos y rocas débiles; su distribución, en espiral, estrella o asimétrica, reparte el empuje.

HERRAMIENTA	FUNCIÓN	DATO
Rastreles	Apoyan el corte y protegen la rueda	Acero con recargue de carburo de cromo de 60 a 90 HRc
Picas tangenciales	Roca blanda a moderadamente dura	Hasta 80 a 120 MPa
Picas radiales	Terrenos blandos	Filo de carburo de tungsteno
Picas de sobrecorte	Garantizar el diámetro en roca dura, terreno mixto y curvas cerradas	55 a 62 HRc; extensión de 70 a 150 mm
Discos de corte	Fracturar roca; también arenas y gravas con agua a presión	Hasta 420 MPa; $\varnothing 17''$ estándar, $\varnothing 20''$ en TBM de más de 10.50 m
Discos centrales, frontales, periféricos	Distinto radio de giro y desgaste	Los periféricos se inclinan 65 a 70°; los de sobrecorte sobresalen 10 a 25 mm

El número de discos que necesita una rueda sale de dividir el empuje disponible entre la carga admisible por disco; con un empuje de 20,000 kN y discos de $\varnothing 17"$ de 215 kN resultan 93 discos como máximo. En la práctica la rueda lleva menos y deja el resto como reserva.

RENDIMIENTO

El rendimiento teórico sale del ciclo de la máquina: cuántos anillos arma por día, cuánto mide cada uno y cuántos días trabaja al mes. El rendimiento real es una fracción de ese teórico, el factor de utilización.

$$L_{real} = FU \times N_{dia} \times L_{anillo} \times d$$

donde L_{real} es el avance mensual real (m), FU es el factor de utilización (adimensional), N_{dia} es el número de anillos teóricos por día, L_{anillo} es el ancho del anillo (m) y d es el número de días de trabajo al mes. Con un anillo de 1.50 m, un ciclo de 20 minutos de excavación y 20 de colocación de dovelas (valores supuestos, de la clase que garantiza un fabricante), 20 horas útiles al día, 6 días a la semana y 4.3 semanas al mes se obtienen 30 anillos por día y 1,161 m teóricos al mes; con $FU = 0.35$, el avance real es de 406 m por mes. La diferencia con el teórico son los cambios de herramienta, los paros, los trenes de rezaga, el suministro de dovelas y el terreno. En un proyecto el plazo se calcula con el rendimiento real, no con el teórico.

TRABAJOS PRELIMINARES

Un escudo presurizado necesita subestación eléctrica (23 kV de acometida y 4,160 V en túnel), planta de emergencia, patio de dovelas con grúa pórtico (la dovela pesa unas 2 t), compresor, cisterna con unos 34 m³ de agua por anillo y planta de lodos con cárcamos de descarga, sedimentación, ajuste y suministro. En la lumbrera, la cuna de concreto con rieles, el muro de atraque donde reaccionan los gatos, y el sello de salida que impide que el lodo se escape por la holgura entre la camisa y la pared. En lodos, la rezaga sale por tubería y bombas; en EPB, por sinfín, banda y tren o camiones.

DEL AIRE COMPRIMIDO AL FRENTE PRESURIZADO EN LA CIUDAD DE MÉXICO

La Ciudad de México enseñó a sus ingenieros qué no funciona antes de adoptar el escudo presurizado. El escudo de frente abierto se fue modificando conforme bajaba la cohesión del terreno: desde el tramo de la lumbrera 9 a la 10 del Interceptor Central hubo que presurizar el túnel con aire comprimido y aislar el frente con una mampara. En el Interceptor Centro-Centro y en colectores semiprofundos como Iztapalapa y Obrero Mundial, las arcillas eran tan blandas que la presión superaba 1.3 kg/cm^2 . Eso causaba problemas físicos al personal y descompresiones tan largas que la jornada efectiva casi desaparecía. Por eso el Departamento del Distrito Federal compró dos escudos de frente presurizado con lodo a la japonesa Okumura Machinery Corporation.

Esos escudos tenían cabeza de 6.12 m, 24 gatos con 2,880 t de empuje total y un circuito de lodos con una bomba de suministro en superficie y cinco de extracción, una cada 400 m dentro del túnel. Con ellos se excavaron tramos de 2,042 m entre lumbreras, con densidades de lodo de 1.0 a 1.10 t/m^3 en el suministro y 1.20 t/m^3 en la extracción. Se eliminaron los problemas del aire comprimido y bajaron los asentamientos superficiales y el riesgo de falla del frente. La contrapartida fue una planta de lodos en superficie y tuberías de bombeo, que es la razón por la que el escudo de tierras sin planta separadora resultó atractivo después.

FIGURA 1: MAQUINA DEL ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO

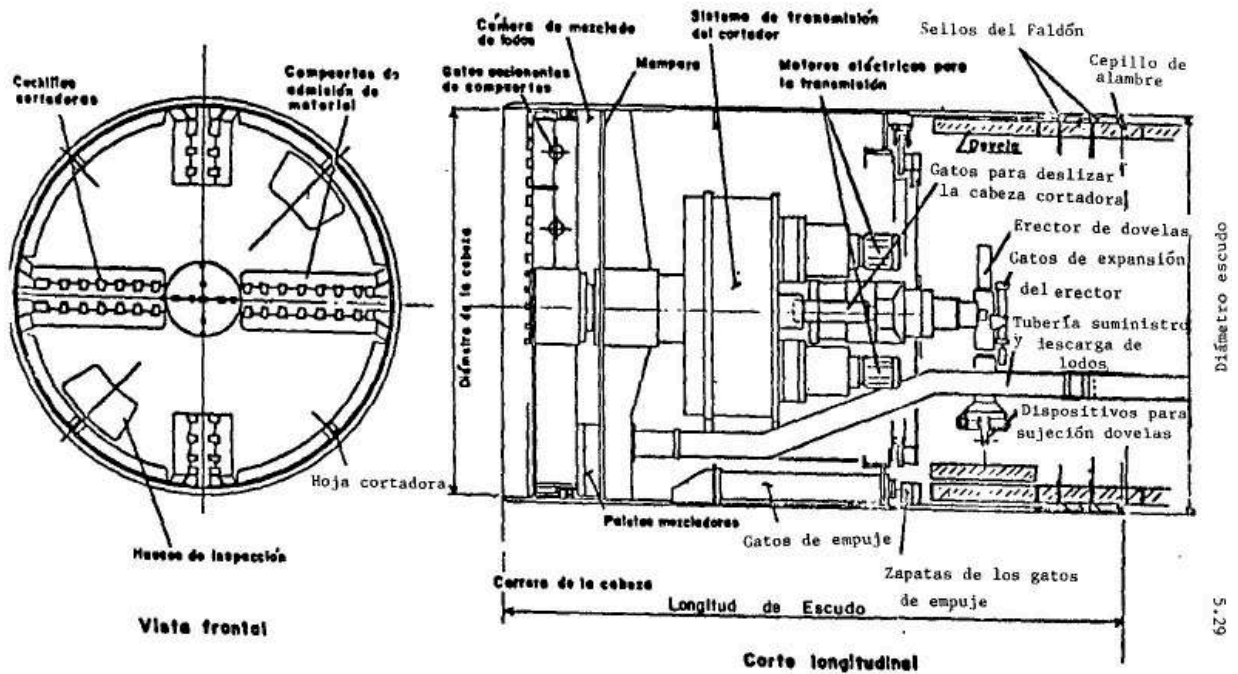


Figura 5.21. Escudo cortador de frente presurizado con lodos del Drenaje Profundo

FIGURA 3: TREN DE EQUIPO DEL ESCUDO CORTADOR DE FRENTE PRESURIZADO

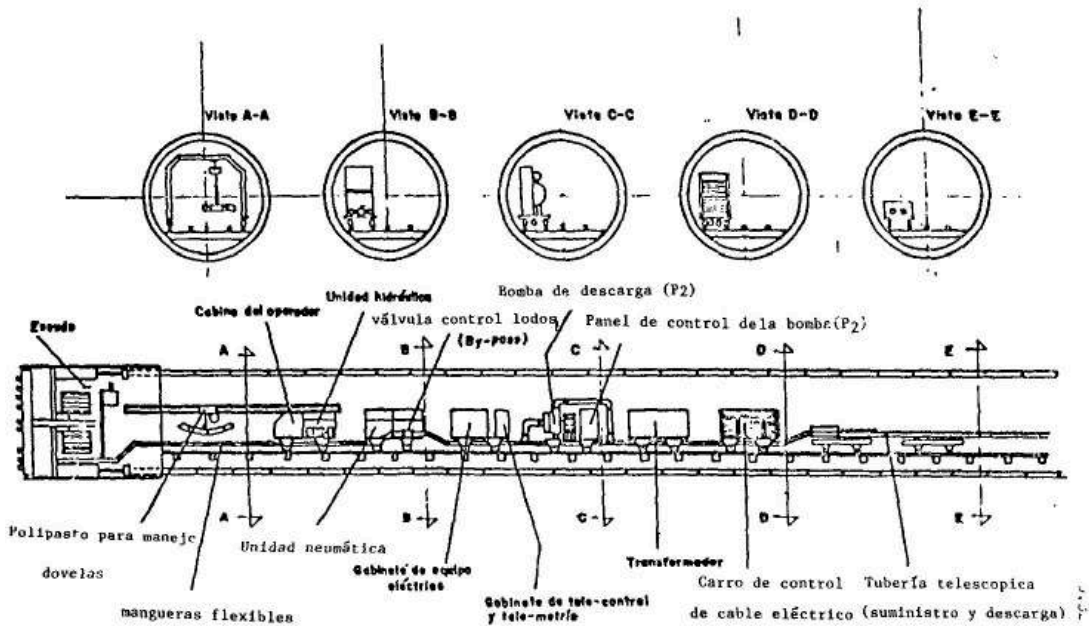


Figura 5.22. Tren de equipo del escudo de frente presurizado del Drenaje Profundo

Sin abrir zanja: hincado, microtúneles y perforación direccional

Instalan la conducción sin abrir la superficie, desde un pozo de ataque.

HINCADO

Se empuja una tubería con gatos desde un pozo mientras se excava delante. El caso documentado es una conexión entre una lumbrera del Gran Canal y el Interceptor Oriente: un tubo de acero de 1 1/2" de espesor y 3.62 m de diámetro, hincado con cuatro gatos de al menos 800 t de empuje total. Se construyó la reacción, se colocaron cuatro troqueles a 10 t, se demolió la pared de la lumbrera, se hincó el tubo por etapas, se sellaron las juntas con inyección de agua-cemento-bentonita (hasta 1.5 kg/cm² y luego 2 kg/cm²) y se coló el revestimiento sin retirar los gatos hasta alcanzar 80 % de la resistencia de proyecto. Exige controlar empuje, contacto con el frente y sello contra el agua.

La fuerza de empuje necesaria es la del frente más la fricción sobre la superficie exterior del tubo, que baja con lubricación de bentonita. Con los supuestos del anexo (E.5.10), un tubo de 3.62 m hincado 60 m requiere cerca de 7,800 kN, unas 800 t, que coincide en orden de magnitud con los gatos del caso citado. Si la fricción sube con el tiempo, a 20 kPa el empuje se duplica y sobrepasa lo instalado, razón por la que el hincado no se detiene a mitad de tramo.

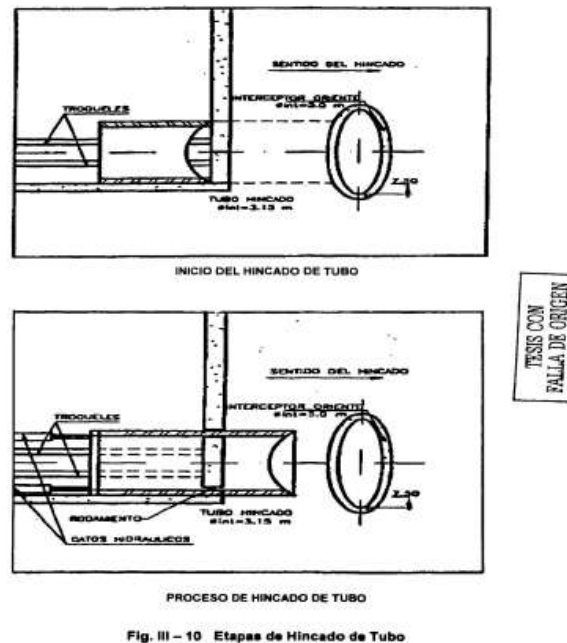


Fig. III – 10 Etapas de Hincado de Tubo

117

Figura 5.23. Etapas del hincado de un tubo de acero hacia el Interceptor Oriente

MICROTÚNELES

Permiten túneles de menos de 3 m de diámetro y menos de 200 m con pozos pequeños; con técnicas clásicas, las secciones menores de tres metros cuadrados no son prácticas. Una máquina de control remoto va delante de la tubería, que se empuja desde un pozo, y la rezaga sale por lodos o tornillo. Se citan diámetros desde 20 cm en suelo blando.

PERFORACIÓN DIRECCIONAL

Abre un barreno piloto guiado, lo ensancha con escariadores y jala la tubería por una trayectoria curva; se usa en cruces de ríos, caminos y vías con ductos flexibles.

La diferencia está en la trayectoria. El hincado y el microtúnel siguen una línea recta entre dos pozos y exigen un muro de reacción capaz de tomar el empuje total de los gatos, que en el caso citado superó las 800 t; su ventaja es el control del frente y el sello inmediato, y su limitación es el costo de abrir dos pozos. La perforación direccional parte de la superficie, sin pozo de empuje, y dibuja una curva que baja bajo el obstáculo y vuelve a salir, lo que la hace económica en cruces largos de poco diámetro, pero limita el

material a ductos flexibles que admitan la curvatura de jalado. Los microtúneles se acotan a menos de 3 m de diámetro y 200 m de longitud. Los boleos y las gravas gruesas desvían la herramienta o atascan la máquina, y pesan en la selección.

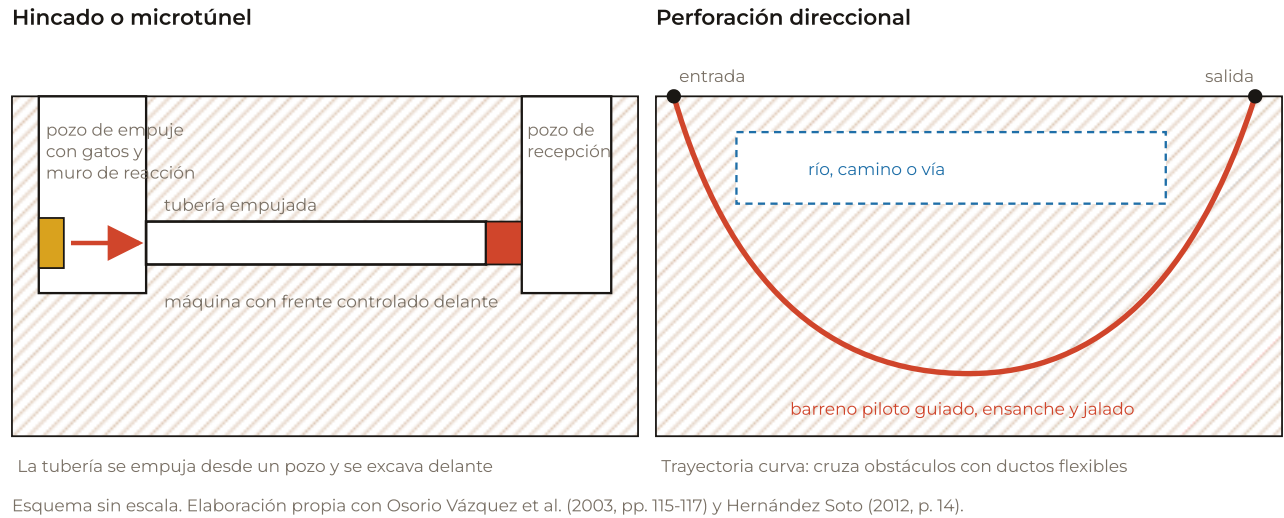


Figura 5.24. Hincado de tubería desde un pozo de empuje y perforación direccional bajo un obstáculo

MÉTODO	QUÉ SE INSTALA	DIÁMETRO Y LONGITUD	VENTAJA	LIMITACIÓN
Hincado de tubo de acero	Tubo empujado desde pozo	Caso citado: 3.62 m, tramo corto	Control del frente, sello inmediato	Empuje y reacción grandes
Microtúnel	Tubería hincada con máquina remota	Menos de 3 m y 200 m	Mínima afectación superficial	Pozos de empuje y recepción
Perforación direccional	Tubería flexible jalada	Ductos de diámetro moderado	Cruces de ríos y caminos	Curvatura mínima de la tubería
Túnel con tuneladora y dovelas	Revestimiento por anillos	Grandes diámetros y longitudes	Grandes longitudes	Costo de arranque

09

Maquinaria por tarea

TAREA	MÁQUINA O EQUIPO
Zanjas y cortes	Excavadora, retroexcavadora, cargador, camión
Contención	Tablestacas, muro Milán
Muro Milán en suelo blando	Almeja guiada con cables
Muro Milán en suelo duro y gran profundidad	Hidrofresa con planta de lodos
Pilas y pilotes	Perforadora, grúa para el armado, bomba o tremie
Roca en túnel	Barrenación, explosivos, rezagadora, locomotoras, concreto lanzado
Suelo blando con aire	Escudo abierto, esclusas, compresores
Suelo cohesivo	Escudo EPB
Suelo no cohesivo con agua	Hidroescudo, planta de lodos
Instalación de anillos	Erector de dovelas
Manteo	Torre con malacate y skips, grúa pórtico
Hincado de tubo	Gatos hidráulicos, troqueles, reacción

10

Maquinaria innovadora

La innovación en maquinaria de excavación no busca máquinas más grandes sino menos intervenciones humanas bajo presión, menos desgaste y más información en el frente. Las herramientas de corte pueden costar de 20 a 30 % de la operación de una tuneladora, y cada cambio bajo presión exige cuadrillas especializadas y descompresión. De ahí que la literatura reporte soluciones para desgastar menos o para cambiar herramientas sin presurizar.

TECNOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	BENEFICIO REPORTADO
Recubrimiento NanoSHIELD	Película de aleación amorfa de 0.07 mm máximo aplicada con láser	20 % más de duración en pruebas de Atlanta
SmartCutter (Robbins)	Sensores inalámbricos de temperatura, rotación y vibración en los discos	Detecta bloqueos y falla de rodamientos
Compensador de presión en discos	Retén de dos piezas que iguala la presión de los sellos	Menos falla de sellos con presión alta
Control de tracción en discos	Protuberancias en el aro para forzar el giro en suelo blando	Evita el bloqueo del disco
Water jet y alambre de diamante	Hidrocorde anular y corte del núcleo (concepto)	174 m/día en roca blanda; 0.64 m/día en roca dura (modelo)
Robot NeTTUN e IIRTT	Robots de inspección y cambio de herramientas en la cámara	Menos personal en hiperbaria (hasta 10 bar)
CPT de sobrecorte	Mide el sobrecorte por los puertos de inyección	Estima el desgaste periférico sin parar
CCTV en cámara	Cámaras en el mamparo	Ahorra intervenciones
Rueda con cambio atmosférico	Brazos huecos accesibles (río Elba)	Cambio de herramientas sin presurizar

Fuera de las herramientas de corte hay tres líneas más. La excavación vertical mecanizada (VSM) abre lumbreras con una cabeza rotatoria en un brazo telescópico, bajo agua o lodo, con poco espacio de montaje, hasta 9.6 m de diámetro y 160 m de profundidad en las experiencias europeas que reporta la fuente. La hidrofresa sustituyó a la almeja donde el suelo es duro o la profundidad es grande, con verticalidad ultrasónica y desviación máxima de 0.3 %. Y la inteligencia artificial empieza a usarse para operar las tuneladoras: una máquina EPB registra en tiempo real parámetros de empuje, rotación, sinfín y asentamiento, y un operador no puede vigilarlos todos al mismo tiempo; las redes neuronales artificiales estiman parámetros operacionales a partir de esos datos, con la expectativa de que en el futuro las máquinas operen de forma autónoma. El anexo de materiales y maquinaria innovadora reúne la lista completa.

Criterios de selección por tipo de suelo

La tabla cruza el comportamiento del terreno con la solución recomendable, la alternativa descartada y la razón. Es síntesis de lo que dicen las fuentes de cada fila; no es un criterio normativo.

CONDICIÓN	MÉTODO Y MÁQUINA	RAZÓN	ALTERNATIVA DESCARTADA Y POR QUÉ
Arcilla blanda lacustre bajo el freático (fluye bajo presión)	EPB; en lumbrera, anillos o muro Milán con almeja	El suelo acondicionado equilibra la presión; el lodo estabiliza las paredes	Aire comprimido: riesgos y bajo rendimiento; lumbrera flotada: inestabilidad rotacional
Arena o grava limpia saturada (fluyente)	Hidroescudo o Mixshield; abatimiento y muro Milán en lumbrera	El lodo forma un sello y equilibra el agua	EPB sin acondicionar: el sinfín no sella; zanja abierta con abatimiento: hundimientos
Suelo cohesivo firme (arcilla dura, toba)	EPB o escudo abierto con soporte parcial; lumbrera convencional	El frente se sostiene unos metros	Voladura: innecesaria; hidroescudo: costo de planta
Roca sana o media	Topo o escudo de roca dura; voladura con marcos, pernos y concreto lanzado en túneles cortos	Corte con discos; sostenimiento rápido	EPB: no corta roca resistente
Geología mixta (suelo, roca, boleos)	Tuneladora dual o Mixshield	Cambio de modo sin cambiar de máquina	Máquina de un solo modo: paros y sobreconsumo de herramientas
Zona urbana con edificios próximos	Muro Milán, abatimiento limitado, escudo presurizado	Limita vibración y asentamientos	Tablestacas y pilotes: ruido y vibración
Tramo corto o cruce de infraestructura	Hincado o microtúnel	Evita la zanja y afecta poco la superficie	Zanja abierta: cierre de vialidad

CONDICIÓN	MÉTODO Y MÁQUINA	RAZÓN	ALTERNATIVA DESCARTADA Y POR QUÉ
Agua a presión en acuífero confinado	Pozos profundos y muro Milán; revisar subpresión	Falla de fondo si $FS < 1.3$	Solo achique: no abate la presión

12

Balance

Casi todos los problemas de excavación revisados terminan siendo problemas de agua. La subpresión de fondo, el lodo que se escapa, el aire comprimido que se abandonó por sus riesgos y la presión de cámara del EPB son versiones de la misma pregunta: cuánta presión de agua hay y qué la equilibra.

El procedimiento escrito y el que se ejecuta en el frente no coinciden. En el ejemplo de rendimiento, el factor de utilización de 0.35 no es pesimismo: es lo que resulta al sumar las herramientas que se cambian, las dovelas que no llegan y la rezaga que no sale. Un programa de obra realista parte del rendimiento real, y el teórico solo sirve para medir cuánto se pierde.

En el corte de la zanja pesa más de lo que parece el acostillamiento, la parte que nadie ve después y la que más se ahorra cuando falta tiempo o supervisión. Un tubo bien apoyado en su plantilla y bien acostillado trabaja como se calculó; uno mal apoyado falla años después, lejos de quien lo dejó así.

Entre la hidrofresa, los anillos y las alternativas anteriores, la técnica que se impone no es la más moderna sino la que deja menos asentamiento en una ciudad con cimentaciones antiguas. Por eso el muro Milán y la lumbrera de anillos desplazaron a la flotada en la zona lacustre, y por eso el aire

En el ejemplo de rendimiento, el factor de utilización de 0.35 no es pesimismo: es lo que resulta al sumar las herramientas que se cambian, las dovelas que no llegan y la rezaga que no sale

comprimido, que funcionaba, salió de la práctica. En cimentaciones, una lumbrera sobrecompensada se parece más a un barco que a un edificio: no se trata de cargar el suelo, sino de que el suelo no note que está ahí.

Las decisiones de excavación que se tomaron en el Túnel Emisor Oriente se describen en los capítulos 14 y 15.



Parte I · Líneas de conducción

6

Materiales

Clasificación, propiedades y bancos de materiales de una obra de conducción

Un tubo no se escoge por catálogo. Se escoge contra cinco preguntas: presión, diámetro, terreno, agua y costo de mantenimiento. A diámetros de varios metros no existe nada comercial de acero ni de plástico, y entonces el revestimiento se arma en sitio con concreto o se hace en anillos de dovelas colocados detrás de una tuneladora. A diámetros chicos el problema es el contrario: hay tanta oferta que la elección se decide por la unión, la corrosión y el costo de operar.

Antes de hablar de tubos, el capítulo ordena los materiales del terreno: cómo se clasifican suelos y rocas, cómo se califica la dificultad de excavarlos y de dónde sale el agregado que se vuelve concreto. Después recorre ocho materiales de conducción, el revestimiento de túnel y la protección contra la corrosión, y cierra con los bancos de materiales, los materiales innovadores y un cuadro comparativo. El uso de estos materiales en el Túnel Emisor Oriente se describe en la Parte II.

01

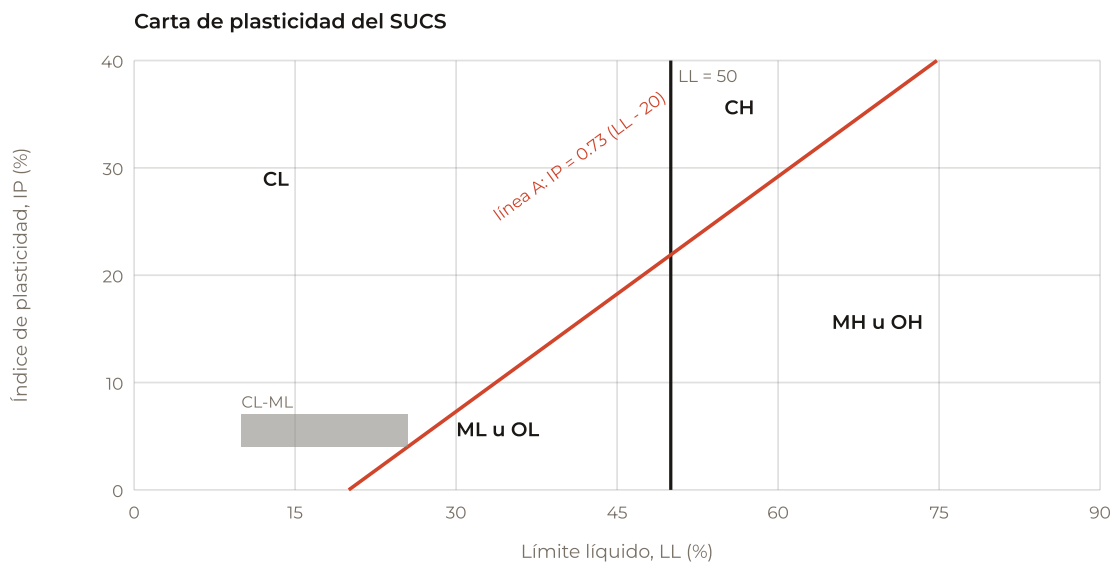
Clasificación de los materiales de construcción

Los materiales que interesan a una obra de conducción son de dos familias. Los del terreno, que se excavan, se rellenan o se trituran para hacer agregado, y los manufacturados, como el tubo, la dovela o el concreto. Cada familia tiene su clasificación, y no son intercambiables: una arcilla de alta plasticidad puede ser un material fácil de excavar y, a la vez, un mal material para un terraplén.

SUELOS: TAMAÑO DE GRANO Y PLASTICIDAD

La clasificación de suelos más usada separa los de grano grueso, gravas y arenas, en los que más de 50 % de las partículas es mayor de 0.075 mm, de los de grano fino, limos y arcillas, en los que más de 50 % es menor de ese tamaño. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), normado por la ASTM D2487, afina esa división con la granulometría y con los límites de consistencia del material que pasa la malla de 0.075 mm (ASTM D2487; los ensayos se describen en el capítulo 4). Cada suelo recibe un símbolo de dos letras: la primera indica el tipo (G grava, S arena, M limo, C arcilla, O orgánico) y la segunda, la graduación o la plasticidad.

GRUPO	SÍMBOLOS	CÓMO SE RECONOCE	QUÉ SIGNIFICA EN OBRA
Gravas	GW, GP, GM, GC	Más de la mitad de la fracción gruesa queda retenida en la malla de 4.75 mm; W bien graduada, P mal graduada, M con finos limosos, C con finos arcillosos	Bien graduadas y limpias, son buen agregado y buen relleno compactado; con finos se vuelven sensibles al agua
Arenas	SW, SP, SM, SC	Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla de 4.75 mm	Igual criterio; las arenas limpias y uniformes se erosionan con facilidad
Limos y arcillas de baja plasticidad	ML, CL, OL	Límite líquido menor de 50	Se compactan con humedad controlada; el limo es susceptible a la erosión interna
Limos y arcillas de alta plasticidad	MH, CH, OH	Límite líquido de 50 o más	Compresibles y, en el caso de la arcilla, con expansión y contracción; poco recomendables para terraplén
Turba	Pt	Suelo orgánico fibroso de color oscuro	No sirve como apoyo ni como relleno; se retira



Elaboración propia con ASTM D2487; el límite de 50 y los símbolos son los de la tabla del capítulo.

Figura 6.1. Carta de plasticidad

La carta se usa así. Con la fracción fina del suelo se miden el límite líquido, que es la humedad a la que el suelo pasa de plástico a fluido, y el límite plástico, la humedad a la que deja de poder moldearse. Su diferencia es el índice de plasticidad. Se ubica el punto en la gráfica y la zona donde cae da el símbolo (ASTM D2487). La línea A arranca en un límite líquido de 20 y sube con una pendiente de casi tres cuartos; un punto por encima es arcilla inorgánica y por debajo es limo o suelo orgánico. En obra, una arcilla CH, de alta plasticidad, se hincha con la humedad y se contrae al secarse, por lo que no conviene como apoyo directo de un tubo ni como relleno de acostillado; una arcilla CL de baja plasticidad, compactada con humedad cercana a la óptima, sí sirve como relleno de zanja. Los limos ML y MH pierden resistencia con el agua y se erosionan, de modo que alrededor de una tubería con fugas pueden formar huecos. Para el apoyo de un tubo el orden va de mejor a peor así: grava y arena bien graduadas, arena limosa, arcilla de baja plasticidad, limo y, al final, arcilla de alta plasticidad y turba, que se sustituyen.

La clasificación sirve para decidir qué hacer con el suelo: si se puede dejar como apoyo de un tubo, si se debe sustituir, si es utilizable como relleno de zanja o si se manda a banco de tiro. Un suelo con doble símbolo, como GP-GM o CL-ML, es uno que cae en la frontera entre dos grupos (ASTM D2487).

SUELOS BLANDOS, SUELOS FIRMES Y ROCAS POR RESISTENCIA

Para túneles y excavaciones profundas importa más la capacidad resistente. Un suelo blando es el que, por el acomodo y el tamaño de sus partículas, tiene baja capacidad de carga, con resistencia a la compresión simple de hasta 0.1 MPa. Un suelo firme tiene una resistencia elevada, que puede llegar a 1 o 1.25 MPa, valor que se acepta como frontera entre los suelos y las rocas blandas. Esa frontera ha ido bajando en las clasificaciones, hasta quedar en 1 o 1.25 MPa porque algunas rocas muy blandas presentan resistencias de ese orden.

ROCAS POR SU ORIGEN

Una roca es un agregado de uno o varios minerales con fuertes uniones cohesivas. Su comportamiento depende de su origen y de su estructura, es decir, del conjunto de discontinuidades que la atraviesan (estratificación, juntas, fallas). Por su origen, las rocas

son de tres tipos.

1. Ígneas, formadas por la solidificación del magma. Las intrusivas solidifican a profundidad y desarrollan cristales grandes, como el granito. Las extrusivas solidifican en la superficie y tienen cristales pequeños o ninguno; entre ellas están las piroclásticas, de ceniza y fragmentos expulsados por un volcán: las tobas, los aglomerados y las brechas.
2. Sedimentarias, formadas por la acumulación y la compactación de fragmentos de otras rocas, por la precipitación química de minerales disueltos o por la acumulación de restos de animales o plantas. Las calizas y el yeso son rocas sedimentarias no clásticas.
3. Metamórficas, que resultan de transformar una roca existente por cambios de presión y temperatura. Pueden ser foliadas, con minerales orientados, o no foliadas.

La mecánica de rocas distingue dos escalas: la roca intacta, que es la que se prueba en una muestra de laboratorio, y el macizo rocoso, que incluye los bloques y sus discontinuidades y se comporta como un medio discontinuo, anisótropo y heterogéneo.

CLASIFICACIÓN PARA EXCAVACIÓN: MATERIALES I, II Y III

Para presupuestar y programar una excavación se clasifica el material según la dificultad de moverlo, con tres categorías de uso común en México.

CLASE	CÓMO SE EXCAVA A MANO	CÓMO SE EXCAVA CON MÁQUINA	RESISTENCIA
Material I	Con pala, sin necesidad de pico	Escrepa enganchada a un tractor de orugas de 90 a 110 hp, sin arado	Suelos blandos no cementados, hasta 2.5 t/m ² (unos 25 kPa)
Material II	Con pico y pala	Tractor de orugas con cuchilla de 140 a 160 hp o pala mecánica de al menos 1 m ³ , sin explosivos	Hasta 40 t/m ² (unos 390 kPa) en compresión simple
Material III	Solo con cuña y marro, martillo neumático, explosivos o gel expansivo	Martillos neumáticos adaptados a equipo pesado	Del orden de 400 t/m ² (unos 3.9 MPa)

Dato técnico: la clasificación en tres clases aparece con distintos umbrales de resistencia según la dependencia y el contrato; la tabla usa un solo conjunto de umbrales. En una obra pública, las bases del contrato y las especificaciones de la dependencia dicen qué definición aplica, y la clase que se paga se verifica en campo.

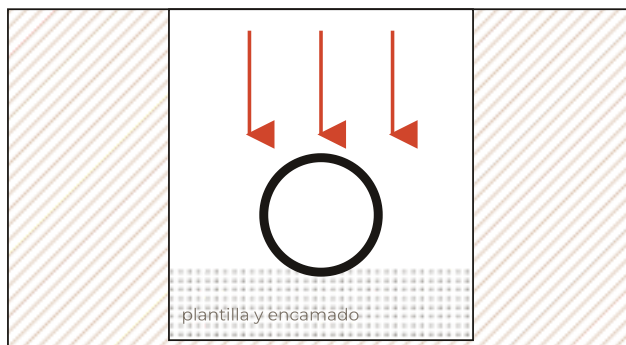
La misma fuente añade dos clasificaciones de la excavación que cambian el precio. Por profundidad: de 0 a 2.00 m, de 2.01 a 4.00 m y de 4.01 a 6.00 m. Por presencia de agua: en seco, en material saturado y en agua, cuando el nivel freático no se puede abatir con bombeo de forma económica o técnica. Los métodos de excavación y la maquinaria que corresponde a cada clase se tratan en el capítulo 5.

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DE CONDUCCIÓN

Los materiales manufacturados se clasifican por su composición y por cómo trabajan: rígidos como el concreto y el acero, flexibles como el PEAD y el PVC, y compuestos como el PRFV. La tabla 6.1, al final del capítulo, los compara por diámetro, presión, rugosidad, vida útil y unión.

Tubo rígido (concreto)

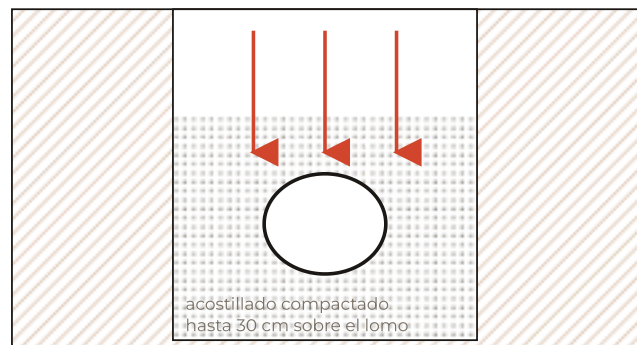
La pared resiste la carga sola;
el apoyo repartido en la plantilla evita puntos duros



Si el tubo es muy resistente, el suelo exige menos
Esquema sin escala. Elaboración propia con Conagua (2009, pp. 89 y 116-117).

Tubo flexible (PEAD, PVC)

Se deforma bajo la carga y el suelo de los costados
la sostiene: el acostillado es parte de la estructura



Si el suelo está mal compactado, el tubo se ovaliza

Figura 6.2. Tubo rígido y tubo flexible bajo carga

La diferencia entre las dos familias explica casi todos los criterios de instalación. Un tubo rígido, como el de concreto, soporta la carga del relleno y del tránsito con su pared, y falla por agrietamiento si el apoyo tiene huecos o piedras. Un tubo flexible, como el de PEAD, PVC o PRFV, se ovaliza un poco al cargarse y transmite el empuje al suelo de los costados, que lo sostiene. Por eso en un tubo flexible el acostillado, el relleno compactado a los lados, es parte de la estructura, y una compactación deficiente es causa común de ovalización excesiva. En el tubo rígido importan más la plantilla y el encamado, que reparten el peso en el ancho del apoyo. La consecuencia práctica es que a un tubo flexible no se le puede dar un relleno cualquiera: se pide material seleccionado y compactación por capas, y se revisa la deformación después del relleno. A un tubo rígido se le tolera un suelo más variado, pero se le exige un apoyo continuo.

