



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELADO ANALÍTICO Y NUMÉRICO DE  
FILTRACIONES DE AGUA EN TÚNELES

**TESIS:**

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A:

**JAVIER ANTONIO REYES ROJAS**



TUTOR:

**DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA**

2015



## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: M. I. Agustín Deméneghi Colina

Secretario: Mtra. Margarita Puebla Cadena

Vocal: Dra. Norma Patricia López Acosta

1<sup>er</sup>. Suplente: Ing. Marcos Trejo Hernández

2<sup>do</sup>. Suplente: M. I. Guillermo Mancilla Urrea

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM

## **TUTOR DE TESIS**

DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA

---

**FIRMA**



## AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

A la *Universidad Nacional Autónoma de México* y al *Instituto de Ingeniería de la UNAM* por el tiempo, las facilidades, estancia y su apoyo institucional en el manejo de información, para la realización y desarrollo de este trabajo académico.

Mi gran profundo agradecimiento a la *Dra. Norma Patricia López Acosta*, por su apoyo incondicional, enseñanzas, tiempo, paciencia, aliento, motivación, guía y crítica para el mejoramiento de esta tesis y desarrollo profesional.

A las personas que con su amor, ejemplo y confianza me motivan:

A *Dios* por tu amor infinito, paciencia, comprensión, guía y encaminarme en el buen camino de la vida.

A mi hijo *José Javier*, mi sobrina *Amanda Yarezi* y *Doña Amanda Pascual Cirilo*: Gracias *Dios* porque ellos son parte de mi formación, mi vida y por compartir tantas sonrisas, enseñanzas, amor, alegrías y tristezas juntos. Los amo.

Dedico este trabajo a mi Familia por su gran apoyo incondicional en todo momento, a mi madre *María Luisa Ileana Rojas Moreno* y a mi hermana *Ileana Reyes Rojas*. Las amo con todas mis fuerzas.

A mi madre por creer en mí, brindarme todo su amor, enseñanzas, cariño y el apoyo incondicional en todo momento a lo largo de la vida. Te amo y Dios te bendiga.

A mis amigos y compañeros por su amistad, cariño y paciencia en todo momento.

A *Denise Reyes García* por el tiempo y cariño compartido.

*“El ingeniero debe ser siempre autocrítico, ya que al fin de cuentas el juicio del profesional en ingeniería se forma con el retroanálisis de las experiencias”.*

*Jesús Alberro Aramburu (1935-2008)*

*“La educación es la mejor defensa de las naciones”.*

*Edmund Burke (1729-1797)*





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVÓNIMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/075/15

Señor  
JAVIER ANTONIO REYES ROJAS  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"MODELADO ANALÍTICO Y NUMÉRICO DE FILTRACIONES DE AGUA EN TÚNELES"**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES SOBRE TÚNELES Y PROBLEMÁTICA DE FILTRACIÓN EN TÚNELES
- II. MODELOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN TÚNELES
- III. CONTRIBUCIÓN A LOS ANÁLISIS DE FILTRACIONES DE AGUA EN TÚNELES
- IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA
- ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 11 de agosto del 2015.  
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.







## “Modelado analítico y numérico de filtraciones de agua en túneles”

### ÍNDICE

INDICE DE FIGURAS .....	iii
INDICE DE TABLAS .....	vii
RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	3
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	5
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Objetivo de la tesis .....	6
1.3 Alcances .....	6
1.4 Metodología.....	7
CAPÍTULO 2.....ANTECEDENTES SOBRE TÚNELES Y PROBLEMÁTICA DE FILTRACIONES EN TÚNELES .....	9
2.1 Reseña histórica.....	9
2.2 Estudios previos para la construcción de un túnel.....	10
2.3 Clasificación de túneles.....	14
2.3.1 Clasificación de acuerdo con su función.....	14
2.3.2 Clasificación de acuerdo con su ubicación .....	15
2.3.3 Clasificación de acuerdo con su aplicación .....	16
2.4 Métodos de excavación para túneles.....	20
2.4.1 Métodos convencionales.....	20
2.4.2 Métodos con máquinas integrales.....	22
2.5 Problemática de las filtraciones en túneles.....	24
2.6 Casos de filtraciones de túneles en el mundo .....	27
2.6.1 Filtraciones en los túneles noruegos.....	27
2.6.2 Filtraciones en los túneles de los trenes de Alta Velocidad Española (AVE) en la Sierra de Guadarrama, España .....	33
2.6.3 Filtraciones en los túneles de la Línea 1 del Metro de Caracas, Venezuela .....	35
2.6.3.1. Causas básicas del origen de las filtraciones .....	35
2.6.3.2. Diagnóstico de las causas primarias.....	36
2.6.3.3. Posibles alternativas para su solución .....	37
2.6.4 Filtraciones durante la excavación del tramo III de la lumbrera L-10 a la Lumbrera L-11 del Túnel Emisor Oriente (TEO), México .....	39
2.6.5 Filtraciones en la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, México.....	43
CAPÍTULO 3....MODELOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN TÚNELES.....	47
3.1 Introducción .....	47
3.1.1 Definición de un modelo .....	49
3.1.2 Validación de un modelo .....	49
3.2 Modelos físicos de laboratorio.....	50
3.2.1 Modelos usuales.....	50
3.2.2 Modelo de Hele-Shaw .....	51



3.3	Modelos analíticos.....	53
3.3.1	Flujo establecido.....	53
3.3.1.1.	Medio homogéneo e isótropo.....	53
3.3.1.1.1.	Ecuación de Polubarinova-Kochina (1962) .....	55
3.3.1.1.2.	Ecuación de Goodman et al. (1965) .....	56
3.3.1.1.3.	Ecuación de Alberro y Hernández (1989).....	57
3.3.1.2.	Ecuación de Alberro y Hernández (1989) para medios estratificados .....	60
3.3.2	Flujo transitorio .....	62
3.3.2.1.	Ecuación de Goodman et al. (1965) para flujo transitorio.....	62
3.3.2.2.	Ecuación para el cálculo de infiltraciones en acuíferos recargados por lluvia.....	64
3.4	Modelos numéricos .....	64
3.4.1	Consideraciones generales.....	65
3.4.2	Método de elementos finitos (MEF) .....	66
3.4.3	Metodología de análisis para el estudio del flujo de agua con modelado numérico mediante el MEF .....	67
3.4.4	Algoritmo PLAXFLOW.....	68
3.4.4.1.	Introducción .....	68
3.4.4.2.	Convención de signos .....	70
3.4.4.3.	Generación de la geometría del modelo .....	70
3.4.4.4.	Propiedades de los materiales .....	71
3.4.4.5.	Generación de la malla de elementos finitos .....	72
3.4.4.6.	Definición de condiciones de frontera .....	73
CAPÍTULO 4..... CONTRIBUCIÓN A LOS ANÁLISIS DE FILTRACIONES DE AGUA EN TÚNELES .....		75
4.1	Aplicación de métodos analíticos en la evaluación del flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo.....	75
4.1.1	Modelo analítico de Polubarinova-Kochina (1962) .....	77
4.1.2	Modelo analítico de Goodman et al. (1965) .....	77
4.1.3	Modelo analítico de Alberro y Hernández (1989).....	78
4.1.4	Comparación de resultados .....	78
4.2	Aplicación de modelos numéricos en la evaluación del flujo establecido.....	79
4.2.1	Medio homogéneo e isótropo.....	80
4.2.1.1.	Geometría del modelo.....	80
4.2.1.2.	Malla de elementos finitos.....	80
4.2.1.3.	Condiciones de frontera .....	81
4.2.1.4.	Resultados.....	82
4.2.2	Medio heterogéneo e isótropo.....	85
4.2.2.1.	Geometría del modelo.....	85
4.2.2.2.	Malla de elementos finitos.....	87
4.2.2.3.	Condiciones de frontera .....	88
4.2.2.4.	Resultados.....	88
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		91
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....		95



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1.1	Esquema ilustrativo del desarrollo de esta tesis “ <i>Modelado analítico y numérico de filtraciones de agua en túneles</i> ” .....	8
Fig 2.2	Tipo de terreno para la construcción (fuente: <a href="http://www.arqhys.com/construccion/tierra-relleno.html">http://www.arqhys.com/construccion/tierra-relleno.html</a> , 2015). .....	11
Fig 2.3	Estudio Geológico y Geotécnico del Ramal Camelinas para la construcción del túnel 2 (fuente: <a href="http://noticiales.com/aun-sin-liberar-estudio-geologico-y-geotecnico-de-la-unam-para-ramal-camelinas/">http://noticiales.com/aun-sin-liberar-estudio-geologico-y-geotecnico-de-la-unam-para-ramal-camelinas/</a> , 2014). .....	11
Fig 2.4	Sondeo para la construcción del Monumento “El Santísimo” (fuente: <a href="http://www.piltta.com">http://www.piltta.com</a> , 2013) .....	12
Fig 2.5	Dimensión de un túnel para drenaje profundo (fuente: <a href="http://fuerza.com.mx/2014/07/27/inician-construccion-de-tunel-que-terminara-con-inundaciones-en-valle-de-chalco/">http://fuerza.com.mx/2014/07/27/inician-construccion-de-tunel-que-terminara-con-inundaciones-en-valle-de-chalco/</a> , 2015). .....	12
Fig 2.6	Esquema básico de un anillo dovelado (fuente: <a href="http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-30112012000100001&amp;script=sci_arttext">http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-30112012000100001&amp;script=sci_arttext</a> , 2012). ..	13
Fig 2.7	Sistema de encofrado del túnel (Fuente: <a href="http://www.rollingmachinery.com.es/index.html">http://www.rollingmachinery.com.es/index.html</a> , 2014). .....	13
Fig 2.8	Instalación eléctrica del túnel en el Oeste de San Pedro (Línea de Alta Velocidad (LAV) Madrid-Valladolid) (fuente: Grupo OHL, 2012). .....	14
Fig 2.9	Túnel de ferrocarril de Saint-Gothard, Suiza (fuente: <a href="http://www.nemetscheck-allplan.fr">http://www.nemetscheck-allplan.fr</a> , 2015). .....	16
Fig 2.10	Túnel de carretera. Circunvalación oeste de Zurich N4/N20 Knonauremant, (fuente: <a href="http://www.Phoenixcontact.com">http://www.Phoenixcontact.com</a> ) .....	16
Fig 2.11	Distintas secciones para dos vías en túneles para metro (Soto, 2004). .....	17
Fig 2.12	Túnel de la línea 9 del metro de Barcelona (fuente: <a href="http://magazine.sener.es/news/continua-la-integracion-de-la-linea-9-del-metro-de-barcelona/46/">http://magazine.sener.es/news/continua-la-integracion-de-la-linea-9-del-metro-de-barcelona/46/</a> , 2013). .....	17
Fig 2.13	Túnel para la distribución de agua potable en la ciudad (Soto, 2004). .....	18
Fig 2.14	Acceso de un túnel hidráulico (fuente: <a href="http://www.tierraminera.wordpress.com/obra/civil">http://www.tierraminera.wordpress.com/obra/civil</a> , 2011). .....	18
Fig 2.15	Túneles de alcantarillado en París (fuente: <a href="http://www.paris.es/museo-alcantarillado">http://www.paris.es/museo-alcantarillado</a> , 2015). .....	19
Fig 2.16	Túneles para galería de servicios (Soto, 2004). .....	19
Fig 2.17	Método Inglés (Cuenca, 2009) .....	20
Fig 2.18	Método Clásico de Madrid (Cuenca, 2009) .....	20
Fig 2.19	Esquema del Método Alemán (fuente: <a href="http://www.opandalucia.es/verdocumento.php?documento=capitulo%20XIII_Construccion%20de%20tuneles.pdf">http://www.opandalucia.es/verdocumento.php?documento=capitulo%20XIII_Construccion%20de%20tuneles.pdf</a> ) .....	21



Fig 2.20	Método Austriaco (fuente: <a href="http://www.opandalucia.es/verdocumento.php?documento=capitulo%20XIII_Construccion%20de%20tuneles.pdf">http://www.opandalucia.es/verdocumento.php?documento=capitulo%20XIII_Construccion%20de%20tuneles.pdf</a> ).....	21
Fig 2.21	Clasificación de TBM según el tipo de suelo (Beromeu, 2010). .....	23
Fig 2.24	Ejemplo de filtraciones y flujo de agua: (a) filtraciones de agua en un túnel; (b) flujo de agua a través de un estrato de basalto permeable (fuente: <a href="http://tunnels.piarc.org/tunnels/ressources/4/542,Chap-5-Environmental-issues-v-11.10.pdf">http://tunnels.piarc.org/tunnels/ressources/4/542,Chap-5-Environmental-issues-v-11.10.pdf</a> ). .....	25
Fig 2.25	Efecto de las filtraciones: a) efecto de entrada de agua en una junta de construcción; b) agua de drenaje y precipitaciones de cal en un túnel con revestimiento de concreto (fuente: <a href="http://tunnels.piarc.org/tunnels/ressources/4/542,Chap-5-Environmental-issues-v-11.10.pdf">http://tunnels.piarc.org/tunnels/ressources/4/542,Chap-5-Environmental-issues-v-11.10.pdf</a> ). .....	26
Fig 2.26	Daños más frecuentes en túneles posibles causas y efectos (fuente: <a href="http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/6.9._adaptaci%C3%B3n_de_t%C3%A1neles_al_tr%C3%A1nsito_peatonal_tcm7-213279.pdf">http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/6.9._adaptaci%C3%B3n_de_t%C3%A1neles_al_tr%C3%A1nsito_peatonal_tcm7-213279.pdf</a> ) .....	27
Fig 2.27	Esquema de la determinación de perfiles acústicos para la excavación de túneles (Junca, 1990).....	28
Fig 2.28	Excavación de túneles noruegos: a) Perforación con taladros para la inyección de sellado de filtraciones en el frente de ataque; b) Instalación de láminas impermeabilizantes de Polietileno Expandido (Junca, 1990).....	28
Fig 2.29	Mapa de la localización de los principales túneles submarinos y terrestres con problemas de filtraciones. ....	30
Fig 2.30	Túnel de Vardo. Portal este (Junca, 1990). ....	31
Fig 2.31	Túnel Kvalsund en construcción (Junca, 1990). ....	32
Fig 2.32	a) Entrada del Túnel de Flekkeroy; b) Interior del Túnel Flekkeroy (Junca, 1990).....	32
Fig 2.33	Túnel de Hvaler. Portal sur (Junca, 1990). ....	33
Fig 2.34	Interior de uno de los túneles de Guadarrama (fuente: <a href="http://www.elmundo.es">http:// www.elmundo.es</a> , España, 2007). ....	34
Fig 2.35	Trabajos de mantenimiento: a) personal técnico y especialistas en vías férreas realizando labores de limpieza y mantenimiento; b) trabajos de sustitución de mantenimiento mayor en la Línea 1 del Metro de Caracas (fuente: <a href="http://www.correodelorinoco.gob.ve">http:// www.correodelorinoco.gob.ve</a> , 2011).....	37
Fig 2.36	Alternativa 1: Implemento de sellado en las juntas entre anillos debajo de las losas (Perri, 2010).....	37
Fig 2.37	Alternativa 2: Sustitución de la losa de vía con balasto (Perri, 2010).....	38
Fig 2.38	Alternativa 3: Control de las filtraciones (Perri, 2010).....	38
Fig 2.39	Túnel Emisor Oriente: a) Zona de la banda transportadora de material de excavación; b) Maniobra y colocación de una dovola para un anillo del túnel (Prácticas profesionales del Colegio de Ingenieros Civiles de México –CICM–; Reyes, 2013). ....	39
Fig 2.40	Trazo de la trayectoria del Túnel Emisor Oriente y su cercanía con el Túnel Emisor Central (TEC) hacia el portal de salida. ....	40
Fig 2.41	Ubicación de la lumbrera L-10 del Tramo III del Túnel Emisor Oriente (TEO). ....	41
Fig 2.42	Filtraciones durante la excavación: a) distribución de costales de arena en la parte inferior del anillo; b) uso de bomba de achique para retirar el agua hacia el contenedor de agua	



residual de la máquina (Prácticas profesionales del Colegio de Ingenieros Civiles de México – CICM–; Reyes, 2013).....	42
Fig 2.43 Primer método: a) y b) Colocación de bomba Wilden para retirar las filtraciones de agua en el empaquetado de cepillos nuevos de la primera etapa del cambio de cepillos (Prácticas profesionales del Colegio de Ingenieros Civiles de México –CICM–; Reyes, 2013).....	42
Fig 2.44 Segundo método: a) Realizar la perforación en zona del taco sofrazar de la dovela y b) Adaptación y colocación de válvula a dovelas para inyectar sustancia (Prácticas profesionales del Colegio de Ingenieros Civiles de México –CICM– ; Reyes, 2013) .....	43
Fig 2.45 Segundo método: a) Inyección de resina en las dovelas de la parte inferior del anillo; b) Catalizador-Resina junto con la espuma de Poliuretano Poly-Tuff (Prácticas profesionales del Colegio de Ingenieros Civiles de México –CICM–; Reyes, 2013). .....	43
Fig 2.46 Trazo de la trayectoria de la Línea 12 del metro de la Ciudad de México de Poniente a Oriente. ....	44
Fig 2.47 a) Filtraciones de agua en paredes del túnel; b) Localización del desgaste de vías provocado por las filtraciones en la Línea 12 del metro (fuente: <a href="http://archivo.eluniversal.com.mx/ciudad-metropoli/2015/nuevas-fallas-amenazan-con-cierre-total-de-l12-1097224.html#grafico040515">http://archivo.eluniversal.com.mx/ciudad-metropoli/2015/nuevas-fallas-amenazan-con-cierre-total-de-l12-1097224.html#grafico040515</a> ) .....	45
Fig 2.48 Filtraciones en trabes y columnas de concreto en la Línea 12 del metro inaugurada el 30 de octubre de 2012 (Fuente: <a href="http://www.jornada.unam.mx/2014/03/28/capital/039n1cap">http://www.jornada.unam.mx/2014/03/28/capital/039n1cap</a> ). .....	46
Fig 3.1 Efecto dren: impactos causados por el rebajamiento del nivel freático desde su posición inicial (línea continua) hasta la final (línea discontinua) (Carrera y Vázquez-Suñé, 2008).	47
Fig 3.2 Esquema del desarrollo del Capítulo 3 de esta tesis. ....	48
Fig 3.3 Aspectos a considerar en la aplicación de un modelo a sistemas de aguas subterráneas (fuente: <a href="http://aguas.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro107/pdf/lib107/in_05.pdf">http://aguas.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro107/pdf/lib107/in_05.pdf</a> )... ..	50
Fig 3.4 Modelo físico del ensayo de agitación de la ampliación del puerto de Barcelona (Gutiérrez, 2003). ....	51
Fig 3.5 Modelo de Hele Shaw: a) esquema simples de una celda Hele-Shaw con un arreglo lineal para la inyección de un colorante; b) visualización experimental de las líneas de corriente de un flujo bidimensional en un perfil alar (fuente: <a href="http://materias.df.uba.ar/e1a2012c2/category/material-complementario/page/2/">http://materias.df.uba.ar/e1a2012c2/category/material-complementario/page/2/</a> , 2015). .....	52
Fig 3.6 Esquema para la aplicación de la ecuación de Polubarinova-Kochina (1962).....	56
Fig 3.7 Dibujo representativo para la aplicación de la ecuación de Goodman <i>et al.</i> (1965).....	57
Fig 3.8 Sistema de ejes de referencia de un túnel en un medio homogéneo e isótropo (Alberro y Hernández, 1989).....	58
Fig 3.9 Sistema de ejes de referencia (Alberro y Hernández, 1989). ....	59
Fig 3.10 Líneas equipotenciales y de flujo (Alberro y Hernández, 1989). ....	60
Fig 3.11 Sistema de referencia en un medio estratificado (Alberro y Hernández, 1989). ....	60
Fig 3.12 Líneas equipotenciales y de flujo en un medio estratificado (Alberro y Hernández, 1989). ....	61
Fig 3.13 Túnel excavado en materiales de alta porosidad y modificación del nivel freático (Padilla, 2011). ....	63



Fig 3.14	Diagrama de árbol para la solución de problemas de flujo de agua en túneles. ....	66
Fig 3.15	Programas de computadora para la solución de problemas de ingeniería geotécnica. ....	67
Fig 3.16	Consideración de signos para presiones en PLAXFLOW (Mendoza, 2015). ....	70
Fig 3.17	Diseño de la geometría para el modelado de un túnel en PLAXFLOW. ....	71
Fig 3.18	Asignación de propiedades de los materiales en el programa PLAXFLOW. ....	72
Fig 3.19	Generación de la malla de elementos finitos para un túnel. ....	73
Fig 3.20	Definición de condiciones de frontera para un túnel. ....	73
Fig 4.1	Estratigrafía típica simplificada de la Zona Lacustre de la Ciudad de México asumida en los cálculos. ....	75
Fig 4.2	Representación esquemática de los análisis considerando el túnel ubicado a diferentes profundidades dentro de la formación arcillosa superior (FAS). ....	76
Fig 4.3	Comparación de los gastos de infiltración hacia el túnel obtenidos con diferentes modelos analíticos. ....	79
Fig 4.4	Geometría del modelo (análisis para condición de flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo). ....	80
Fig 4.5	Discretización de la región de flujo (análisis para condición de flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo). ....	81
Fig 4.6	Condiciones de frontera asumidas en el modelo numérico (análisis para condición de flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo). ....	82
Fig 4.7	Distribución de cargas hidráulicas (análisis para condición de flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo). ....	83
Fig 4.8	Distribución de las velocidades de flujo (análisis para condición de flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo). ....	84
Fig 4.9	Comparación de los gastos de infiltración obtenidos con las ecuaciones analíticas y el modelado numérico. ....	85
Fig 4.10	Representación esquemática de los análisis considerando el túnel ubicado a diferentes profundidades dentro de la formación arcillosa inferior (FAI). ....	86
Fig 4.11	Geometría del modelo (análisis para condición de flujo establecido en un medio heterogéneo e isótropo). ....	86
Fig 4.12	Discretización de la región de flujo (análisis para condición de flujo establecido en un medio heterogéneo e isótropo). ....	87
Fig 4.13	Condiciones de frontera consideradas en el modelo numérico (análisis para condición de flujo establecido en un medio heterogéneo e isótropo). ....	88
Fig 4.14	Distribución de cargas hidráulicas (análisis para condición de flujo establecido en un medio heterogéneo e isótropo). ....	89
Fig 4.15	Vectores de velocidad (análisis para condición de flujo establecido en un medio heterogéneo e isótropo) ....	90



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Túneles noruegos submarinos de carretera en servicio (Junca, 1990).....	29
Tabla 2.2	Problemática y consecuencias de las filtraciones en los túneles de la línea 1 del Metro de Caracas.....	36
Tabla 3.1	Métodos analíticos utilizados para el cálculo de filtración en túneles en condición de flujo establecido.....	54
Tabla 3.2	Métodos analíticos utilizados para el cálculo de filtración en túneles bajo condiciones de flujo transitorio.....	62
Tabla 3.3	Programas de computadora que utilizan elementos finitos y diferencias finitas.....	67
Tabla 4.1	Gastos de infiltración obtenidos con la ecuación de Polubarinova-Kochina (1962).	77
Tabla 4.2	Gastos de infiltración obtenidos con la ecuación de Goodman <i>et al.</i> (1965).....	77
Tabla 4.3	Gastos de infiltración obtenidos con la ecuación de Alberro y Hernández (1989) ..	78
Tabla 4.4	Variación de la malla de elementos finitos para las diferentes condiciones de análisis. ....	81
Tabla 4.5	Variación de la malla de elementos finitos para las diferentes condiciones de análisis. ....	87
Tabla 4.6	Gastos de infiltración hacia el interior del túnel en el medio heterogéneo de estudio con la sección del túnel localizada en la formación arcillosa inferior (FAI).....	90







## RESUMEN

La presencia de un túnel dentro de un suelo o macizo rocoso ocasiona el efecto de un dren hacia el cual el agua fluye, dando lugar a distintos problemas durante la construcción y también a largo plazo, como son: a) dificultades en el avance de la excavación, b) disminución de la resistencia del suelo o macizo rocoso, c) incremento de la presión del agua sobre el revestimiento primario y secundario, d) hinchamientos y reblandecimientos en materiales arcillosos (suelos expansivos), e) formación de cavidades en materiales salinos, f) descenso de los niveles de agua en la superficie provocando hundimiento del terreno, g) movimientos de laderas, h) impactos ambientales.

Los túneles también pueden experimentar filtraciones de agua asociadas al deterioro y pérdida de mortero, así como a deformaciones, grietas y roturas del revestimiento o caída de bloques debido al agua.

Teóricamente un túnel puede ser impermeable, es decir, que no experimente filtraciones de agua y que por tanto toda la presión se ejerza sobre su revestimiento; o bien, puede ser semi-permeable, permitiendo un cierto volumen de filtración y evitando presiones significativas sobre el revestimiento. En la práctica, la mayoría de los túneles son permeables durante su construcción y semipermeables durante su vida útil.

En esta tesis se muestra cómo se puede evaluar la infiltración de agua en túneles. En la parte principal, se presentan los análisis efectuados para determinar el gasto de infiltración en un túnel sin revestimiento que se encuentra ubicado en un suelo representativo de la Zona Lacustre de la Ciudad de México con base en métodos analíticos y numéricos. Los métodos analíticos expuestos corresponden a las ecuaciones de Polubarinova-Kochina (1962), Goodman *et al.* (1965) y Alberro y Hernández (1989) aplicables a medios homogéneos e isótropos. Los modelos analíticos previos se comparan con la solución obtenida mediante modelación numérica fundamentada en el método elementos finitos (MEF), con ayuda del programa PLAXFLOW. Los análisis numéricos se realizan considerando inicialmente el medio como homogéneo y posteriormente como heterogéneo. Asimismo los cálculos se efectúan en condiciones de flujo establecido. Los resultados se resumen en gráficas comparativas para facilitar su interpretación.

Al final, se dan conclusiones de los análisis efectuados y recomendaciones generales para llevar a cabo este tipo de cálculos.





## ABSTRACT

The presence of a tunnel in a soil or rock mass causes this structure behaves such as a drain to which the water flows, resulting in several problems during construction and long term, such as: a) difficulty in advancing the excavation, b) shear stress reduction of the soil or rock mass, c) increase the pore water pressure on the primary and secondary lining, d) swelling and softening in clayed materials (expansive soils), e) formation of cavities in saline materials, f) lowering of water levels on the surface causing land subsidence, g) landslides, h) environmental impacts.

The tunnels may also experience water infiltration associated with deterioration and loss of mortar, as well as deformations, cracking and breaking of the lining or block falls due to water.

Theoretically, a tunnel can be impermeable, that is, the tunnel does not experience water flow and therefore the whole pressure is experienced by its lining; or a tunnel can be semi-permeable, allowing a certain amount of filtration and avoiding significant pressures on the lining. In practice, most tunnels are permeable during construction and semi-permeable during their lifetime.

This thesis shows how to evaluate water inflow into tunnels. In the main part, the analyses performed to determine water infiltration into an unlined tunnel that is located in a representative soil of the Lacustrine Zone of Mexico City by analytical and numerical methods are presented. The exposed analytical methods correspond to Polubarinova-Kochina (1962), Goodman *et al.* (1965) and Alberro and Hernandez (1989), that are equations applicable to homogeneous and isotropic media. The previous analytical models are compared with the solution obtained by numerical modeling based on the finite element method (FEM), using the PLAXFLOW program. The numerical analyses are performed initially assuming the soil as a homogeneous material and subsequently as a heterogeneous material. Likewise the calculations are carried out under steady-state flow conditions. The results are summarized in comparative graphs for facilitating the interpretation.

At the end, conclusions of the performed analysis and general recommendations in order to carry out such calculations are given.





## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El flujo de agua a través de los suelos es un aspecto primordial en el área de la construcción y de la ingeniería geotécnica, relacionada con una gran diversidad de suelos de cimentación de construcciones y estructuras térreas. Estas estructuras pueden ser presas de tierra, taludes de bordos, excavaciones profundas, pavimentos, carreteras, túneles, etc.

Las infiltraciones de agua en los túneles de gran profundidad se consideran uno de los problemas de gran importancia que enfrentan los ingenieros civiles en la actualidad, cuyo trabajo no sólo está enfocado a túneles, sino a la construcción de obras de infraestructura de pequeñas o grandes dimensiones. Parte de esta problemática se atribuye al terreno donde se realizan excavaciones para la construcción de obras de ingeniería civil. El ingeniero civil debe tener conocimiento de las condiciones del suelo (en estado saturado o parcialmente saturado o no saturado), la geología del lugar, la estratigrafía, etc. El elemento principal que prácticamente toda infraestructura debe afrontar es el *agua*. Por tanto, es importante saber cómo aprovechar este recurso hídrico y proponer las soluciones adecuadas para poder gestionarlo mejor y evitar que dañe las construcciones.