02

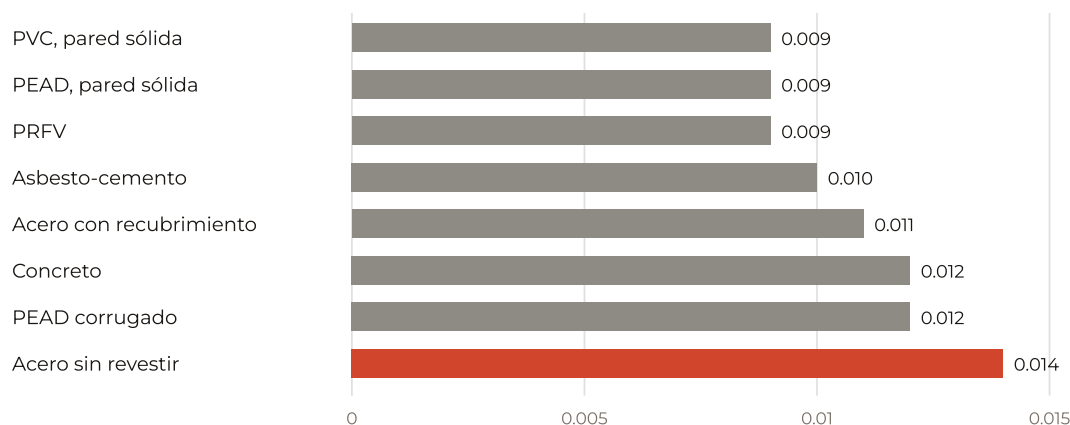
Ocho materiales, cada uno con su lugar

Concreto simple y reforzado para gravedad y diámetros grandes. Dovelas para túneles de escudo. Acero donde hay presión alta o cruces. Hierro dúctil en líneas a presión que piden junta flexible. PEAD donde el terreno se mueve. PVC en redes chicas y medias. PRFV donde se busca ligereza y resistencia química. Y el asbesto-cemento, que se dejó de fabricar y queda en redes antiguas.

La rugosidad de cada material entra en la ecuación de Manning del capítulo 2:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

donde V es la velocidad media (m/s), n es el coeficiente de Manning (adimensional), R_h es el radio hidráulico (m) y S es la pendiente de la línea de energía (m/m). Un n menor significa una pared más lisa y más caudal para la misma pendiente.

Coefficiente de rugosidad de Manning, n Menor n significa pared más lisa y más caudal con la misma pendiente

Elaboración propia con Conagua (2009, Tabla 3.7), valores de la Tabla 3.1 de este capítulo.

Figura 6.3. Coeficiente de Manning por material

La diferencia parece pequeña en las cifras, pero pesa. De 0.009 a 0.014 la rugosidad crece casi 55 %, y a igual diámetro y pendiente el caudal baja en la misma proporción inversa. Un colector de concreto con n de 0.012 lleva alrededor de tres cuartos del caudal que llevaría el mismo diámetro en PVC (cálculo propio con los valores de la gráfica), así que a veces un material liso permite un diámetro menor. Además la rugosidad cambia con los años: el concreto de un colector de aguas negras se desgasta y se cubre de limo, y un tubo de acero sin revestir se tuberculiza. El recubrimiento de mortero de cemento en hierro dúctil busca conservar la pared lisa; DIPRA (2025) publicó una prueba de flujo en una tubería con mortero de 97 años de servicio. Los valores de la gráfica son de proyecto y no sustituyen los datos del fabricante ni una medición en campo.

03

Acero

El acero para conducción es tubo de placa soldada o sin costura, con pared delgada respecto al diámetro. Admite presiones altas y diámetros grandes y resiste flexión y golpes, así que se usa en cruces de ríos, carreteras y barrancas, en sifones, en tramos expuestos y como camisa de otras tuberías.

La norma AWWA C200 cubre el tubo de acero soldado de 6 pulgadas (150 mm) y mayor para agua potable, cruda y reciclada, y desde su revisión reciente también para aguas residuales; abarca la fabricación, la soldadura, las tolerancias de peso y dimensión, la preparación de extremos, las piezas especiales, la inspección y las pruebas (AWWA, C200). En el MAPAS el acero de tubería comercial aparece de 50.4 a 355.6 mm, y galvanizado de 50.4 a 152.4 mm (Conagua, s. f., libro 12, Tabla 2.4).

Se une por soldadura en sitio, con bridas o con juntas mecánicas. La soldadura da continuidad estructural y obliga a controlar la calidad de cada cordón. Se defiende del suelo, que ataca por fuera, y del agua, que ataca por dentro, con un recubrimiento interior (mortero de cemento, epóxico), un recubrimiento exterior (pintura, cinta, polietileno extruido) y, en ductos largos enterrados, con protección catódica (más adelante en este capítulo).

La hidráulica del acero con recubrimiento interior es la de una pared lisa: $n = 0.011$ para acero soldado con recubrimiento interior y $n = 0.014$ para acero sin revestimiento.

EL ESPESOR POR PRESIÓN INTERIOR

El espesor mínimo de la pared por presión interior sale de la fórmula de Barlow:

$$t = \frac{P D}{2 \sigma_{adm}} + t_c$$

donde t es el espesor de pared (mm), P es la presión interior de diseño (MPa), D es el diámetro exterior del tubo (mm), σ_{adm} es el esfuerzo admisible del acero (MPa) y t_c es el sobreepesor por corrosión (mm). Con 1.5 MPa en un tubo de 1,000 mm, el espesor por presión es de unos 6 mm y con el sobreepesor llega a 7.5 mm.

El espesor real lo fija además la rigidez para el manejo y el vacío, que en diámetros grandes suele gobernar sobre la presión. Para esa revisión y para el diseño completo se usa el Manual M11 de AWWA.

Hay un uso del acero que no tiene que ver con la presión. En el Drenaje Profundo de la Ciudad de México, un conducto de acero hincado de una lumbrera a otra alimentó un cárcamo de bombeo, con límite práctico de longitud y de diámetro de 4.0 m; cuando el

tramo era muy largo, el mismo conducto se hacía de concreto con dovelas. La elección del acero vino del procedimiento de instalación, el hincado, y no de la presión del agua.

04

Hierro dúctil

Es una fundición con grafito esferoidal, que resiste presión y golpes mejor que el hierro gris. Se produce como tubo y como piezas especiales (codos, tees, válvulas), casi siempre con un revestimiento interior de mortero de cemento.

La norma ISO 4179 fija la naturaleza, el método de aplicación, el estado superficial y el espesor mínimo del mortero de cemento interior de los tubos y accesorios de hierro dúctil, con dos fines: mejorar las propiedades hidráulicas respecto del tubo sin revestir y prevenir la corrosión. Para fluidos agresivos se aumenta el espesor, se cambia el cemento o se pone un recubrimiento sobre el mortero. En el ámbito AWWA, la norma C104/A21.4 cubre el mortero aplicado en taller, la C115 el tubo con bridas de 3 a 64 pulgadas (80 a 1,600 mm) y la C151 el tubo de 3 a 64 pulgadas fundido por centrifugación. El espesor del tubo se diseña con la AWWA C150 para clases de presión de 150 a 350 psi (1,034 a 2,413 kPa). La ISO 2531 cubre tubos, accesorios y piezas de DN 40 a DN 2600, clasificados por presión de funcionamiento admisible. El MAPAS lista tubo de hierro fundido de 100 a 1,600 mm (Conagua, s. f., libro 12, Tabla 2.4).

Se une con junta de espiga y campana y empaque de elastómero, que permite una pequeña deflexión angular; con bridas en cámaras y cruces; y con juntas mecánicas.

05

Concreto simple, reforzado y presforzado

El concreto es el material de los grandes diámetros y de la baja presión, y tiene tres variantes.

El concreto simple lleva cemento, agregados y agua, sin acero. Se usa en tubos de gravedad de diámetro moderado, plantillas y rellenos estructurales, y no tolera tensión.

El concreto reforzado lleva varilla corrugada que toma las tensiones. Sirve para colectores, cajas, lumbreras y revestimientos de túnel. El agua residual lo ataca por vía química: sus sulfatos y ácidos atacan la pasta de cemento, y por eso en agua residual se pide cemento resistente a sulfatos (tipos RS) y concreto de baja permeabilidad. Un ejemplo documentado es el Emisor Central: durante la rehabilitación de la zona L-8A a L-8B se encontró acero expuesto con corrosión de 100 % en los costados, y en la clave ya no había acero por la abrasión y la corrosión de las aguas negras. La lección de materiales es que el concreto de un colector de aguas negras debe diseñarse contra gases ácidos, no solo contra carga.

El revestimiento de un túnel circular bajo presión radial uniforme trabaja casi todo a compresión, como un anillo: el empuje crece con la presión exterior y con el radio, y el esfuerzo baja con el espesor. Por ejemplo, un anillo de 0.30 m de espesor y 2.5 m de radio bajo 250 kPa trabaja a unos 2.1 MPa, una fracción pequeña de un concreto de 35 MPa. El diseño real revisa además la flexión por cargas no uniformes, que es lo que domina en suelos blandos.

El concreto presforzado combina, en los tubos de presión, un cilindro de acero con alambre de presfuerzo enrollado y recubierto con mortero. La norma AWWA C301-14 cubre la fabricación de tubo de concreto presforzado con cilindro de acero entre 16 y 144 pulgadas (410 a 3,660 mm), y el diseño estructural queda en la AWWA C304. Un fabricante anuncia tubo de cilindro embebido de 54 a 144 pulgadas para presiones de hasta 400 psi; es una referencia comercial, no un límite normativo. El MAPAS lo lista de 760 a 2,750 mm (Conagua, s. f., libro 12, Tabla 2.4). En México se ha usado en acueductos: el proyecto del Túnel Emisor Poniente II contempló desviar el acueducto Teoloyucan, de concreto presforzado de 72 pulgadas de diámetro interior.

La rugosidad de un concreto liso de gran diámetro se tomó como $n = 0.010$ y $C = 160$ en el diseño de los interceptores del Drenaje Profundo, como valores de diseño y no los reales al término de la obra. El concreto con los años se vuelve más rugoso y baja el gasto

real respecto del de diseño. El MAPAS da $n = 0.012$ para concreto. En tubo se une con junta de espiga y campana con empaque de hule; en túnel, con juntas entre dovelas.

PROBAR EL CONCRETO

La resistencia que se pide en proyecto no es la que se dosifica. Como los resultados de obra varían, la mezcla se diseña para una resistencia promedio mayor, que suma a la especificada un múltiplo de la desviación estándar de la planta, con el criterio del reglamento ACI 318. El control se hace con cilindros de prueba tomados en la dosificadora, a varias edades, y con el revenimiento medido con el cono de Abrams. En una planta de dovelas hay además una regla de desmolde: la pieza sale del molde cuando el cilindro curado en las mismas condiciones alcanza un porcentaje fijado en proyecto de la resistencia especificada, lo bastante alto para manejarla sin dañarla.

06

PVC

El policloruro de vinilo rígido es liso, ligero y barato. Se une con cemento solvente o con espiga y campana y empaque, y domina las redes de agua y alcantarillado de diámetro pequeño y medio. El MAPAS lo lista de 50 a 630 mm (Conagua, s. f., libro 12, Tabla 2.4) y da $n = 0.009$ para PVC de pared sólida o corrugada. La hoja técnica de un fabricante para sus sistemas de alcantarillado de PVC da $C = 150$ (Pavco Wavin).

Resiste la corrosión y la abrasión moderada. No conviene a la intemperie prolongada, porque los rayos UV lo degradan, ni en diámetros grandes ni donde haya golpes fuertes. En México, la NOM-001-CONAGUA-2011 fija las especificaciones mínimas de desempeño, y por tanto de hermeticidad, de los productos de sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario. Se publicó en el DOF el 17 de febrero de 2012 y entró en vigor el 16 de junio de 2012 (Secretaría de Economía, catálogo de normas).

07

PEAD

El polietileno de alta densidad es flexible y se fabrica en tramos largos que se unen por termofusión, de modo que forma una línea sin juntas con empaque.

Es la respuesta a terrenos que se asientan. Un fabricante lo ofrece de ½ a 24 pulgadas (unos 610 mm) y declara una vida útil mínima de 50 años (Pavco Wavin); el MAPAS lo lista de 12 a 1,000 mm (Conagua, s. f., libro 12, Tabla 2.4). El grado PE100 se define por una resistencia mínima requerida de 10 MPa a los 50 años.

Su límite es la rigidez anular baja: en diámetros grandes se recurre a paredes gruesas o estructuradas. La presión nominal (PN) es la presión de operación máxima del tubo a 20 °C, y depende de la serie (relación entre diámetro y espesor, SDR). En Manning, el MAPAS da $n = 0.009$ para polietileno de pared sólida y $n = 0.012$ para corrugado o estructurado.

08

PRFV (poliéster reforzado con fibra de vidrio)

Es un compuesto de resina termofija con refuerzo de fibra de vidrio, liso, ligero y resistente a la corrosión. La norma AWWA C950 cubre tubería de presión de fibra de vidrio de 1 a 156 pulgadas (25 a 4,000 mm), con clases de presión de 50 a 450 psig (345 a 3,103 kPa) y rigideces de 9, 18, 36 y 72 psi; la edición de 2020 es la vigente. El diseño hidráulico y la instalación se tratan en el Manual M45 de AWWA, que es una práctica recomendada y no una norma de cumplimiento. Se une con coples de PRFV y empaques o con juntas de campana. El MAPAS da $n = 0.009$.

También aparece como material de anclas en excavaciones: las anclas de fibra de vidrio se instalan en una perforación llena de lechada para no oponerse al proceso de excavación.

Asbesto-cemento

Fue un tubo de cemento reforzado con fibras de asbesto, ligero y barato, muy usado en México en redes de agua. Se dejó de fabricar por el riesgo del asbesto al cortarlo o demolerlo, aunque quedan redes antiguas. El proceso y uso del asbesto se rige en México por la NOM-125-SSA1-2016, publicada en el DOF el 28 de febrero de 2017 y vigente desde el 1 de septiembre de 2018. Al intervenir una línea de este material se aplican protocolos de manejo y se sustituye por PEAD, PVC o hierro dúctil. El MAPAS lista el fibrocemento de 75 a 2,000 mm y da $n = 0.010$.

Revestimientos de túnel

Un túnel excavado en suelo blando no se sostiene solo. En la zona lacustre del Valle de México el diseño del revestimiento se hace en dos etapas. El revestimiento primario sustituye el confinamiento y evita deformaciones inmediatas; es temporal y corresponde al periodo de construcción. El secundario o definitivo se coloca encima y resiste las cargas de largo plazo. La carga con que se diseñan depende de las propiedades mecánicas del suelo, de su relación esfuerzo-deformación-tiempo y de la geometría del túnel.

DOVELAS PREFABRICADAS

Es el revestimiento primario de los túneles de escudo. Una dovela es un segmento curvo de concreto armado hecho en fábrica. Unidas en círculo forman un anillo, y los anillos colocados detrás de la tuneladora forman el revestimiento. La pieza llega curada y probada, pero exige planta, moldes de precisión, grúas pórtico, patio de almacenaje y

transporte hasta el frente. El anillo se arma con un número de piezas (por ejemplo seis dovelas y un candado, o siete y un candado), y el candado entra al último porque el anillo se cierra empujándolo, como la clave de un arco.

El peso de cada anillo decide el equipo de manejo. Un anillo de 3.4 m de radio exterior, 3.1 m de radio interior y 1.5 m de ancho pesa unas 22 t, y dividido en siete piezas cada una pesa unas 3 t. La grúa del patio y el erector del escudo se dimensionan para esa carga. Las piezas se apilan sobre polines para no concentrar esfuerzos, y la figura siguiente es el esquema de un patio de dovelas con su grúa pórtico.

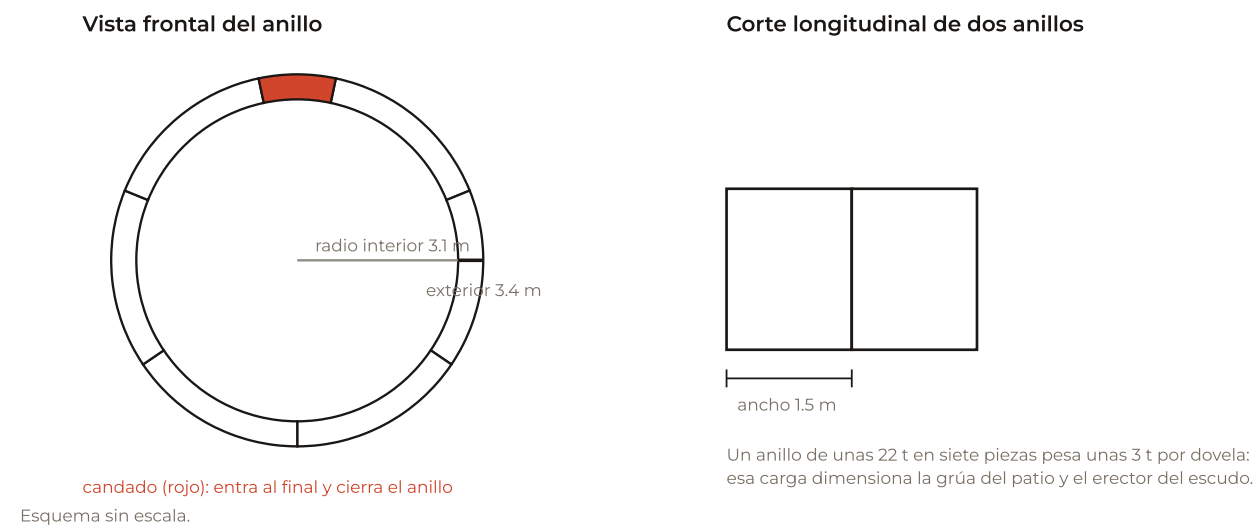


Figura 6.4. Anillo de dovelas y corte longitudinal

Los datos reales dan el intervalo de diseño. En el Túnel Emisor Oriente la planta de Ecatepec produjo anillos de 0.35 m de espesor, 1.5 m de ancho y 7.70 m de diámetro interior, y se reportó concreto de 500 a 550 kg/cm² a 28 días. Las caras del anillo no son exactamente paralelas, sino ligeramente cónicas, y al combinar anillos se logra girar el túnel en las curvas. Una vez armado, el hueco de pocos centímetros entre el anillo y el terreno se rellena de manera continua con mortero desde la cola del escudo, para limitar el asentamiento en superficie. En la cola, cepillos de alambre y grasa retienen ese mortero. Los defectos que se vigilan son el despostillado de aristas por mal manejo, las fugas en las juntas y el desplazamiento entre anillos si la inyección se retrasa.

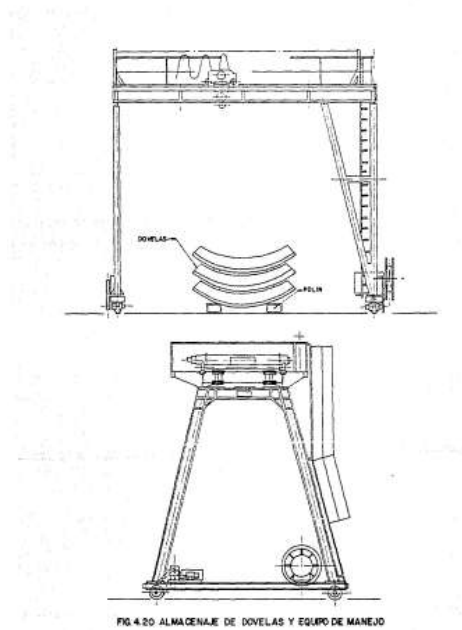


Figura 6.5. Almacenaje de dovelas sobre polines y grúa pórtico para su manejo

Las juntas entre anillos llevan sellos. Hay dos sistemas de sello perimetral entre dovelas: el hule de neopreno y la hidrotita expansiva, un material que se hincha al hidratarse hasta unas diez veces su espesor original para cerrar la junta. Si el sello se daña por contacto entre el revestimiento y el cuerpo del escudo, hay fugas de mortero de inyección o de lodo hacia el interior.

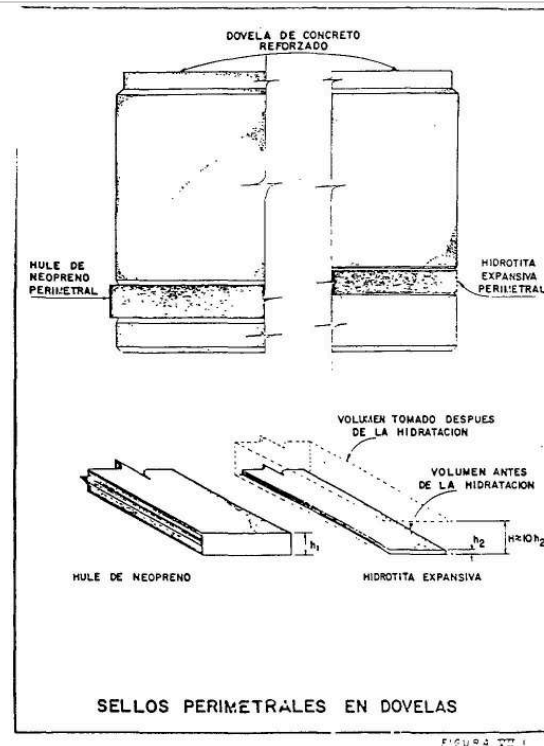


Figura 6.6. Sellos perimetrales de neopreno y de hidrotita expansiva en las juntas de dovelas

CONCRETO LANZADO

Es mortero o concreto proyectado a presión sobre la superficie excavada, con o sin marcos metálicos y anclas. Se usa como soporte primario en lumbreras y túneles convencionales, y en rehabilitación. En el Emisor Central, la rehabilitación de L-8A a L-8B empezó con pruebas de adherencia de concreto lanzado sobre seis productos adhesivos de distintas marcas y terminó con un cambio de procedimiento por cimbra telescópica en lugar de concreto lanzado.

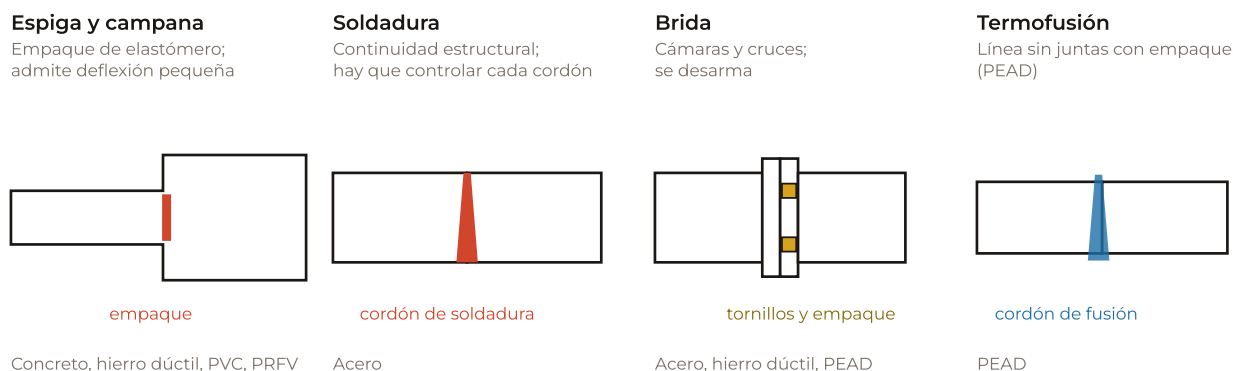
REVESTIMIENTO SECUNDARIO

El revestimiento definitivo se cuela en sitio, de concreto reforzado, sobre el primario de dovelas. Se cuela con cimbra metálica telescópica que avanza por tramos, y se vibra, se cura y se descimbra a una edad que fija el proyecto.

JUNTAS Y EMPAQUES EN TÚNEL

En el túnel hay juntas de cuatro tipos.

1. Juntas entre dovelas. Llevan sellos de neopreno o de hidrotita, como se describió.
2. Sello de entrada y salida en lumbreras. El portal se acondiciona con un tímpano de concreto reforzado y un sello de neopreno anclado, formado por un anillo de neopreno y placas metálicas de seguridad que impiden que el sello se abra y que escape material a la lumbrera cuando la máquina avanza.
3. Cola del escudo. Cepillos de alambre y grasa retienen el mortero de relleno del espacio anular.
4. Juntas de colado. En un detalle de lumbrera aparecen perfiles hidroexpansivos de efecto retardado y conectores mecánicos entre elementos.



Esquema sin escala. Elaboración propia con las normas AWWA C200, ISO 2531 y las fichas de Pavco Wavin citadas en el capítulo.

Figura 6.7. Cuatro formas de unir tubos

La junta es el punto débil de una tubería, y elegirla es una decisión estructural y también hidráulica. La de espiga y campana es la más común en tubo rígido: la espiga entra en la campana y el hule queda comprimido, de modo que sella y admite una deflexión pequeña, lo que absorbe asentamientos del terreno sin romper. La soldadura en acero hace que la línea trabaje como una sola pieza, pero cada cordón requiere control de calidad. La brida se reserva a cámaras de válvulas, cruces y puntos que deben poder desarmarse. La termofusión en PEAD forma una línea sin juntas con empaque y por eso responde bien a terrenos que se asientan (Pavco Wavin, ficha de PEAD). En todos los casos la junta es donde se originan las fugas de una red y la entrada de agua freática a un drenaje, por lo que la hermeticidad de cada tramo se prueba antes de rellenar la zanja.

Protección anticorrosiva y catódica

El agua residual de un colector genera ácido sulfhídrico, que se convierte en ácido sulfúrico en la corona del conducto y ataca al concreto y al acero. En el Emisor Central el resultado se vio como pérdida de recubrimiento en la clave y corrosión total en los costados; los niveles de H_2S medidos durante la inspección fueron de 0 a 20 ppm y los de oxígeno de 19 a 21 %.

Hay tres defensas, en orden creciente de costo.

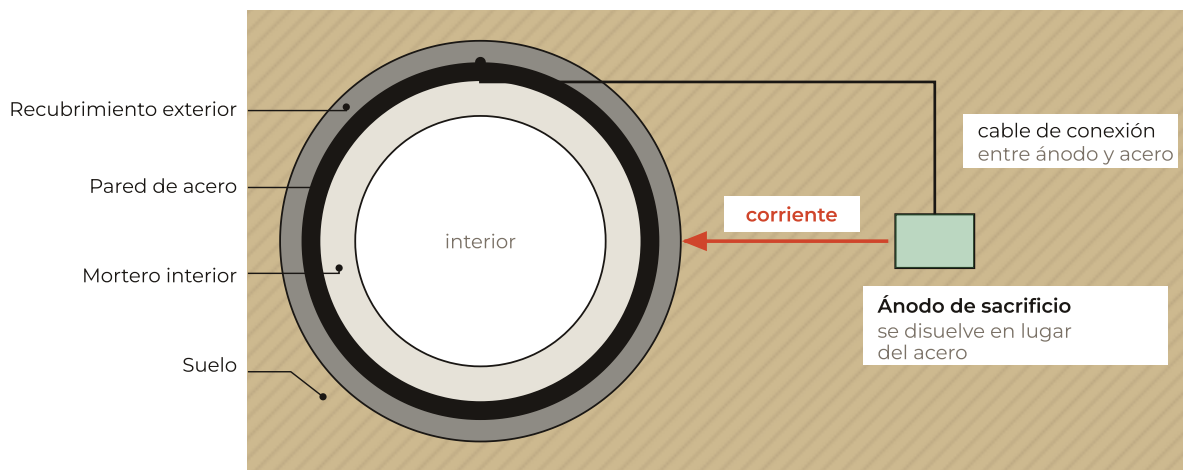
1. Mezcla y recubrimiento. Cemento resistente a sulfatos (tipos RS) y concreto de baja permeabilidad.
2. Recubrimiento polimérico. En L-8A a L-8B se instaló T-Lock, una lámina de cloruro de polivinilo que se ancla mecánicamente en la pared interior del concreto y forma una barrera flexible de corrosión.
3. Protección catódica. En tubería de acero enterrada se baja el potencial del metal con ánodos de sacrificio o con corriente impresa, de modo que el metal se comporte como cátodo y no se disuelva.

El criterio de protección más usado para acero enterrado es un potencial polarizado igual o más negativo que -850 mV contra un electrodo de cobre-sulfato de cobre, con las caídas de tensión eliminadas, según NACE SP0169 (hoy AMPP SP0169). El tamaño de un sistema de ánodos de sacrificio se calcula con la corriente que pide la superficie a proteger y la capacidad del ánodo. Para una tubería de 0.9 m y 1,000 m bien recubierta, bastan unos 27 kg de magnesio para 20 años, y la cifra sube casi en proporción si el recubrimiento se daña. Por eso el recubrimiento y la protección catódica se diseñan juntos.



Figura 6.8. Colocación de la lámina T-Lock dentro de un túnel de drenaje con cimbra telescópica

Tubería de acero enterrada con ánodo de sacrificio



Espesores sin escala. Técnica general de ingeniería.

Figura 6.9. Corte de una tubería de acero con recubrimiento interior, pared, recubrimiento exterior y ánodo de sacrificio enterrado

Bancos de materiales

En obra la palabra "banco" nombra cuatro cosas distintas: una referencia topográfica, una fuente de material, un destino para el material sobrante y un lugar de paso donde se guarda lo que se usará después. Solo la segunda es un banco en sentido geológico.

TIPO	QUÉ ES	FUNCIÓN EN LA OBRA
Banco de nivel	Punto fijo de cota conocida al que se refieren las nivelaciones	Controlar trazo, profundidades y asentamientos
Banco de materiales o de préstamo	Sitio del que se extrae suelo, grava, arena o roca; puede ser préstamo lateral o préstamo de banco	Terraplenes, rellenos, agregados para concreto
Banco de desperdicio o de tiro	Sitio donde se deposita el material que la obra no reutiliza	Destino de la rezaga y del producto del despalle
Banco de almacenamiento o de acopio	Área donde se guardan materiales antes de usarlos	Estibar dovelas, acero, cemento, agregados

BANCO DE NIVEL

Se llama nivelación al trabajo que determina la diferencia de alturas de uno o varios puntos respecto a uno conocido, el banco de nivel, que puede ser verdadero o supuesto; de él depende la precisión de toda la obra. En suelos que se hunden, como los del Valle de México, el banco de nivel profundo es un punto fijo que no sufre los asentamientos de la superficie: una columna metálica delgada anclada a un muerto de concreto apoyado en un estrato indeformable, de suelo duro o de roca. La instalación y el uso de los bancos de nivel del TEO están en el capítulo 13.

BANCO DE MATERIALES O DE PRÉSTAMO

Es el sitio de donde se extraen suelo, grava, arena o roca para usarlos en la obra, como agregado para concreto, relleno, terraplén, enrocamiento o pavimento. En la práctica de terracerías se distinguen dos formas. En el préstamo lateral el material se toma de franjas contiguas al trazo, dentro o junto al derecho de vía, con acarreo mínimo pero con calidad la que dé el terreno. En el préstamo de banco se explota un sitio aparte y el material se acarrea hasta la obra, lo que permite escoger material de mejor calidad a cambio de un acarreo mayor. Según el material que ofrezcan, los bancos de préstamo se agrupan así.

TIPO	QUÉ SE EXTRAE	PARA QUÉ SIRVE	CÓMO SE EXPLOTA
Banco de suelo o tepetate	Suelo, tepetate o material fino	Terraplenes, rellenos de zanja, plantillas	Despalme y corte con tractor, cargador o excavadora; a veces con ripper
Banco aluvial	Grava y arena de cauces o depósitos fluviales	Agregado para concreto y filtros	Extracción con cargador o draga y cribado en planta
Banco de roca o cantera	Roca sana (caliza, basalto y otras)	Agregado triturado, enrocamiento, escollera	Barrenación y voladura, carga, trituración y cribado

La clase de material de la sección anterior decide el método: un banco en material I se abre con maquinaria de movimiento de tierras, uno en material II pide ripper o pala potente, y uno en material III, voladura o martillo.

BANCO DE DESPERDICIO O DE TIRO

Es el sitio donde se deposita el material que la obra no reutiliza, desde el producto del despalme hasta la rezaga de un túnel. El material extraído se lleva a bancos de tiro controlados, y el que resulta sano puede reservarse para rellenos de otras áreas. El tiro se tiende, se compacta y se restaura al terminar. En una obra de túnel es el destino de la rezaga; los bancos de tiro del TEO están en el capítulo 13.

BANCO DE ALMACENAMIENTO O DE ACOPIO

Es el área donde se guardan materiales antes de usarlos, con la clasificación y la protección que cada uno pide. En un túnel de dovelas son los patios de la planta, donde las piezas curadas se estiban sobre polines con grúa pórtico, y los patios de las lumbreras.

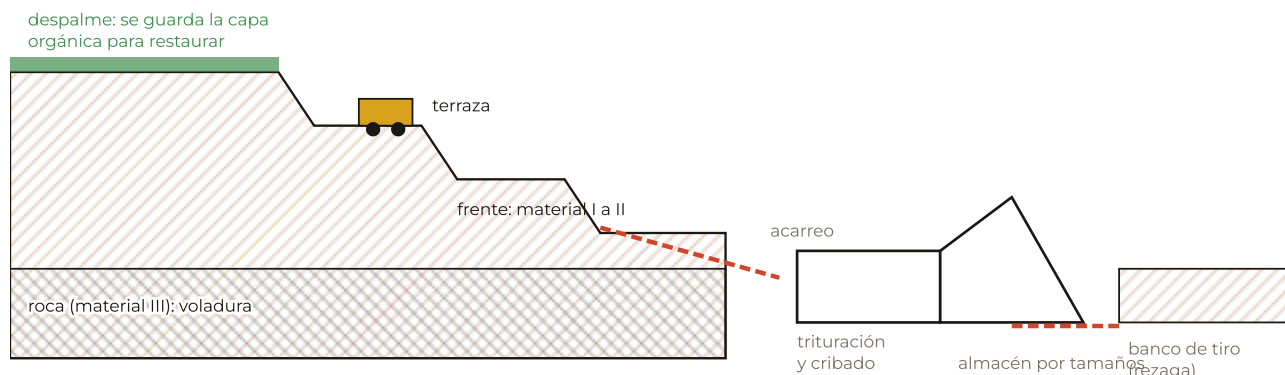
Los usados en el TEO están en el capítulo 13.

CÓMO SE EXPLOTAN

El orden de trabajo es casi el mismo en cualquier banco. Se despalma, es decir, se retira y se guarda la capa superficial con materia orgánica, que servirá para restaurar. Se abre el frente por bancos o terrazas, de modo que el talud sea estable y la maquinaria trabaje con seguridad. Se extrae, se carga y se acarrea. Si el material es agregado, pasa por trituración y cribado, y se almacena por tamaños para que no se mezcle. Al terminar, se restaura el sitio.

La terraza no es un detalle de dibujo: limita la altura de cada frente a lo que la maquinaria alcanza con seguridad y deja una berma que sostiene el talud. Un banco bien proyectado guarda el despálme aparte, desvía el agua de lluvia fuera del frente y deja al final un perfil que se pueda restaurar. En un caso real, para el concreto de las dovelas la grava caliza salió del banco La Valenciana, en Atotonilco de Tula, Hidalgo, y la arena del banco La Magdalena, en San Jerónimo Almanalco, Estado de México; uno es un banco de roca triturada y el otro de arena natural. Para el agregado, el material de roca pasa por trituración y cribado, y el almacén por tamaños evita que se mezclen graduaciones. Los errores frecuentes son abrir el banco sin estudio de volumen, de modo que se agota antes de terminar la obra, mezclar el despálme con el material útil y dejar taludes sin berma ni drenaje.

Cómo se explota un banco



Esquema sin escala. Elaboración propia con Cruz León (2016, pp. 42-43) y criterio general de ingeniería civil.

Figura 6.10. Explotación de un banco por terrazas

CÓMO SE ELIGE UN BANCO

La selección sigue seis pasos.

1. Se identifican los bancos posibles con cartografía e imagen de satélite.
2. Se muestrea el material y se prueba en laboratorio.
3. Se verifica el cumplimiento de los términos de referencia del contrato.
4. Se comparan distancia de acarreo, volumen disponible y costo.
5. Se tramitan los permisos. En obra pública, las bases pueden dejar a la dependencia la gestión de permisos y derechos de bancos de materiales antes de los trabajos.
6. Se controla la explotación durante la obra.

Las pruebas del paso 2 dependen del uso. Para un agregado de concreto se hacen granulometría (ASTM C136/C136M-25), densidad y absorción (ASTM C127 para la grava y C128 para la arena), sanidad con sulfatos (ASTM C88), desgaste en la máquina de Los Ángeles (ASTM C131/C131M-20, para agregado grueso menor de 37.5 mm; el mayor se prueba con la C535) y reactividad con los álcalis del cemento (ASTM C1260), y los resultados se comparan con la especificación del agregado, ASTM C33/C33M-24a o la NMX-C-111-ONNCCE-2018, vigente desde el 11 de enero de 2019. Para un terraplén se clasifica el suelo en el SUCS y se obtienen sus límites de consistencia, su peso volumétrico máximo y su humedad óptima.

QUÉ SE TRANSPORTA Y QUÉ SE EXCAVA

El volumen que se transporta no es el que se excava. Al romper el terreno aumenta su volumen, y los camiones se dimensionan con el volumen suelto, que resulta de multiplicar el volumen en banco por un factor de abundamiento. Con 100,000 m³ de rezaga de un suelo arcilloso y un abundamiento supuesto de 30 %, se transportan 130,000 m³, unos 9,300 viajes de camiones de 14 m³. En un túnel largo ese cálculo decide el número de camiones, el horario de salida de la rezaga y el tamaño del banco de tiro, y por eso el destino de la rezaga se define desde la MIA y no durante la obra (capítulo 13). El agregado para las dovelas y el concreto sale de bancos con pruebas de calidad y de reactividad, y cambiar de banco en obra obliga a repetir el diseño de mezcla.

13

Materiales innovadores

Un material nuevo se justifica si resuelve un problema que los tradicionales dejan abierto: el peso, la fisura, la corrosión o la huella de carbono. La tabla resume cuatro líneas, con su grado de madurez según la literatura revisada. El anexo de materiales y maquinaria innovadora retoma el tema para obras como el TEO.