La excavación de un túnel produce el efecto de un gran dren hacia el cual fluye el agua del subsuelo o de los acuíferos interceptados, dando lugar a distintos problemas durante la construcción y también a largo plazo, como son:

- ✚ Filtraciones de agua.
- ✚ Disminución de la resistencia del suelo o macizo rocoso.
- ✚ Incremento de las presiones intersticiales sobre el revestimiento primario y secundario.
- ✚ Hinchamientos y reblandecimientos en materiales arcillosos.
- ✚ Formación de cavidades en materiales salinos.
- ✚ Inconvenientes en el avance de la excavación.
- ✚ Descenso de los niveles de agua en la superficie, ocasionando a su vez un fenómeno de subsidencia.
- ✚ Impactos ambientales.

En el caso de las grandes ciudades como la Ciudad de México, que se encuentra ubicada en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), construir túneles de gran profundidad representa todo un reto, debido a las particularidades del subsuelo.



## 1.2 Objetivo de la tesis

El objetivo general de esta investigación es contribuir al estudio de la infiltración de agua en túneles en suelos homogéneos e isótropos, pero también en suelos heterogéneos, poniendo en evidencia las cualidades y limitaciones de las principales soluciones analíticas disponibles para estos fines y comparando los resultados obtenidos mediante modelación numérica a través del método de elementos finitos.

## 1.3 Alcances

El alcance de cada uno de los capítulos de esta tesis, se expone a continuación.

*Capítulo 1.-* Se da una breve introducción sobre la problemática de las filtraciones de agua en túneles construidos en suelos (durante su construcción y a largo plazo). Se señala el objetivo general de la investigación, y se indican los alcances y la metodología seguida para el desarrollo de la tesis.

*Capítulo 2.-* Se presenta una reseña histórica sobre el origen de los túneles. Se hace un recuento de los estudios previos para la construcción de un túnel. Se proporciona una clasificación general de los túneles, de acuerdo con su función, su ubicación y su aplicación. Se exponen los principales métodos de excavación para túneles que se utilizan en la actualidad (se discuten sus problemáticas más importantes, el impacto que producen durante la construcción a partir de las filtraciones que experimentan, entre otros). Al final de este capítulo, se ponen de manifiesto casos de filtraciones de túneles construidos en distintas partes del mundo (Noruega, España, Venezuela y México), remarcando los problemas a los que se enfrentaron los diseñadores y constructores, y se exponen las soluciones que contribuyeron a un mejor funcionamiento de los mismos.

*Capítulo 3.-* Se estudian los principales modelos analíticos y numéricos disponibles para la evaluación del flujo de agua en túneles construidos en suelos. Inicialmente se da una breve introducción, explicando cómo se definen y se validan los modelos empleados para el estudio de problemas de ingeniería. Se habla brevemente sobre modelos físicos de laboratorio. Posteriormente, se exponen las principales ecuaciones matemáticas para la evaluación de filtraciones en túneles bajo régimen establecido y transitorio en medios homogéneos y heterogéneos (ecuación de Polubarinova-Kochina, 1962; ecuación de Goodman *et al.*, 1965; ecuación de Alberro y Hernández, 1989; entre otras). En cuanto a la modelación numérica, el énfasis se centra en el método del elemento finito (MEF), utilizado para discretizar problemas continuos planteados por expresiones matemáticas determinadas. En la parte final, se proporcionan las consideraciones generales para la aplicación del MEF, y se explica con detalle el funcionamiento y manejo del programa de computadora PLAXFLOW. Se expone la metodología sugerida para realizar cálculos numéricos mediante este programa especializado, el cual, aplica la teoría de los elementos



finitos y permite efectuar análisis de flujo establecido y transitorio en condiciones saturadas y parcialmente saturadas.

*Capítulo 4.-* Se presentan los análisis efectuados para determinar el gasto de infiltración en un túnel sin revestimiento que se encuentra ubicado en un suelo representativo de la Zona Lacustre de la Ciudad de México con base en métodos analíticos y numéricos. Los métodos analíticos expuestos corresponden a las ecuaciones de Polubarinova-Kochina (1962), Goodman *et al.* (1965) y Alberro y Hernández (1989) aplicables a medios homogéneos e isótropos. Los modelos analíticos previos se comparan con la solución obtenida mediante modelación numérica fundamentada en el método elementos finitos (MEF), con ayuda del programa PLAXFLOW. Los análisis numéricos se realizan considerando inicialmente el medio como homogéneo y posteriormente como heterogéneo. Asimismo todos los cálculos se efectúan en condiciones de flujo establecido. Los resultados se resumen en gráficas comparativas para facilitar su interpretación y poder dar comentarios concluyentes sobre los mismos.

*Capítulo 5.-* Se dan conclusiones de los análisis efectuados y recomendaciones generales para llevar a cabo este tipo de cálculos.

## 1.4 Metodología

En el desarrollo de esta tesis fue necesario proponer una metodología que permitiera realizar el trabajo de manera ordenada, partiendo de los fundamentos teóricos básicos, mediante la investigación sobre los distintos métodos para calcular gastos de infiltración en túneles.

La metodología para este trabajo de tesis se dividió en tres partes. Primero, se hizo una recopilación bibliográfica de tesis, tesinas, artículos de investigación científica y por último notas periodísticas y páginas web que se centraran en la temática de “túneles”. En la segunda parte, se analizó, resumió y redactó toda la explicación para el empleo de ecuaciones analíticas y aplicación de modelado numérico a la evaluación de filtraciones en túneles en medios homogéneos y heterogéneos. En la tercera parte, para demostrar la aplicabilidad de los métodos analíticos y numéricos expuestos, se efectuaron diversos análisis paramétricos cuyos resultados se resumieron en gráficas comparativas de los distintos métodos. Al final, se interpretaron y compararon los resultados obtenidos, y se formularon conclusiones y recomendaciones para llevar a cabo este tipo de análisis de flujo de agua.

En la Figura 1.1 se muestra como está desglosado el trabajo de investigación de esta tesis titulada “*Modelado analítico y numérico de filtraciones de agua en túneles*”.

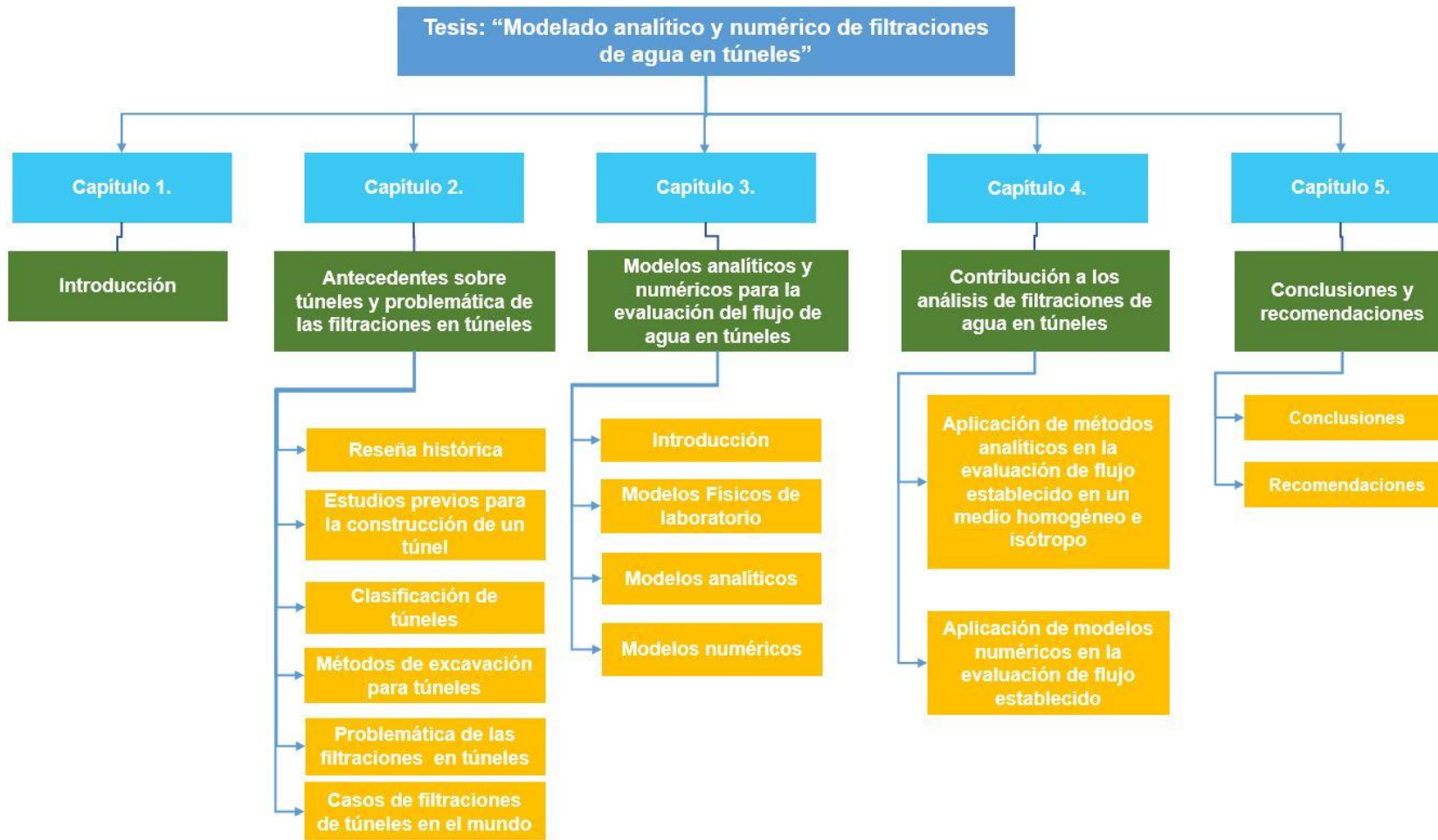


Fig 1.1 Esquema ilustrativo del desarrollo de esta tesis “*Modelado analítico y numérico de filtraciones de agua en túneles*”.





## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES SOBRE TÚNELES Y PROBLEMÁTICA DE FILTRACIONES EN TÚNELES

### 2.1 Reseña histórica

La humanidad desde los tiempos antiguos y en diferentes culturas ha tenido que utilizar los espacios subterráneos como una forma de vida. De acuerdo con su nivel de conocimiento, ha desarrollado diferentes métodos en la excavación de rocas y suelos.

A lo largo de la historia y en distintas culturas se han planeado y construido túneles por distintos motivos, sus orígenes se remontan desde el antiguo Egipto hasta las culturas orientales surgiendo a partir de la minería. Éste se considera como uno de los primeros métodos de perforación que utilizó la técnica del fuego y se determina por su carácter ingenieril. Otro de los propósitos era abastecer a las ciudades utilizando la captación del agua.

El renacimiento marca el resurgir del hombre, así como, el de los túneles tras el letargo de la época medieval, Leonardo Da Vinci utiliza el concepto de niveles subterráneos en sus proyectos de ciudades y piensa en la posibilidad de perforar túneles donde los canales se encuentran con barreras montañosas. Es en el siglo XVIII cuando nace la Era de los Canales y cuando los túneles comienzan a adquirir peso propio.

Los avances técnicos del siglo XIX surgen gracias a la Revolución Industrial, resultando muy valiosos debido a la experiencia adquirida en la construcción de túneles para canales y durante la época de los ferrocarriles en Europa. Durante este período también tiene lugar la perforación del primer túnel bajo el río Támesis entre Rotherhithe y Wapping, el primero se construye en terreno blando y con enorme presencia de agua y en el que por primera vez se aplica la técnica del escudo patentado por Marc Brunel.

Con el resurgimiento de los túneles como consecuencia de la Revolución Industrial, la máquina de vapor y los ferrocarriles marca un hito importante en el diseño y la construcción de los mismos. En la segunda mitad del siglo XIX se produce un avance importante con la construcción de los grandes túneles alpinos de ferrocarril. Los medios disponibles eran todavía modestos, la incorporación de máquinas taladoras accionadas por aire comprimido marca un salto cualitativo en los rendimientos alcanzados.

Los siguientes avances como la electricidad y potencia eléctrica propició la aparición del metro, las centrales de energía dieron lugar a los túneles para enfriamiento de agua y conducción de cables. Con las máquinas de combustión interna que dio lugar al motor, condujo al desarrollo de carreteras y la demanda de un número creciente de túneles para

vehículos. No solo excavados bajo montañas sino también bajo colinas menores o bajo los cauces de los ríos.

Son innumerables los túneles construidos desde entonces hasta la actualidad, así como los avances en técnicas y elementos constructivos que poco a poco han alcanzado un grado de eficacia inimaginable. La ingeniería de los túneles ha progresado de forma muy significativa durante el siglo XX y lo que llevamos del XXI.

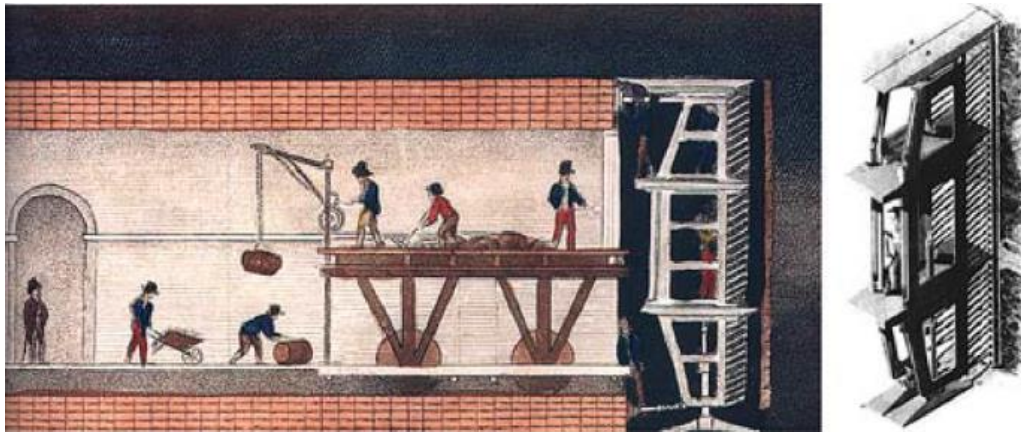


Fig 2.1 Esquematización del escudo empleado por Brunel en la construcción del Támesis (Zaldívar, 2013).

## 2.2 Estudios previos para la construcción de un túnel

Un túnel es una obra subterránea de forma lineal y artificial, que a partir de su planeación y construcción permite la comunicación entre dos puntos. Generalmente tiene diversas funciones para el paso al tránsito, trenes subterráneos, transporte de personas o materiales, almacenamiento, alojamiento de instalaciones, necesidades científicas y la protección de personas. Otro de los propósitos es transportar agua para el aprovechamiento hidroeléctrico o saneamiento (Soto, 2004).

Algunos de los elementos a considerar en los estudios previos que se realizan para la construcción de un túnel, son los siguientes:

- Tipo de terreno
- Estudio geológico
- Sondeos
- Dimensiones del túnel
- Formas estructurales
- Sistema de construcción
- Instalaciones terminales en un túnel

**Tipo de terreno:** El terreno puede ser desde un limo hasta una roca dura, la selección del terreno implicará cambios en la geometría, forma de la estructura y el método de construcción (Soto, 2004).



Fig 2.2 Tipo de terreno para la construcción (fuente: <http://www.arqhys.com/construccion/tierra-relleno.html>, 2015).

**Estudio geológico:** La información geológica se consigue del trazado de mapas, obteniendo datos de depósitos aluviales y tipos de roca que se encuentran en la excavación, como son las fallas y accidentes geológicos que se investigan a fondo. Estos informes se indicarán la posible existencia de agua y cauces subterráneos.

También se aportarán registros de perforaciones como son: cimentaciones profundas, pozos, túneles anteriores, canteras, minas, inspección de acantilados lechos de ríos y cualquier otro tipo de excavación.



Fig 2.3 Estudio Geológico y Geotécnico del Ramal Camelinas para la construcción del túnel 2 (fuente: <http://noticiales.com/aun-sin-liberar-estudio-geologico-y-geotecnico-de-la-unam-para-ramal-camelinas/>, 2014).

**Sondeos:** Los sondeos son el método más común para la exploración detallada en la construcción de obras civiles, proporcionan información sobre las distintas capas,

consistencia, grado de humedad del terreno. Es importante saber que aún un buen programa de sondeos no proporcionará todas las respuestas sobre los materiales y sus propiedades, pero sí dará las respuestas suficientes para el diseñador y constructor. Ellos puedan estar preparados para las significativas variaciones de las condiciones geológicas que se puedan encontrar (Cuenca, 2009).

La perforación con barrenos es uno de los métodos más utilizados, por razones de resistencia, rapidez y economía. Sea cual sea el método más utilizado, las muestras obtenidas se extraen y se examinan en la superficie. Se sellan inmediatamente para impedir cualquier cambio de humedad antes de su llegada al laboratorio, donde se obtiene la mayor parte de las características necesarias para su estudio (Soto, 2004).



Fig 2.4 Sondeo para la construcción del Monumento “El Santísimo” (fuente: <http://www.piltta.com>, 2013)

**Dimensiones del túnel:** Las dimensiones, tanto el espesor, la altura y la longitud, así como los parámetros que definan la planta cuyas características son las curvas circulares, de transición y el ajuste de pendientes máximas, son muy variados y pueden reducirse en unos casos y en otros se puede disponer de un número de posibilidades (Soto, 2004).



Fig 2.5 Dimensión de un túnel para drenaje profundo (fuente: <http://fuerza.com.mx/2014/07/27/inician-construccion-de-tunel-que-terminara-con-inundaciones-en-valle-de-chalco/>, 2015).

**Formas estructurales:** Éstas pueden ser un círculo, un rectángulo, etc. El material utilizado (como es el caso del concreto con mayor o menor espesor), el acero, forma estructural que deberá soportar las presiones del suelo, y el tipo de terreno como el método de construcción influyen decisivamente en la estructura del túnel que se debe utilizar (Soto, 2004).

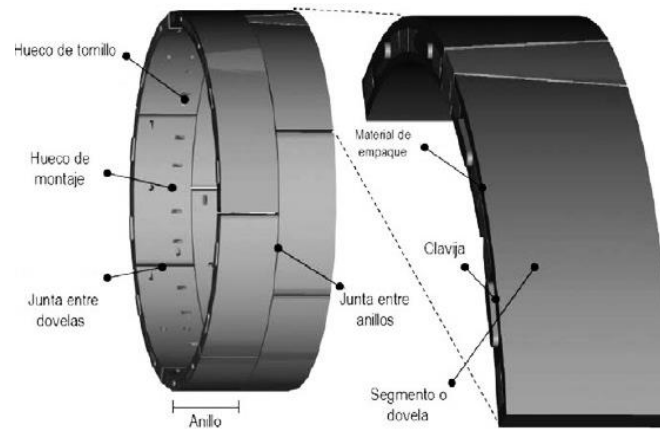


Fig 2.6 Esquema básico de un anillo dovelado (fuente: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-30112012000100001&script=sci\\_arttext,2012](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-30112012000100001&script=sci_arttext,2012)).

**Sistema de construcción:** Existen numerosos procesos constructivos, desde la excavación por explosivos hasta las máquinas tuneladoras a sección completa, pasando por los procedimientos de corte de terreno para los túneles más superficiales. La elección del método apropiado o la combinación de estos, depende de las condiciones del terreno (Soto, 2004).



Fig 2.7 Sistema de encofrado del túnel (Fuente: <http://www.rollingmachinery.com.es/index.html,2014>).

**Instalaciones terminales de un túnel:** Las carreteras o vías del ferrocarril, para la construcción de un túnel, la iluminación, los sistemas de control, son factores fundamentales que se toman en cuenta. Estas características deben considerarse integralmente y ser siempre incluidas en la planificación y diseño de una obra subterránea o túnel (Soto, 2004).



Fig 2.8 Instalación eléctrica del túnel en el Oeste de San Pedro (Línea de Alta Velocidad (LAV) Madrid-Valladolid) (fuente: Grupo OHL, 2012).

## 2.3 Clasificación de túneles

A continuación se mencionan las principales clasificaciones para la planificación, desarrollo y diseño de un túnel.

### 2.3.1 Clasificación de acuerdo con su función

**Túneles para transporte:** Conocidos como uno de los tipos de túneles más antiguos, estas construcciones protegen obstáculos naturales. Son utilizados para el transporte de personas, agua potable o drenaje. El desarrollo de los trenes y vehículos motorizados, hace necesaria la construcción de túneles evitando fuertes pendientes, acortando distancias y brindando seguridad.

**Túneles para almacenamiento:** Son diseñados para garantizar la seguridad debido a fuertes impactos naturales en la superficie. Se utilizan para el almacenamiento de residuos radioactivos, usos militares y como almacenes subterráneos.

**Túneles para instalaciones especiales:** Este tipo de túneles se construyen por motivos tanto prácticos como estratégicos. Algunos de ellos son: las centrales hidroeléctricas, estacionamiento de vehículos y depuradoras de aguas residuales.






**Túneles con fines científicos:** Actualmente en países desarrollados, estos túneles se construyen en la actualidad para investigaciones científicas de difícil elaboración en la superficie, por ejemplo: los experimentos para un acelerador de partículas subatómicas, entre otros.

**Túneles para seguridad y protección:** Su función es la de proteger personas tanto militares como civiles, se construyen para la defensa de ataques nucleares. El desarrollo este tipo de túneles, se basa en que la estructura resista los explosivos y su preservación durante largo tiempo (Soto, 2004).

### 2.3.2 Clasificación de acuerdo con su ubicación

Otra de las clasificaciones en el estudio de túneles, para determinar sus características y método constructivo, es la ubicación estratégica. Es importante debido a las dificultades naturales que hay que proteger o librar, como son: montañas, ríos, estuarios o mares, las calles de una ciudad, edificios y otras estructuras.

Se pueden clasificar de la siguiente manera:

-  túneles de montaña
-  túneles subacuáticos
-  túneles urbanos.

**a) Túneles de montaña:** Si el obstáculo es una cadena montañosa, la construcción de un túnel puede suponer ahorro y energía.

Hay dos soluciones para atravesar una cadena montañosa con un túnel: la de un túnel corto a un nivel elevado, que es una solución más económica pero exige largas pendientes y curvas cerradas hasta llegar a una altura elegida. O un túnel largo a un nivel más bajo, con el que se ahorra en combustible y tiempo, la inversión será mucho mayor, también su manejo será mucho mayor ya que no se verá afectado por la nieve de los túneles construidos a un nivel más elevado (Soto, 2004).

**b) Túneles subacuáticos:** La construcción este tipo de túneles para atravesar un río o mar depende del ambiente. El proyecto de un túnel puede solucionar un problema de acceso a un lugar, cuando los puentes no sean la mejor elección. La selección de un túnel en lugar de un puente puede salvar un río o desembocadura dependiendo de cada caso (Soto, 2004).

**c) Túneles urbanos:** La construcción de túneles bajo una ciudad, se utiliza generalmente en todas sus aplicaciones al transporte; pero los túneles urbanos más largos son las redes de trenes subterráneos, abastecimiento de agua y sistemas de alcantarillado, redes de gas, de energía eléctrica, de telefonía etc.

En este tipo de túneles los problemas de ventilación resultan a veces, complicados, por el hecho de que no siempre pueden expulsar el aire proveniente del interior del túnel, debido a las restricciones de carácter ambiental (Soto, 2004).

### 2.3.3 Clasificación de acuerdo con su aplicación

**Túneles de ferrocarril:** Con la aparición del túnel en el transporte ferroviario, fue necesaria la construcción de túneles para atravesar montañas, en zonas costeras, y cruces subacuáticos (Soto, 2004).



Fig 2.9 Túnel de ferrocarril de Saint-Gothard, Suiza (fuente: [http:// www.nemetscheck-allplan.fr](http://www.nemetscheck-allplan.fr), 2015).

**Túneles de carretera:** La construcción de túneles para carreteras llegó después de la construcción de túneles para trenes. El perfil longitudinal respeta el mismo modelo que para un túnel de ferrocarril, en cuanto a las condiciones necesarias para la evacuación de aguas por gravedad, tanto en su etapa constructiva como su vida útil (Soto, 2004).



Fig 2.10 Túnel de carretera. Circunvalación oeste de Zurich N4/N20 Knonauremant, (fuente: [http:// www.Phoenixcontact.com](http://www.Phoenixcontact.com)).



**Túneles de transporte urbano (metro):** Estos túneles tienen diferentes características por sus secciones sumergibles, son pocas las grandes ciudades que no cuentan con ríos o desembocaduras que cruzar. No existe el inconveniente de los túneles subacuáticos que precisan descender muy por debajo del nivel del terreno, ya que es por donde suelen transitar los trenes urbanos.

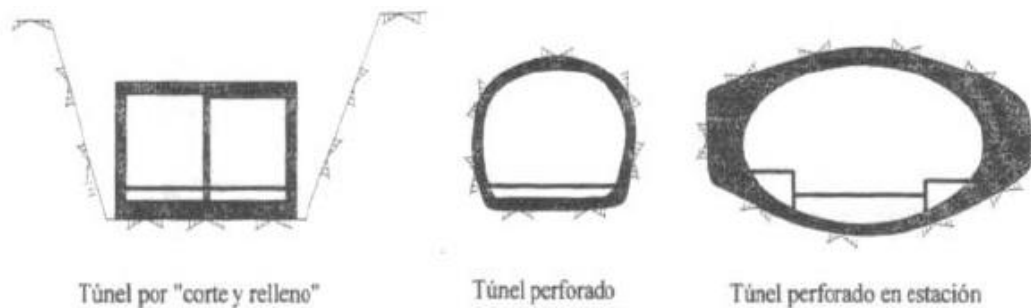


Fig 2.11 Distintas secciones para dos vías en túneles para metro (Soto, 2004).

El sistema de excavación empleado usual es de corte y relleno, su sección suele tener una característica rectangular y actualmente es base de piezas prefabricadas de fácil y rápido montaje. En túneles perforados se tiene secciones circulares con el mínimo diámetro, por lo que la exactitud en el trazo de un terreno de la alineación es muy importante debido al escaso espacio libre entre el equipo rodante y la estructura (Soto, 2004).



Fig 2.12 Túnel de la línea 9 del metro de Barcelona (fuente: <http://magazine.sener.es/news/continua-la-integracion-de-la-linea-9-del-metro-de-barcelona/46/>, 2013).

**Túneles de conducción de agua:** El abastecimiento de agua potable a las ciudades es una necesidad que se remonta a tiempos antiguos. En este tipo de túneles no existen limitaciones de curvas y pendientes, la alineación puede ser recta o lo más larga posible. Conviene que sean líneas quebradas, ya que pasan bajo una depresión que permite abrir nuevos frentes de ataque de excavación.

El perfil longitudinal tendrá todo tipo de inclinaciones sobre todo vertical, siempre que tenga un gradiente hidráulico que descienda de extremo a extremo. La impermeabilización es importante en dos aspectos contrarios, por un lado para evitar erosiones importantes por pérdida de agua en tramos en los que circule a muy alta presión, y por el otro, para evitar infiltraciones que pueden contaminar el agua cuando el túnel va parcialmente lleno (Soto, 2004).

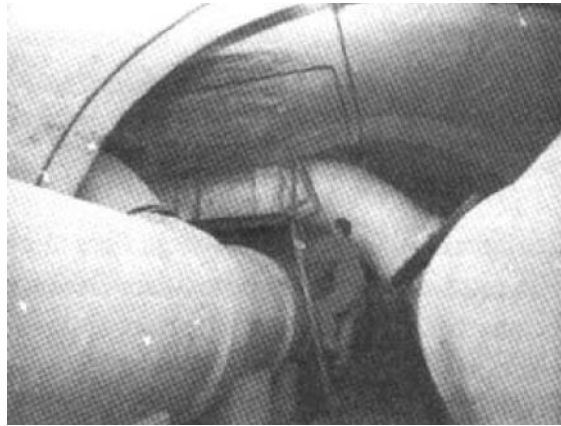


Fig 2.13 Túnel para la distribución de agua potable en la ciudad (Soto, 2004).

**Túneles de centrales hidroeléctricas subterráneas:** En este tipo de proyectos se construyen una compleja red de túneles con diferentes funciones que son: túneles de acceso desde el exterior hasta la sala de máquinas y transformadores, túneles que conducen cables, y los propios túneles para la generación de la energía que se pueden clasificar por sus distintas características, en tres tipos: a) de descarga libre, b) de alta presión y c) salas de máquinas y transformadores.

Generalmente estos túneles se encuentran en áreas montañosas, ya que dependen del almacenamiento del agua a un nivel elevado, utilizando modernas estaciones generadoras de energía hidráulica (Soto, 2004).



Fig 2.14 Acceso de un túnel hidráulico (fuente: [http:// www.tierraminera.wordpress.com/obra/civil](http://www.tierraminera.wordpress.com/obra/civil), 2011).

**Túneles para sistemas de alcantarillado:** Es necesaria la excavación de túneles en los sistemas de alcantarillado cuando la profundidad es excesiva para la excavación de zanjas o no se puede afectar la superficie. Las ciudades tienden a ampliar o modificar sus redes de saneamiento que ya no vierten directamente a un río o al mar sino que deben pasar por plantas depuradoras. La sustitución o ampliación de tramos ya antiguos y sin capacidad suficiente a menudo se realiza en túneles más profundos (Soto, 2004).



Fig 2.15 Túneles de alcantarillado en París (fuente: <http://www.paris.es/museo-alcantarillado>, 2015).

**Túneles de servicios:** Actualmente se está generalizando el uso de túneles para llevar cables y otros servicios mediante tuberías, sobre todo en las grandes ciudades y en zonas sumergibles.

Las redes telefónicas en túnel permiten el acceso de personal para desplegar nuevas líneas y dar mantenimiento sin afectar la superficie. Las redes de gas precisan túneles para su uso exclusivo, con instalaciones para el control de fugas que podría crear una atmosfera toxica o explosiva; incluso se proyectan largos túneles como almacenamiento y así evitar la superficie (Soto, 2004).



Fig 2.16 Túneles para galería de servicios (Soto, 2004).

**Túneles de almacenamiento:** Antiguamente la función del túnel era recolectar agua de lluvia. Ahora su uso común es almacenar petróleo por tener grandes depósitos subterráneos sin revestir, y la ventaja de su seguridad contra daños o incendios (Soto, 2004).

## 2.4 Métodos de excavación para túneles

### 2.4.1 Métodos convencionales

A continuación se exponen los métodos más comunes para la excavación de túneles.

**Método inglés:** Este método se le conoce con este nombre debido a que fue en túneles donde el terreno usualmente son arcillas y arenas localizadas en Inglaterra. La forma de llevar la excavación es que el terreno tenga suficiente cohesión, donde este proceso se realiza a sección completa en una sola operación. Un ejemplo es la construcción del primer túnel bajo el Río Támesis.

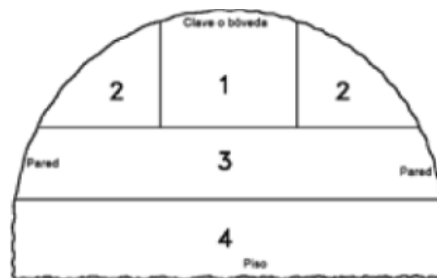


Fig 2.17 Método Inglés (Cuenca, 2009)

**Método de Madrid:** Este método se conoce como “método belga”, y consiste en realizar la excavación abriendo una pequeña galería en la clave del túnel, agrandándolo poco a poco. Para proteger y ademar el frente, se coloca concreto lanzado en toda la bóveda (Cuenca, 2009).

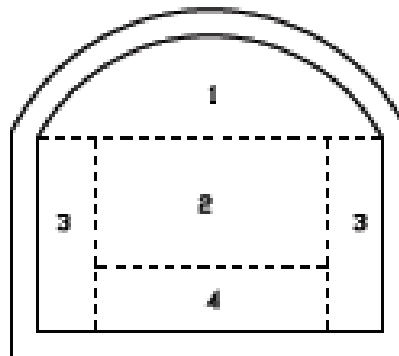


Fig 2.18 Método Clásico de Madrid (Cuenca, 2009).

**Método Alemán:** El método alemán se emplea mucho en estaciones subterráneas cuando el terreno es muy malo o bien cuando las dimensiones del túnel son grandes. Fue diseñado por Wiebeking en 1803 y utilizado para construir el Canal de San Quintín. Este método hace avanzar dos galerías inferiores, una en cada muro lateral, en estas galerías se construyen los muros hasta llegar al techo de misma.

Sobre este se excavan dos galerías y se continúan la construcción de los muros. Se añade una galería central superior que se ensancha hasta alcanzar las galerías laterales; el terreno sobre el arco queda apuntalado por maderos longitudinales y estacas transversales.

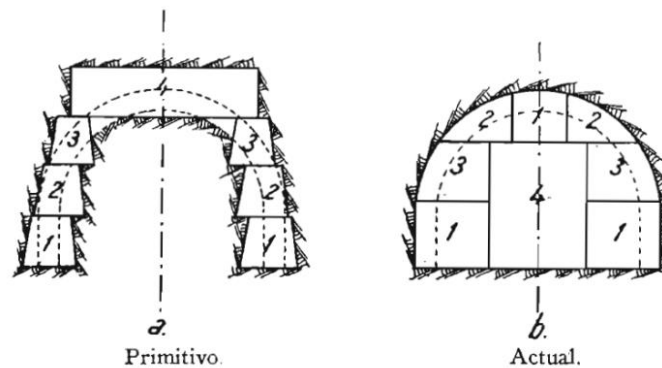


Fig. 248. — Esquema método alemán.

Fig 2.19 Esquema del Método Alemán (fuente: [http://www.opandalucia.es/verdocumento.php?documento=capitulo%20XIII\\_Construccion%20de%20tuneles.pdf](http://www.opandalucia.es/verdocumento.php?documento=capitulo%20XIII_Construccion%20de%20tuneles.pdf)).

**Método Austriaco:** Los austriacos, desarrollaron un plan de trabajo basado en la utilización de puntales de madera, formando un sistema de entibación, procedimiento aplicado en las minas de Friburgo. Fue aplicado por primera vez por Meisner en la construcción del túnel de Oberau, en el ferrocarril entre Leipzig y Dresden, en Sajonia en el año 1837. En 1839 Keissler lo empleó en el túnel de Gumpoldskirch, cerca de Viena-Neustadt.

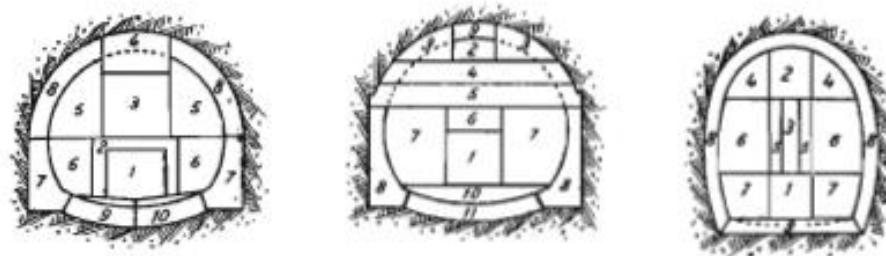


Fig 2.20 Método Austriaco (fuente: [http://www.opandalucia.es/verdocumento.php?documento=capitulo%20XIII\\_Construccion%20de%20tuneles.pdf](http://www.opandalucia.es/verdocumento.php?documento=capitulo%20XIII_Construccion%20de%20tuneles.pdf)).



**Nuevo método Austríaco (NATM):** El método fue patentado en el año de 1956 y surgió de una forma empírico-analítico tras la ejecución de los grandes túneles en los Alpes y el desarrollo de las técnicas de anclaje y concreto lanzado. Se caracteriza por la aplicación de un revestimiento delgado, semirrígido colocado inmediatamente antes de que la roca se vea alterada por la reducción de presión. El material de desprendimiento no se especifica; puede ser variado: anclajes, concreto lanzado, concreto, marcos o combinaciones de ellos (Cuenca, 2009).

Sus características son las siguientes:

- ✚ El suelo es partícipe en la función portante de la cavidad
- ✚ La participación se logra permitiendo que el subsuelo se deforme, activando la resistencia al corte
- ✚ Para aumentar la función portante del suelo, debe proveerse a éste de un confinamiento radial

#### 2.4.2 Métodos con máquinas integrales

Otro de los métodos de excavación de túneles, se realiza mediante máquinas integrales conocidas como T.B.M. por sus siglas en inglés (Tunnel Boring Machine). Son una serie de máquinas capaces de excavar un túnel a sección completa, se dividen en dos grandes grupos: a) topos, b) escudos. Ambos difieren de forma importante según el tipo de roca o de suelo que sea necesario excavar, así como, en las necesidades de sostenimiento o revestimiento que requiera cada terreno (Bertomeu, 2010).

**Topos:** Estas máquinas se componen de una cabeza giratoria, dotada de cortadores, accionados mediante motores eléctricos y avanzan en cada ciclo mediante el empuje de unos gatos hidráulicos que reaccionan sobre las zapatas de las pinzas neumáticas (grippers), los cuales están anclados contra la pared del túnel (Bertomeu, 2010).

**Escudos:** Se utilizan para la excavación de roca dura con resistencia muy blanda y en suelos, disponen de una cabeza giratoria accionada por motores eléctricos, normalmente están incorporados por rascadores y avanza mediante el empuje de una serie de forma inmediata. Proporciona un área estable y segura en la zona del frente de trabajo, protegiendo del colapso en la bóveda y los hastiales e incluso contra el colapso del propio frente de excavación (Soto, 2004).

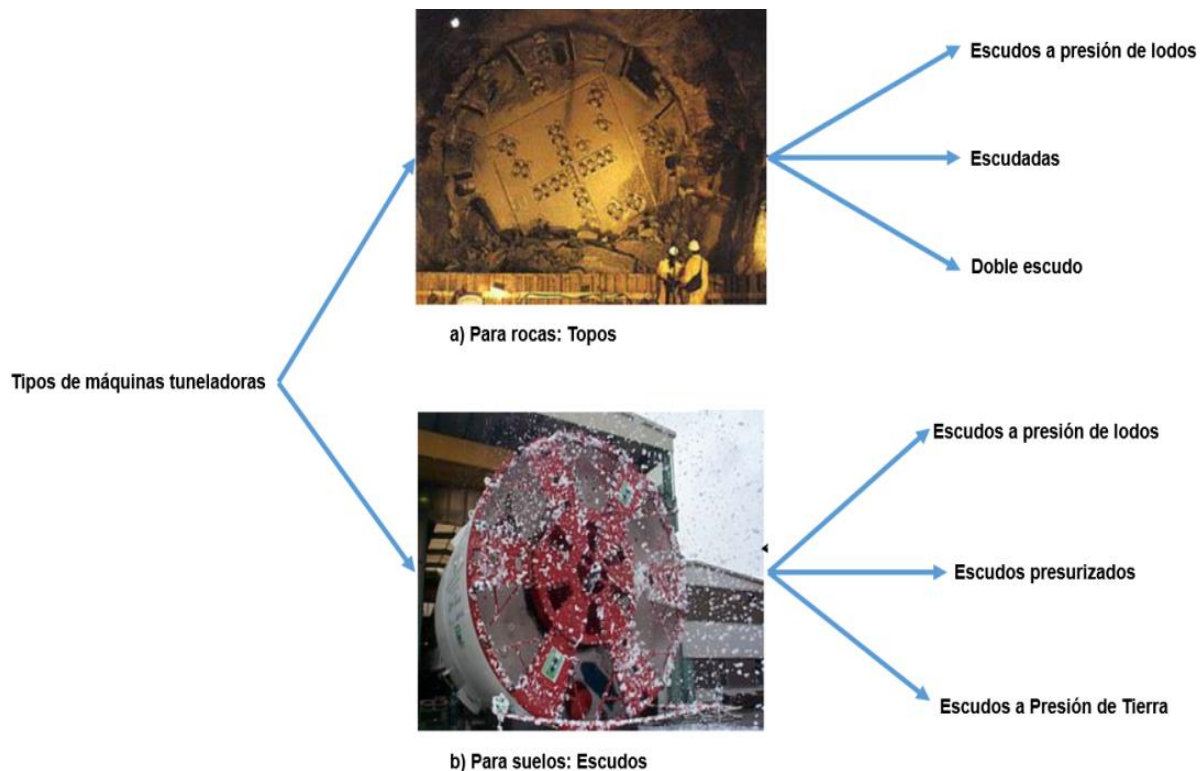


Fig 2.21 Clasificación de TBM según el tipo de suelo (Beromeu, 2010).

**Escudos de frente abierto:** Se utilizan normalmente cuando el frente es estable y las fluencias del agua, reducidas. En este tipo de escudos, se trabaja por encima del nivel freático o bien por suelos impermeables. Su característica principal, es que permite observar directamente el suelo que se excava.

Los escudos de frente abierto se clasifican de la siguiente manera:

- Manual
- Rejilla al frente
- Cabeza giratoria
- Excavadora

En cualquier caso, son máquinas relativamente sencillas, que se adaptan bien a condiciones variables del terreno, siempre que estas no sean extremadamente difíciles, siempre que estas no sean extremadamente difíciles. Este grupo de escudo permite la colocación de revestimientos de muy variada índole admitiendo cualquier tipo de dovela, o incluso la puesta de cerchas metálicas con cubierta de madera o metálico.



Fig 2.22 Escudo de frente abierto (fuente: <http://www.zinzanja.com/Procedimientos.html>, 2013).

**Escudos de frente cerrado:** Estos escudos están diseñados para trabajar en suelos difíciles, no cohesivos y con frecuencia bajo el nivel freático y saturado de agua, en frentes claramente inestables.

Los escudos de frente cerrado se clasifican de la siguiente manera:

- ✚ Con cabeza cortadora giratoria
- ✚ Con mampara de presión
- ✚ Con frente presurizado
- ✚ Con presión balanceada

Las de excavaciones deben de ser secciones circulares y con la necesidad de colocar un revestimiento con dovelas de concreto atornilladas entre sí, con garantía de que sean impermeables.



Fig 2.23 Escudo de frente cerrado, cabeza de corte de la tuneladora “La Almodena” (fuente: <http://ecomovilidad.net/madrid/tuneles-madrid-tuneladoras/>, 2009).

## 2.5 Problemática de las filtraciones en túneles

La presencia de filtraciones de agua subterránea en la excavación de un túnel, constituye uno de los problemas geotécnicos que pueden presentarse en el interior de estas



estructuras. En este tipo de obras, las principales dificultades se relacionan con el agua, porque su manejo representa un problema difícil durante la etapa constructiva.

Cuando el propio túnel se excava pendiente abajo, éste opera como si fuera un canal, estableciéndose como una vía de drenaje en el caso de un suelo blando o un macizo rocoso. Sin embargo, cuando las excavaciones son verticales en el drenaje, estos túneles pueden ser complejos y costosos, en cualquier caso es preciso efectuar una determinación de los posibles gastos de infiltración hacia un túnel.

Si la geología de la zona por donde pasa un túnel es simple y las propiedades de los materiales son homogéneas, el cálculo de las filtraciones resulta más sencillo, tal es el caso de un túnel excavado en un medio homogéneo e isótropo.

El impacto que produce un túnel sobre el agua se origina al momento de su construcción; algunos permanecen mucho tiempo enterrados y pueden convertirse en un gran obstáculo durante la excavación o mantenimiento de otros túneles. Durante la planificación de un túnel en sus diferentes etapas constructivas, debe ponerse suficiente atención a las consecuencias que genera el agua.

Teóricamente un túnel puede ser impermeable, es decir que, no tiene filtraciones de agua y por tanto toda la presión recae sobre su revestimiento, o bien, puede ser semi-permeable, permitiendo un cierto volumen de filtración y evitando fuertes presiones sobre el revestimiento. En la práctica, la mayoría de los túneles son permeables durante su construcción y semipermeables durante su vida útil.



Fig 2.24 Ejemplo de filtraciones y flujo de agua: (a) filtraciones de agua en un túnel; (b) flujo de agua a través de un estrato de basalto permeable (fuente: <http://tunnels.piarc.org/tunnels/ressources/4/542,Chap-5-Environmental-issues-v-11.10.pdf>).

La acción del agua se considera como la principal causa de deterioros presentes en la excavación de una gran cantidad de túneles, afectando tanto el revestimiento como el terreno más próximo. Cuando el agua entra en un túnel, ésta llega a disolver hidróxido de calcio sobre el revestimiento de concreto, volviéndose más alcalina y liberando depósitos sólidos en el sistema de alcantarillado. Su efecto es más frecuente en túneles que todavía cuentan con sistemas de drenaje obsoletos.

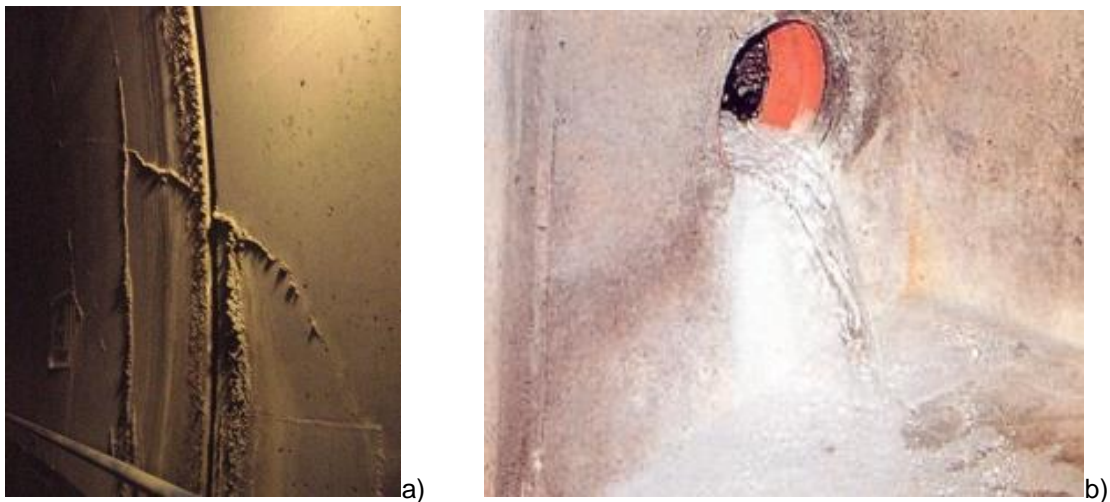


Fig 2.25 Efecto de las filtraciones: a) efecto de entrada de agua en una junta de construcción; b) agua de drenaje y precipitaciones de cal en un túnel con revestimiento de concreto (fuente: <http://tunnels.piarc.org/tunnels/ressources/4/542,Chap-5-Environmental-issues-v-11.10.pdf>).

En este tipo de casos debe crearse una base de datos del túnel donde se incluya: historia, geología de la roca o suelo donde se ubica, tipo de revestimiento, posibles patologías, deformaciones existentes, filtraciones de agua, etc. que permitan conocer las acciones necesarias para su buen funcionamiento y mantenimiento adecuado.

El esquema de la Figura 2.26 relaciona los daños más frecuentes con sus posibles causas asociados a la funcionalidad de un túnel.

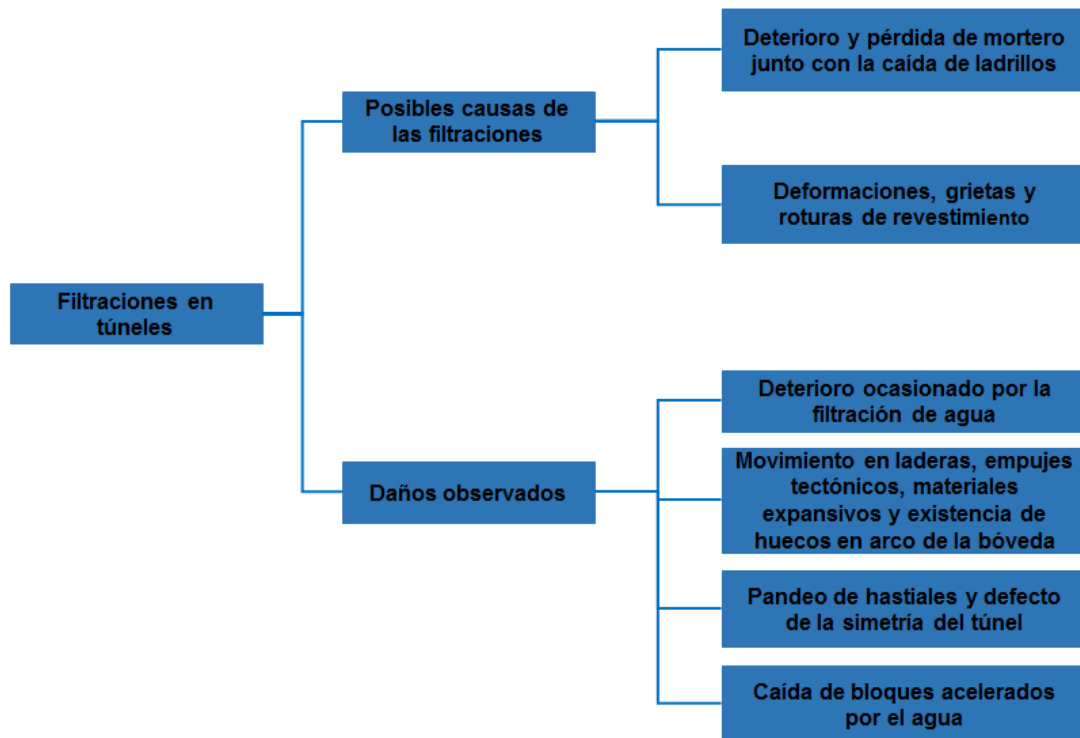


Fig 2.26 Daños más frecuentes en túneles posibles causas y efectos (fuente: [http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/6.9.\\_adaptaci%C3%B3n\\_de\\_t%C3%A1neles\\_al\\_tr%C3%A1nsito\\_peatonal\\_tm7-213279.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/6.9._adaptaci%C3%B3n_de_t%C3%A1neles_al_tr%C3%A1nsito_peatonal_tm7-213279.pdf))

## 2.6 Casos de filtraciones de túneles en el mundo

Se mencionan cuatro casos de estudio de las filtraciones en distintos tipos de túneles excavados. Se exponen sus diferentes problemáticas y soluciones a las que se llegaron.

### 2.6.1 Filtraciones en los túneles noruegos

Noruega se considera líder mundial en la infraestructura de túneles bajo tierra, manteniendo un fuerte ritmo en cuanto a obras subterráneas y desarrollo tecnológico. Sus particularidades ingenieriles son la gran variedad de túneles y estructuras excavadas en roca, aplicando modernas técnicas de construcción a menor costo. Su éxito se debe al perfeccionamiento y dominio de sistemas consagrados, como son las excavaciones con explosivos.

A lo largo de su línea costera, la zona montañosa noruega está constituida por rocas metamórficas debido al efecto de la erosión. Donde se localizan fallas que atraviesan los túneles submarinos; encontrando varias formaciones geológicas que van desde una roca sana, como es el caso del gneis precámbrico, hasta esquistos de baja calidad y pizarras. El

país cuenta con aproximadamente de 700 túneles de trenes, más de 5,000 km de túneles hidráulicos y 350 túneles de carretera, se cree que estos túneles tienen longitudes de 450 km. Actualmente, están en servicio diez túneles de estas características, representando 28.5 km de carreteras construidas bajo el mar.

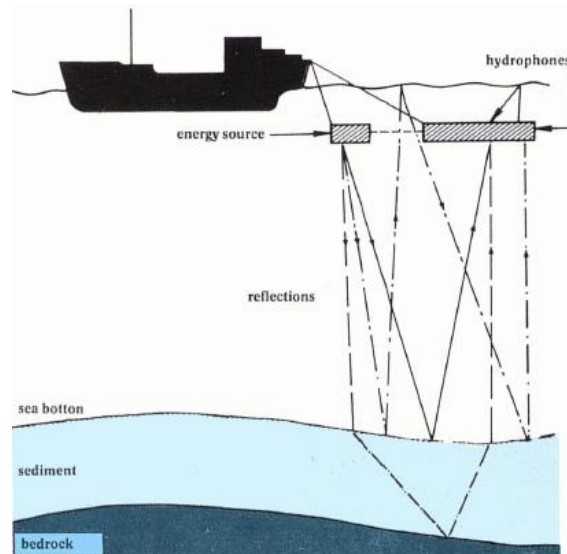


Fig 2.27 Esquema de la determinación de perfiles acústicos para la excavación de túneles (Junca, 1990).

La característica fundamental de los túneles noruegos es el agua que poseen, debido a que éstos exigen mayores precauciones al determinar su trazado. Especialmente definiendo la mínima cobertura de roca en clave del túnel junto con la detección de fisuras y veredas de agua en la roca al excavar. Se practican sondeos horizontales o ligeramente inclinados, que van de 20 a 30 m en el frente de ataque, sirviendo como un procedimiento al realizar las inyecciones de alta presión para sellar grietas y evitar inundaciones en la excavación (Junca, 1990).

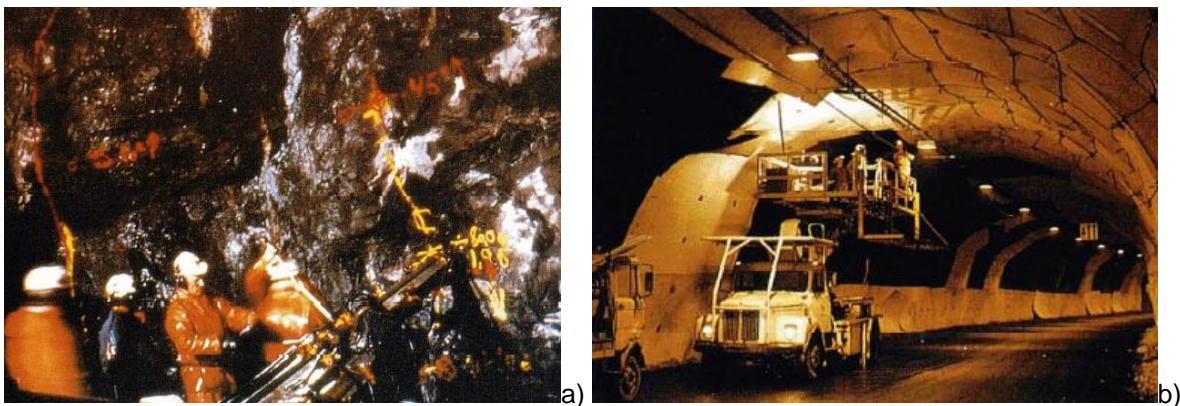


Fig 2.28 Excavación de túneles noruegos: a) Perforación con taladros para la inyección de sellado de filtraciones en el frente de ataque; b) Instalación de láminas impermeabilizantes de Polietileno Expandido (Junca, 1990).



A finales de la década de los ochenta, se inyectaron alrededor de  $100 \text{ kg/m}^3$  de concreto en las bóvedas de túneles submarinos carreteros construidos como una medida para prevenir filtraciones. A excepción del túnel Godoy en el que se inyectaron  $400 \text{ kg/m}^3$ . También se instalaron elementos de revestimiento aislante mediante placas de polietileno expandido (PE), y en ocasiones de aluminio que a la vez sirven de protección al hielo.

La Tabla 2.1 muestra las características de los túneles noruegos submarinos de carretera en servicio con sus respectivas filtraciones de agua.

Tabla 2.1 Túneles noruegos submarinos de carretera en servicio (Junca, 1990).

Túnel	Año	Longitud (m)	Profundidad máxima (m)	Pendiente máxima (%)	Sección transversal (m)	Filtraciones de agua (l/min)
Vardo	1982	2,620	-88	8.0	46.0	400
Ellingsoy	1987	3,481	-140	8.5	68.0	310
Valderoy	1987	4,176	-137	8.0	68.0	300
Kvalsund	1988	1,530	-56	8.0	43.0	250
Godoy	1989	3,835	-153	10.0	48.0	300
Flekkeroy	1989	2,321	-101	10.0	49.5	200
Hualer	1989	3,755	-120	10.0	45.0	200
Nappstraumen	1990	1,780	-60	8.0	55.0	250
Maursundet	1990	2,300	-93	10.0	43.0	S/N
Fannefjord	1990	2,743	-100	9.0	43.0	380

El siguiente mapa muestra la ubicación de los túneles noruegos donde se presentan problemas de filtraciones.

A continuación se expone la problemática de las filtraciones ocurridas en la construcción y operación de los túneles de la Figura 2.29.



Fig 2.29 Mapa de la localización de los principales túneles submarinos y terrestres con problemas de filtraciones.

Las instalaciones básicas con las que cuentan los túneles noruegos son: estación de bombeo (que evacua el agua de infiltración), batería con tres bombas, depósitos de seguridad y de regulación (se construyeron en el punto más bajo del túnel, para almacenar el agua que ingresa al túnel con una capacidad de 2 a 3 días).

**Túnel de Vardo:** Primer túnel submarino en carretera construido en un terreno constituido por areniscas y pizarras poco metamorizadas, con una longitud de 2,800 m y un revestimiento de 600 m de concreto lanzado.

Su construcción inició en el año de 1979 en la isla de Vardo, situada en la entrada del Golfo de Varanger. Durante su construcción este túnel presentó dos problemas de hundimientos

en el frente de trabajo, los cuales se sellaron con concreto para establecer condiciones estables. También es el que se ha registrado mayores filtraciones de agua ya que este ha sido el que menos inyecciones de bentonita se le han realizado.



Fig 2.30 Túnel de Vardo. Portal este (Junca, 1990).

**Túnel de Kvalsund:** Ubicado al noroeste de la ciudad de Tromsø, con una longitud de 1350 m que une las islas de Ringvassøy y Kvaløya bajo el estrecho de Kvalsundet. Su profundidad máxima de 56 m, posee una cubierta mínima de roca de 20 m, la sección transversal es de 43 m y la pendiente máxima es de 8%.