MATERIAL	QUÉ ES	QUÉ PROBLEMA ATIENDE	MADUREZ
Dovelas con concreto reforzado con fibras	Concreto con fibras de acero o macrofibras sintéticas que sustituyen total o parcialmente la parrilla de varilla	Menos acero que habilitar, menos descascaramiento en el manejo y menor riesgo de corrosión del refuerzo	Hay guía de diseño específica (ACI 544.7R-16) y proyectos con segmentos de este tipo; con macrofibras sintéticas como único refuerzo la experiencia es más limitada

MATERIAL	QUÉ ES	QUÉ PROBLEMA ATIENDE	MADUREZ
Concreto autorreparable	Concreto con esporas de bacterias del género <i>Bacillus</i> que, con agua, precipitan carbonato de calcio y sellan fisuras	Fisuras finas que dejan pasar agua y aceleran la corrosión	Reparan fisuras de décimas de milímetro y requieren humedad; la evidencia es sobre todo de laboratorio
Cementantes alternativos y geopolímeros	Ligantes de escoria, ceniza volante o arcilla calcinada activados químicamente, en lugar de cemento Portland	Menor huella de carbono del ligante	Sus propiedades técnicas se comparan con las del Portland en usos específicos; la durabilidad a largo plazo sigue en estudio
Tubería y recubrimientos poliméricos	PEAD con termofusión, PRFV y láminas de PVC ancladas al concreto, como la T-Lock	Corrosión por gases ácidos, juntas con fugas, peso	Ya es práctica común en redes y se ha usado en rehabilitaciones de colectores

Sobre las fibras, el informe ACI 544.7R-16 reúne el historial de segmentos prefabricados con fibras en túneles de varios países y propone un procedimiento de diseño según los casos de carga que gobiernan: el manejo y el almacenaje, el transporte, el empuje de los gatos del escudo y las cargas del terreno. La guía de la ITA para dovelas prefabricadas con fibras y el fib Model Code son las otras referencias de diseño. Los estudios sobre dovelas reforzadas solo con macrofibras sintéticas son todavía escasos.

Sobre el concreto autorreparable, la idea es del grupo de Jonkers, en la Universidad Tecnológica de Delft, que empezó a estudiarlo en 2006 (TU Delft); su primer ensayo con esporas de bacterias afines a *Bacillus* se publicó en 2010. Las esporas de *Bacillus* permanecen inactivas mientras el concreto está sano y despiertan cuando una fisura deja entrar agua. Para proteger su supervivencia en la mezcla, las esporas y el lactato de calcio se encapsulan en partículas de arcilla expandida. Sin agua en la fisura no hay reparación, y la porción del sellado que se debe a las bacterias y la que se debe al curado natural del concreto aún se discute.

Los geopolímeros son ligantes activados con álcalis, hechos de escoria, ceniza volante y arcilla calcinada. Sus propiedades técnicas son comparables a las del cemento Portland en varios usos, con una huella de carbono mucho menor y posibles ventajas en aplicaciones particulares. El cemento Portland requiere quemar mucho combustible y descomponer caliza, procesos que liberan CO₂. La reducción real depende del activador químico y del transporte, de modo que cualquier cifra debe verse como un máximo y no como un valor típico.

Sobre la maquinaria innovadora, el capítulo 5 trata las tuneladoras de nueva generación.

14

Cuadro comparativo de materiales

TABLA 6.1. MATERIALES DE CONDUCCIÓN: DIÁMETROS, PRESIÓN, RUGOSIDAD Y UNIÓN. LOS COEFICIENTES DE MANNING SON DE CONAGUA (2009, TABLA 3.7); LAS**

MATERIAL	DIÁMETROS	PRESIÓN	RUGOSIDAD	VIDA ÚTIL	UNIÓN	PROTECCIÓN
Acero	50.4 a 355.6 mm en tubo comercial; desde 150 mm en tubo soldado	Según el espesor	n = 0.011 con recubrimiento interior; 0.014 sin revestir	Depende del recubrimiento y de la protección catódica	Soldadura, brida	Recubrimientos y catódica
Hierro dúctil	100 a 1,600 mm en tubo comercial; hasta DN 2600 por norma	Clases de 150 a 350 psi	C = 140 con mortero	Depende del suelo; ver dato técnico	Espiga y campana, brida	Mortero interior
Concreto simple y reforzado	Gran diámetro y túnel	Gravedad o baja presión	n = 0.012; 0.010 liso nuevo	Depende del agua y del cemento	Campana, dovelas	Cemento RS, recubrimientos
Concreto presforzado con cilindro	760 a 2,750 mm en tubo comercial; hasta 3,660 mm por norma	Hasta 400 psi en una oferta comercial	Como concreto liso	Depende del mortero y del suelo	Espiga y campana	Mortero y recubrimiento exterior
PVC	50 a 630 mm	Según la clase del tubo	n = 0.009; C = 150	Sin cifra normativa	Cemento solvente, campana	Resistente a la corrosión
PEAD	12 a 1,000 mm	PN según serie y SDR	n = 0.009 pared sólida; 0.012 corrugado	50 años declarados por el fabricante	Termofusión	Resistente a la corrosión

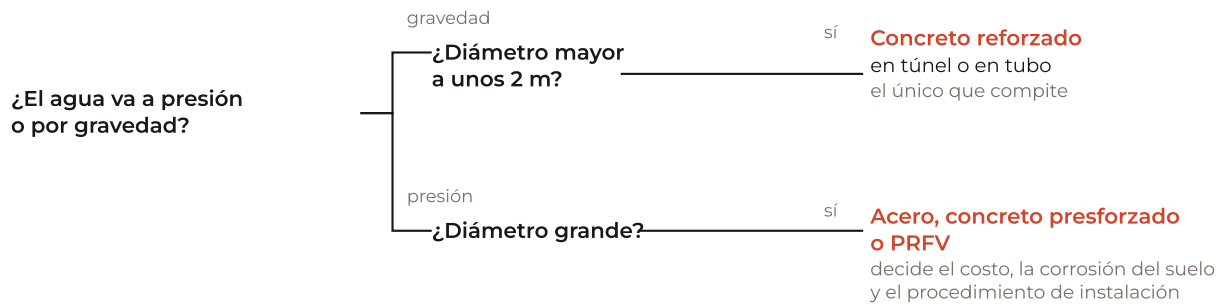
MATERIAL	DIÁMETROS	PRESIÓN	RUGOSIDAD	VIDA ÚTIL	UNIÓN	PROTECCIÓN
PRFV	25 a 4,000 mm	345 a 3,103 kPa (50 a 450 psig)	n = 0.009	Sin cifra normativa	Cople, campana	Resistente a la corrosión
Asbesto-cemento	75 a 2,000 mm	Histórico	n = 0.010	Histórico	Cople	Su manejo se rige por la NOM-125-SSAI-2016

CÓMO SE LEE EL CUADRO

- Si el agua corre por gravedad y el diámetro pasa de unos 2 m, el concreto reforzado en túnel o en tubo es el único que compite.
- Si hay presión y el diámetro es grande, compiten el acero, el concreto presforzado y el PRFV, y la elección cae en el costo, la corrosión del suelo y el procedimiento de instalación.
- Si el terreno se mueve, el PEAD con termofusión y el hierro dúctil con junta flexible dan margen.
- Si el agua es residual y agresiva, importa más la defensa contra gases ácidos que el valor del coeficiente de rugosidad.

Cómo se elige el material de una conducción

Criterio del equipo, no norma



Después de elegir, dos preguntas que cambian el material o su defensa

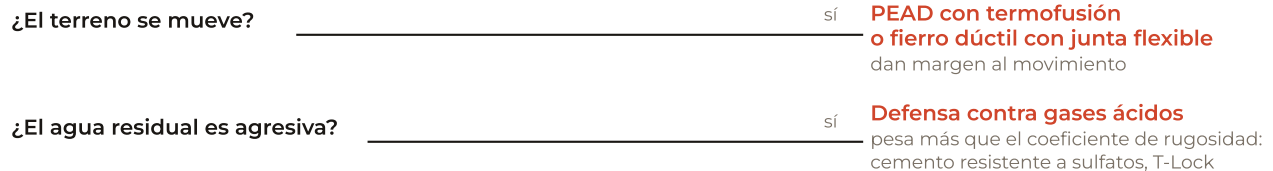


Figura 6.11. Cómo escoger el material de una conducción según presión, diámetro, terreno y agua

15

Balance

El cuadro anterior es más simple de lo que parece. Está armado con cifras de normas y de manuales, y en obra el material que llega a la zanja no siempre coincide con el de la hoja técnica, ni la junta que se instala en un día de lluvia con la de laboratorio. Por eso la unión es el criterio menos valorado en la elección de un material.

El costo de mantenimiento casi nunca entra en la comparación inicial. Un colector de concreto sin protección contra gases ácidos cuesta menos el día de la entrega y mucho más cuando hay que rehabilitarlo, como muestra el caso del Emisor Central, donde el acero llegó a quedar expuesto. Para un colector de agua residual de 1.2 m de diámetro, la

opción mejor respaldada es concreto con cemento resistente a sulfatos y un recubrimiento polimérico en la clave, con el sobrecosto justificado por la vida útil y no por el precio.

De la clasificación de materiales se desprende una consecuencia práctica: la clase con que se contrata una excavación se paga, y la que aparece al excavar se discute, y ahí se concentran las disputas por los volúmenes de material III. Los materiales innovadores son prometedores, pero no conviene incorporarlos a un proyecto sin una obra comparable que los respalde.

El uso que se le dio a cada material en el Túnel Emisor Oriente está en el capítulo 16; los bancos efectivamente usados, en el capítulo 13.



Parte I · Líneas de conducción

7 Dispositivos de control, eficiencia y funcionamiento

Las piezas que regulan el flujo y cómo se comprueba que la obra cumple

Una conducción no se abre y se olvida. Alguien tiene que poder cerrarla, regularla, protegerla de sus propios transitorios, medir lo que lleva y, antes de entregarla, probar que funciona. Este capítulo reúne lo que hace posible operar una línea: el golpe de ariete que obliga a protegerla, los dispositivos de control que la protegen, la eficiencia con que se compara un tipo de obra con otro, la funcionalidad que dice si la obra construida sigue sirviendo y las pruebas que lo comprueban.

Golpe de ariete

Una conducción real no trabaja siempre en régimen permanente: deja de hacerlo cuando alguien opera una válvula o se detiene una bomba, y el transitorio, no el permanente, suele fijar la presión de diseño del tubo.

Se distinguen tres transitorios: muy lento o cuasi estático, lento u oscilación de masa y rápido o golpe de ariete, el más destructivo. Sus causas típicas son el paro repentino de bombas, el cierre brusco de una válvula, la interrupción de energía, el mal diseño y el aire atrapado.

El mecanismo es el de un tren que frena: la locomotora se detiene y los vagones siguen y chocan. Un cierre brusco detiene el fluido junto a la válvula; el de atrás sigue y se comprime. Esa onda de sobrepresión sube con velocidad (celeridad) a , se refleja en el depósito con signo contrario y regresa como onda de depresión. El ciclo completo dura $4L/a$.

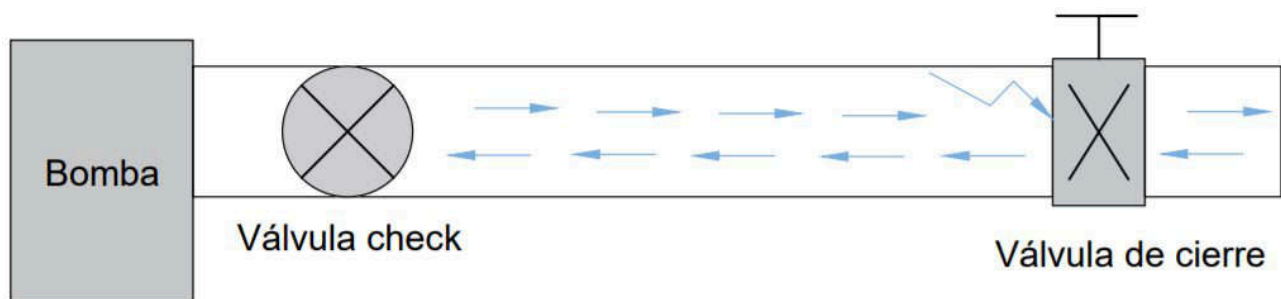


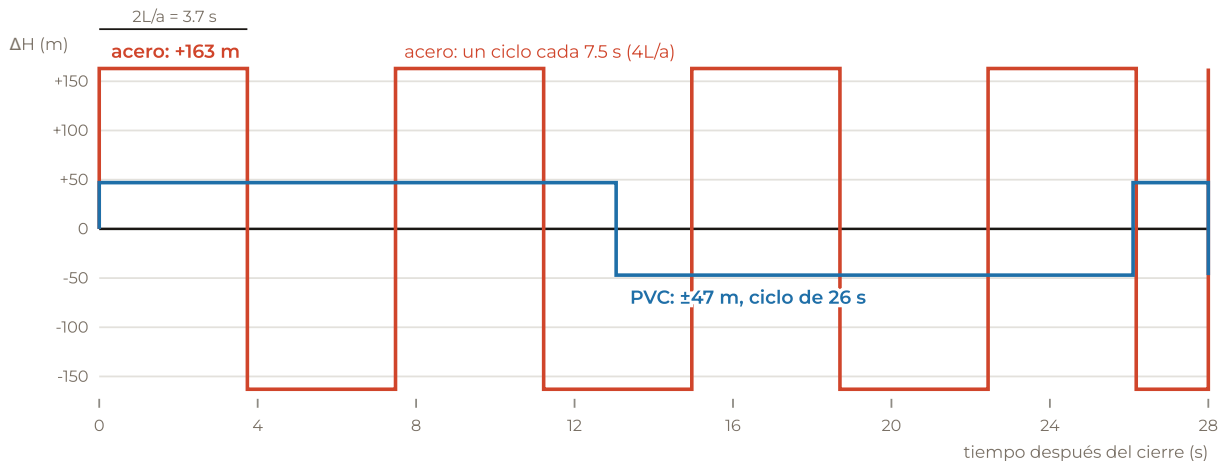
Figura 7.1. Arreglo de bomba, válvula de retención y válvula de cierre en una conducción

La celeridad de la onda depende de qué tan deformable sea el tubo: cuanto más flexible, más lenta y menor la sobrepresión. La sobrepresión de Joukowsky crece con la celeridad y con el cambio de velocidad del agua. Con agua a 1.5 m/s que se detiene por cierre rápido en una tubería de 0.60 m, la sobrepresión es de unos 163 m de columna de agua en acero y de unos 47 m en PVC, calculada con valores supuestos. En una línea con 4 bar

de servicio, un cierre rápido en acero la llevaría a más de cuatro veces la presión de operación. Si la válvula cierra en un tiempo claramente mayor que el que tarda la onda en ir y volver, la sobrepresión es menor. Los cambios de diámetro, las derivaciones y los extremos cerrados reflejan la onda y son zonas de amplificación o de atenuación.

Qué le pasa a la presión junto a la válvula cuando se cierra de golpe

Tubería de 0.60 m y 2,000 m, agua a 1.5 m/s que se detiene; caso ideal, sin fricción ni cavitación



a (acero) = 1,069 m/s; a (PVC) = 306 m/s; con E y espesores supuestos. La depresión de -163 m es solo la onda ideal: en la tubería real el agua llegaría a la presión de vapor y se formaría una cavidad, no una presión negativa.

Figura 7.2. Oscilación de presión tras un cierre rápido

Para protegerse se dispone de válvulas anticipadoras de onda (se abren al inicio de la depresión y evacúan el exceso), válvulas de control de bombas sincronizadas con el arranque y el paro, válvulas de retención con cierre lento y válvulas de admisión y expulsión de aire (Conagua, s. f., libro 12, cap. 2). En uso general están además las chimeneas de equilibrio, las cámaras de aire, los volantes de inercia y los tanques unidireccionales. El principio común es alargar la maniobra, absorber la energía de la onda o aliviar la presión.

Dispositivos de control

FUNCIÓN	DISPOSITIVO	RÉGIMEN
Aislar	Válvula de compuerta, mariposa, asiento	A presión
Regular gasto o presión	Válvula de asiento, reductora, sostenedora, de altitud	A presión
Proteger	Admisión y expulsión de aire, retención, anticipadora de onda, desagüe	A presión
Controlar gasto	Compuerta, vertedor	Superficie libre
Disipar energía	Estructuras de caída, pozos con caída, lumbreras con colchón, cámaras en espiral	Superficie libre
Retener sólidos	Rejilla	Superficie libre
Acceso y ventilación	Pozo de visita, lumbrera, registro	Superficie libre
Medir	Venturi, electromagnético, ultrasónico, limnómetro, pluviómetro	Ambos
Supervisar	Telemetría y monitoreo en tiempo real (SCADA)	Ambos

VÁLVULAS

Se dividen en válvulas de aislamiento y de control (Conagua, s. f., libro 12, cap. 2). La de compuerta es una placa perpendicular al flujo: la más usada para aislar por su costo y su baja pérdida abierta, pero no sirve para regular porque produce altas pérdidas y puede cavitarse; arriba de 400 mm lleva un bypass para igualar presiones. La de mariposa es un disco sobre un eje, de cuerpo corto y más barata en diámetros grandes; puede sustituir a la de compuerta con presiones bajas y regula con gastos bajos. Las de asiento (cilíndrico, cónico o esférico) giran 90° y regulan el gasto. Las de altitud controlan el nivel de un tanque. Las de admisión y expulsión de aire van en puntos altos y cambios de pendiente.

Las controladoras de presión pueden ser reductoras, sostenedoras o aliviadoras. Las de retención impiden el contraflujo, aunque pueden producir golpe de ariete. Las de vaciado drenan la línea en puntos bajos.

Válvula de compuerta. Su función es aislar: se abre o se cierra por completo y nada más. Se usa para sacar un tramo de servicio, reparar o seccionar, y se coloca al inicio y al final de los tramos y a los lados de los equipos que requieren mantenimiento. Falla cuando se la usa a medio abrir: la placa vibra, las pérdidas son altas y puede cavitarse (Conagua, s. f., libro 12, cap. 2). También falla por falta de uso: si nadie la maniobra, el vástago y el asiento se atascan y, cuando se necesita cerrarla, no cierra. En diámetros grandes el bypass no es un lujo: sin él hay que vencer toda la diferencia de presión con la placa.

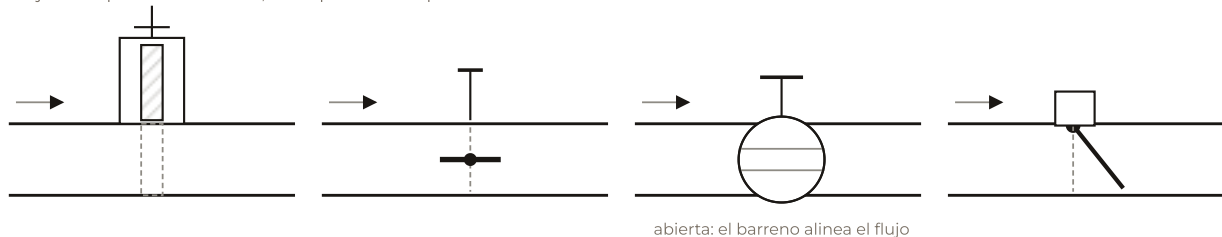
Válvula de mariposa. Aísla y, con gastos y presiones bajos, regula. Su cuerpo corto permite instalarla donde no cabe una de compuerta, y en diámetro grande cuesta menos. La limitación es que el disco queda dentro del flujo aunque esté abierta, de modo que siempre resta algo de carga, y que con aperturas pequeñas el coeficiente de pérdida crece mucho. Con un cuarto de vuelta basta para cerrarla, y por eso suele cerrarse más rápido de lo debido: ahí nace el golpe de ariete.