La construcción inició en 1987, en la que se excavaron alrededor de 800 m de longitud bajo el mar mediante explosivos (extrayéndose 85,000 m<sup>2</sup> de gneis granítico). Se realizó un estudio para el dispositivo de drenaje y evacuación de agua infiltrada.

Cuenta con una estación de bombeo de cuatro bombas con capacidades de 2,200 l/min; si éstas fallaran simultáneamente, cuenta con un depósito capaz de almacenar durante 160 horas un gasto de 250 l/min antes de que se inunde el túnel.

Su construcción presentó problemas, sin necesidad de aplicar inyección de bentonita; aplicando concreto lanzado correspondiente a un 50% del previsto en el proyecto. La roca excavada dentro del túnel fue de buena calidad, salvo en un tramo corto se revistió con concreto.

Para prevenir las heladas, la nieve derretida de primavera y filtraciones de agua a través de la roca e interior de la galería, se instalaron placas de sellado e impermeabilización que conducen el agua hasta un depósito a través de zanjias.



Fig 2.31 Túnel Kvalsund en construcción (Junca, 1990).

**Túnel de Flekkeroy:** Construido en 1988 e inaugurado en 1989, con una longitud de 2,231 m, en su excavación utilizó explosivos en ambos extremos de la isla Flekkeroy. La mayor parte del túnel no tiene revestimiento, con una sección transversal de diseño de 49 m<sup>2</sup> y una pendiente máxima del 10% en cada extremo.

El suelo de cimentación se compone básicamente de gneis con resistencia a la compresión de 1,500 MPa y anfibolita con 2,000 MPa. La zona del terreno más complicada del gneis, se encontró una aglomeración de pequeñas fisuras rellenas de arcilla; aplicándose concreto lanzado de 8 cm de espesor. Inmediatamente después de la excavación se emplearon grandes tornillos de anclaje para arreglar las fisuras mayores. La cobertura de roca sobre el túnel oscila entre un mínimo de 30 a 100 m bajo las islas.

La problemática de las filtraciones resultó un tanto alarmante, que para su prevención durante la excavación se redujeron a solo 200 l/min, siendo el túnel submarino de carretera más seco de los construidos hasta ahora en Noruega.

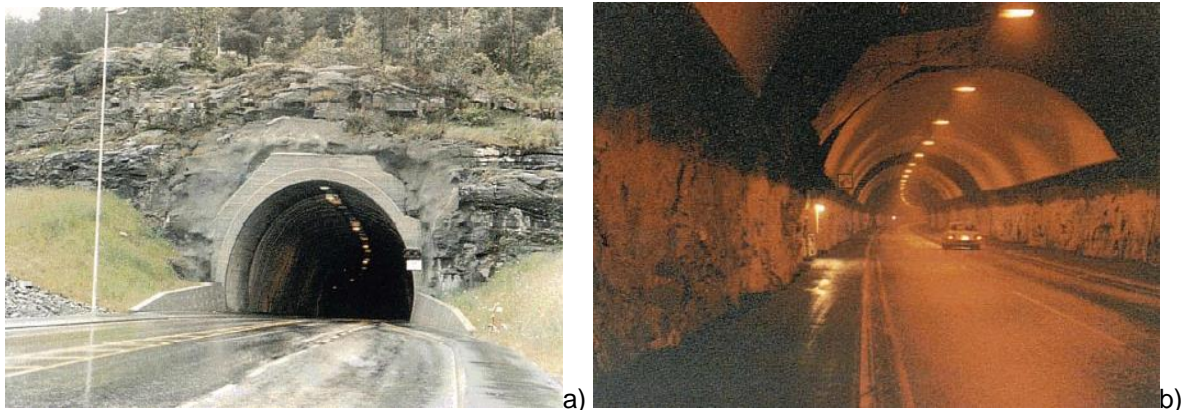


Fig 2.32 a) Entrada del Túnel de Flekkeroy; b) Interior del Túnel Flekkeroy (Junca, 1990).

**Túnel de Hvaler:** Construido en un área rodeada de islas a 120 km de Oslo al suroeste del país, cerca de la frontera con Suecia. Este túnel comenzó a construirse el 1 de febrero de



1988, y entró en servicio el 2 de octubre del mismo año. Tiene una longitud de 3,755 m, con una profundidad máxima de 120 m bajo el mar y una cobertura mínima de roca de 35 m. La sección transversal es de 45 m<sup>2</sup> y la máxima pendiente longitudinal es del 10%, con un flujo máximo de agua de infiltración de 200 l/min.

La excavación se realizó mediante explosivos, atravesando una roca de color rojo (gneis). El ciclo de perforación fue de aproximadamente 5 horas, de esas 3 horas correspondieron a la carga de explosivos y voladura. La construcción de este túnel utilizó concreto, reforzándose con fibras de acero mucho más largas de lo normal, añadiéndolas a una mezcla de concreto de 60 kg/m<sup>3</sup>.

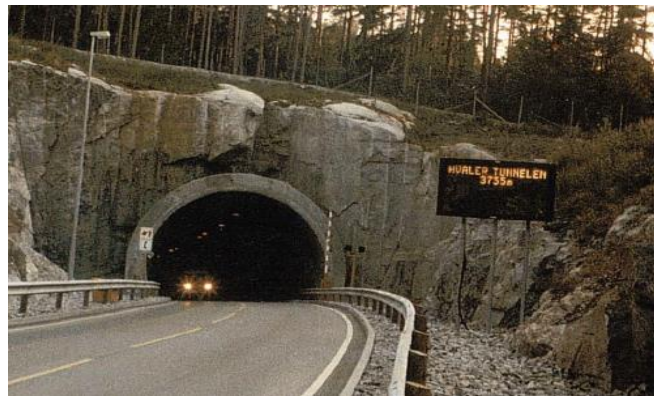


Fig 2.33 Túnel de Hvaler. Portal sur (Junca, 1990).

En los tramos de las zonas de rocas fracturadas, se revistió la sección mediante concreto. La empresa encargada del proyecto diseñó sus propios moldes móviles para facilitar el montaje y desmontaje, permitiendo el desplazamiento con una pala cargada sobre ruedas (Junca, 1990).

### 2.6.2 Filtraciones en los túneles de los trenes de Alta Velocidad Española (AVE) en la Sierra de Guadarrama, España

Los túneles ferroviarios de Guadarrama entraron en servicio el 22 de diciembre de 2007, tienen una longitud de 28 km y están formados por dos tubos paralelos (uno en cada sentido de la circulación). Se considera el cuarto túnel más largo de Europa y el quinto de todo el mundo a partir de 2008, constituye una de las líneas más importantes de trenes de alta velocidad. Su infraestructura atraviesa la Sierra de Guadarrama, ubicada entre Miraflores de la Sierra (Madrid) y próximo a la ciudad de Segovia; estos túneles conectan a la Ciudad de Madrid con las principales ciudades del Norte de España. Cada túnel tiene un diámetro de 9.5 m y una separación de 30 m entre ambos, disponen de galerías de emergencia uniendo a ambos corredores a cada 250 m.

A pesar de algunas pequeñas deficiencias iniciales al inicio de su excavación, presentaron filtraciones como consecuencia del deshielo de la nieve acumulada en la parte superior del túnel durante el invierno. Las observaciones se registraron a un kilómetro de la entrada norte, en uno de los túneles ubicado en la provincia de Segovia.

A partir de estos problemas de filtraciones, se tuvo que contactar a empresas especializadas y realizar estudios de carácter preventivo. Una de las empresas encargadas de la infraestructura del túnel, se dedicó a la tarea de reforzar la red de drenaje y evacuar el agua procedente de las filtraciones que actualmente existen en los túneles de Guadarrama. El personal administrativo de la empresa dedicada a la infraestructura, dio su punto de vista, comentando que los tubos que componen este complejo disponen de sistemas de sellado y drenaje.

Otra de las hipótesis a la que llegaron fue que la orografía donde se encuentran construidos los túneles presenta características especiales; indicando una de las causas por las que se generan las filtraciones. La entrada norte de uno de los túneles de Guadarrama, resultó ser una de las más afectadas por las goteras, debido a la existencia de un desnivel en esa zona que implica una mayor dificultad para evacuar el agua que proviene de las filtraciones.



Fig 2.34 Interior de uno de los túneles de Guadarrama (fuente: [http:// www.elmundo.es](http://www.elmundo.es), España, 2007).

Debido a las situaciones anteriores, se generaron acumulaciones de agua en algunos puntos del túnel. Para evitar esas posibles afectaciones que pudieran llegar a producirse, se consideró oportuno reforzar la estructura de los túneles.

La trayectoria de los túneles de alta velocidad que cubren la línea Madrid-Segovia-Valladolid no se ha visto afectada por estas deficiencias. El personal asegura que estas filtraciones no alteran la circulación del agua por los túneles. Una de las soluciones que propusieron los diseñadores fue dividir en varios tramos los frentes de trabajo para reparar las filtraciones.



### 2.6.3 Filtraciones en los túneles de la Línea 1 del Metro de Caracas, Venezuela

Las filtraciones de agua en túneles de la Línea 1 del Metro de Caracas entre las terminales de Chacaito y Chacao, constituye un problema técnico desde el momento de su construcción hace más de 20 años de servicio y sin interrumpir. Los túneles se llevaron a cabo por tres empresas: los diseños por Parsons Brinckerfort-Tudor Betchel en 1969, la revisión de los anillos por Mott-Hay & Anderson en 1977, y la construcción por el consorcio Cedica-Sogene entre 1985 y 1986.

A pesar de los intentos realizados en la construcción del túnel el problema no se solucionó totalmente. Este avanzado deterioro se debe a la presencia de las filtraciones que dificultan la geometría del túnel. Incluye además el sellado y la canalización de las aguas provenientes de las filtraciones, que exigen la reconstrucción de secciones enteras en la losa de la vía. La situación empeoró cuando se alcanzaron niveles alarmantes de agua, por lo que se implementaron medidas de seguridad para enfrentar drásticamente el problema. Antes de que se tuviera una consecuencia enorme en el servicio del Metro de Caracas.

Durante las etapas constructivas del tramo CP001 se tenía conocimiento del problema en el interior de los túneles después de quedar como evidencia. Las observaciones hechas mencionan la aparición de importantes filtraciones de agua a lo largo del tramo en un 50%, a pesar de haber realizado inyecciones primarias y secundarias de bentonita en los anillos.

Un estudio realizado menciona, que no se dio aviso de la presencia de agua en el subsuelo durante la excavación; indicando que el agua no era un problema de mayor consecuencia y suponían que el diseño no consideraba la magnitud del problema.

La construcción de estos túneles creó en el subsuelo una barrera impermeable al flujo, que produjo una fuerte presión hidráulica sobre la línea de las juntas de los anillos y el revestimiento. El sistema de sellado que posee estos anillos no fue diseñado para estas presiones y desarrolló filtraciones a través de las juntas.

#### 2.6.3.1. Causas básicas del origen de las filtraciones

Se establecieron la existencia de tres causas básicas que originaron las filtraciones en el tramo entre Chacaíto-Altamira:

- ✚ Las elevadas presiones hidráulicas sobre las juntas de los anillos, ejerciendo gastos del agua presente en el subsuelo debido a las vertientes subterráneas activas con dirección Norte-Sur a lo largo del tramo
- ✚ El funcionamiento defectuoso de los sellos embutidos en los segmentos del anillo
- ✚ La presencia de agujeros en los anillos para el paso de los pernos de fijación



A continuación se mencionan en la siguiente tabla las problemáticas y consecuencias actuales en las filtraciones del túnel Sur del tramo Chacao-Chacaíto de la línea 1 del Metro de Caracas.

Tabla 2.2 Problemática y consecuencias de las filtraciones en los túneles de la línea 1 del Metro de Caracas

Problemática actual	Consecuencias
Abundante agua dentro del túnel proveniente de las filtraciones	Filtraciones de las juntas existentes en los anillos del túnel y entre los segmentos de cada anillo
Las aguas filtradas en el revestimiento del túnel gotean y escurren libremente	Descarga de agua en la zanja de la misma losa desde que son bombeadas o evacuadas
Infiltración de agua desde las juntas entre los anillos (no están cubiertas por la losa de fondo)	Incremento de grietas debido a la socavación provocada por las aguas debido a la infiltración, esta agua es corrosiva
Escurrimiento de las aguas de filtración a través de las losas de concreto (sin revisar durante más de 20 años)	Fracturas y colapsos de la plataforma de vía, expuesto a lo largo de los años. Realizando trabajos de mantenimiento de mayor y alto riesgo
Deterioro y socavación producto de las infiltraciones entre losa de vía y losa estructural de concreto	Presencia del deterioro físico químico que ha sufrido el concreto de la losa estructural de fondo.

### 2.6.3.2. Diagnóstico de las causas primarias

- ✚ El defectuoso e intacto sistema de impermeabilización, adoptado por el diseño y la construcción del revestimiento del túnel
- ✚ Conjunto de inyecciones primarias y secundarias ejecutadas para rellenar espacio anular entre los anillos del revestimiento y el perímetro del terreno excavado por la tuneladora

Estos efectos constructivos corresponden al mal funcionamiento del sistema de impermeabilización, el sistema dañado fue bueno pero inadecuado con las condiciones geohidrológicas del tramo. En relación con el terreno permeable y los aspectos hidrodinámicos de las aguas subterráneas, el diseño de estos túneles fue indispensable si se hubieran previsto implementar un sistema eficiente de drenaje, donde las aguas pudieran haberse infiltrado.

En la siguiente Figura 2.35 se observan parte de las actividades de mantenimiento y rehabilitación de la línea 1 del Metro de Caracas.



Fig 2.35 Trabajos de mantenimiento: a) personal técnico y especialistas en vías férreas realizando labores de limpieza y mantenimiento; b) trabajos de sustitución de mantenimiento mayor en la Línea 1 del Metro de Caracas (fuente: [http:// www.correodelorinoco.gob.ve](http://www.correodelorinoco.gob.ve), 2011).

El túnel se construyó con un sistema de canaletas de drenaje sobre la pasarela y luego dentro de la losa de concreto de vía, concebido para drenar solamente las aguas provenientes de esas filtraciones. Este sistema se encuentra ubicado en el segmento expuesto por el perímetro del túnel tapado por losas de fondo y de vía.

Las aguas que aparecen son responsables de los serios problemas de deterioro continuo entre ambas losas, obligando a realizar costosas y largas intervenciones de mantenimiento mayor. Que con el tiempo se incrementan debido al envejecimiento de las estructuras y al persistir de las acciones físico-químicas.

Se propuso tres alternativas para solucionar la problemática de las filtraciones en la base del túnel:

### 2.6.3.3. Posibles alternativas para su solución

**Alternativa 1:** Realizar recorridos aleatorios distribuidos para conducir el deterioro de la losa estructural de fondo, debido a la quiebra de la losa de vía. Esta alternativa requiere de trabajo minucioso, sistemático y lento, basado en el sellado de todas y cada una de las juntas.

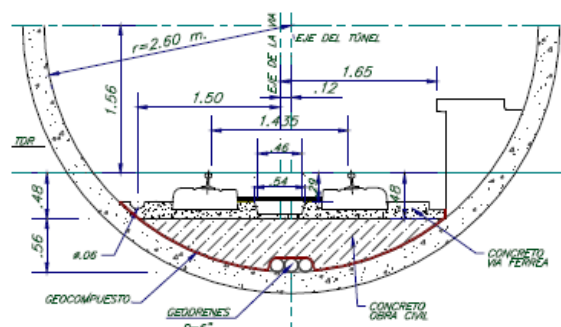


Fig 2.36 Alternativa 1: Implemento de sellado en las juntas entre anillos debajo de las losas (Perri, 2010).

**Alternativa 2:** Implementar un sellado en todas las juntas entre anillos ubicadas debajo de las losas, las filtraciones provenientes de aquellas juntas defectuosas continúan produciéndose. Se considera que la entrada de agua en el fondo de los anillos no produzca daños inesperados, proponiendo colocar un filtro asociado a un sub-dren justo en el contacto entre el anillo y la losa de fondo. Implica un geo-compuesto caracterizado por ser permeable y absorber agua desde una cara (inferior que tiene contacto con la cara de la dovela de los anillos).

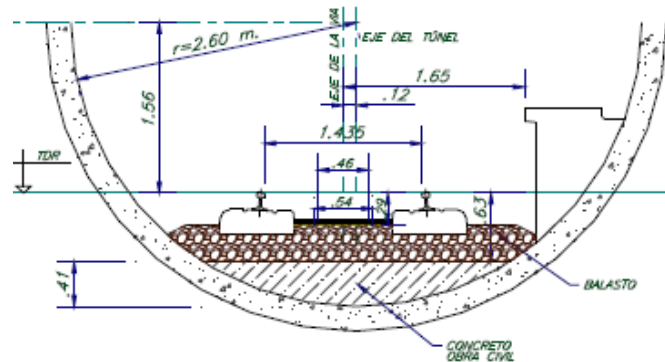


Fig. 2.37 Alternativa 2: Sustitución de la losa de vía con balasto (Perri, 2010).

**Alternativa 3:** Sustituir la losa de vía con balasto, que ocasiona un cambio de operación en el sistema férreo. El balasto a diferencia de la losa de concreto, no se expone a graves inconvenientes ligados a la presencia de las aguas de infiltración. No sería imprescindible implementar el sistema de sub-drenaje ni tampoco la necesaria demolición y reconstrucción de la losa estructural de fondo.

Se deben eliminar la losa de vía, ubicada a pocos centímetros de espesor de la losa estructural, los cuales generalmente resultan estar muy deterioradas. El mantenimiento de la línea férrea del túnel se limitaría a un mantenimiento rutinario, previsto y normalmente ejecutado para los tramos de vía sobre el balasto que ya posee el Metro de Caracas.

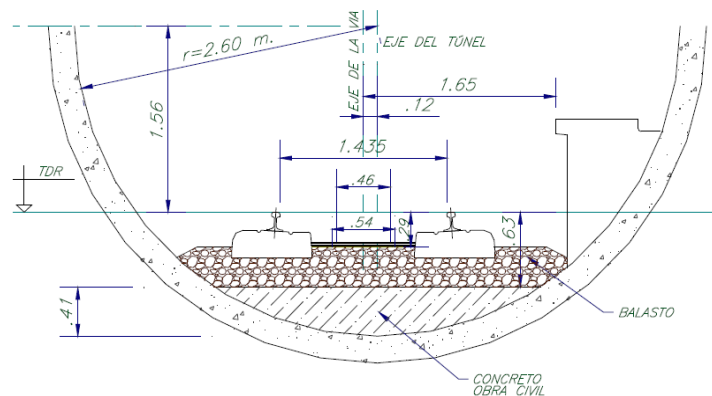


Fig. 2.38 Alternativa 3: Control de las filtraciones (Perri, 2010).

#### 2.6.4 Filtraciones durante la excavación del tramo III de la lumbrera L-10 a la Lumbrera L-11 del Túnel Emisor Oriente (TEO), México

El Túnel Emisor Oriente (TEO) se encuentra al Norte de la Ciudad de México y en su trayectoria, inicia en la confluencia del Gran Canal con el Río de los Remedios (límite con el Distrito Federal y el Estado de México) y termina en el municipio de Atotonilco en el estado de Hidalgo. Su trazo se constituye por 24 lumbreras (lumbreras de ensamble y de paso) y un portal de salida con el que tendrá una capacidad de desalojo de 150 m<sup>3</sup>/s. De acuerdo con el perfil del terreno natural y la profundidad del túnel, cuenta con diferentes profundidades entre 30 y 150 m y en algunas partes hasta 200 m. En la excavación se utilizan 6 escudos túneladores diseñados y fabricados específicamente para el mismo fin (Vargas, 2010).

Esta obra se planeó para la sustentabilidad del Valle de México y el incremento de la capacidad de drenaje, así como para garantizar la seguridad hidráulica para una población de 20 millones de habitantes. En temporada de lluvia funcionará de manera simultánea con el actual drenaje profundo Túnel Emisor Central (TEC), y en períodos secos lo hará alternadamente para facilitar su mantenimiento adecuado.

El túnel busca restaurar las condiciones de pendiente en el sistema hidráulico para el desalojo del afluente residual y pluvial, y drenar la cuenca hidrológica del Valle de México. Asimismo permitir el desarrollo normal de los programas de mantenimiento del Drenaje profundo y evitar riesgos de inundaciones durante la época de lluvia (Vargas, 2010).

En la Figura 2.39 se ilustra la colocación de un anillo del túnel al término de la excavación en el Túnel Emisor Oriente.

En la Figura 2.40 se muestra el trazo del Túnel Emisor Oriente (TEO), dividido en 6 tramos que corresponden a las 24 lumbreras y el portal de salida.



Fig 2.39 Túnel Emisor Oriente: a) Zona de la banda transportadora de material de excavación; b) Maniobra y colocación de una dovela para un anillo del túnel (Prácticas profesionales del Colegio de Ingenieros Civiles de México –CICM–; Reyes, 2013).

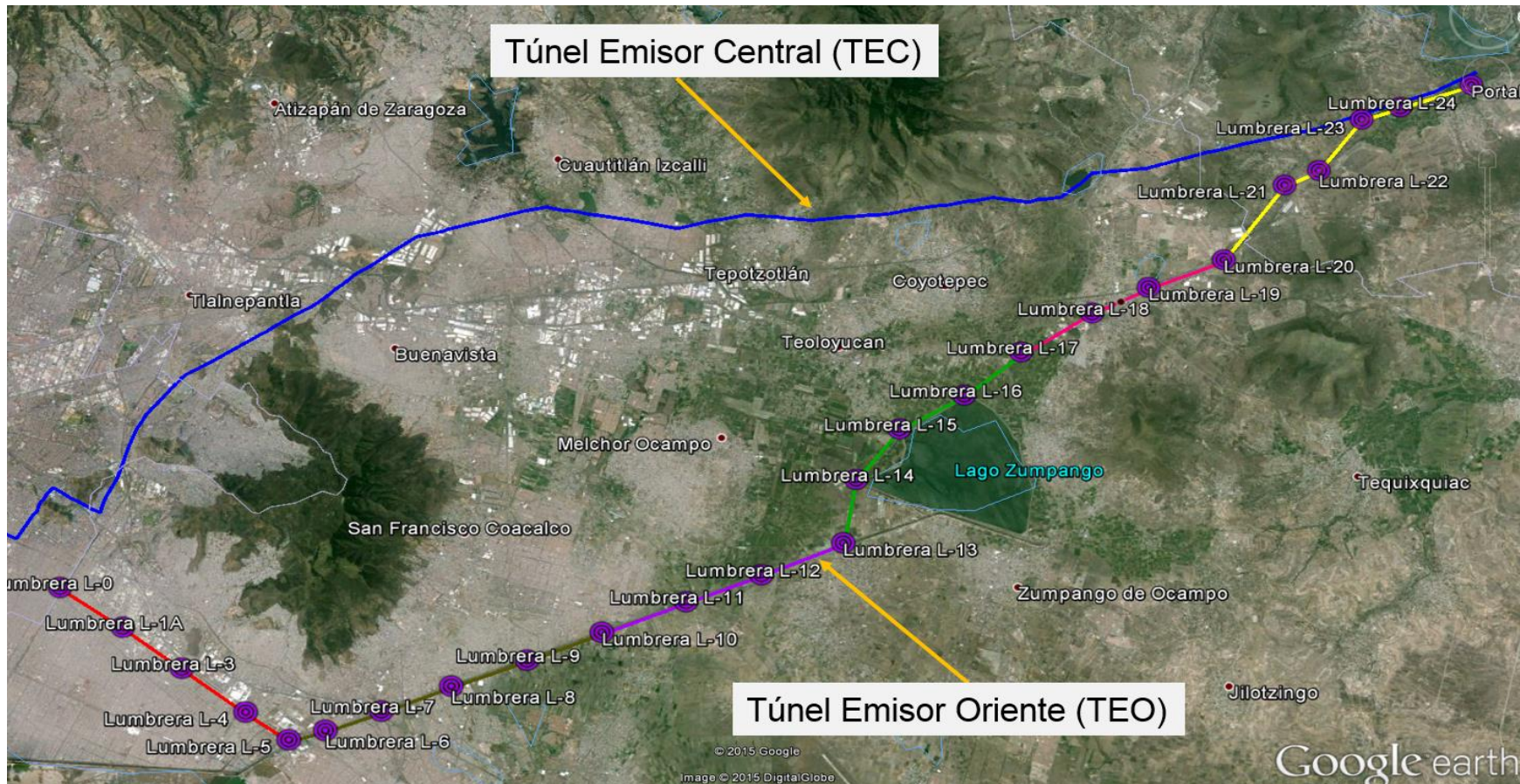


Fig 2.40 Trazo de la trayectoria del Túnel Emisor Oriente y su cercanía con el Túnel Emisor Central (TEC) hacia el portal de salida.



### Caso de estudio: lumbrera L-10 (Tramo III)

El tramo III del Túnel Emisor Oriente (TEO), inicia en la lumbrera L-10 y termina en la lumbrera L-17, con una longitud aproximada de 8,949 km. Su cadenamamiento inicia en 21+635 y termina en 30+793. La excavación se realiza en suelos constituidos por arenas cementadas y abanicos aluviales compactados.

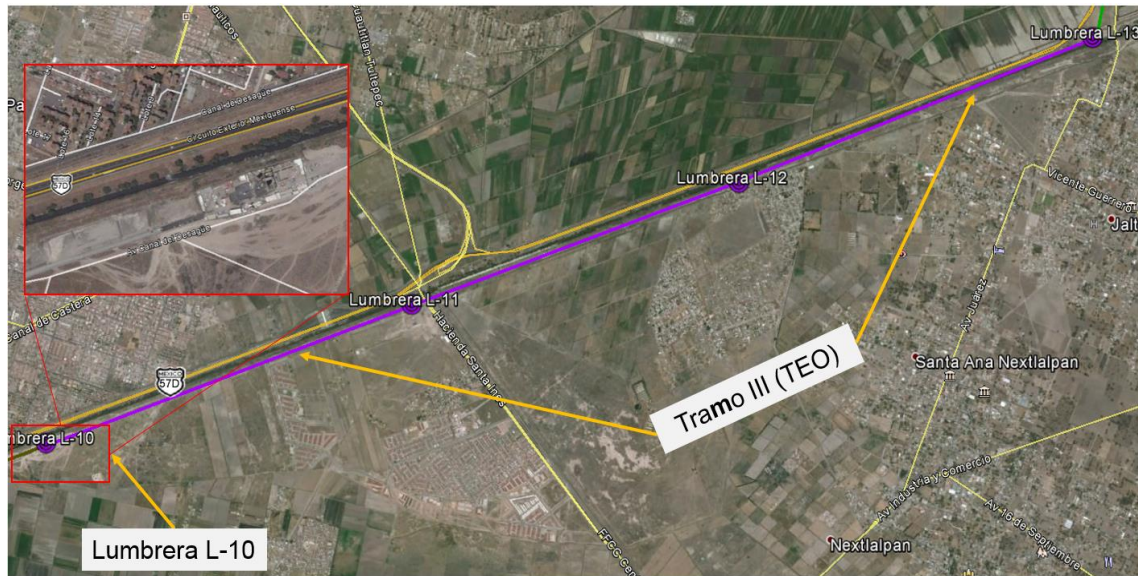


Fig. 2.41 Ubicación de la lumbrera L-10 del Tramo III del Túnel Emisor Oriente (TEO).

La excavación del túnel presentó problemas de filtraciones de agua durante su proceso constructivo. Particularmente en la fase de colocación de los anillos, y al realizar el retiro y cambio de cepillos en la excavadora.

Para la solución a este problema se tuvo que recurrir a dos alternativas, la primera consistió en abatir el nivel freático con una bomba tipo “Wilden” en la parte inferior de los anillos del túnel. La segunda solución fue utilizar dos productos químicos: a) catalizador “Marifoam”, y b) espuma de poliuretano, inyectándose en las dovelas de cada anillo para reducir las filtraciones.

**Primer método:** En la excavación del túnel entre los anillos 1343 a 1347, que corresponden a anillos mixtos (acero-concreto), se llevó a cabo la primera etapa del cambio de cepillos. En esta solución ingenieril primero se colocaron costales de arena debajo de los anillos para evitar el paso del agua proveniente de la parte inferior, y posteriormente, se instaló la bomba “Wilden” para abatir el nivel freático con la finalidad de que el equipo de soldadores retirara los cepillos desgastados y colocara los cepillos nuevos alrededor de la carcasa de la excavadora.

En las Figuras 2.42 y 2.43 se observan los trabajos para la solución del primer método.



Fig 2.42 Filtraciones durante la excavación: a) distribución de costales de arena en la parte inferior del anillo; b) uso de bomba de achique para retirar el agua hacia el contenedor de agua residual de la máquina (Prácticas profesionales del Colegio de Ingenieros Civiles de México –CICM–; Reyes, 2013).

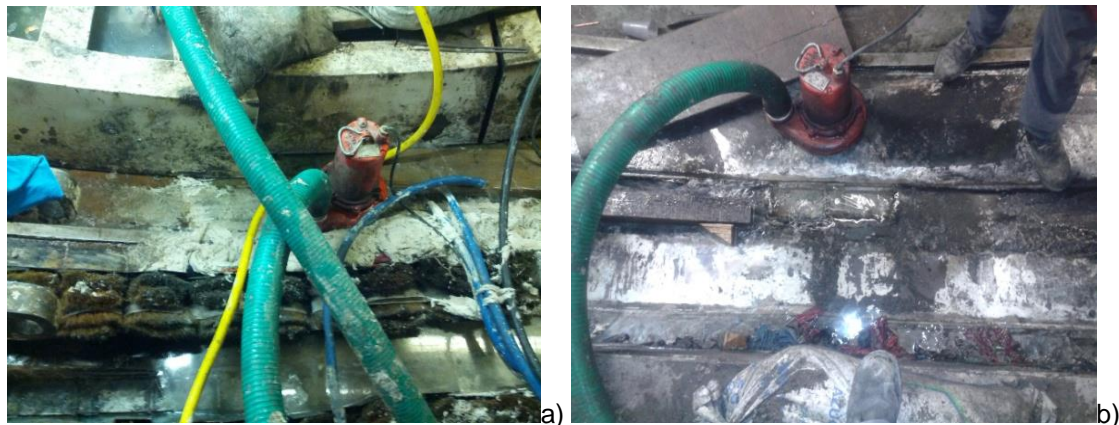


Fig 2.43 Primer método: a) y b) Colocación de bomba Wilden para retirar las filtraciones de agua en el empaquetado de cepillos nuevos de la primera etapa del cambio de cepillos (Prácticas profesionales del Colegio de Ingenieros Civiles de México –CICM–; Reyes, 2013).

**Segundo método:** La segunda solución consistió en la inyección del catalizador con resina tipo *Marifoam* y espuma de poliuretano *Poly-Tuff*. Este trabajo se llevó a cabo mediante perforaciones en el centro de las dovelas de cada anillo, utilizando como herramienta especializada: barrenos, taladros especiales y la operación de una bomba hidráulica para inyectar los químicos, evitando las filtraciones de agua provenientes de los anillos del túnel.

En las Figuras 2.44 y 2.45 se muestran los trabajos realizados para el segundo método durante la excavación del túnel.



Fig 2.44 Segundo método: a) Realizar la perforación en zona del taco sofrazar de la dovela y b) Adaptación y colocación de válvula a dovelas para inyectar sustancia (Prácticas profesionales del Colegio de Ingenieros Civiles de México –CICM– ; Reyes, 2013)



Fig 2.45 Segundo método: a) Inyección de resina en las dovelas de la parte inferior del anillo; b) Catalizador-Resina junto con la espuma de Poliuretano Poly-Tuff (Prácticas profesionales del Colegio de Ingenieros Civiles de México –CICM–; Reyes, 2013).

### 2.6.5 Filtraciones en la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, México

La Línea 12 del Metro se considera como una de las líneas de mayor longitud del Sistema de Transporte Colectivo (STC) de la Ciudad de México con una distancia de 24.9 km, y la más larga de América Latina. El trazo de esta línea del metro tuvo como finalidad dar solución al problema del transporte en la zona oriente, ubicándose en las Delegaciones Tláhuac, Iztapalapa, Coyoacán y Benito Juárez. La Línea 12 está constituida por 20 estaciones, 19 tramos, tres pasarelas de correspondencia incluida una de sus terminales, 15 estaciones de paso y una terminal más; del total 13 estaciones son subterráneas y una superficial (Caballero, 2011).

La Figura 2.46 muestra la trayectoria de la estación Mixcoac a la estación Tláhuac de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México.

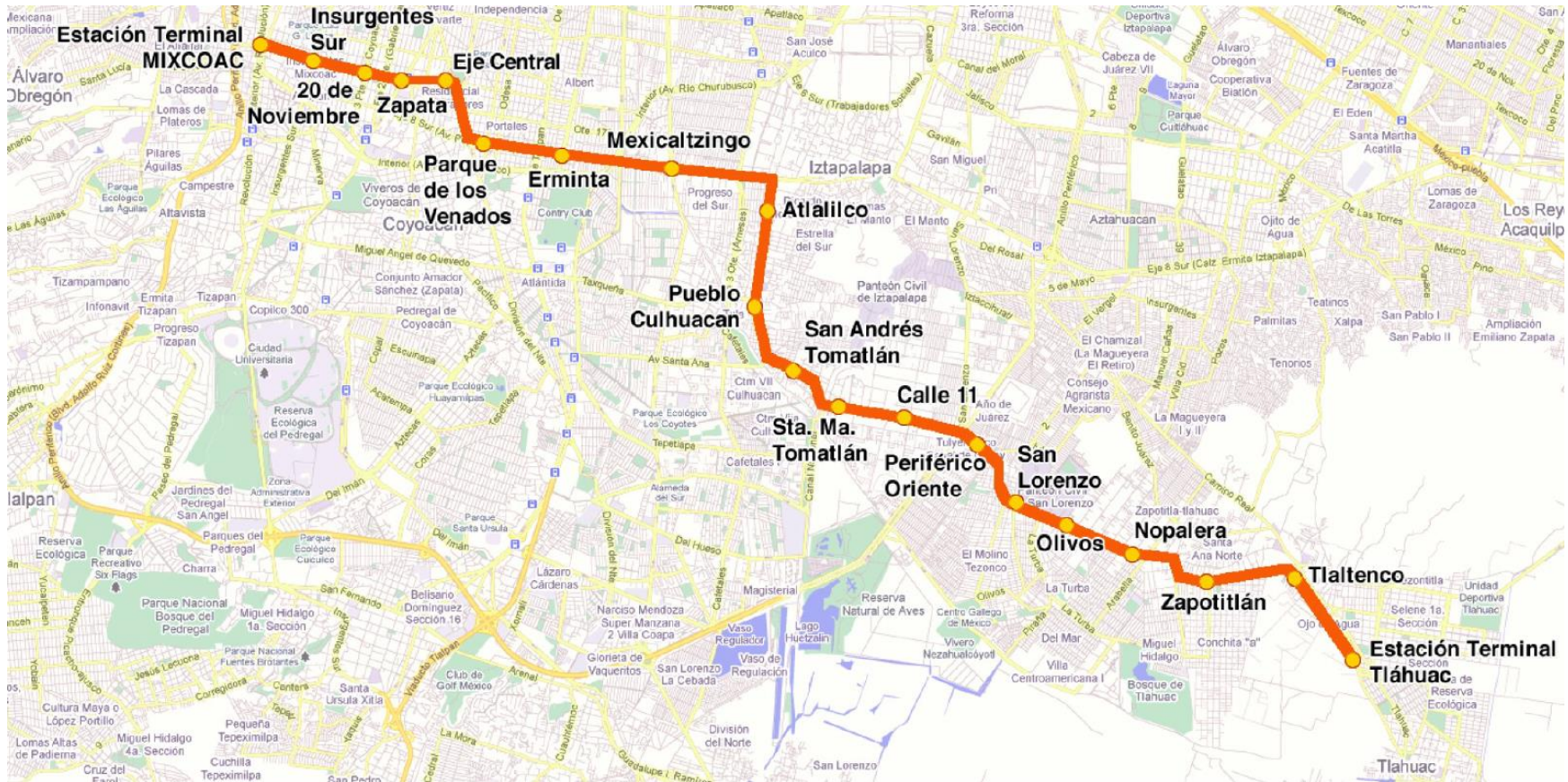


Fig 2.46 Trazo de la trayectoria de la Línea 12 del metro de la Ciudad de México de Poniente a Oriente.

La Línea 12 tiene correspondencia en la estación Atlalilco con la Línea 8 (Garibaldi-Constitución de 1917), en la estación Ermita con la Línea 2 (Taxqueña-Cuatro caminos), en la estación Zapata de la Línea 3 (Universidad-Indios Verdes), y en Mixcoac con la Línea 7 (El Rosario-Barranca del muerto) (Caballero, 2011).

Distintos problemas ocasionaron que el servicio de pasajeros fuera suspendido el 12 de marzo de 2014 desde la estación terminal Tláhuac hasta la estación Culhuacán. Después de 20 meses de reparaciones, las estaciones cerradas se reabrieron el 29 de noviembre de 2015 desde Tláhuac a la estación Atlalilco.

Uno de los problemas detectados en el tramo subterráneo de la Línea 12 del Metro es que el túnel no tiene revestimiento, por lo que en las paredes y piso se presentaron filtraciones de agua, lo que provocó desgaste y deformaciones en la propia terracería. Además de la existencia de filtraciones de agua en las paredes del túnel, se constató que los registros estaban llenos con agua, lo cual no debería ocurrir y menos durante la temporada de lluvias.

Entre las estaciones Parque de los Venados y Eje Central también se detectaron filtraciones de agua en las paredes y piso del túnel, así como problemas en la construcción del drenaje, y piezas rotas.

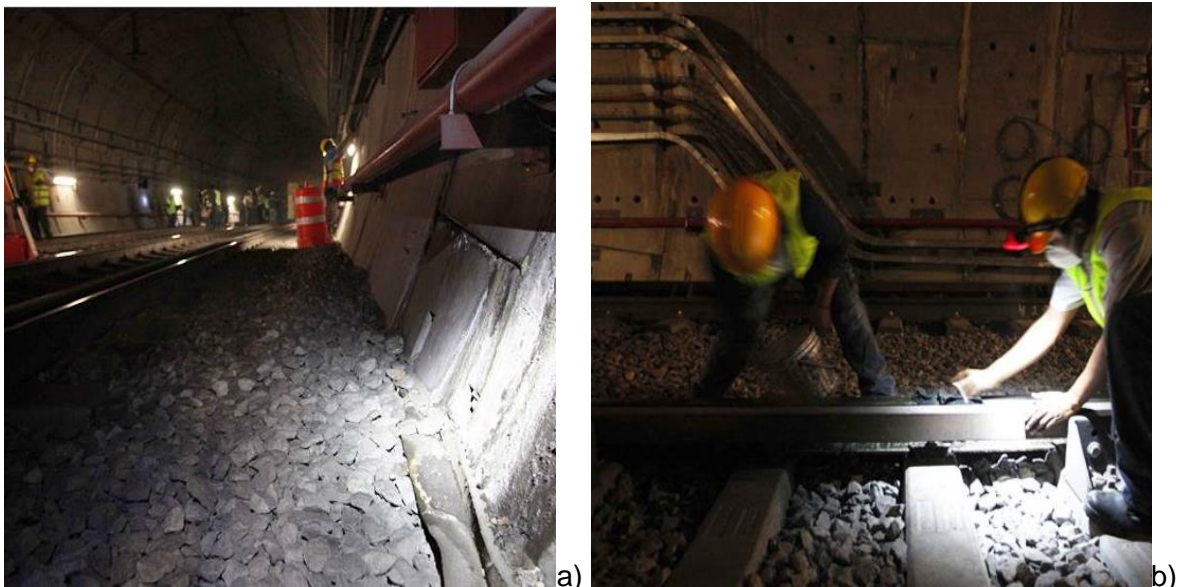


Fig 2.47 a) Filtraciones de agua en paredes del túnel; b) Localización del desgaste de vías provocado por las filtraciones en la Línea 12 del metro (fuente: <http://archivo.eluniversal.com.mx/ciudad-metropoli/2015/nuevas-fallas-amenazan-concierre-total-de-l12-1097224.html#grafico040515>)



Fig 2.48 Filtraciones en traveses y columnas de concreto en la Línea 12 del metro inaugurada el 30 de octubre de 2012 (Fuente: <http://www.jornada.unam.mx/2014/03/28/capital/039n1cap>).

Con el fin de evitar las filtraciones de agua en la Línea 12 del metro, se realizaron trabajos de rehabilitación y mantenimiento que consistieron en la aplicación de químicos como el *poliuretano hidrofóbico* (espuma para sellar grietas), lodo fraguante y mortero hidráulico de fraguado instantáneo para el sellado de superficies de concreto armado. Como parte de trabajos adicionales se colocaron canalones de lámina para captar el agua que se filtra por los ductos de ventilación, con el fin de desviar el agua proveniente de las filtraciones hacia los ductos de drenaje y evitar que se concentre en las vías o en algún equipo donde pueda provocar alguna falla.

## CAPÍTULO 3 MODELOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN TÚNELES

### 3.1 Introducción

Las condiciones de agua subterránea antes de la construcción de un túnel se consideran en régimen establecido. Al realizar la excavación de cualquier obra, las descargas de agua subterránea afectan la velocidad de avance de la construcción originando disminuciones permanentes en los niveles piezométricos (Molinero, Samper y Juanes, 2000). Estas disminuciones afectan a su vez la velocidad de excavación, pudiendo constituir un riesgo en la construcción de un túnel. Otro aspecto importante que puede provocar variaciones en el nivel freático, es el bombeo intenso de los estratos permeables profundos que se refleja en las formaciones arcillosas. Un ejemplo de estructuras que pueden encontrarse en la situación anterior son los túneles profundos construidos o actualmente en construcción dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, los cuales atraviesan importantes formaciones arcillosas lacustres blandas, que pueden presentar problemas a corto y largo plazo (Alberro y Hernández, 1989).

Uno de los problemas más comunes que enfrentan los diseñadores y constructores de túneles están relacionados con el flujo de agua. Una forma sencilla de analizar este problema desde un punto de vista geotécnico es considerando el efecto dren del túnel, que se refiere al impacto causado en el acuífero por la extracción de agua durante la excavación, que puede provocar descensos en los niveles piezométricos (Carrera y Vázquez, 2008).

En la Figura 3.1 se ilustra cómo el efecto dren ocasiona un impacto importante en el nivel freático.

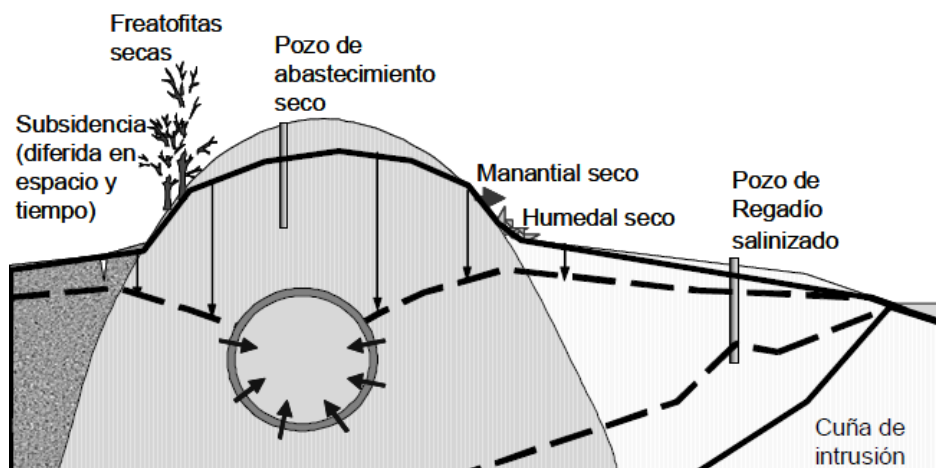


Fig 3.1 Efecto dren: impactos causados por el rebajamiento del nivel freático desde su posición inicial (línea continua) hasta la final (línea discontinua) (Carrera y Vázquez-Suñé, 2008).

En este capítulo se presentan y analizan algunos modelos analíticos para evaluar el flujo bidimensional en estado establecido alrededor de túneles en suelos homogéneos e isotrópicos, y en medios heterogéneos. También se exponen algunas ecuaciones analíticas para la evaluación de filtraciones en estado transitorio. Estos modelos corresponden a varios autores dedicados a la investigación de las filtraciones de agua en túneles, quienes proponen soluciones analíticas para calcular gastos de infiltración en túneles. Junto con la modelación analítica, se explica cómo realizar el modelado numérico mediante un programa de computadora que se fundamenta en el Método del Elemento Finito para comparar resultados y proponer la mejor solución para la evaluación de las filtraciones de agua en túneles.

Las ecuaciones matemáticas que se presentan son válidas porque se aplican a un fenómeno típico en las construcciones de túneles: las filtraciones de agua. Su estudio y comparación son necesarios para proponer mejores soluciones de este tipo de problemas.

La Figura 3.2 muestra el esquema de desarrollo del Capítulo 3, correspondiente al fundamento teórico que se aplica en esta tesis para realizar los análisis de las filtraciones de agua en túneles.

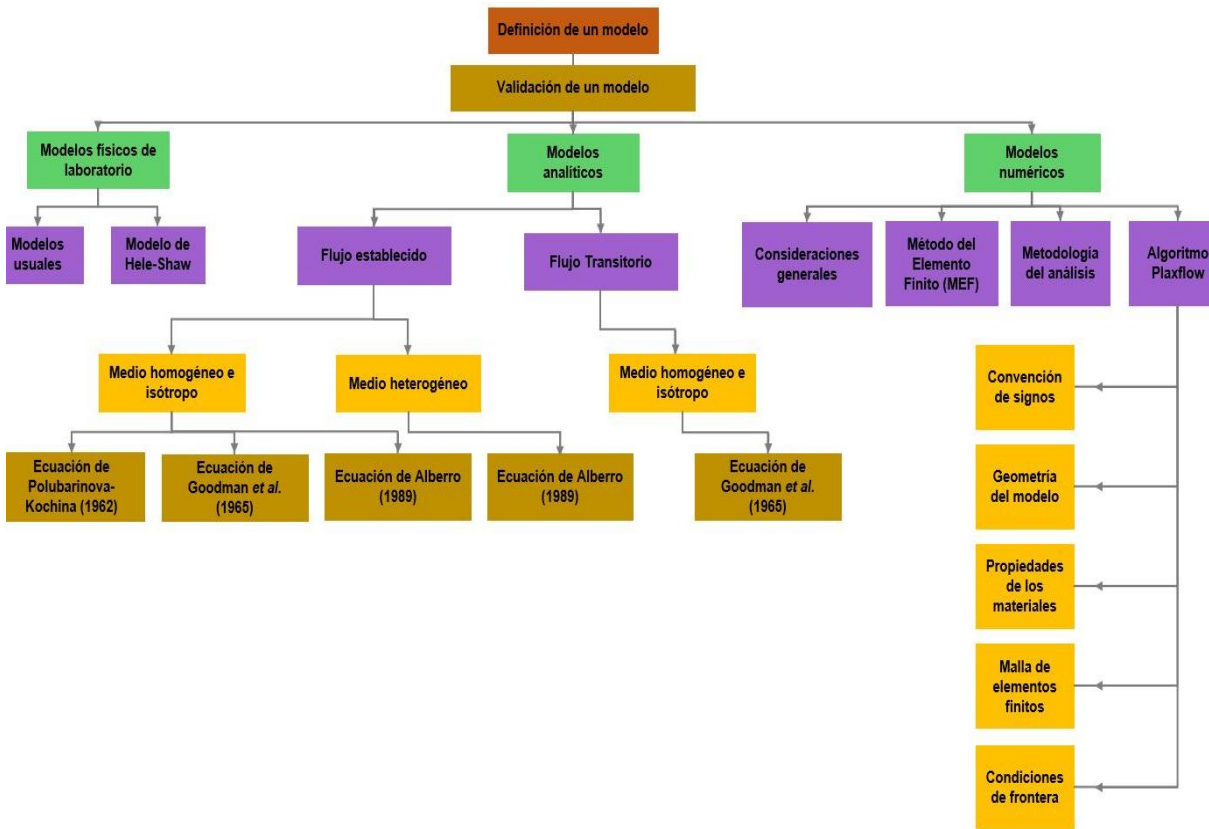


Fig 3.2 Esquema del desarrollo del Capítulo 3 de esta tesis.



### 3.1.1 Definición de un modelo

Un modelo se define como una representación simplificada de un sistema real de agua subterránea, simulando de manera aproximada el comportamiento general de un evento. En el que se muestran las relaciones predominantes entre sus elementos.

Al formular un problema se deben identificar las posibles soluciones donde las restricciones permitan considerarse factibles; entonces el siguiente paso consiste en reformular el problema para analizarlo más fácilmente.

Por esta razón un modelo no puede incluir todos los aspectos de un sistema real, solamente los más importantes. Es decir, los procesos físicos, símbolos y relaciones que lo constituyen. De manera general, la representación se hace con medios de diferente sustancia a los del sistema original (Borgo, 1998).




### 3.1.2 Validación de un modelo

Validar un modelo es asignar un nivel de certeza adecuada a los resultados es decir, asegurarse de que contiene todos los parámetros, variables y relaciones funcionales necesarias para que proporcionen respuestas correctas.

Para validar un modelo se utilizan, por lo general tres pruebas:

1. Se construye un modelo y se analiza para estar seguro de que tiene apariencia de certidumbre, es decir, que tiene parecido o describe el sistema original.
2. Se efectúa una o más pruebas con el modelo y se pregunta si los resultados parecen razonables.
3. Se solicita comparar los resultados del modelo con las respuestas actuales del sistema.

Según la forma de idealizar y representar el sistema real, existen básicamente los siguientes tipos de modelos:

-  Modelos físicos de laboratorio
-  Modelos analíticos
-  Modelos numéricos

En la Figura 3.3 se muestra un esquema ilustrativo de los aspectos a considerar en el desarrollo de un modelo.

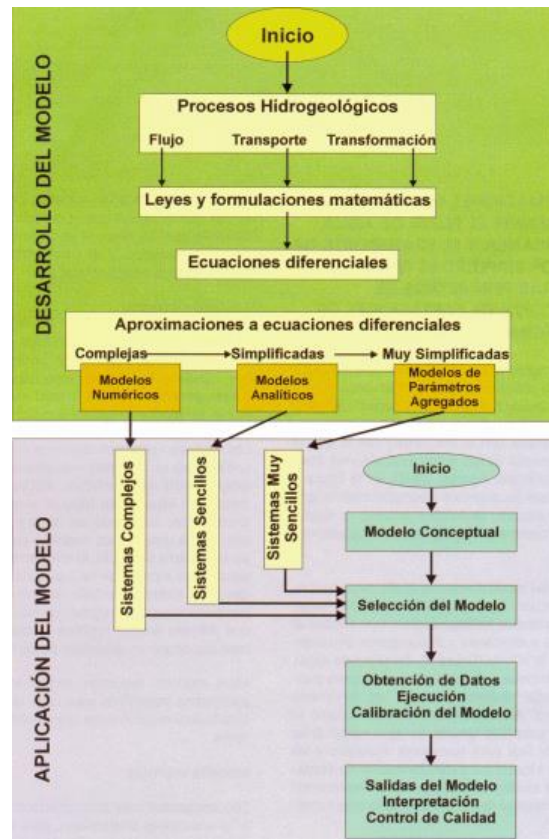


Fig 3.3 Aspectos a considerar en la aplicación de un modelo a sistemas de aguas subterráneas  
(fuente: [http://aguas.igme.es/igme/publica/libros1\\_HR/libro107/pdf/lib107/in\\_05.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro107/pdf/lib107/in_05.pdf))

## 3.2 Modelos físicos de laboratorio

### 3.2.1 Modelos usuales

Los modelos físicos de laboratorio son una representación que se hace del prototipo con el propósito de estudiar detalladamente el comportamiento de la estructura o parte de ella, bajo ciertas circunstancias, mediante el uso de técnicas y pruebas experimentales.

Una de las dificultades que presenta la modelación es la idealización de fenómenos, en la que se realizan simplificaciones importantes. Éstas pueden ser valoradas por medio de pruebas experimentales, aplicadas a modelos físicos de escala reducida o de tipo analógico.

Los modelos de laboratorio que reproducen a escala la región de flujo considerada, se usan con frecuencia para analizar el flujo en dos dimensiones, así como para calcular gastos, efectos de tubificación, arenas movedizas, etc. Uno de los dispositivos utilizados para considerar tales modelos son generalmente los que utilizan tanques con paredes de vidrio,

de poco ancho dentro de los cuales se simula la región de flujo que es una arena más o menos fina (López-Acosta, 1999).

En la siguiente imagen se puede observar el ensayo de un modelo físico de laboratorio que simula el efecto de las olas en un puerto.



Fig 3.4 Modelo físico del ensayo de agitación de la ampliación del puerto de Barcelona (Gutiérrez, 2003).

### 3.2.2 Modelo de Hele-Shaw

Alrededor de 1897 el arquitecto naval inglés Hele-Shaw, diseñó en Inglaterra el primer modelo de flujo laminar entre placas planas paralelas, con el cual fue capaz de reproducir diversas configuraciones de flujos dotados de potencial bidimensional, introduciendo diferentes tipos de obstáculos entre las placas que confinan el flujo.

Este instrumento permite simular fenómenos de diferentes condiciones en modelos a pequeña escala ofreciendo una representación útil en la experimentación.

Consta de dos placas planas de material transparente, superficie lisa, rígido y con un modelo de espuma ubicado entre éstas. Se encuentran separadas una de la otra a una distancia muy pequeña con un sello de caucho que evita fugas, y entre las cuales, se hace fluir un líquido viscoso en régimen laminar.

La imagen se obtiene coloreando un número arbitrario de líneas de corriente o filamentos producidas por un flujo medido de colorante, que se inyecta a través de un conjunto de boquillas en la parte inferior de la sección de entrada del fluido, de manera que se genera un flujo de burbujas.

La placa superior es removible. El agua fluye a lo largo de la sección, con una velocidad lo suficientemente baja para que las fuerzas de inercia sean despreciables. La placa inferior posee canales que están conectados al suministro y salida del agua.

Los modelos de Hele-Shaw no solo son capaces de reproducir configuraciones de flujo alrededor de obstáculos. También han sido utilizados para simular flujos bidimensionales de agua a través de medio porosos.

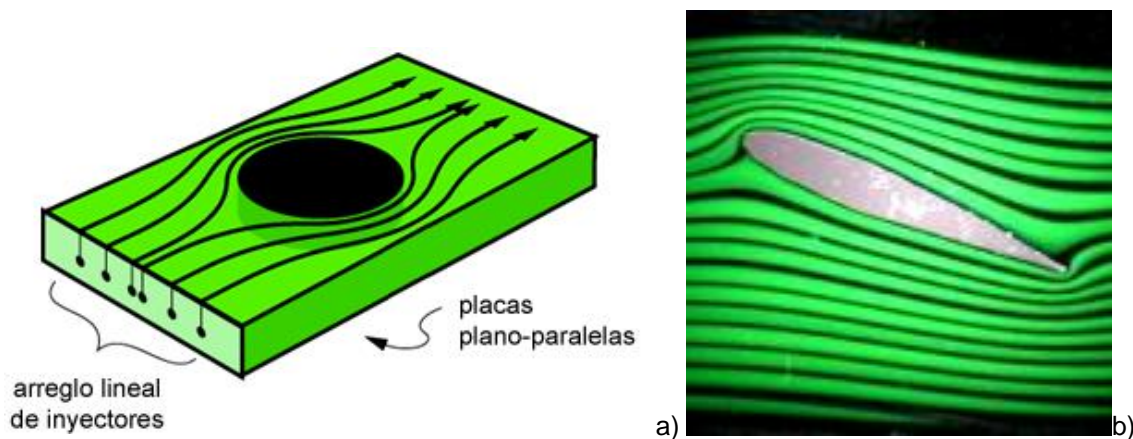


Fig. 3.5 Modelo de Hele Shaw: a) esquema simple de una celda Hele-Shaw con un arreglo lineal para la inyección de un colorante; b) visualización experimental de las líneas de corriente de un flujo bidimensional en un perfil alar (fuente: <http://materias.df.uba.ar/e1a2012c2/category/material-complementario/page/2/>, 2015).

El flujo de agua producido, es laminar, no viscoso, bidimensional e incompresible, de manera que se puede emplear la ecuación de Laplace en dos dimensiones, y a partir de la geometría de las líneas generadas pueden llevarse a cabo soluciones con similitud cinemática, sin necesidad de los números adimensionales de Reynolds, Froude o Mach.

Estos modelos tienen dos formas principales de operación: un túnel con dos placas paralelas donde confinan el flujo y en canal cuando el flujo presenta una superficie opuesta a la atmósfera.

Los modelos de operación en túnel se utilizan principalmente para reproducir flujos potenciales bidimensionales establecidos alrededor de obstáculos, tales como pilas, perfiles de alas de aviones (aerodinámica), secciones de pozos de bombeo, casco de embarcaciones, vehículos autopropulsados, así como, construcciones civiles, etc.

También son ampliamente utilizados en la explotación de acuíferos por sistemas de pozos de bombeo. Aunque también pueden utilizarse para simular flujo de agua en medios porosos, tienen la desventaja que para casos de flujo no confinado, no son capaces de producir la línea de corriente superior (Hernández, 1990).

### 3.3 Modelos analíticos

Los modelos analíticos fueron importantes durante la década de los años setenta en el siglo pasado, sin embargo en diversas ocasiones debido a su complejidad han sido reemplazados por modelos computacionales, gracias a la tecnología de la informática. A principio de los años 90 disminuyó el uso de los métodos analíticos, debido al auge de los modelos numéricos (Reyna y Reyna, 2012).