Válvula de asiento. Cilíndrica, cónica o esférica, gira 90° y es la indicada cuando se quiere regular el gasto (Conagua, s. f., libro 12, cap. 2). Se instala en derivaciones y en la descarga de equipos donde importa ajustar, no solo cerrar. Su falla típica es el desgaste del asiento cuando trabaja mucho tiempo parcialmente abierta con agua que arrastra arena.

Válvula de retención o check. Evita el contraflujo. Va a la salida de una bomba, para que el agua de la línea no regrese y haga girar la bomba al revés cuando se detiene, y en líneas donde una derivación pueda invertir el sentido. Es sencilla, pero puede producir golpe de ariete: si cierra tarde, el agua que ya viene de regreso la azota contra el asiento. Por eso se prefieren las de cierre lento o con dispositivo amortiguador.

Cuatro válvulas en corte: lo que hace cada pieza dentro del tubo

Flujo de izquierda a derecha; trazo punteado = posición cerrada

**De compuerta**

aislar: abierta o cerrada

Placa perpendicular al flujo.
Abierta pierde poca carga.
No regula: cavita y pierde mucho.
Más de 400 mm: con bypass.

De mariposa

aislar y regular poco

Disco sobre un eje; cuerpo corto.
Más barata en diámetros grandes.
Regula con gastos y presiones bajos.
AWWA C504: 3 a 72 in, 25 a 250 psi.

De asiento esférico

regular el gasto

Giro de 90°; el paso es un barrenito.
Cilíndrico, cónico o esférico.
Sirve para regular, no solo cerrar.
Cierra lento si se maniobra lento.

De retención (check)

impedir el contraflujo

Una charnela abre con el flujo.
Cierra sola al invertirse el flujo.
Cierre brusco = golpe de ariete.
Pide cierre lento en bombeo.

Figura 7.3. Cuatro válvulas en corte

Válvulas de admisión y expulsión de aire (ventosas). Protegen la tubería. Al llenar, expulsan el aire que empuja el agua; al vaciar, lo admiten para que no se forme un vacío que pueda colapsar el tubo; en operación, sueltan las bolsas que se acumulan arriba y estrangulan la sección. Se ubican en los puntos altos y en los cambios de pendiente (Conagua, s. f., libro 12, cap. 2). Fallan por abandono: una ventosa tapada de tierra o sin mantenimiento no deja salir el aire, y el síntoma es un gasto menor al esperado sin que nada parezca roto.

Válvulas de alivio y de control de presión. Las reductoras bajan la presión aguas abajo, las sostenedoras la mantienen aguas arriba, las aliviadoras la desfogan cuando pasa de un tope y las anticipadoras de onda se abren al comenzar la depresión para evacuar el exceso antes de que llegue la sobrepresión (Conagua, s. f., libro 12, cap. 2). Se instalan en la línea cerca de la bomba o donde la presión de la red cambia de zona. Sus fallas habituales son el resorte o el piloto descalibrado y el cierre incompleto por sedimentos: una válvula de alivio que nunca se ha probado es una suposición, no una protección. La válvula de desagüe, en el punto bajo, vacía la línea para repararla; su error común es descargarla a un lugar sin salida.

Dónde van las válvulas de aire y de desagüe en el perfil de una línea a presión

Perfil esquemático, sin escala

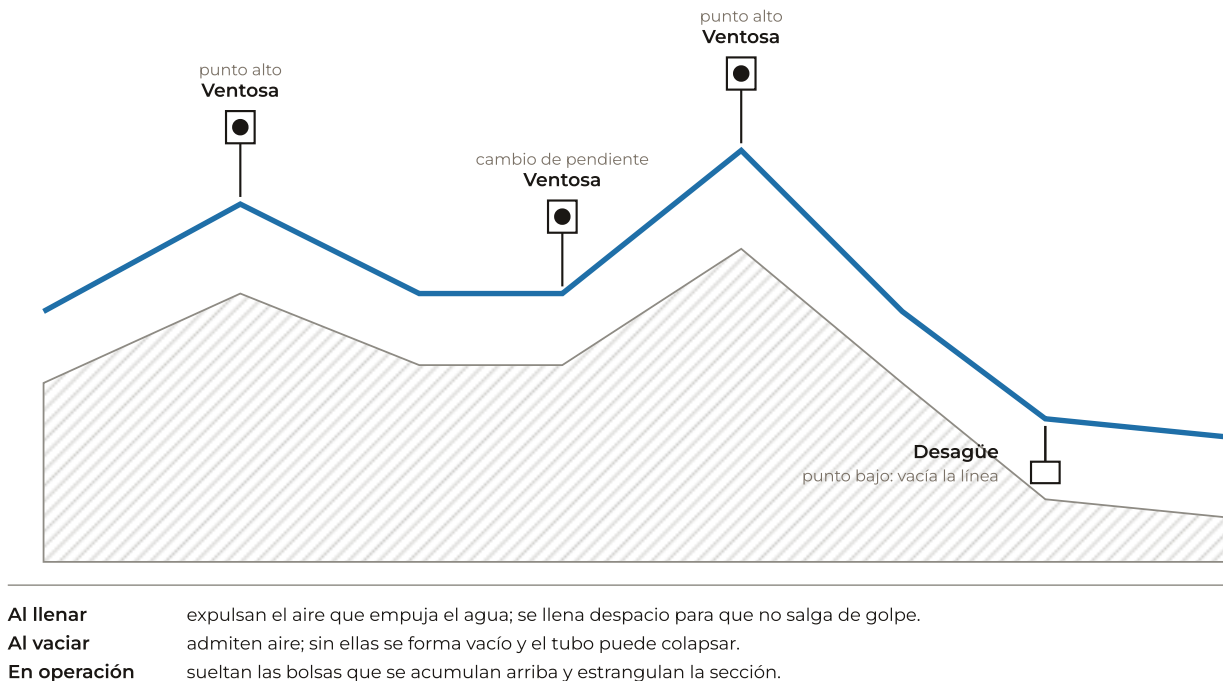


Figura 7.4. Ventosas y desagüe en el perfil de una línea

COMPUERTAS Y VERTEDORES

En superficie libre la compuerta hace el papel de la válvula. La caja de control de una captación al drenaje profundo tiene generalmente dos juegos de compuertas, y las pantallas terminan en vertedores que derraman las tormentas imprevistas. La compuerta regula lo que entra y el vertedor protege la estructura cuando se rebasa el gasto previsto. En un vertedor de pared delgada el gasto crece con la carga sobre la cresta elevada a la potencia $3/2$: si la carga se duplica, el gasto sube casi tres veces.

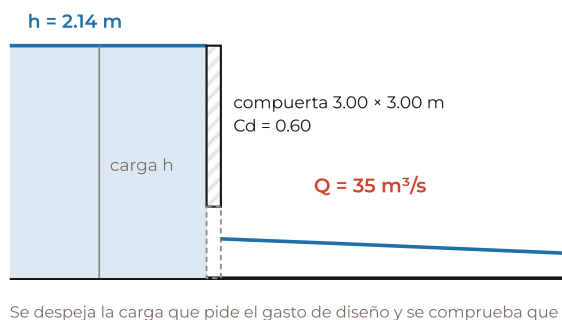
La diferencia de comportamiento explica para qué sirve cada uno. Para pasar $35 \text{ m}^3/\text{s}$ por una compuerta de 3 por 3 m con coeficiente de 0.60 hizo falta una carga de 2.14 m en la captación del Túnel Semiprofundo Gran Canal. En el muro vertedor de una caja de control, una carga de 1.33 m deja pasar $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y una de 2 m deja pasar $18.5 \text{ m}^3/\text{s}$: la carga subió la mitad y el gasto casi el doble. Por eso la compuerta se usa para dosificar y el vertedor como válvula de seguridad. Ambos se ubican en la caja de control, antes del pozo

o la lumbrera. Las fallas comunes son el atoramiento por basura o azolve, la oxidación de los sistemas de izaje y que la descarga se ahogue cuando el nivel aguas abajo sube y la compuerta ya no entrega lo previsto.

Dos formas de controlar un gasto a superficie libre, con números de obras reales

Compuerta (orificio): el gasto crece con la raíz de la carga

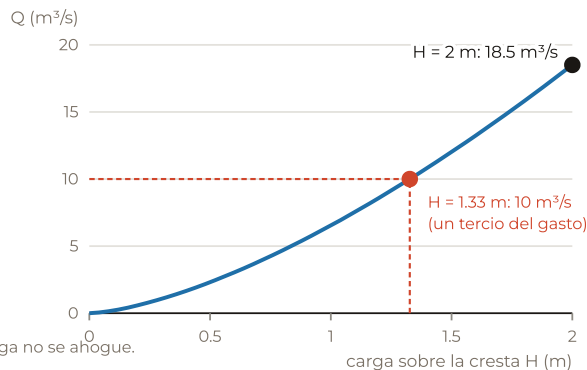
Captación del Túnel Semiprofundo Gran Canal



Se despeja la carga que pide el gasto de diseño y se comprueba que la descarga no se ahogue.

Vertedor: el gasto crece con la carga a la 3/2

Muro vertedor de una caja de control (C_d 2.181, cresta de 3.00 m)



Si la carga sube de 1.33 a 2 m (+50 %), el gasto sube de 10 a $18.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (+85 %)

Figura 7.5. Compuerta y vertedor con números de obras reales

REJILLAS

Retienen sólidos gruesos. Los vapores del agua residual aceleran la oxidación de compuertas, sistemas de izaje y rejillas de acero, y se recomiendan recubrimientos de fibra de vidrio o pinturas anticorrosivas. La separación entre barras se elige según el sólido que se quiere retener y la limpieza, manual o mecánica, que tendrá la rejilla, y con ella se calcula la velocidad de aproximación para no arrastrar lo ya retenido.

La rejilla se ubica aguas arriba de lo que protege: en la entrada de un sifón, para detener objetos flotantes que puedan obstruir las tuberías, y en una planta de bombeo, en la zona de control y cribado antes de la cámara de bombeo, con rejillas primarias y secundarias. Su falla característica es la obturación: la basura retenida por el acero expuesto casi taponó el Emisor Central, y una rejilla tapada eleva el nivel aguas arriba justo cuando hay tormenta. Una rejilla útil es la que se limpia a tiempo; si la limpieza depende de un operador que no ve el nivel, falla en el peor momento.

ESTRUCTURAS DE CAÍDA

Absorben la energía cuando el terreno impone un desnivel brusco.

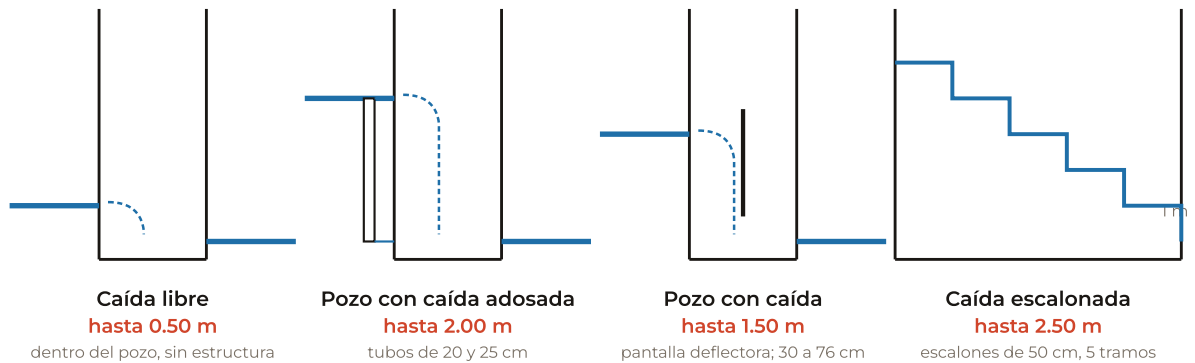
ESTRUCTURA	CONDICIÓN DE USO	DESNIVEL MÁXIMO
Caída libre dentro del pozo	Sin estructura especial	0.50 m
Pozo con caída adosada	Tuberías de 20 y 25 cm	2.00 m
Pozo con caída	Caja y chimenea con pantalla deflectora; tuberías de 30 a 76 cm	1.50 m
Caída escalonada	Escalones de 50 cm con pozos en los extremos	2.50 m
Sifón invertido	Cruzar corrientes, depresiones o estructuras	Es un cruce, no una caída

Cada una se elige por el desnivel y el diámetro. La caída libre es la más barata y la que más gas libera, porque el agua cae y se agita; la adosada permite un desnivel mayor en tubos de 20 y 25 cm sin que el agua golpee el fondo; la de pantalla deflectora sirve para tubos de 30 a 76 cm; y la escalonada reparte la caída en peldaños de 50 cm. Las fallas comunes son la erosión del fondo del pozo y el desprendimiento de gases corrosivos cuando se fuerza una caída libre mayor a la que la estructura admite.

A mayor escala, el drenaje profundo resolvió el mismo problema con lumbreras de captación. Su extremo inferior tiene uno o dos orificios, o un muro vertedor, que descargan el gasto de diseño y forman un colchón de amortiguamiento; a más gasto, más colchón y más disipación. Si el túnel sube por encima de la salida, la descarga debe limitarse porque el ahogamiento resta capacidad. Se usaron cinco tipos de captación: cámara en espiral con estructura amortiguadora; caída con diafragmas, escalones o en cascada; caída libre con tubos de desfogue; caída libre con estructura amortiguadora; y caída con ranura vertical y tubos de desfogue.

Estructuras de caída dibujadas a la misma escala vertical

Cada una resuelve un desnivel brusco entre dos tuberías; 1 m = 40 px



El sifón invertido no es una caída sino un cruce: sirve para pasar una corriente, una depresión o una estructura al mismo nivel.

Figura 7.6. Cuatro estructuras de caída a escala

POZOS Y LUMBRERAS

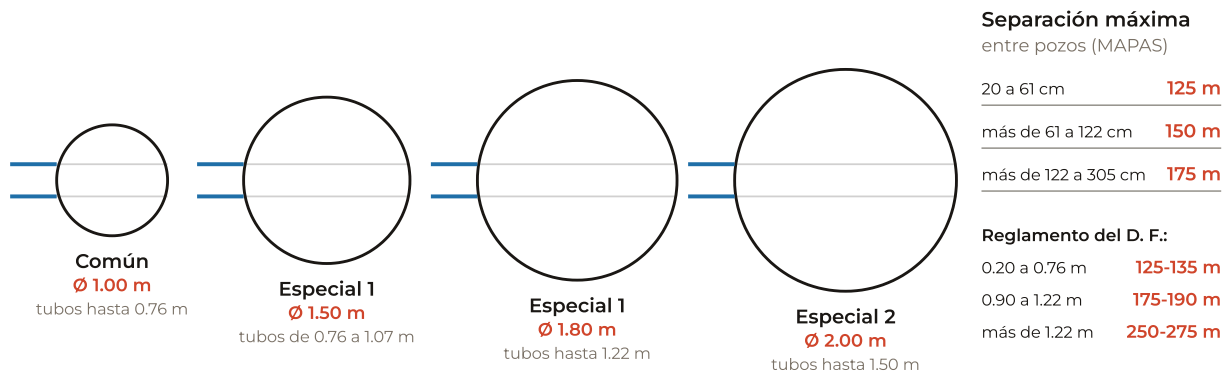
El pozo de visita une tramos, da acceso y ventila la red. Va en cruceros y cambios de dirección, pendiente y diámetro. Los prefabricados tienen 1,000 mm de diámetro interior mínimo con escalera. En espacios confinados se ventila antes y durante la presencia del personal, se abre un pozo adicional y se usa arnés con cable de extracción. En túneles profundos el equivalente es la lumbrera: tiro vertical que sirve primero para construir y luego para acceso, ventilación y captación.

Hay cuatro familias de pozos. El pozo común tiene 1.00 m de diámetro interior, una tubería de hasta 0.76 m con entronques de hasta 0.45 m y admite una deflexión de 90°. El especial tiene la base más grande: el tipo 1 mide 1.50 m (tubos de 0.76 a 1.07 m) o 1.80 m (hasta 1.22 m) y el tipo 2, 2.00 m (hasta 1.50 m); ambos admiten 45°. Los pozos caja no permiten deflexión: la unión es en línea recta. Los hechos en obra de tabique llevan muro de 28 cm como mínimo y base de concreto de 15 cm. La separación máxima entre pozos es de 125 m para tubos de 20 a 61 cm, de 150 m hasta 122 cm y de 175 m hasta 305 cm; el reglamento del Distrito Federal fija rangos distintos, por lo que el proyectista

debe aclarar cuál rige. Las fallas comunes son la infiltración en la unión pozo-tubo, que se evita con mangas de poliuretano o neopreno, el brocal sin respiraderos que impide la ventilación y el asentamiento diferencial que agrieta la unión.

Pozos de visita en planta, a escala, y cada cuánto se ponen

Círculos a escala: 1 m = 62 px. Cada pozo trae el tubo más grande que admite



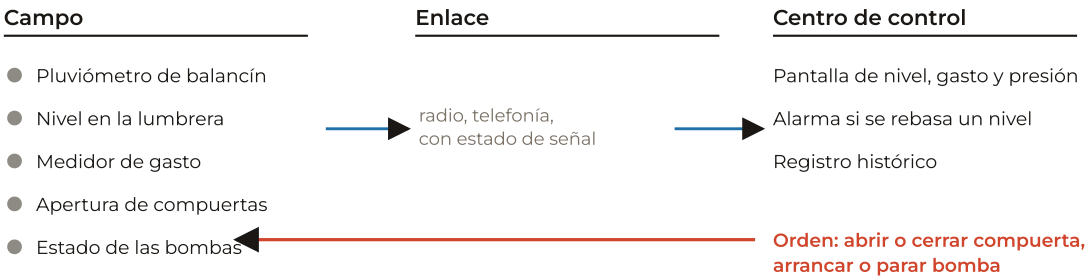
Los pozos caja (tipos 1, 2 y 3, para tubos de 0.75 a 2.44 m) no permiten deflexión: la unión es en línea recta.

Figura 7.7. Pozos de visita en planta y su separación

MEDICIÓN Y SUPERVISIÓN

Conviene instalar piezas especiales que permitan verificar la exactitud del medidor. El Venturi pierde de 0.1 a 0.2 veces el diferencial que mide, de modo que medir cuesta carga. SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) es el sistema que adquiere datos de campo, los lleva a un centro de control y permite mandar órdenes. Un caso documentado en la Ciudad de México: el SACMEX opera 78 estaciones pluviométricas con monitoreo en tiempo real y debe medir lumbreras, compuertas y plantas de bombeo para anticipar una tormenta atípica; en otro organismo las variables se reportan por radio o teléfono, sin plataforma de consulta. Un dispositivo sirve si su estado es visible para quien opera.