El modelo analítico utiliza patrones para designar las propiedades del sistema que se desea estudiar, con la capacidad de representar las características y relaciones fundamentales del fenómeno, proporcionando explicaciones y sirviendo como guía para generar hipótesis teóricas. Generalmente, se considera que los modelos analíticos proporcionan relaciones matemáticas o lógicas que representan leyes físicas que rigen el comportamiento de un escenario bajo investigación. Son apropiados para las aproximaciones simplificadas de ecuaciones diferenciales y permiten obtener expresiones simples en el caso del flujo de agua, proporcionando soluciones a las mismas lo más precisas posible (asumiendo diversas hipótesis simplificadoras).

Las observaciones que se realizan en la práctica de la ingeniería actual, indican que las soluciones analíticas no son consistentemente precisas en la estimación del flujo de agua en túneles, debido a diversos factores que dichas soluciones no toman en cuenta de forma apropiada. Estos factores incluyen la presencia de características geológicas especiales, como el nivel freático, o bien, consideraciones sobre la anisotropía en la permeabilidad del suelo, o la permeabilidad en las inmediaciones del túnel (revestimiento-suelo).

#### 3.3.1 Flujo establecido

El flujo estacionario se origina por las contribuciones de agua en los estratos que confinan un acuífero bajo estudio, los valores de presión y velocidad de flujo permanecen constantes todo el tiempo. En el enfoque para el estado establecido, un túnel tiende a actuar normalmente como un desagüe, debido a que la cantidad de agua que ingresa al túnel es igual a la cantidad que sale, sin que se tengan variaciones, e implica también que el flujo es independiente todo el tiempo.

##### 3.3.1.1. Medio homogéneo e isótropo

En la actualidad existen varias expresiones analíticas para calcular la filtración de agua en túneles circulares bajo régimen de flujo estacionario, entre ellas se encuentran la de Goodman *et al.* (1965), Freeze y Cheery (1979), Alberro (1989), Heuer (1995), Lei (1999), Karlsrud (2001), Raymer (2001), El Tani (2003), Koliymbas y Wagner (2007) y Park *et al.* (2008). Estas soluciones se han utilizado satisfactoriamente en la práctica, pero al

considerar diversas simplificaciones se corre el riesgo de que el valor de filtración estimado sea menor o mayor que el real, resultando en sobrecostos y condiciones riesgosas en el lugar de la excavación (Zuluaga, 2015).

En la Tabla 3.1 se resumen varias de las ecuaciones para flujo estacionario mencionadas previamente y sus hipótesis de aplicabilidad correspondientes. En los párrafos siguientes se describen con mayor detalle las soluciones más usuales.

Tabla 3.1 Métodos analíticos utilizados para el cálculo de filtración en túneles en condición de flujo establecido.

Método analítico	Ecuación	Representación esquemática	Hipótesis u observaciones
Polubarinova-Kochina (1962)	$q = \frac{2\pi k(d - \phi_0)}{\ln(2D/R)}$		Aplicable al cálculo del flujo de agua en dos dimensiones de un túnel en un medio saturado, homogéneo e isótropo
Goodman et al. (1965)	$Q_L = 2\pi k H_0 / \ln(2z/r)$		Las aplicaciones de esta ecuación en la práctica reportan que el caudal real se desvía en gran medida del caudal estimado
Freeze y Cheery (1979)	$Q_L = 2\pi k H_0 / \ln(2H_0/r)$	-----	El caudal de infiltración estimado resulta menor al calculado con la ecuación de Goodman et al., ya que H <sub>0</sub> es mayor que z y ambos términos se encuentran en el logaritmo de la ecuación
Alberro y Hernández (1989)	$Q_L = 4\pi k \frac{(P_{aire} / \gamma_w) - h}{\ln\left(\frac{a^2}{a^2 + 4h^2}\right)}$		Permite el cálculo del gasto de filtración de un túnel en un medio homogéneo e isótropo
Alberro y Hernández (1989) medio estratificado	$Q_L = 4\pi k \frac{(P_{aire} / \gamma_w) - (h + H)}{\ln\left(\frac{a^2}{a^2 + 4h^2}\right)}$		Determina el caudal de filtración de un túnel en un medio estratificado, constituido por una secuencia de capas permeables e impermeables

Continuación Tabla 3.1 Métodos analíticos utilizados para el cálculo de filtración en túneles en condición de flujo establecido

Método analítico	Ecuación	Representación esquemática	Hipótesis u observaciones
Heuer (1995)	$Q_L = (1/8)[2\pi kH_0 / \ln(2z/r)]$	-----	En esta ecuación se propuso un factor de ajuste, basado en caudales de infiltración medidos en varios túneles (el factor es de 1/8)
Lei (1999)	$Q_L = \frac{2\pi kh}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}\right)}$		Este autor encontró una expresión analítica para estimar el caudal de filtración establecido en dos dimensiones hacia un túnel horizontal en un acuífero poroso semi-infinito, saturado, homogéneo e isótropo
El Tani (2003)	$Q_L = \frac{2\pi k(A+H)}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1}\right)}$		Permite el cálculo del gasto de filtración de agua en un túnel sin revestimiento, considerando por lo tanto que el perímetro del túnel se encuentra a presión atmosférica en cada uno de sus puntos
Kolymbas y Wagner (2007)	$Q_L = \frac{2\pi k(-h_a + H)}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1}\right)}$		Calcula la filtración de agua en la capa drenante de los túneles revestidos. Considera una carga hidráulica uniforme en el perímetro del túnel controlada por la capa drenante

### 3.3.1.1.1. Ecuación de Polubarinova-Kochina (1962)

La ecuación analítica de Polubarinova-Kochina (1962) permite el cálculo del gasto de infiltración hacia un túnel en dos dimensiones, donde el suelo está totalmente saturado y el medio es homogéneo e isótropo. El terreno se caracteriza por estar en un acuífero semi-infinito. La ecuación de Polubarinova-Kochina (1962) se expresa de la siguiente manera:

$$q = \frac{2\pi k(d - \phi_0)}{\ln(2D/R)} \quad (3.1)$$

Donde:

- $k$ = conductividad hidráulica o permeabilidad (m/s)
- $D$ = profundidad desde el centro del túnel a la superficie del terreno (m)
- $\Phi_0$ = carga de agua al perímetro del túnel (m)
- $d$ = profundidad del agua por encima del terreno (m)
- $R$ = radio del túnel (m)

Esta ecuación es similar a la de Goodman *et al.* (1965) con las siguientes hipótesis:

- El túnel es horizontal con una sección transversal circular y se encuentra en un suelo homogéneo e isótropo, y en un acuífero poroso semi-infinito
- El flujo es estacionario
- El agua es incompresible
- La carga de agua en la superficie del terreno y en el perímetro del túnel es constante

En la Figura 3.6 se presenta el esquema ilustrativo para la aplicación de la ecuación de Polubarinova-Kochina (1962).

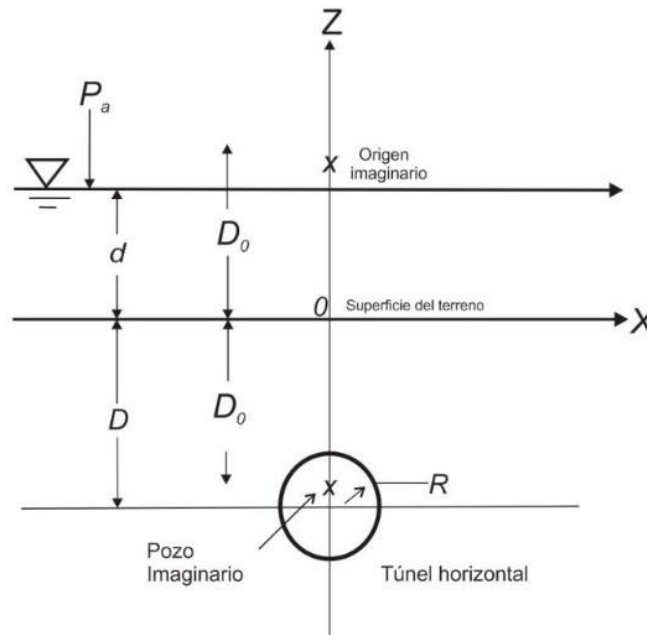


Fig 3.6 Esquema para la aplicación de la ecuación de Polubarinova-Kochina (1962).

### 3.3.1.1.2. Ecuación de Goodman *et al.* (1965)

Otra de las soluciones analíticas para el cálculo del gasto de infiltración en túneles en un medio homogéneo e isótropo es (Goodman *et al.*, 1965):



$$Q_L = \frac{2\pi k H_0}{\ln(2z/r)} \quad (3.2)$$

Donde:

$Q_L$ = caudal de infiltración por unidad de longitud del túnel ( $m^3/s$ )

$k$ = conductividad hidráulica o permeabilidad ( $m/s$ )

$r$ = radio del túnel ( $m$ )

$H_0$ = carga de agua arriba del túnel ( $m$ )

$z$  = distancia del centro del túnel al fondo del cuerpo de agua (lago o río) ( $m$ )

Goodman, Moye, Schakwyk y Javandel (1965) desarrollaron la expresión anterior con el fin de determinar el gasto de infiltración en un túnel localizado bajo un cuerpo de agua (un lago o un río), considerado como fuente infinita. Las aplicaciones de esta ecuación en la práctica señalan que el caudal real se desvía del caudal estimado (Zuluaga, 2015).

En la Figura 3.7 se presenta el esquema ilustrativo para la aplicación de la ecuación de Goodman *et al.* (1965).

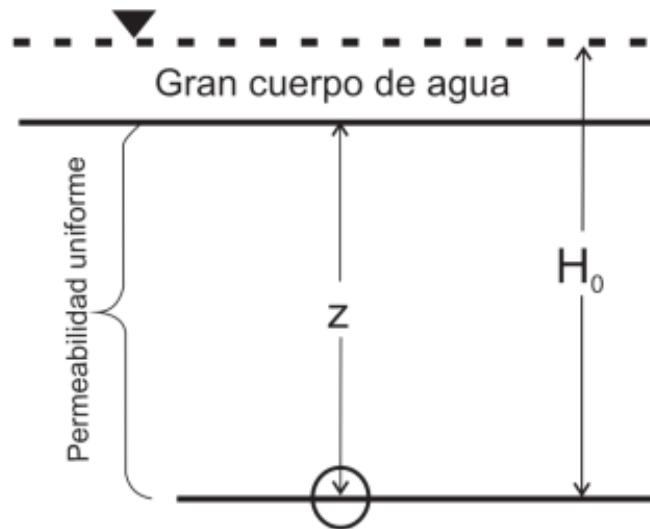


Fig 3.7 Dibujo representativo para la aplicación de la ecuación de Goodman *et al.* (1965).

### 3.3.1.1.3. Ecuación de Alberro y Hernández (1989)

Alberro y Hernández (1989) realizaron estudios y análisis sobre el efecto del agua en el contorno de túneles, enfocándose en los problemas técnicos planteados por el Sistema de

Drenaje Profundo, tanto en su construcción como a largo plazo. Alberro y Hernández (1989) consideraron dos problemas importantes relacionados con el efecto de las fuerzas de filtración generadas por el flujo de agua:

- ✚ La estabilidad a largo plazo del revestimiento de los túneles embebidos en una masa arcillosa que se encuentra bajo el efecto del bombeo regional
- ✚ El *efecto dren* en la construcción de un túnel

En este método el análisis se enfoca en el *efecto dren*, utilizando el procedimiento analítico que se basa en la consideración de las redes de flujo inducidas durante la construcción del túnel por bombeo regional (Alberro y Hernández, 1989).

Excavar un túnel bajo el nivel freático implica realizar prevenciones constructivas para evitar el flujo de agua hacia el túnel. En esos casos se deben tomar las siguientes consideraciones:

- ✚ Asegurar la impermeabilidad del revestimiento primario
- ✚ Usar lodo a presión que contrarreste la presión del agua en el frente del túnel

En la Figura 3.8 se muestra el sistema de referencia para el análisis de un túnel en un medio homogéneo e isótropo, localizado a una profundidad  $h$  bajo el nivel freático y en condiciones de flujo establecido.

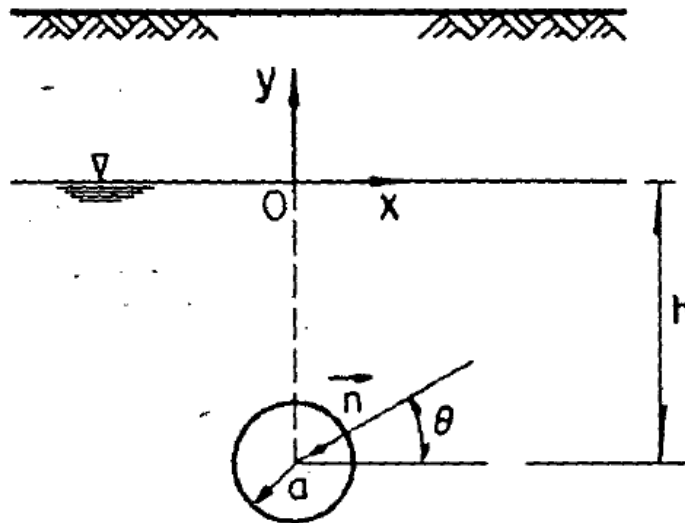


Fig 3.8 Sistema de ejes de referencia de un túnel en un medio homogéneo e isótropo (Alberro y Hernández, 1989).

En algunas ocasiones resulta difícil asegurar la impermeabilidad del revestimiento primario construido mediante dovelas, en este caso las juntas de construcción entre sí pueden propiciar la generación de un flujo de agua convergente hacia el túnel.

Cuando el túnel se localiza bajo el nivel freático, se supone que su revestimiento primario es permeable, y se asume que el perímetro interno del túnel está sometido a una presión de aire denominada  $P_{aire}$ .

De esta manera, considerando un túnel localizado a una profundidad  $h$  bajo el nivel freático, referido al sistema de ejes de la Figura 3.9, y asumiendo que su revestimiento primario es permeable, la ecuación analítica para estimar el flujo bidimensional hacia el túnel puede escribirse como (Alberro y Hernández, 1989):

$$Q = 4\pi k \frac{P_{aire} / \gamma_w - h}{\ln \frac{a^2}{a^2 + 4h^2}} \quad (3.3)$$

Donde:

$k$ = permeabilidad del material que rodea el túnel (m/s)

$h$ = distancia vertical entre el nivel freático y el eje del túnel (carga de agua sobre el túnel) (m)

$a$ = radio del túnel (m)

$P_{aire}$ = presión del aire dentro del túnel (atm)

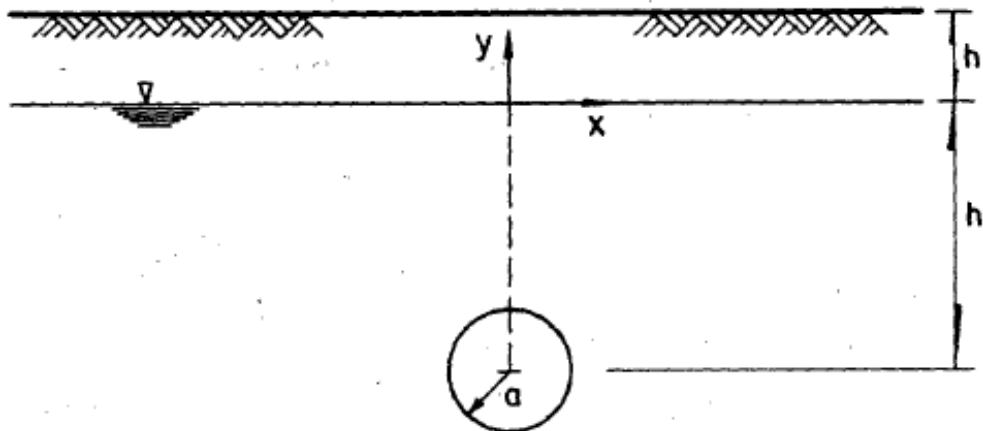


Fig 3.9 Sistema de ejes de referencia (Alberro y Hernández, 1989).

La expresión (3.3) muestra que el gasto del túnel es:

- ✚ Proporcional a la permeabilidad del medio
- ✚ Proporcional a la presión de aire aplicada en el interior del túnel
- ✚ No es estrictamente proporcional a la profundidad o al diámetro del túnel

La ecuación (3.3) anterior se utiliza para calcular el flujo bidimensional hacia un túnel, considerando la red de flujo permanente que se muestra en la Figura 3.10.

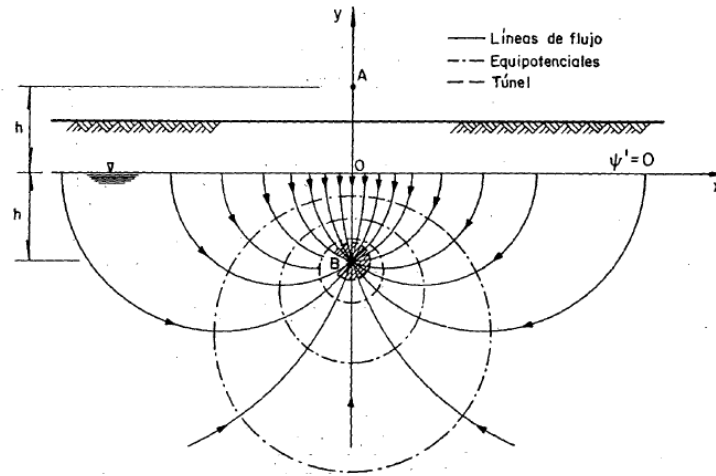


Fig 3.10 Líneas equipotenciales y de flujo (Alberro y Hernández, 1989).

### 3.3.1.2. Ecuación de Alberro y Hernández (1989) para medios estratificados

La ecuación propuesta por Alberro y Hernández (1989) permite calcular el caudal de filtración hacia un túnel en un medio estratificado (Figura 3.11) constituido por una secuencia de capas permeables e impermeables y un sistema de ejes referido a la capa permeable adyacente al túnel y localizada a una profundidad  $H$  debajo del nivel freático (Alberro y Hernández, 1989).

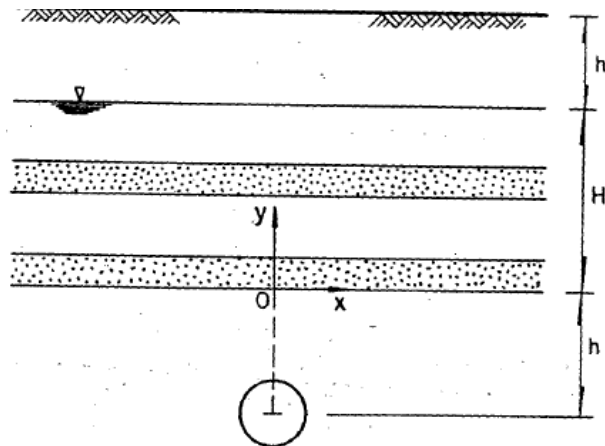


Fig 3.11 Sistema de referencia en un medio estratificado (Alberro y Hernández, 1989).

Las líneas equipotenciales y las líneas de flujo en este caso también se consideran constituidas por dos familias ortogonales de círculos, centradas con respecto a "y" y "x", correspondientemente.

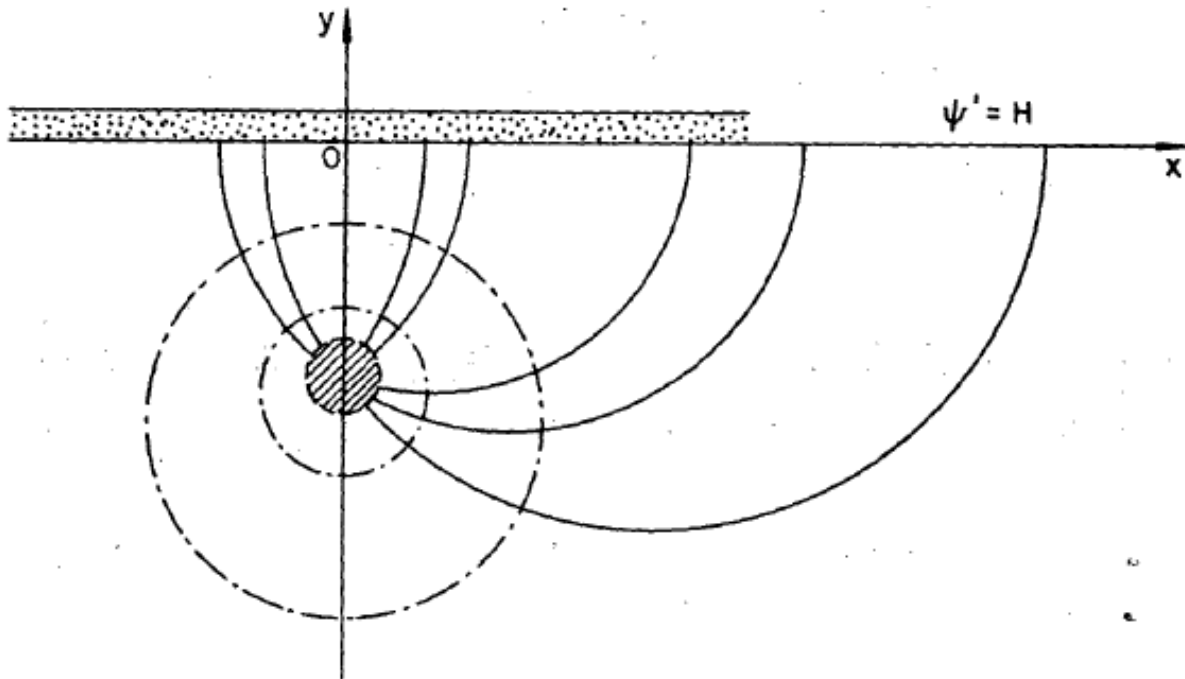


Fig 3.12 Líneas equipotenciales y de flujo en un medio estratificado (Alberro y Hernández, 1989).

De acuerdo con Alberro y Hernández (1989), el gasto que se infiltra hacia un túnel está dado por:

$$Q = 4\pi k \frac{P_{\text{aire}} / \gamma_w - (h + H)}{\ln \frac{a^2}{a^2 + 4h^2}} \quad (3.4)$$

Donde:

$k$ = permeabilidad del material que rodea el túnel (m/s)

$h$ = distancia vertical entre el extremo inferior del estrato permeable aledaño al túnel y el eje del túnel (m)

$H$ = distancia vertical entre el nivel freático y el extremo inferior del estrato permeable aledaño al túnel (m)

$a$ = radio del túnel (m)

$P_{\text{aire}}$ = presión del aire dentro del túnel (atm)

Se resalta que en las expresiones de Alberro y Hernández (1989) la presión del aire  $P_{\text{aire}}$  suele considerarse nula.

### 3.3.2 Flujo transitorio

En la actualidad, se han desarrollado algunos métodos que toman en cuenta la naturaleza transitoria de la filtración de agua en túneles utilizando las soluciones analíticas desarrolladas para pozos (Zuluaga, 2015).

En la Tabla 3.2 se resumen algunos de los métodos para el cálculo del caudal de filtración en un túnel bajo régimen de flujo de agua transitorio.

Tabla 3.2 Métodos analíticos utilizados para el cálculo de filtración en túneles bajo condiciones de flujo transitorio.

Método analítico	Ecuación	Hipótesis u observación
Goodman <i>et al.</i> (1965)	$Q(t) = \sqrt{\frac{8 \cdot C}{3} \cdot k \cdot H_0^3 \cdot S_y \cdot t}$	Considera que la superficie freática tiene una forma parabólica y se asume la condición de flujo horizontal de Dupuit-Forchheimer
Goodman <i>et al.</i> (1965)	$q(t) = H_0 \sqrt{\frac{0.5 \cdot k \cdot \omega}{1 - \exp\left(-\frac{6\omega}{H_0} t\right)}}$	Permite el cálculo del gasto en acuíferos recargados por lluvia
Goodman <i>et al.</i> (1965)	$q = H_0 \sqrt{\frac{k\omega}{2}} \cdot \omega \cdot L(\infty)$	Representa la generalización de la expresión para el cálculo del gasto en acuíferos recargados por lluvia cuando $t \rightarrow \infty$
Jacob y Lohman (1972)	$Q = \frac{4\pi \cdot k \cdot H_0 \cdot L}{2.3 \log(2.25k \cdot Lt / Sr^2)}$	Considera que la carga hidráulica es constante en el perímetro del túnel
Perrochet y Dematteis (2007)	$Q(t) = 2\pi \sum_{i=1}^N H(t-t_i) \times \int_0^{v_i(t-t_i)} \frac{k_i s_i H(L_i - x)}{\ln\left(1 + \sqrt{\frac{\pi k_i}{S_i r_i^2} \left(t - t_i - \frac{x}{v_i}\right)}\right)}$	Permite predecir la descarga transitoria dentro de un túnel perforado a diferentes velocidades a través de formaciones heterogéneas

Una explicación más detallada de las ecuaciones más usuales de la Tabla 3.2 anterior se expone en los párrafos siguientes.

#### 3.3.2.1. Ecuación de Goodman *et al.* (1965) para flujo transitorio

Además de la expresión para el cálculo del flujo en un túnel en régimen establecido, Goodman *et al.* (1965) propusieron una expresión para el cálculo de la infiltración hacia un

túnel en condiciones transitorias, que considera que la superficie freática tiene una forma parabólica y asume la condición de flujo horizontal de Dupuit-Forechheimer.

El caudal de filtración acumulado en función del tiempo  $Q(t)$ , por unidad de longitud del túnel para cualquier tiempo  $t$  desde que se genera el flujo transitorio, está dado por (Goodman *et al.* 1965):

$$Q(t) = \sqrt{\frac{8 \cdot C}{3} \cdot k \cdot H_0^3 \cdot S_y \cdot t} \quad (3.5)$$

Donde:

- $H_0$ = carga de agua sobre el túnel (medida desde el centro del mismo) (m)
- $k$ = conductividad hidráulica del medio (m/s)
- $S_y$ = coeficiente de almacenamiento del medio
- $C$ = constante arbitraria (0.75 propuesta por Goodman *et al.* 1965)
- $t$ = tiempo (s)

La ecuación (3.5) es válida bajo las siguientes hipótesis:

- ✚ El nivel freático tiene forma parabólica
- ✚ Se asume la suposición de flujo horizontal de Dupuit-Forchheimer

En la Figura 3.13 se presenta un esquema ilustrativo para el cálculo del gasto hacia un túnel bajo régimen transitorio.

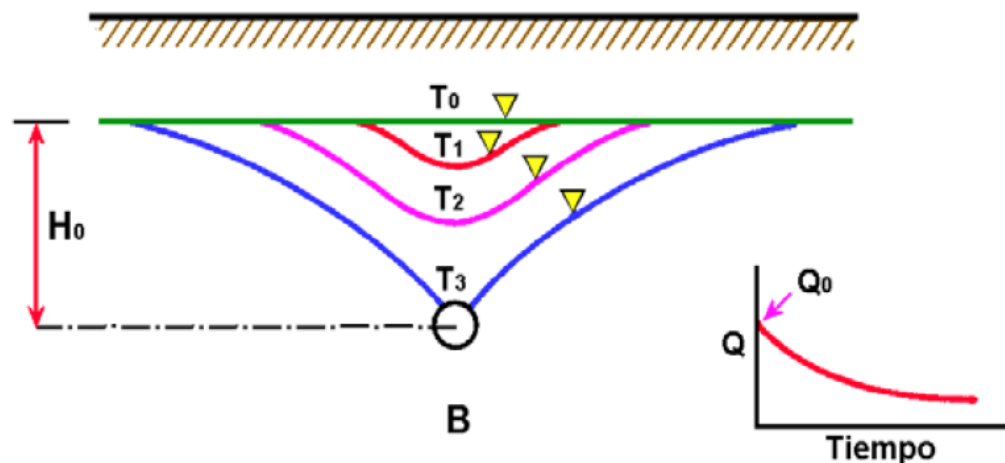


Fig 3.13 Túnel excavado en materiales de alta porosidad y modificación del nivel freático (Padilla, 2011).

En un túnel excavado en materiales de alta porosidad, se aprecia cómo el nivel freático se va modificando respecto al tiempo (Fig 3.13). En este caso, el régimen transitorio se

presenta hasta que el nivel freático alcanza el túnel. En esas circunstancias no es posible calcular  $Q_0$  de forma simple, dado que varía con el tiempo (Padilla, 2011).

### 3.3.2.2. Ecuación para el cálculo de infiltraciones en acuíferos recargados por lluvia

La evolución transitoria del caudal drenado por un túnel en un acuífero recargado por agua de lluvia, se puede evaluar con una solución analítica que considera cambios sucesivos en el estado estacionario y que permite aproximar el régimen transitorio de acuíferos libres (Molinero, Samper y Juanes, 2000). La expresión que permite lo anterior es (Goodman *et al.* 1965):

$$q(t) = H_0 \sqrt{\frac{0.5 \cdot k \cdot \omega}{1 - \exp\left(-\frac{6\omega}{H_0} t\right)}} \quad (3.6)$$

Donde:

$k$ = conductividad hidráulica o permeabilidad (m/s)

$t$ = tiempo (s)

$\omega$ = aporte de agua de lluvia (l/s)

$H_0$ = carga de agua al centro del túnel (m)

La ecuación anterior se puede generalizar al caso en el que el túnel se encuentra a una altura determinada sobre la base impermeable, considerando que  $L(\infty)$  (Goodman *et al.*, 1965):

$$q = H_0 \sqrt{\frac{k\omega}{2}} \cdot \omega \cdot L(\infty) \quad (3.7)$$

## 3.4 Modelos numéricos

En los últimos 30 años se ha tenido una mayor demanda por obtener modelos que simulen con mejor precisión los problemas geotécnicos. Actualmente los modelos numéricos se requieren con mayor frecuencia, debido a su fácil adaptación a condiciones variables y capacidad para resolver problemas complejos. En general, las soluciones exactas y analíticas son laboriosas cuando las condiciones geométricas, hidráulicas y de frontera se tornan complejas (López-Acosta, 2014).





Modelar numéricamente es una habilidad que se alcanza con el tiempo y la experiencia. Por lo que, adquirir un programa especializado no hace a una persona experto en la materia. Tiempo, mucha práctica y un conocimiento profundo de los fundamentos matemáticos son necesarios para entender las técnicas, poder aplicarlas y aprender a interpretar los resultados obtenidos (Mendoza, 2015).

### 3.4.1 Consideraciones generales

La modelación numérica se puede utilizar como una herramienta predictiva a partir de un comportamiento esperado.

En términos generales, el modelado numérico es una simulación matemática de un proceso que se presenta en la realidad. El modelo numérico es puramente matemático y muy diferente a un modelo físico (Mendoza, 2015). Teniendo de este modo, algunas ventajas sobre los modelos físicos:

- ✚ Los modelos numéricos pueden plantearse y evaluarse rápidamente en comparación con los modelos físicos.
- ✚ Un modelo físico puede estar restringido por un número de condiciones, lo que no es un problema en los modelos matemáticos, que permiten considerar un mayor número de escenarios (condiciones de frontera más complejas, así como heterogeneidad y anisotropía).

Actualmente las técnicas numéricas se utilizan con mayor regularidad, debido a su capacidad para resolver problemas complejos. La metodología general señala que para llevar a cabo un análisis de flujo de agua, se requieren parámetros hidráulicos de los materiales que solo pueden obtenerse a partir de pruebas de campo o laboratorio. Estos parámetros en la práctica común no se determinan por tiempo y costo, además de que algunos tipos de ensayos requieren de personal o equipo más especializado (López-Acosta, 2014).

En la Figura 3.14 se presenta un diagrama de árbol para la solución de problemas de flujo de agua en túneles.

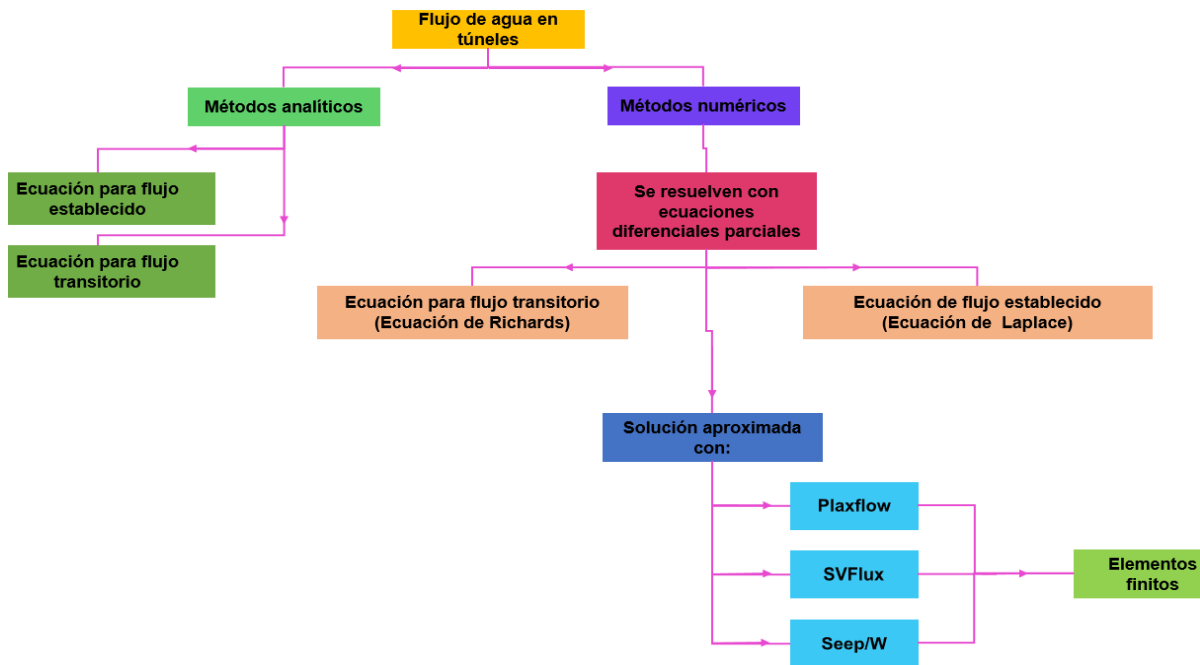


Fig. 3.14 Diagrama de árbol para la solución de problemas de flujo de agua en túneles.

### 3.4.2 Método de elementos finitos (MEF)

El Método de Elementos Finitos (MEF) se origina a partir de un procedimiento general de discretización de problemas continuos, planteados por expresiones matemáticas definidas. Estas ecuaciones pueden resolverse mediante técnicas aproximadas especiales, como el método de elementos finitos o las diferencias finitas, entre otros. Con el MEF, el dominio en estudio se divide en un número de elementos cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros. Es un método versátil respecto a otros métodos, puesto que permite la consideración de anisotropía, heterogeneidad y múltiples condiciones de frontera (López-Acosta, 2014).

Los métodos numéricos se han venido desarrollando y utilizando exitosamente en la solución de problemas en diferentes áreas de la ciencia e ingeniería. Constituyen una herramienta matemática que proporciona soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales.

Actualmente se encuentran disponibles una cantidad de programas computacionales basados en diferentes técnicas numéricas, una de las más populares es precisamente el método del elemento finito. Otras técnicas son las diferencias finitas, el método del volumen finito, los elementos distintos, etc.

En la Tabla 3.3 se muestran algunos programas de computadora usuales y el método en el que se fundamentan.

Tabla 3.3 Programas de computadora que utilizan elementos finitos y diferencias finitas.

Programa	Técnica numérica
STARDYNE	Elementos finitos
ANSYS	Elementos finitos
ABAQUS	Elementos finitos
ADINA	Elementos finitos
FLAC	Diferencias finitas
MIDAS-GTS	Elementos finitos
PLAXFLOW	Elementos finitos
PLAXIS	Elementos finitos
MODFLOW	Diferencias finitas
SVFLUX	Elementos finitos
SEEP/W	Elementos finitos
SLIDE	Elementos finitos

Algunos programas de computadora para la solución de problemas de ingeniería geotécnica que manejan estas técnicas numéricas se resumen en la Figura 3.15.

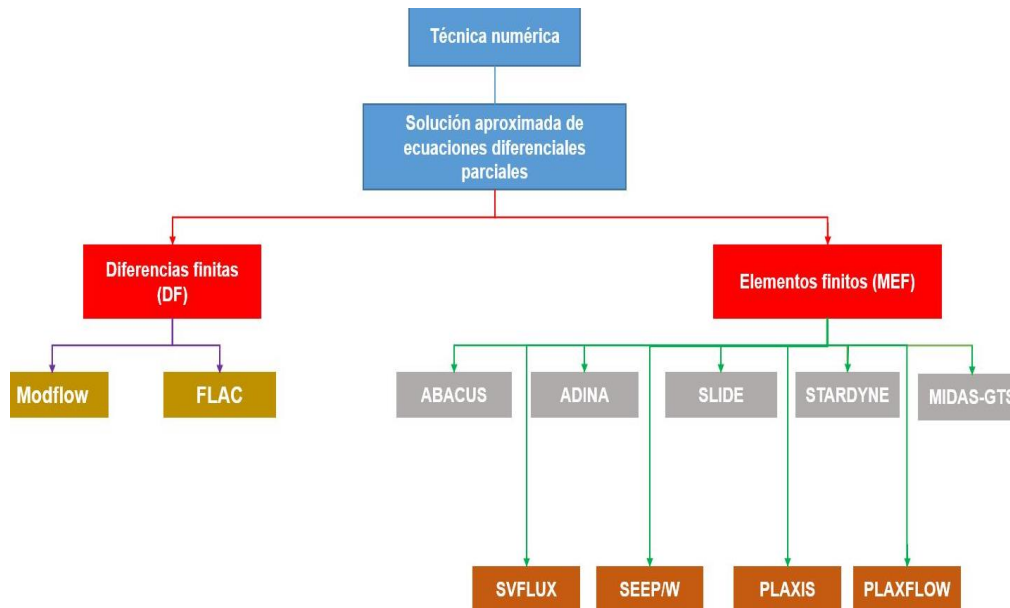


Fig 3.15 Programas de computadora para la solución de problemas de ingeniería geotécnica.

### 3.4.3 Metodología de análisis para el estudio del flujo de agua con modelado numérico mediante el MEF

Los pasos sugeridos que deben considerarse en la solución numérica bidimensional de problemas de ingeniería geotécnica son:

- ✚ Identificar claramente el caso de estudio que se desea resolver
- ✚ Introducir la geometría del problema
- ✚ Asignar las propiedades de los materiales (conductividad hidráulica o permeabilidad, relación de vacíos o porosidad, curva característica y función de conductividad hidráulica, en su caso, etc.)
- ✚ Generar la malla de elementos finitos
- ✚ Especificar las condiciones de frontera
- ✚ Especificar las condiciones iniciales de la(s) etapa(s) de análisis
- ✚ Ejecutar el programa
- ✚ Evaluar los resultados y establecer conclusiones y recomendaciones

Se asume que el análisis mediante modelación numérica es como un laboratorio virtual, aplicando un criterio ingenieril, y la cautela para resolver problemas complejos de obras subterráneas considerando variables tales como el mejoramiento del suelo (Zaldívar, 2013).

Una de las principales ventajas del modelado numérico en el caso de excavaciones profundas y particularmente de túneles, es que permite al ingeniero geotecnista conocer con detalle las causas que originan un cambio en el estado de filtraciones de agua dentro de la masa de suelo.

Varios programas para el análisis de flujo de agua consideran sistemas de clasificación de suelos diferentes al SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), debido a que estos sistemas involucran parámetros que se utilizan en el estudio de los suelos parcialmente saturados, como:

- ✚ HYPRES= Database (Hydraulic Properties of European Soils)
- ✚ U.S.D.A= United States Department of Agriculture
- ✚ STARING= Dutch Winand Staring Soil Series

Los sistemas anteriores implican que no es recomendable utilizar solamente los parámetros hidráulicos que de forma automática incluyen los programas para determinados tipos de materiales (arenosos, arcillosos, limosos, etc.). Es preferible que se asignen los parámetros hidráulicos necesarios en función del tipo de análisis a efectuar, pero obtenidos de pruebas de laboratorio o de campo realizadas directamente en los materiales de la estructura térrea o suelo en estudio.

### 3.4.4 Algoritmo PLAXFLOW

#### 3.4.4.1. Introducción

PLAXFLOW (Delft University of Technology, 2007) es un módulo del programa PLAXIS que aplica la teoría del elemento finito para realizar análisis de flujo de agua en suelos, ya sea

para régimen establecido o transitorio, y en condiciones saturadas o parcialmente saturadas (Mendoza, 2015).

El algoritmo PLAXFLOW cuenta con diferentes características para representar una variedad de situaciones de problemas de ingeniería. Permite considerar múltiples condiciones geométricas y de frontera medios homogéneos y heterogéneos, propiedades anisótropas de los materiales, condiciones de flujo establecido o transitorio, modelar el estado saturado o parcialmente saturado del suelo, etc. (Mendoza, 2015).

Los análisis de flujo establecido y transitorio se efectúan con PLAXFLOW mediante la solución aproximada de la siguiente ecuación:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + c \frac{\partial h}{\partial t} = Q \quad (3.8)$$

Donde:

$h$  = carga hidráulica total

$k_x, k_y$  = permeabilidad en las direcciones  $x, y$ , respectivamente

$c$  = capacidad específica (depende de la porosidad y del grado de saturación)

$Q$  = fuente de recarga o extracción de agua

La forma generalizada de la expresión (3.8) se conoce como la *ecuación de Richards* (1931).

PLAXFLOW permite considerar el estado del suelo saturado y parcialmente saturado con los modelos de *Van Genuchten* y la *Aproximación de Van Genuchten*<sup>(\*)</sup> (López-Acosta, 2015).

Algunas características de este programa son (López-Acosta, 2015):

- Generación automática de la malla de elementos finitos
- Refinamiento automático de la malla en puntos de interés, como nodos, líneas, subregiones (clusters), global, etc.
- Asignación de propiedades de los materiales, tanto en estado saturado como parcialmente saturado
- Análisis de flujo 1D y 2D, y axisimétricos
- Consideración de condiciones climáticas (como lluvia)

---

(\*) El *modelo de Van Genuchten* representa el modelo original de este autor en el que se contemplan los tres parámetros de ajuste que controlan el valor de entrada de aire, la pendiente de desaturación y el contenido de agua residual de la función de almacenamiento (o curva característica). La *aproximación de Van Genuchten* se refiere a una modificación del modelo original en la que el comportamiento de desaturación del suelo se considera lineal.

- Interfaz amigable entre programa y usuario

### 3.4.4.2. Convención de signos

En los análisis de flujo de agua, lo usual es utilizar una convención de signos en la que las presiones que se generan debajo del nivel freático se consideran positivas, mientras que las presiones arriba de dicho nivel son negativas.

En el programa PLAXFLOW estas consideraciones se invierten, es decir, la presión de poro debajo del nivel freático se considera negativa, y la presión de poro por encima del nivel freático se asume positiva. Se debe considerar este aspecto para dar una interpretación adecuada a los resultados que proporciona el programa (Mendoza, 2015).

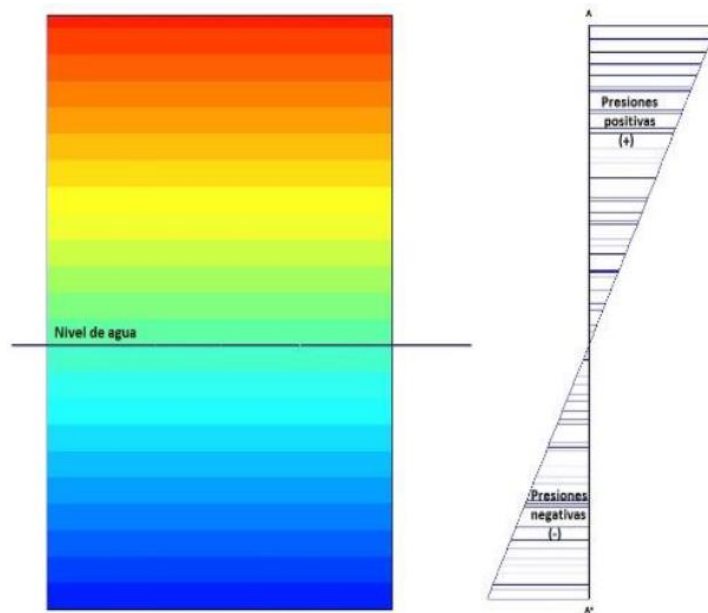


Fig 3.16 Consideración de signos para presiones en PLAXFLOW (Mendoza, 2015).

### 3.4.4.3. Generación de la geometría del modelo

En la realización de cualquier tipo de modelo numérico es necesario definir la geometría, misma que se estructura en su totalidad mediante *líneas* (Mendoza, 2015).

La creación de un modelo se basa en tres principales tipos geometrías:

- *Puntos*: Definen el inicio y final de una línea
- *Líneas*: Se emplean para definir condiciones de frontera y discontinuidades dentro del modelo geométrico, tales como pantallas, drenes, planos de estratificación, o fronteras en el modelado de una excavación por etapas.

- *Regiones (clusters)*: Permiten definir áreas que están confinadas por un conjunto de líneas. Las regiones son reconocidas auténticamente por el programa.

Adicionalmente, la ventana de modo geométrico de PLAXFLOW cuenta con otras características que facilitan el modelado de túneles con distintas características (Figura 3.17).

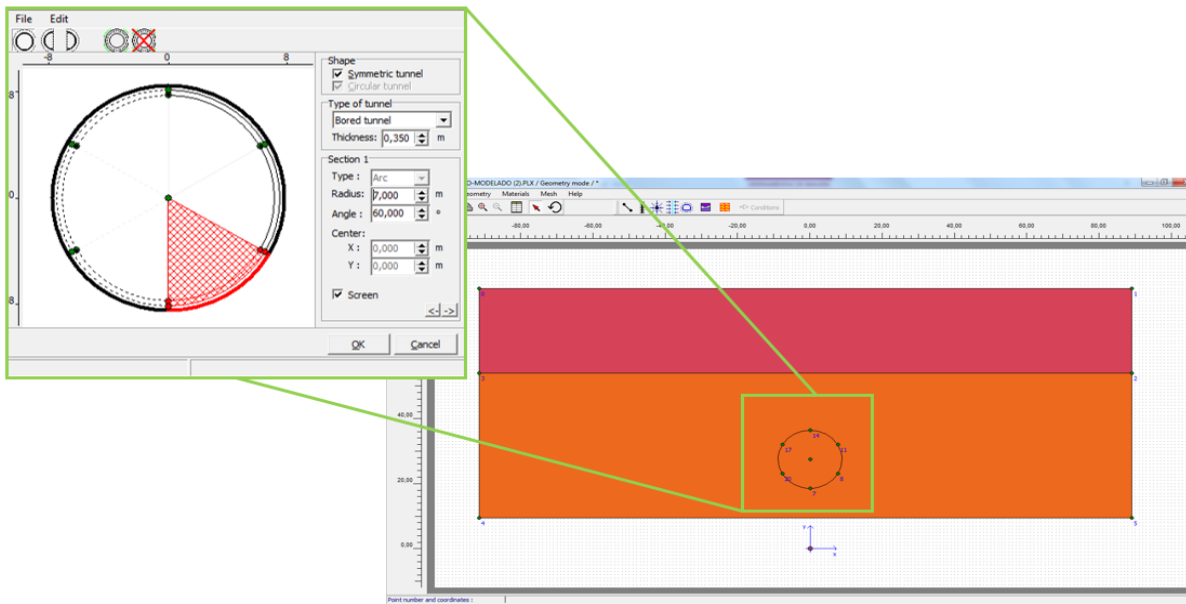


Fig 3.17 Diseño de la geometría para el modelado de un túnel en PLAXFLOW.

#### 3.4.4.4. Propiedades de los materiales

Para simular adecuadamente el comportamiento de un modelo, es necesario asignar los parámetros apropiados a los materiales del mismo. En los análisis de flujo de agua se requieren definir parámetros hidráulicos, como conductividad hidráulica, relación de vacíos o porosidad, curva característica o función de conductividad hidráulica, en su caso, etc.

El programa PLAXFLOW cuenta con una amplia base de datos de diferentes tipos de suelo.

Para hacer uso de la base de datos que incluye PLAXFLOW, se debe anticipar qué modelo se utilizará en los análisis. Los niveles que se tienen para el manejo de las propiedades del suelo se definen como *estándar*, *avanzados* y *expertos*; cada uno de éstos proporciona una variedad de opciones y datos predefinidos para representar las propiedades del suelo o estructura térrea en estudio (Mendoza, 2015).

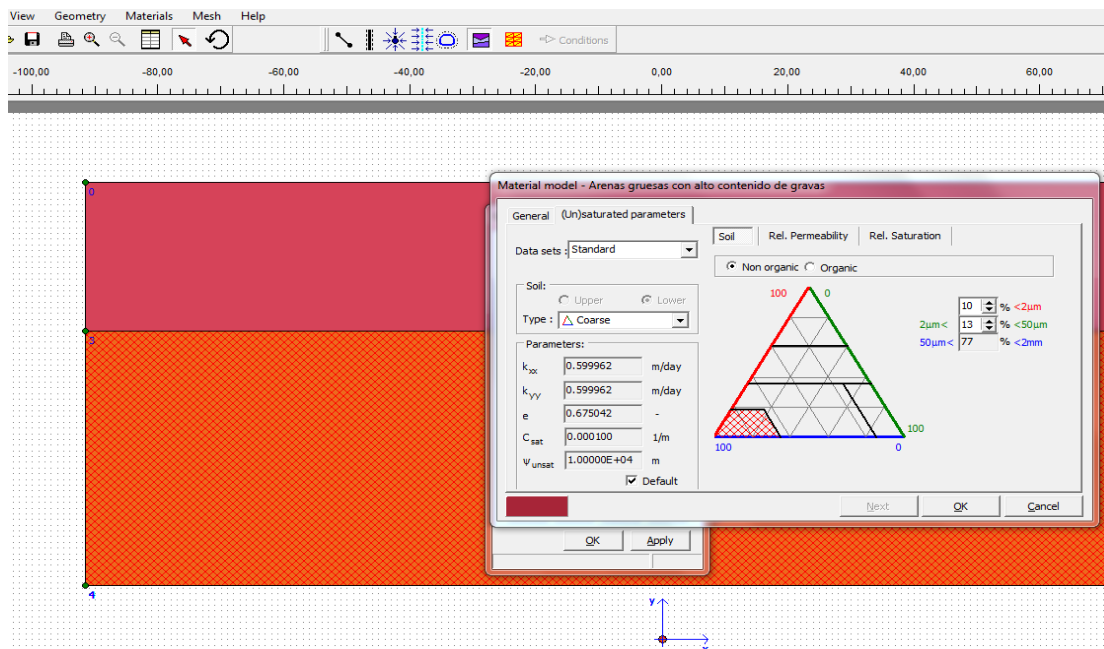


Fig 3.18 Asignación de propiedades de los materiales en el programa PLAXFLOW.

#### 3.4.4.5. Generación de la malla de elementos finitos

La malla generada por el programa PLAXFLOW es del tipo no estructurada con elementos triangulares. Este programa permite la generación automática de la malla, misma que es especificada por el usuario en función del número de nodos de los elementos, pudiendo ser 3, 6 ó 15 nodos. El programa siempre realiza los cálculos con elementos de 3 nodos; las opciones con 6 ó 15 nodos solamente se utilizan para la compatibilidad con el programa PLAXIS cuando se realizan análisis acoplados.

PLAXFLOW también cuenta con la opción de refinamiento de malla, de acuerdo con las necesidades del análisis numérico a realizar, teniendo la posibilidad de refinar, ya sea regiones (clusters), líneas o puntos. La finalidad es realizar cálculos con mayor precisión en líneas, puntos o regiones refinadas, además de obtener un mejor detalle del comportamiento del flujo que se desarrolla en la geometría del modelo en estudio (Mendoza, 2015).



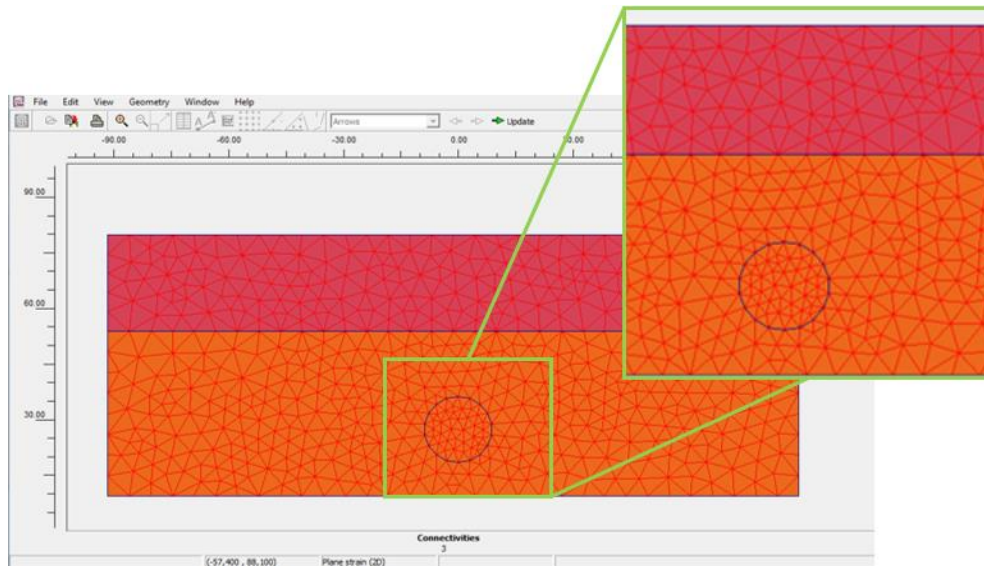


Fig 3.19 Generación de la malla de elementos finitos para un túnel.

#### 3.4.4.6. Definición de condiciones de frontera

Con el objetivo de definir las fronteras del modelo numérico, una vez que el modelo geométrico y la malla de elementos finitos han sido generados, se deben especificar las condiciones de frontera para los niveles de agua y la geometría del problema. Un ejemplo de las condiciones de frontera que incluye el programa PLAXFLOW se muestra en la Figura 3.20.

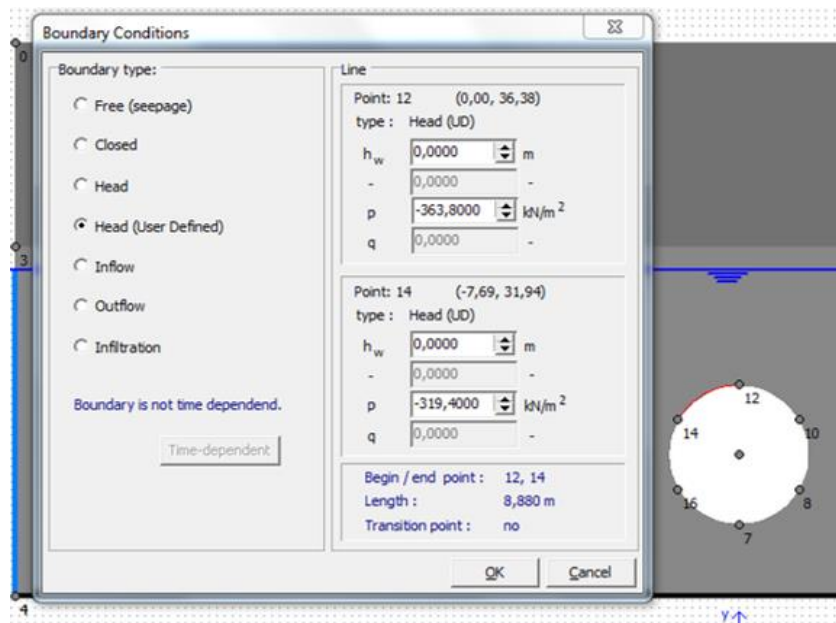


Fig 3.20 Definición de condiciones de frontera para un túnel.



## CAPÍTULO 4 CONTRIBUCIÓN A LOS ANÁLISIS DE FILTRACIONES DE AGUA EN TÚNELES

En la actualidad existen distintos métodos analíticos y numéricos para estimar las infiltraciones hacia un túnel, por ejemplo, las ecuaciones de Polubarinova-Kochina (1962), de Goodman *et al.* (1965), Alberro y Hernández (1989), entre otros. En este capítulo se muestra cómo aplicar algunos de estos modelos analíticos, y también cómo llevar a cabo análisis numéricos fundamentados en el método de elementos finitos (MEF).

### 4.1 Aplicación de métodos analíticos en la evaluación del flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo

En esta sección se exponen diferentes criterios analíticos para estimar el gasto de infiltración hacia un túnel. Los cálculos se efectúan en la estratigrafía típica simplificada representativa de la Zona Lacustre de la Ciudad de México que se muestra en la Fig. 4.1.