Cómo llega el estado de una lumbrera al operador, y cómo regresa la orden



Si el enlace cae, el operador lo ve: el estado de la señal también se transmite.

SACMEX: 78 estaciones pluviométricas con monitoreo en tiempo real; también lumbreras, gastos, presiones, bombas y compuertas.
Otro organismo: el operador reporta por radio o teléfono y no hay plataforma de consulta; el dato llega tarde o no llega.

Figura 7.8. Del sensor al centro de control y de regreso

Los instrumentos se reparten por función. El pluviómetro de balancín da la lluvia que viene; el medidor de nivel en la lumbrera dice cuánto queda de margen; el medidor de gasto confirma lo que realmente pasa; y los indicadores de apertura de compuertas y estado de bombas dicen qué se puede hacer todavía. Se ubican donde la decisión depende del dato: en cada lumbrera, compuerta y planta de bombeo. Las fallas comunes no son del sensor sino del enlace y de la gente: un dato que llega tarde, un enlace caído que nadie nota, o la ausencia de una plataforma de consulta, como ocurría en el organismo cuyo operador reportaba por radio o teléfono. Por eso conviene que el estado de la señal también se transmita, y que exista una forma manual de operar el dispositivo cuando falla la comunicación. En maquinaria subterránea el mismo principio se ve en un escudo: los operadores verifican por teléfono los datos de la consola, porque cualquier discrepancia es señal de falla en la telemetría y el telecontrol.

Eficiencia de un tipo de obra

La eficiencia de una conducción se evalúa en cuatro dimensiones que no deben confundirse. La hidráulica es cuánto gasto conduce por unidad de sección y de pendiente; la circular tiene el mejor radio hidráulico para un perímetro dado cuando trabaja llena o casi llena. La energética es cuánta energía externa necesita. La de confiabilidad es cuánto depende de equipos, maniobras y mantenimiento. La económica es el costo por unidad de gasto a lo largo de la vida útil.

TIPO DE OBRA	HIDRÁULICA	ENERGÉTICA	CONFIABILIDAD	OBSERVACIÓN
Canal a cielo abierto	Media (rugosa, se azolva)	Alta	Media (expuesto, derecho de vía)	Ocupa suelo superficial
Tubería enterrada por gravedad	Alta (lisa)	Alta	Alta con aire controlado	Sujeta a transitorios
Tubería a presión con bombeo	Alta	Baja	Depende de bombas y energía	Golpe de ariete por paro
Túnel a superficie libre por gravedad	Alta si se mantiene liso	Muy alta	Alta, inspección difícil	Costo inicial alto, profundidad

Los indicadores que vuelven medible la eficiencia son cuatro. El primero es la capacidad retenida frente a la de diseño: si la rugosidad aumenta por azolve o corrosión, la sección conduce menos aunque no haya cambiado. El segundo es la disponibilidad: la fracción del tiempo en que la obra puede operar, que cae cuando falla una válvula, una compuerta o una bomba. El tercero es la energía por unidad de agua conducida, que en una tubería a presión depende de las pérdidas locales de cada válvula y pieza. El cuarto es la pérdida de agua por fugas, que se ve en las pruebas de hermeticidad. La falla común al evaluar es mezclar dimensiones: una obra muy eficiente hidráulicamente puede ser poco confiable si depende de equipos sin mantenimiento.

Cuatro tipos de obra frente a tres dimensiones de eficiencia

Juicio cualitativo del equipo: círculo lleno = alta o muy alta, medio = media, vacío = baja

	Hidráulica	Energética	Confiabilidad	
Canal a cielo abierto				se azolva; ocupa suelo
Tubería enterrada por gravedad				sujeta a transitorios
Tubería a presión con bombeo				depende de bombas y energía
Túnel a superficie libre				costo alto; inspección difícil

Raya gris = depende de otros factores. El túnel por gravedad no gasta energía; la tubería con bombeo sí.

Figura 7.9. Matriz de eficiencia de cuatro tipos de obra

04

Funcionalidad: si la obra sigue sirviendo

Hay que distinguir dos preguntas. La eficiencia mide qué tan bien cumple el tipo de obra con su función en comparación con otros: hidráulica, energética, de confiabilidad y económica (sección anterior). La funcionalidad pregunta si la obra, ya construida, sigue haciendo lo que se proyectó: conducir el gasto de diseño, poder sacarse de servicio para inspeccionarla y descargar en un cauce que la reciba.

Una obra puede ser eficiente en el papel y dejar de ser funcional en la práctica. El Gran Canal fue una buena solución por gravedad en 1900 y perdió su función cuando el hundimiento le quitó la pendiente (capítulo 3). El Emisor Central conserva su eficiencia energética, porque no bombea, pero perdió funcionalidad cuando dejó de tener un estiaje libre para inspeccionarse. Lo que se vigila entonces no es el proceso constructivo sino tres indicadores: la capacidad retenida frente a la de diseño (el gasto que conduce la sección con su rugosidad actual frente al de diseño), la disponibilidad para inspección y la calidad del agua en la descarga.

Pruebas que se hacen a una conducción

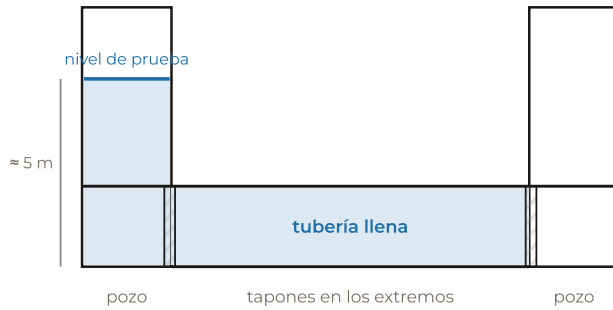
Una norma no vale sin una prueba que la compruebe. Las pruebas de una conducción se agrupan por el momento en que se hacen.

1. Antes de construir se ensayan los materiales: el agregado se prueba en laboratorio (granulometría, densidad, absorción, sanidad, reactividad con los álcalis del cemento) y el acero se certifica contra su especificación (capítulo 6).
2. Durante la construcción se controla el concreto con el cono de Abrams y los cilindros a 7 y 28 días (NMX-C-156 y NMX-C-083), y se mide el aire de los espacios confinados con detectores de gases antes de cada descenso (NOM-033-STPS-2015).
3. Al terminar un tramo se prueba la hermeticidad. En sistemas de agua potable y alcantarillado la NOM-001-CONAGUA-2011 fija las especificaciones y los métodos de prueba; en ductos de hidrocarburos, los códigos ASME y las normas de la ASEA piden pruebas de presión antes de la puesta en servicio (capítulo 8).

En la prueba hidrostática el tramo se llena entre pozos, se tapan los extremos, se espera el prellenado y se mide el agua que hay que añadir para mantener el nivel; la presión de prueba es de 0.05 MPa (0.5 kg/cm²), unos 5 m de columna de agua. La alternativa es la prueba neumática a 0.03 MPa (0.3 kg/cm²); para diámetros mayores de 630 mm se exigen procedimientos de seguridad propios antes de hacerla. El agua que se permite añadir va de 0.02 L por metro cuadrado de superficie mojada en fibrocemento, PVC, PE y PRFV, a 0.10 en concreto reforzado y 0.15 en concreto simple de hasta 600 mm. Se hace al terminar el tramo y antes de tapar la zanja, y las fallas que revela son uniones mal ensambladas, tapones mal sellados, pozos agrietados y empaques fuera de su alojamiento. Una prueba mal hecha es peor que ninguna: si el tramo no se llena el tiempo de prellenado, el material absorbe agua y el resultado engaña.

Prueba de hermeticidad de un tramo de alcantarillado

Presión de prueba hidrostática: 0.05 MPa (0.5 kg/cm²), unos 5 m de columna de agua



Se llena, se espera el prellenado y se mide el agua que hay que añadir para mantener el nivel.

Alternativa: prueba neumática a 0.03 MPa (0.3 kg/cm²).

Agua que se permite añadir
litros por m² de superficie mojada

Fibrocemento

0.02

PVC, PE y PRFV

0.02

Concreto reforzado

0.10

Concreto simple (hasta 600 mm)

0.15

Acero al carbono: prellenado de 1 h, sin tope de agua en la tabla.

Figura 7.10. Prueba de hermeticidad de un tramo

4. Durante la vida útil se inspecciona: recorrido visual y topográfico, cámaras, medición de sedimentos y pruebas de laboratorio sobre el concreto envejecido, como el pH de la pared tras el hidroescarificado.

El resultado de cada prueba se asienta en un registro firmado por un laboratorio acreditado ante la EMA, y ese registro es el que la supervisión revisa antes de pagar una estimación.

06

Balance

El golpe de ariete muestra cómo una maniobra cotidiana puede fijar el diseño de una conducción. Una válvula de cierre rápido en una tubería de acero puede producir una sobrepresión de 163 m, y es el tipo de maniobra que una cuadrilla hace sin pensarlo. En residencia convendría que cada válvula grande tuviera por escrito su tiempo de cierre, no solo su posición.

En los dispositivos y en la funcionalidad se repite una idea: un dispositivo, o una obra, sirve si alguien puede ver su estado y actuar sobre él. Una válvula cuya posición nadie conoce, un túnel que no puede sacarse de servicio para inspeccionarlo y un registro de pruebas que nadie revisa son la misma falla. Por eso el plan de operación, con los tiempos de maniobra y las pruebas, debería entregarse junto con los planos y no después.



Parte I | Líneas de conducción

8

Normatividad, calidad, sustentabilidad y mantenimiento

Las reglas que rigen la obra y el cuidado que la mantiene en servicio

Antes de excavar un metrotray que saber quién puede construir, con qué dinero y bajo qué permiso. Después de colar el primer anillo hay que comprobar que el concreto resista. Este capítulo recorre esas reglas, de la ley al ensayo de laboratorio, y termina en lo que decide si todo sirvió: el mantenimiento. Las pruebas, la cheteneia y la funcionalidad de la obra se tratan en el capítulo 7. Es el marco general para cualquier conducción de agua residual en México. Cómo se aplicó al Túnel Emisor Oriente se cuenta en la Parte II.



Figura 8.6. Hidroescarificado del muro de una lumbrera del Emisor Central

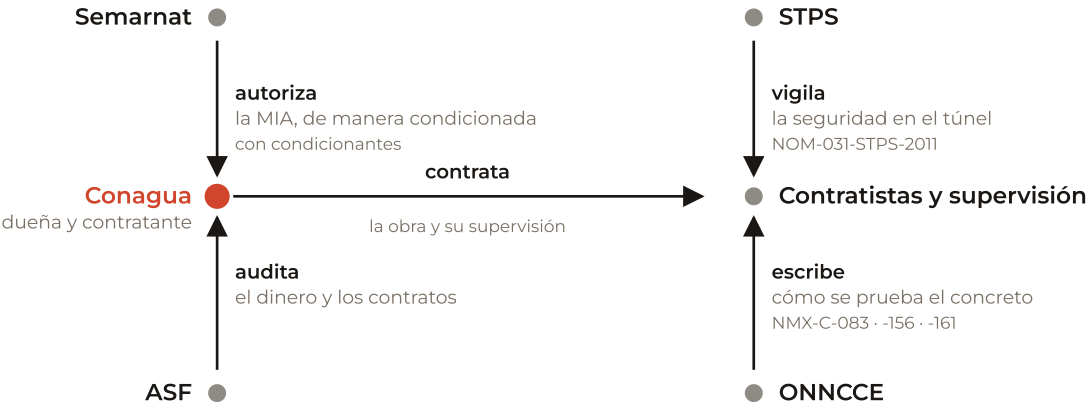


Figura 8.1. Quién hace qué en una obra de conducción

01

Quién manda en qué

Cada institución mira un pedazo distinto de la obra. La Conagua es la autoridad del agua: planea, contrata y opera las obras hidráulicas federales.

La Semarnat decide si la obra puede hacerse desde el punto de vista ambiental, por medio de la manifestación de impacto ambiental. La Auditoría Superior de la Federación (ASF) audita el dinero y los contratos. La STPS vigila que la obra no dañe a quien la construye. Los organismos de normalización, como la ONNCCE para el concreto y el IMNC para la gestión de calidad, escriben cómo se prueba y cómo se documenta, y la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) acredita a los laboratorios que hacen esas pruebas.

02

Las leyes

Cuatro leyes federales cubren una conducción de agua residual. Las fechas salen del catálogo de la Cámara de Diputados y cambian con frecuencia.

LEY	PUBLICACIÓN EN EL DOF	ÚLTIMA REFORMA
Ley de Aguas Nacionales (LAN)	01/12/1992	11/12/2025
Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas (LOPSRM)	04/01/2000	14/11/2025
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	28/01/1988	19/01/2026
Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria (LFPRH)	30/03/2006	09/04/2026

La LAN regula el uso de las aguas nacionales y las descargas; su autoridad es la Conagua. La LOPSRM rige los contratos de obra pública: licitación, adjudicación directa, convenios de ampliación de monto y de plazo, y supervisión. Un contrato se rige por la redacción vigente cuando se firmó. La LGEEPA sostiene la evaluación del impacto ambiental. La LFPRH explica por qué una obra de varios años depende de asignaciones anuales y exige el análisis costo-beneficio de los proyectos de inversión (art. 34).

El Reglamento de la LGEEPA en materia de evaluación del impacto ambiental se publicó el 30 de mayo de 2000; su texto consolidado muestra una reforma del 31 de octubre de 2014. Exige la autorización previa de la Semarnat para las obras hidráulicas del apartado A de su artículo 5. Entre ellas están las presas de más de un millón de metros cúbicos, los canales y cárcamos de bombeo, las obras de conducción para el abastecimiento de agua nacional de más de 10 km, con gasto mayor de 15 L/s y diámetro mayor de 15 cm (fr. IV), las plantas de tratamiento que descargan a cuerpos receptores nacionales (salvo las de hasta 100 L/s que no tengan otro supuesto del artículo 28 de la ley), el entubamiento de corrientes permanentes, el dragado y la apertura de zonas de tiro en cuerpos de agua nacionales. Prevé dos modalidades de manifestación, regional y particular (art. 10).

Ejemplo. Un acueducto de abastecimiento de 12 km, 150 L/s y 0.60 m de diámetro cumple los tres umbrales de la fracción IV (más de 10 km, más de 15 L/s y más de 15 cm) y requiere autorización previa. Una línea de agua residual no está en esa fracción y se revisa con las demás del artículo 5. Una de 8 km con los mismos gasto y diámetro no los cumple todos y se analiza caso por caso, porque otra fracción del artículo 5 o el artículo 28 de la ley pueden aplicar.

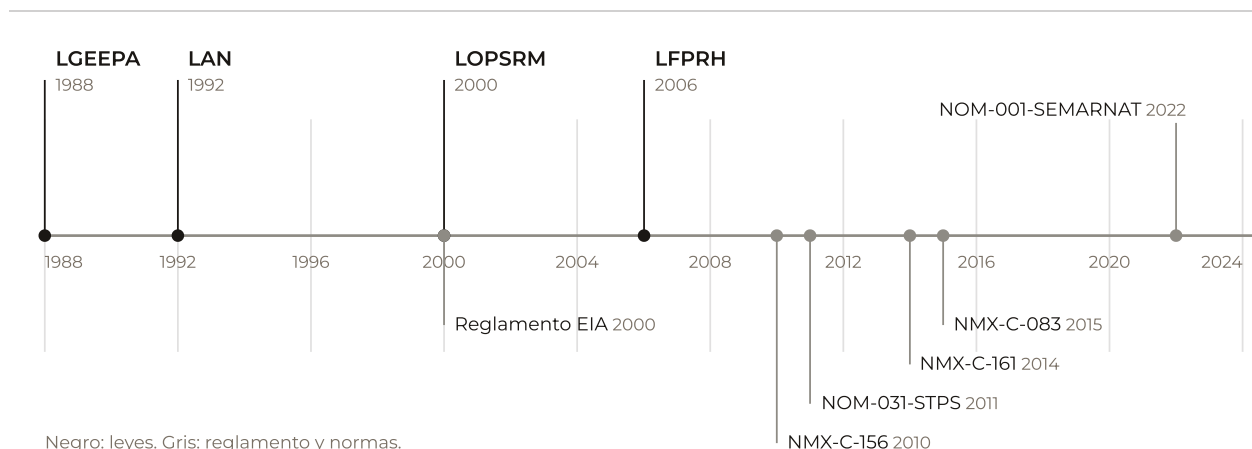


Figura 8.2. Leyes y normas aplicables a una conducción de agua residual, de 1988 a 2022

03

Las normas que tocan la obra

Una conducción cae bajo varias dependencias a la vez y cada una escribe sus propias normas. La regla de este apartado es que una norma entra con su número, su fecha de publicación en el DOF y su estado. Las consultas son del 9 de octubre de 2026 en el Catálogo Mexicano de Normas de la Secretaría de Economía (platiica.economia.gob.mx), que reproduce la fecha del DOF y el estado de cada norma.

TABLA 8.1. NORMAS VERIFICADAS POR DEPENDENCIA.

DEPENDENCIA	NORMA	MATERIA	PUBLICACIÓN	ESTADO
Conagua	NOM-011-CONAGUA-2015	Método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales	27/03/2015	Vigente desde el 26/05/2015; sustituyó a la NOM-011-CONAGUA-2000
Conagua	NOM-001-CONAGUA-2011	Hermeticidad, especificaciones y métodos de prueba de sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario	17/02/2012	Vigente desde el 16/06/2012; reemplazó a las NOM-001 y NOM-002-CONAGUA-1995

DEPENDENCIA	NORMA	MATERIA	PUBLICACIÓN	ESTADO
Semarnat	NOM-001-SEMARNAT-2021	Límites de contaminantes en descargas de aguas residuales a cuerpos receptores nacionales	11/03/2022	Vigente desde el 11/03/2023; sustituye a la de 1996
Semarnat	NOM-002-SEMARNAT-1996	Límites de contaminantes en descargas a sistemas de alcantarillado urbano o municipal	03/06/1998	Vigente en el catálogo
STPS	NOM-031-STPS-2011	Construcción: condiciones de seguridad y salud en el trabajo	04/05/2011	Vigente
STPS	NOM-033-STPS-2015	Seguridad para trabajos en espacios confinados	31/08/2015	Vigente desde el 30/11/2015
STPS	NOM-017-STPS-2024	Equipo de protección personal: selección, uso y manejo	28/03/2025	Aplicable desde el 28/09/2025; sustituyó a la NOM-017-STPS-2008
IMNC	NMX-CC-9001-IMNC-2015	Sistemas de gestión de la calidad, requisitos	03/05/2016	Vigente desde el 02/07/2016; cancela la versión 2008
ONNCCE	NMX-C-083-ONNCCE-2014	Resistencia a la compresión del concreto, método de ensayo	06/04/2015	Vigente
ONNCCE	NMX-C-156-ONNCCE-2010	Revenimiento en concreto fresco	25/10/2010	Vigente
ONNCCE	NMX-C-161-ONNCCE-2013	Concreto fresco, muestreo	23/07/2014	Vigente

CONAGUA

Las normas de la Conagua se llaman NOM-xxx-CONAGUA y se apoyan en la Ley de Aguas Nacionales. La NOM-011 define cómo se calcula el escurrimiento natural y la recarga de acuíferos y sirve de base para concesiones y asignaciones. La NOM-001-CONAGUA-2011 es obligatoria para fabricantes, importadores y para quienes diseñan, construyen, instalan, operan y mantienen sistemas de agua potable y alcantarillado, y fija

la prueba de hermeticidad. El Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) no es una norma de observancia obligatoria sino una guía técnica; su serie incluye libros de conducciones, de alcantarillado y de mantenimiento y reparación de tuberías.

SEMARNAT

La NOM-001-SEMARNAT-2021 aplica cuando el agua sale a un cuerpo receptor de la nación, y no cubre las descargas al drenaje municipal, que se rigen por la NOM-002-SEMARNAT-1996. Una descarga se evalúa por su carga contaminante y por la eficiencia con que se quita:

$$L = \frac{Q C}{1\,000} \qquad E = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

donde L es la carga contaminante (kg/d), Q es el gasto (m³/d), C es la concentración (mg/L), E es la eficiencia de remoción (%), C_0 es la concentración de entrada (mg/L) y C_e es la de salida (mg/L). Una planta que recibe 2 m³/s con una DBO₅ de 220 mg/L y la entrega a 30 mg/L recibe 38 toneladas de DBO₅ al día y quita 86.4 %. El límite aplicable lo fija la norma según el tipo de cuerpo receptor y el uso del agua.

STPS

La NOM-031-STPS-2011 obliga, en el túnel, a identificar riesgos por frente de trabajo y a dotar de equipo de protección. La NOM-033-STPS-2015 aplica de manera directa al mantenimiento de un túnel: una lumbrera y un colector son espacios confinados, donde se miden gases (H₂S, oxígeno) antes de entrar. La NOM-017-STPS-2024 exige un análisis de riesgos documentado por puesto, equipo certificado y capacitación al menos cada dos años.

NORMALIZACIÓN DEL CONCRETO

La ONNCCE elabora las normas mexicanas (NMX), voluntarias salvo que un contrato las exija. Se ven en una planta de concreto: el revenimiento con el cono de Abrams, el muestreo del concreto fresco y los cilindros a desmolde, 7 y 28 días. La NMX-C-156

tiene un proyecto de reemplazo (PROY-NMX-C-156-ONNCCE-2020) que no se ha publicado.

ASEA Y PEMEX

La seguridad industrial de los ductos de hidrocarburos la regula la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA). La NOM-020-ASEA-2024, sobre transporte de gas natural por ductos terrestres, se publicó en el DOF el 1 de septiembre de 2025 y entró en vigor el 28 de febrero de 2026; sustituye a la NOM-007-ASEA-2016. La NOM-009-ASEA-2017 trata la integridad de los ductos de recolección, transporte y distribución en todo su ciclo de vida. Para líquidos por ducto se aplican esa norma y las normas de referencia de Pemex, junto con el código ASME B31.4 (capítulo 2).

04

Por qué la Semarnat autoriza una conducción y con qué norma

Una conducción no se autoriza por capricho de una dependencia: la ley ambiental la pone en una lista de obras que no pueden empezar sin permiso.

La LGEEPA exige autorización previa de la Semarnat en materia de impacto ambiental para las obras hidráulicas, las vías generales de comunicación y los oleoductos, gasoductos y poliductos (LGEEPA, art. 28, fr. I). El Reglamento en materia de evaluación del impacto ambiental concreta esa lista en su artículo 5, apartado A, con los umbrales de la sección sobre las leyes. La razón de fondo es que estas obras alteran el agua, el suelo y la vegetación de una franja larga, a veces de varias entidades, y que una vez excavadas ya no se corrigen.

El trámite es el mismo en todos los casos. El promovente presenta una manifestación de impacto ambiental, regional o particular (Reglamento, art. 10), que describe el proyecto, lo vincula con las normas y los planes de ordenamiento, caracteriza el sistema ambiental, evalúa los impactos y propone medidas de prevención y mitigación. La Dirección

General de Impacto y Riesgo Ambiental la revisa y resuelve: autoriza, autoriza con condicionantes o niega (el capítulo 4 describe el contenido del estudio). Las condicionantes se vuelven obligaciones de obra, con programa de vigilancia ambiental.

Las normas que usa el evaluador para decidir son las mismas que usa el supervisor para verificar. La NOM-001-SEMARNAT-2021 fija los límites de lo que puede descargarse a un cuerpo receptor nacional; la NOM-002-SEMARNAT-1996, los de las descargas al alcantarillado; la NOM-059-SEMARNAT-2010, vigente desde el 28 de febrero de 2011 (Secretaría de Economía, catálogo de normas), protege las especies nativas en riesgo que aparezcan en el trazo, y las normas de residuos regulan el manejo de lo que sale de la excavación. Cuando la conducción cruza otros ámbitos, a la autorización de la Semarnat se suman las de la Conagua, para el uso y la descarga del agua, y las municipales, para el uso de suelo.

05

Calidad: ISO 9001 y control en obra

QUÉ ES ISO 9001

La ISO 9001:2015 especifica los requisitos de un sistema de gestión de la calidad para una organización que necesita demostrar que entrega de manera constante productos y servicios que cumplen los requisitos del cliente y los legales. Fue aprobada el 22 de septiembre de 2015, la prepara el comité ISO/TC 176/SC 2, y es genérica: se aplica a cualquier organización sin importar tipo ni tamaño. Reemplazó a la edición 2008, y su adopción mexicana es la NMX-CC-9001-IMNC-2015. Se apoya en siete principios: enfoque al cliente, liderazgo, compromiso de las personas, enfoque a procesos, mejora, toma de decisiones basada en la evidencia y gestión de las relaciones. La generación anterior de normas tenía ocho: separaba el enfoque de procesos y el enfoque de sistema para la gestión, que la edición 2015 fundió.

CÓMO SE TRADUCE EN UNA OBRA

Un sistema de gestión de calidad en obra se reconoce porque deja papeles. Cuatro de ellos son típicos.

1. Documentos: manual de calidad, procedimientos, instructivos y registros, ordenados por proceso.
2. Ensayos con laboratorio acreditado: en obra debe haber un laboratorio acreditado ante la EMA, además de los de cada planta de prefabricados.
3. Control por lote: en una planta de concreto, un número fijo de muestras por volumen colado y un criterio de desmolde.
4. Supervisión independiente. Un caso bien documentado es la rehabilitación de la zona L-8A a L-8B del Emisor Central, donde participaron la supervisión interna del SACM, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, una supervisión externa y la contratista, y de sus recorridos salió un dictamen técnico que cambió el procedimiento constructivo el 6 de enero de 2009. Es un ejemplo de control que corrige a tiempo.

CRITERIO DE ACEPTACIÓN DEL CONCRETO

El control estadístico compara los resultados de cilindros con la resistencia especificada. Con $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$, el criterio habitual del reglamento ACI 318 pide que el promedio de tres ensayos consecutivos iguale o supere f'_c y que ningún ensaye individual quede más de 35 kg/cm^2 por debajo, es decir, que ninguno baje de 315 kg/cm^2 . Un lote de cinco cilindros que dio 380, 395, 410, 372 y 388 kg/cm^2 tiene un promedio de 389 y un mínimo de 372, de modo que se acepta; su coeficiente de variación es de 3.7 %, señal de un control muy bueno de la planta. Si el coeficiente sube de 10 %, la desviación se come el margen y hay que subir la resistencia de dosificación, como se vio en el capítulo 6.

QUÉ CUBRE Y QUÉ NO

La calidad que mide un sistema ISO 9001 es la conformidad con requisitos. No decide si los requisitos eran correctos. Un estimado de agua subterránea muy por debajo del gasto real, o un pago de piezas de más, no son defectos del concreto. Vienen del estudio previo (capítulo 4) y del control de estimaciones, y por eso un sistema de calidad no sustituye la revisión técnica independiente del proyecto.

Sustentabilidad y sostenibilidad en infraestructura hidráulica

DOS PALABRAS, UN MISMO ORIGEN

El concepto nace del informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, conocido como Informe Brundtland, publicado en abril de 1987, que lo define como el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas. Esa definición pasó al principio 3 de la Declaración de Río (1992).

En español, el Diccionario de la Lengua Española registra sustentable como sinónimo de sostenible, y Fundéu RAE los trata como sinónimos. El uso regional distingue: sostenible predomina en España y sustentable en buena parte de América Latina. La traducción del inglés *sustainable* explica la doble forma.

LA CONVENCIÓN DE ESTE DOCUMENTO

QUÉ SE MIDE EN UNA CONDUCCIÓN

TABLA 8.2. CRITERIOS DE SUSTENTABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD PARA UNA CONDUCCIÓN DE AGUAS RESIDUALES

DIMENSIÓN	PREGUNTA	CÓMO SE RESPONDE
Energía	¿Funciona por gravedad o necesita bombeo?	Se calcula la energía anual de bombeo que se evita
Materiales	¿Se reducen los residuos y se alarga la vida útil?	Prefabricación con control en planta; cemento resistente a sulfatos
Agua	¿Qué se descarga y con qué calidad?	Límites de la NOM-001-SEMARNAT-2021
Suelo y rezaga	¿Adónde va el material excavado?	Bancos de tiro autorizados y volumen suelto transportado (capítulo 6)
Economía	¿El costo se puede sostener?	Costo de inversión, operación y mantenimiento en el análisis costo-beneficio

DIMENSIÓN	PREGUNTA	CÓMO SE RESPONDE
Sociedad	¿La población aceptó la obra?	Consulta, gestión de predios y atención de molestias

La energía es la dimensión más fácil de cuantificar. La potencia de una bomba y la energía que consume en un año son:

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta} \quad E = P t$$

donde P es la potencia en el eje (W), ρ es la densidad del agua (1,000 kg/m³), g es la gravedad (9.81 m/s²), Q es el gasto (m³/s), H es la carga (m), η es el rendimiento, E es la energía anual (kWh) y t son las horas de operación al año. Una bomba de 0.5 m³/s contra 40 m de carga, con rendimiento de 0.70, pide unos 280 kW y consume 2.24 GWh en 8,000 horas. Una conducción por gravedad evita esa energía, y la cifra, multiplicada por la tarifa y por los años de vida, pesa más en la comparación que la diferencia en obra civil.

El Drenaje Profundo de la Ciudad de México sirve de advertencia sobre cómo una obra sustentable en su origen puede dejar de serlo por fuera de su diseño. No requiere bombeo por funcionar por gravedad. Se concibió para trabajar solo en la época de lluvias y dejar el estiaje para inspección y mantenimiento; el hundimiento regional por sobreexplotación del acuífero le quitó capacidad a los grandes drenes superficiales y lo obligó a operar todo el año, lo que impidió inspeccionarlo. Un efecto sobre el agua subterránea, que es sustentabilidad, terminó golpeando el mantenimiento de la obra, que es sostenibilidad.

Cómo el agua subterránea terminó golpeando el mantenimiento

Fuera del túnel



Diseño previsto: trabajar en lluvias y dejar el estiaje para inspección y mantenimiento. Datos de Morales Muñoz (2014, pp. 6 y 76).

Figura 8.3. Cómo el agua subterránea terminó golpeando el mantenimiento del Drenaje Profundo

07

Mantenimiento de conducciones: del plan a la obra

El mantenimiento preventivo se programa antes de la falla: inspección visual, medición de sedimentos, revisión de juntas y válvulas, calibración de medidores. En un túnel profundo exige sacarlo de servicio y controlar la ventilación y los gases. El correctivo repara grietas, sustituye tramos o inyecta lechada. El desazolve retira sedimento y grasas, porque en una conducción por gravedad el azolve reduce el área útil y sube la fricción. La rehabilitación repara con camisas o revestimiento interior, o sustituye el tubo.

PREVENTIVO Y CORRECTIVO

El mantenimiento preventivo es el que se destina a conservar equipos o instalaciones mediante revisión y reparación que garanticen su funcionamiento y fiabilidad, y se hace con el equipo en condiciones de funcionar. El correctivo es el que corrige defectos observados; es la forma más básica y, históricamente, la única hasta la Primera Guerra Mundial. El criterio moderno agrega que el mantenimiento debe adelantarse a la falla.

INSPECCIÓN

La inspección visual y topográfica es el método de menor costo: se recorre el conducto, se mide la sección, se registran filtraciones y niveles de gas. En el Emisor Central, desde los años ochenta el recorrido se hizo primero en equipo anfibio, desde la lumbrera L-0 hasta el portal de salida; el procedimiento se abandonó porque la lancha volcó varias veces y la poca luz impedía ver más que las filtraciones mayores. Lo sustituyó un tractor agrícola que remolcaba plataformas sobre llantas, con personal, planta generadora y unidad de iluminación.

Cuando el túnel no es transitable se usa un vehículo no tripulado con cámaras. En 1999 la dirección de operación del SACM informó que el Emisor Central ya no trabajaba a su capacidad de 220 m³/s, y en el estiaje siguiente se filmaron los recorridos desde L-0 al portal de salida con lanchas no tripuladas provistas de cámaras. En 2004-2005 se hizo una primera inspección del tramo L-3 a L-4 con un vehículo anfibio no tripulado. En tuberías de diámetro pequeño y mediano, la práctica es un robot de cámara que recorre la línea y registra grietas, deformaciones y depósitos; sus hallazgos se codifican con protocolos como el PACP de NASSCO. En un túnel de gran diámetro, la inspección es presencial o con vehículos.

La inspección dentro de un espacio confinado obliga a seguir la NOM-033-STPS-2015 y a medir gases. En L-8A a L-8B, los descensos de personal se hicieron con mascarillas y equipo de detección porque aún había niveles de gas por encima de los permitidos; se midió H₂S de 0 a 20 ppm y oxígeno de 19 a 21 %.

DESAZOLVE

Retirar sedimento, basura y tapones de concreto que bajan la sección útil. En una conducción de gravedad esto sube las pérdidas por fricción. En L-8A a L-8B se retiraron desazolves y tapones de concreto con cargador frontal y costaleras de secado. El tirante de aguas negras en el túnel fue de 50 a 65 cm durante la inspección. Para dejar el túnel seco se cerraron compuertas en las lumbreras 4B, 5A, 5B, 6A, 6B, 7 y 7A y se colocaron agujas en la lumbrera 8 y en la obra de toma.

La condición para hacerlo es poder desviar el agua. A mediados de 2007 se empezó a construir cuatro plantas de bombeo (Gran Canal km 11+600 de 21 m³/s, Casa Colorada Superficial de 20 m³/s, Canal de Sales de 10 m³/s y Vaso del Cristo de 9 m³/s) que permitieron cerrar la obra de toma del Gran Canal al Interceptor Oriente para inspeccionar y dar mantenimiento al Emisor Central desde el estiaje de 2008.

El efecto del deterioro sobre la capacidad se estima con Manning. Como Q es inversamente proporcional a n a igual pendiente y sección:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

donde Q_1 y Q_2 son los gastos antes y después del deterioro (m³/s) y n_1 y n_2 son los coeficientes de rugosidad correspondientes. En el Emisor Central el deterioro llevó n de 0.0126 a entre 0.016 y 0.0221. El conducto pasó a llevar entre 57 y 79 % del gasto que llevaba cuando era nuevo, y esa pérdida de capacidad es la razón económica del mantenimiento.

REHABILITACIÓN

Reparar sin sustituir toda la conducción. Las técnicas documentadas en el mismo caso son estas.

1. Limpieza con hidroescarificado y pruebas. Con presiones de 10,000, 20,000 y 28,000 a 30,000 psi se probó cuánto concreto dañado se retiraba y qué pH quedaba en la pared; los resultados fueron pH de 3 a 4, de 5 a 6 y de 7, este último con el acero libre de óxido.
2. Hidrodemolición. Retira el concreto dañado sin generar microgrietas ni dañar el armado; el equipo reportado trabaja de 12,000 a 25,000 psi con 37 L/min y un motor de 150 HP.
3. Hidroescarificado en dos etapas. La primera, a 240° del perímetro donde el daño era mayor, del 22 de diciembre de 2008 al 25 de marzo de 2009, sobre 1,309 m, con pH final de 7, 94 días trabajados en 2 turnos de 12 horas; la segunda, a 120° después de que un dictamen técnico del 6 de enero de 2009 cambiara el procedimiento a revestimiento a 360°. Se retiraron 5 cm de concreto dañado por gases.

4. Revestimiento nuevo. Cimbra telescópica en lugar de concreto lanzado y recubrimiento de PVC T-Lock contra el ataque de gases.
5. Calafateo de las filtraciones mínimas, sin inyección.



Figura 8.4. Inicio del hidroescarificado dentro del túnel del Emisor Central

Para tubería de agua potable, los criterios de mantenimiento y reparación (fugas, sustitución de tramos y piezas especiales) se tratan en el libro de mantenimiento y reparación de tuberías del MAPAS de la Conagua.

QUÉ DICE EL CASO

El diseño preveía inspección y mantenimiento en el estiaje; cuando el sistema pasó a operar también en estiaje, ya no se pudieron hacer inspecciones ni mantenimientos. La rehabilitación de L-8A a L-8B encontró corrosión del 100 % del acero en los costados. La enseñanza para cualquier obra profunda es que el mantenimiento se diseña con la obra: un túnel que solo puede inspeccionarse si se desvía el agua necesita desde el proyecto las lumbreras, compuertas y plantas de bombeo que permitan hacerlo.

Inspección del Emisor Central, de los años ochenta a 2008



Eje a escala (9 px por año); las barras grises marcan periodos. Datos de Morales Muñoz (2014, pp. 75-77 y 90-96).

Figura 8.5. Inspección y rehabilitación del Emisor Central, de los años ochenta a 2008

08

Balance

El marco normativo admite dos lecturas. Desde el escritorio es una lista de requisitos que se cumplen con un documento; desde la residencia de obra es una lista de cosas que alguien tiene que revisar un martes a las siete de la mañana, con el concreto ya en el camión. La segunda es la que cuenta: una norma sin quien la verifique en el frente no protege nada.

Por eso la parte más útil de la normativa no es la lista de números sino la regla de aceptación, como la del concreto, que dice en qué momento se rechaza un lote. La calidad certificada, además, no reemplaza la revisión técnica de los estudios previos: la ISO 9001 mide la conformidad con lo que se pidió, no si lo pedido era lo correcto.

El caso del Emisor Central muestra el costo de separar el diseño del mantenimiento. La obra se diseñó para inspeccionarse en el estiaje y terminó sin estiaje. En un túnel profundo, el plan de mantenimiento debe entregarse con los planos de construcción y no después.

La aplicación de esta normativa al Túnel Emisor Oriente está en los capítulos 16 (materiales y calidad), 18 (sustentabilidad y normatividad), 19 (operación y mantenimiento) y 20 (gestión, costos y seguridad).