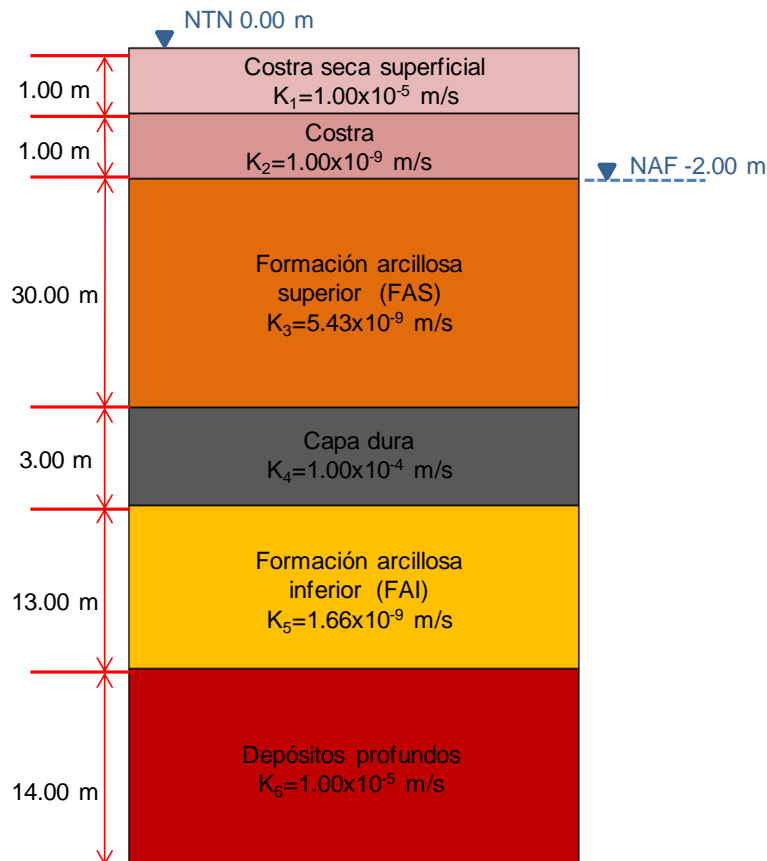


Fig. 4.1 Estratigrafía típica simplificada de la Zona Lacustre de la Ciudad de México asumida en los cálculos.

No obstante, y dado que en primer lugar se analizaron las infiltraciones para un medio homogéneo e isótropo, se determinó una conductividad hidráulica equivalente (ecuaciones 4.1 y 4.2) representativa de los seis estratos (Fig 4.1), cuyo valor resultó  $k_{eq}=1.77 \times 10^{-7}$  m/s. Las ecuaciones de (4.1) permiten convertir un medio estratificado en un medio anisótropo con  $k_{m\acute{a}x}$  en el sentido de la estratificación y  $k_{m\acute{i}n}$  en el sentido perpendicular a ella; y la expresión (4.2) permite convertir un medio anisótropo en uno isótropo con una permeabilidad  $k_{eq}$ .

$$k_{m\acute{a}x} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i d_j}{\sum_{i=1}^n d_j} \quad ; \quad k_{m\acute{i}n} = \frac{\sum_{i=1}^n d_j}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{d_j}{k_i} \right)} \quad (4.1)$$

$$k_{eq} = \sqrt{k_{m\acute{a}x} \cdot k_{m\acute{i}n}} \quad (4.2)$$

La geometría del túnel analizado consistió en una sección circular de 8 m de diámetro sin revestimiento. La localización del túnel en el medio de interés se ubicó a diferentes profundidades, de tal forma que éstas variaron desde 7 hasta 29 m como se indica en la Fig 4.2. Es importante destacar que en esta primera parte de los cálculos únicamente se localizó el túnel en las profundidades correspondientes a la formación arcillosa superior.

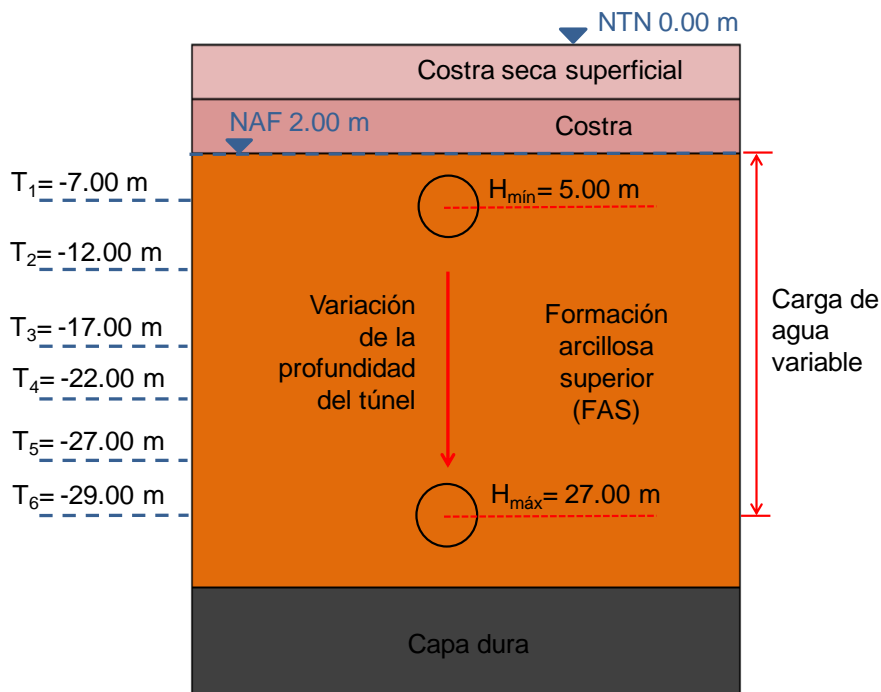


Fig 4.2 Representación esquemática de los análisis considerando el túnel ubicado a diferentes profundidades dentro de la formación arcillosa superior (FAS).

#### 4.1.1 Modelo analítico de Polubarinova-Kochina (1962)

Para la evaluación de los gastos de infiltración con el modelo Polubarinova-Kochina (1962), descrito con detalle en el Inciso 3.3.1.1.1 de esta tesis, se consideraron los siguientes parámetros:

- Conductividad hidráulica o permeabilidad equivalente  $k_{eq}= 1.77 \times 10^{-7}$  m/s
- Profundidad del agua por encima del terreno natural  $d= 0$  (cero metros)
- Carga de agua al perímetro del túnel  $\Phi_0=$  variable
- Distancia del centro del túnel a la superficie del terreno natural  $D=$  variable
- Radio del túnel  $R= 4$  m

En la Tabla 4.1 se proporcionan los gastos de infiltración  $Q_0$  hacia el interior del túnel obtenidos considerando las variaciones de la carga de agua  $\Phi_0$  con respecto a su centro.

Tabla 4.1 Gastos de infiltración obtenidos con la ecuación de Polubarinova-Kochina (1962).

$\Phi_0$ (m)	$Q_0$ (m <sup>3</sup> /s)
5.0	$2.1373 \times 10^{-6}$
10.0	$4.2747 \times 10^{-6}$
15.0	$6.4121 \times 10^{-6}$
20.0	$8.5495 \times 10^{-6}$
25.0	$1.0686 \times 10^{-5}$
27.0	$1.1542 \times 10^{-5}$

#### 4.1.2 Modelo analítico de Goodman *et al.* (1965)

Para la evaluación de los gastos de infiltración con el modelo de Goodman *et al.* (1965), descrito con detalle en el Inciso 3.3.1.1.2 de esta tesis, se asumieron los parámetros siguientes:

- Conductividad hidráulica o permeabilidad equivalente  $k_{eq}= 1.77 \times 10^{-7}$  m/s
- Carga de agua arriba del túnel  $H_0=$  variable
- Radio del túnel  $R= 4$  m

En la Tabla 4.2 se resumen los gastos de infiltración  $Q$  hacia el interior del túnel calculados considerando las variaciones de la carga de agua  $H_0$  con respecto a su centro.

Tabla 4.2 Gastos de infiltración obtenidos con la ecuación de Goodman *et al.* (1965).

$H_0$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
5.0	$6.0779 \times 10^{-6}$
10.0	$6.2906 \times 10^{-6}$
15.0	$8.2919 \times 10^{-6}$
20.0	$9.6746 \times 10^{-6}$
25.0	$1.1024 \times 10^{-5}$
27.0	$1.1554 \times 10^{-5}$

#### 4.1.3 Modelo analítico de Alberro y Hernández (1989)

Para el cálculo de los gastos de infiltración con el modelo de Alberro y Hernández (1989), expuesto con detalle en el Inciso 3.3.1.1.3 de esta tesis, se consideraron los siguientes parámetros:

- Presión del aire dentro del túnel  $P_{aire} = 0$  (cero: equivalente a la presión atmosférica en el interior del túnel)
- Peso específico del agua =  $1000 \text{ kg/cm}^3$
- Distancia vertical entre el nivel freático y el eje del túnel (carga de agua sobre el túnel)  $h = \text{variable}$
- Radio del túnel  $a = 4 \text{ m}$

En la Tabla 4.3 se presentan los gastos de infiltración  $Q$  hacia el interior del túnel obtenidos considerando las variaciones de la carga de agua sobre el túnel con respecto a su centro  $h$ .

Tabla 4.3 Gastos de infiltración obtenidos con la ecuación de Alberro y Hernández (1989).

$h$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
5.0	$5.6162 \times 10^{-6}$
10.0	$6.8296 \times 10^{-6}$
15.0	$8.2466 \times 10^{-6}$
20.0	$9.6429 \times 10^{-6}$
25.0	$1.0998 \times 10^{-5}$
27.0	$1.1529 \times 10^{-5}$

#### 4.1.4 Comparación de resultados

Los resultados anteriores se representan gráficamente en la Fig 4.3. En la misma, se pueden observar las variaciones entre los distintos métodos analíticos aplicados. Se

destaca que los resultados obtenidos con los métodos de Goodman *et al.* (1965) y Alberro y Hernández (1989) son muy similares. Sin embargo, en la Fig 4.3 se distingue una mayor diferencia entre los modelos anteriores y el modelo de Polubarinova-Kochina (1962). En este último caso, las diferencias más significativas ocurren cuando la carga de agua y la profundidad del túnel son muy superficiales, no obstante, conforme la profundidad del túnel se incrementa, los resultados obtenidos parecen ajustarse en gran medida a los gastos calculados con Goodman *et al.* (1965) y Alberro y Hernández (1989).

Se destaca que en todos los cálculos anteriores, el túnel en estudio se considera sin revestimiento. Por otra parte, es importante mencionar que los métodos analíticos asumen distintas hipótesis simplificadoras para su aplicación, una de las más trascendentales es que el medio donde se ubica el túnel es homogéneo e isótropo, lo que difícilmente refleja la realidad ya que el suelo es en general heterogéneo y anisótropo.

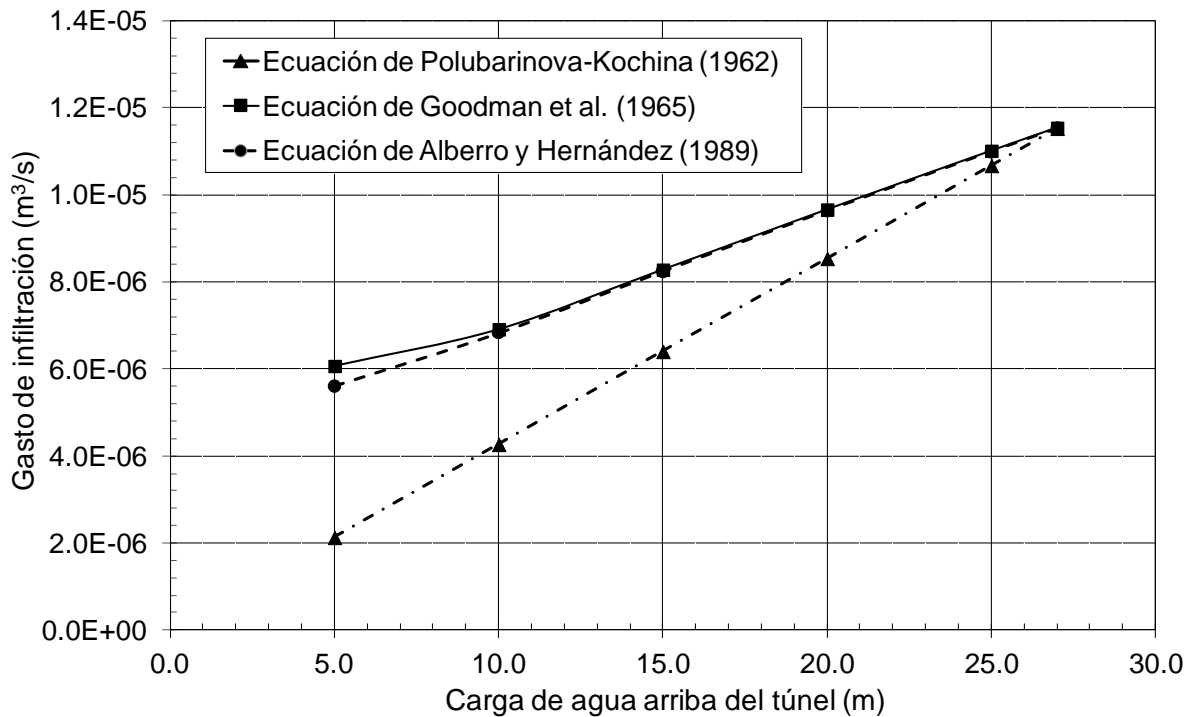


Fig 4.3 Comparación de los gastos de infiltración hacia el túnel obtenidos con diferentes modelos analíticos.

## 4.2 Aplicación de modelos numéricos en la evaluación del flujo establecido

Se presenta a continuación la solución numérica del problema planteado en la Sección 4.1 anterior, considerando el medio inicialmente como homogéneo, y posteriormente como heterogéneo. La modelación numérica se lleva a cabo mediante el método de elementos finitos con ayuda del programa PLAXFLOW, descrito con detalle en el Inciso 3.4.4.

## 4.2.1 Medio homogéneo e isótropo

### 4.2.1.1. Geometría del modelo

La geometría del modelo numérico se definió en función de la región de flujo y la localización del túnel a diferentes profundidades dentro de la formación arcillosa superior (FAS). Se propuso una región lo suficientemente extensa para que la línea de abatimiento se definiera adecuadamente debido a la influencia del túnel. En este caso, la altura del modelo no representa mayor relevancia ya que esta dimensión no influye en gran medida en los resultados, sin embargo se consideró una altura de 62 metros correspondiente con la estratigrafía de la Fig 4.1. Así, la geometría del modelo considerado en los cálculos es la que se indica en la Fig 4.4.

De igual forma, se consideró la permeabilidad equivalente definida en la Sección 4.1 que se obtuvo con las ecuaciones (4.1) y (4.2), esto es  $k_{eq}=1.77 \times 10^{-7}$  m/s.

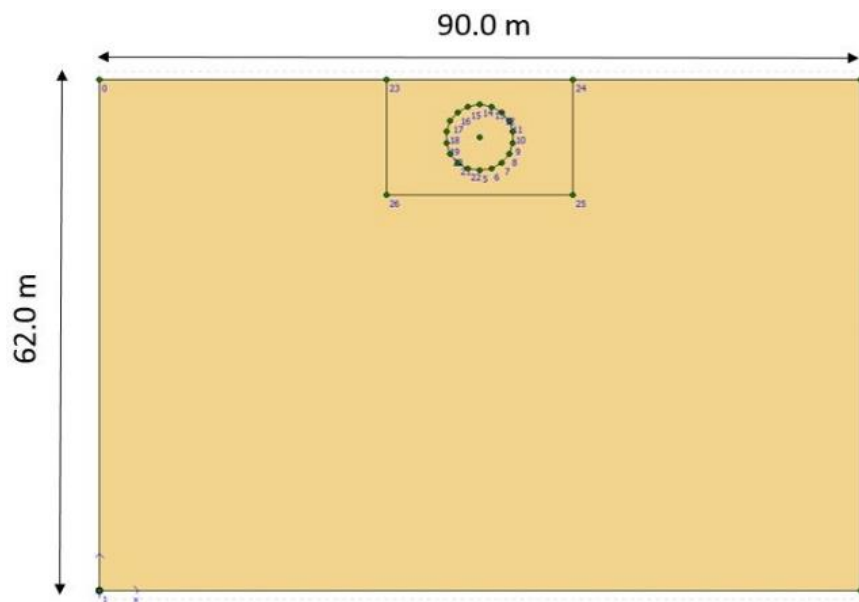


Fig 4.4 Geometría del modelo (análisis para condición de flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo).

### 4.2.1.2. Malla de elementos finitos

La discretización de la región de flujo se llevó a cabo con una malla de elementos finitos de tipo triangular (Fig 4.5a). En este caso y dado que se analizaron distintas condiciones de carga de agua arriba del túnel y profundidades del túnel, se generaron discretizaciones diferentes de acuerdo con cada modelo analizado. Asimismo para un mejor detalle de los resultados, en la periferia se creó una subregión adicional (*cluster*) que permitió el refinamiento de las áreas cercanas al túnel (Fig 4.5b).



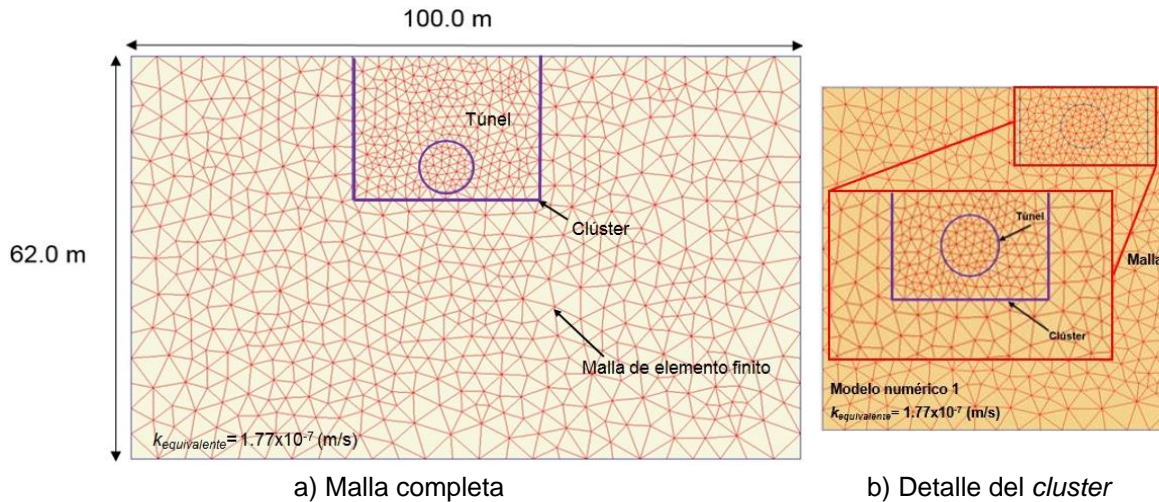


Fig 4.5 Discretización de la región de flujo (análisis para condición de flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo).

En la Tabla 4.4 se señalan las distintas mallas de elementos finitos que se consideraron en cada análisis (seis modelos distintos en total, cuyas profundidades del túnel se muestran en la Fig 4.2).

Tabla 4.4 Variación de la malla de elementos finitos para las diferentes condiciones de análisis.

	Modelo 1 Prof.=5 m	Modelo 2 Prof.=10 m	Modelo 3 Prof.=15 m	Modelo 4 Prof.=20 m	Modelo 5 Prof.=25 m	Modelo 6 Prof.=27 m
Número de elementos	1500	1586	1665	1644	1757	1884
Número de Nodos	799	841	882	871	927	991

#### 4.2.1.3. Condiciones de frontera

Debido a que el modelo numérico analizado se realizó en condiciones de flujo establecido, es decir, que no varían en el tiempo, se definieron las siguientes condiciones de frontera (Fig 4.6).

- El nivel freático (NAF) se posicionó a dos metros de profundidad con respecto al nivel del terreno natural.
- En las fronteras laterales de cada modelo se asignó una carga hidráulica constante correspondiente a la elevación del nivel de agua freática (considerando que el nivel

de referencia se ubica en la línea horizontal inferior de la región de flujo), representando las *fronteras de flujo libre* que se señalan en la Fig 4.6.

- c) La línea horizontal inferior de la región de flujo se asumió como una *frontera impermeable* (sin flujo de agua en la dirección transversal a ella).
- d) En el perímetro del túnel se asignó una condición de frontera de presión constante, que se consideró igual a cero. El criterio seleccionado para definir esta presión se basa en la hipótesis de que la presión dentro del túnel es la atmosférica, con lo que se desprecia la presión de aire a la profundidad del mismo.

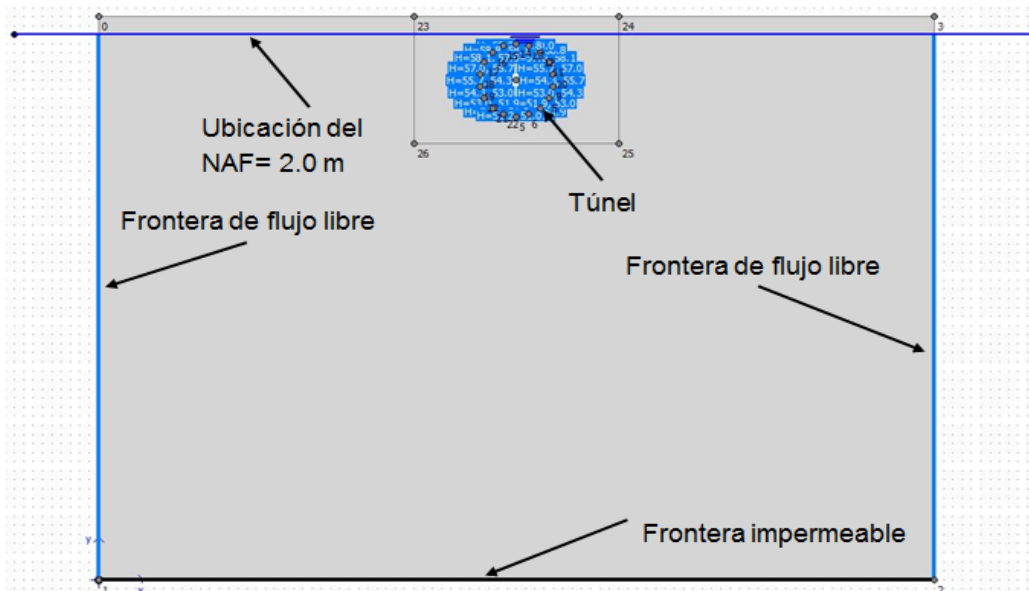


Fig 4.6 Condiciones de frontera asumidas en el modelo numérico (análisis para condición de flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo).

#### 4.2.1.4. Resultados

Los resultados del análisis de flujo establecido en los que se puso especial énfasis fueron la distribución de la carga hidráulica y la distribución de las fuerzas de filtración hacia el interior del túnel.

En la Fig 4.7 se proporciona la distribución obtenida de las cargas hidráulicas. Asimismo se indica el abatimiento del nivel freático por la influencia del túnel a las distintas profundidades analizadas dentro de la formación arcillosa superior (FAS).

En la Fig 4.8 se indican las distribuciones de las velocidades de flujo alrededor del túnel. Asimismo se señala el abatimiento del nivel freático debido a la influencia del túnel a las distintas profundidades analizadas dentro de la FAS. En este caso, se observa que las mayores velocidades de flujo se presentan en la parte inferior del perímetro del túnel.

Cabe destacar que el análisis se realizó en condiciones de flujo establecido, y debido a que el túnel se encuentra sin revestimiento, el nivel freático se ve afectado hasta la profundidad del túnel, no obstante, esta situación pocas veces es representativa de la realidad, ya que en la práctica el túnel generalmente se encuentra sin revestimiento por un periodo de tiempo corto.

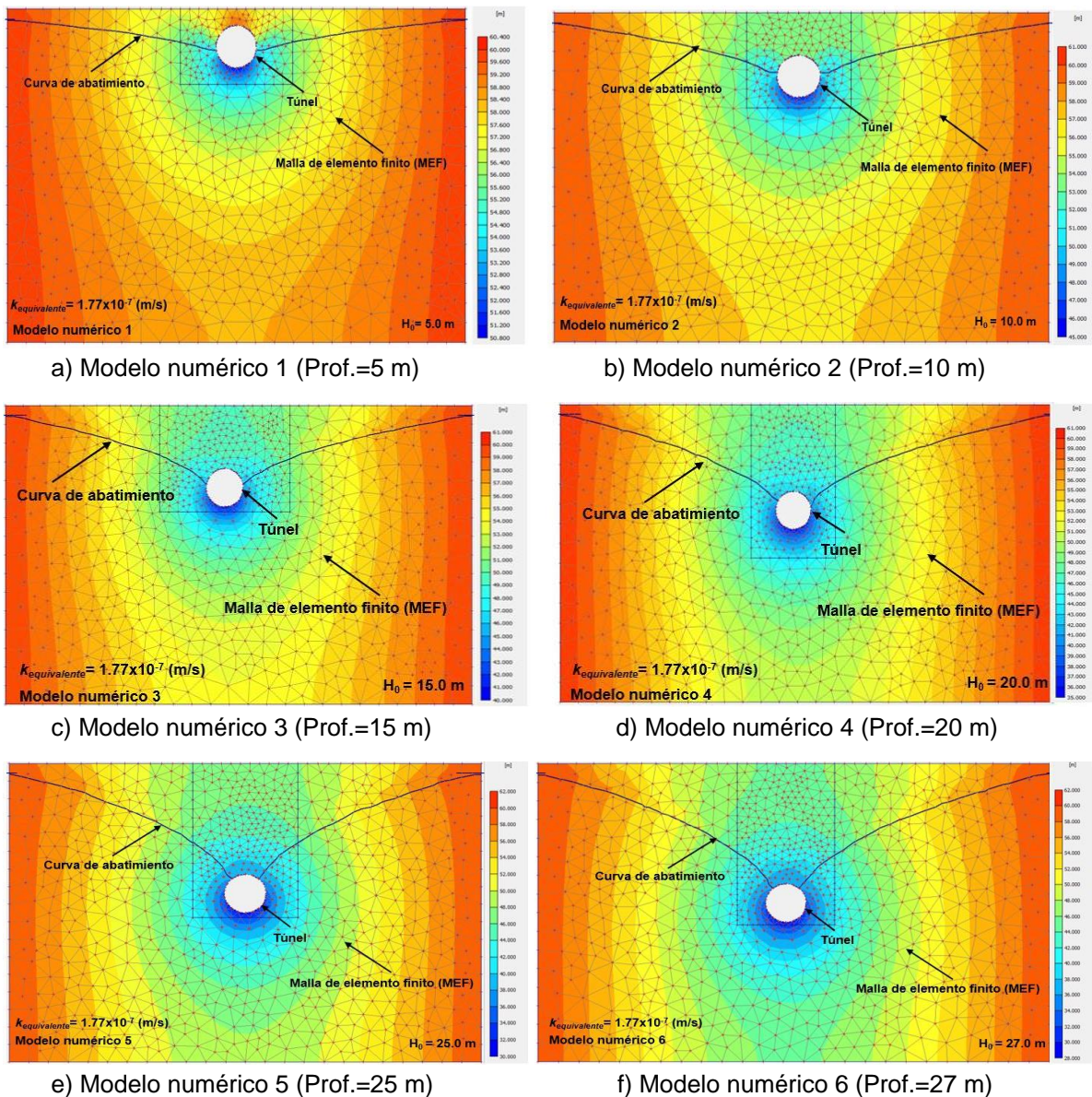
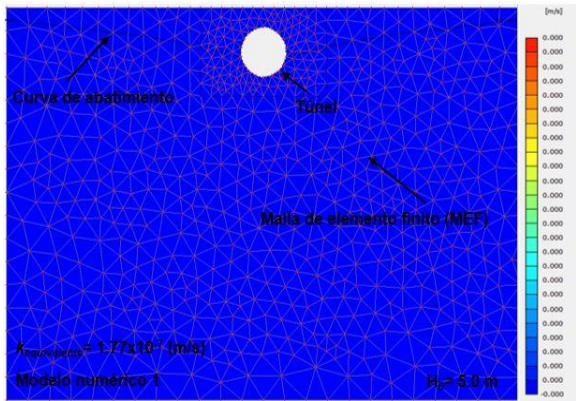
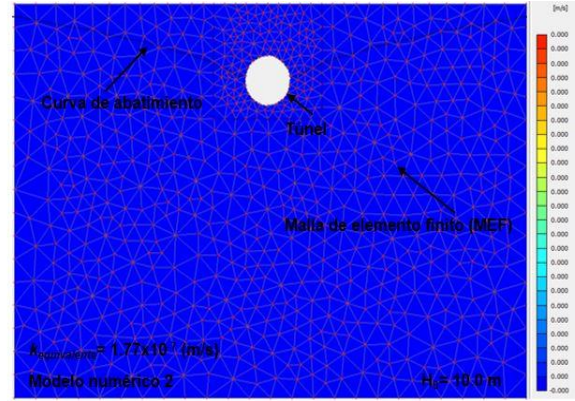


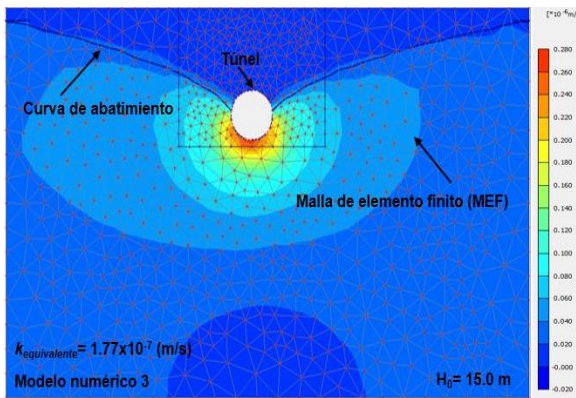
Fig 4.7 Distribución de cargas hidráulicas (análisis para condición de flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo).



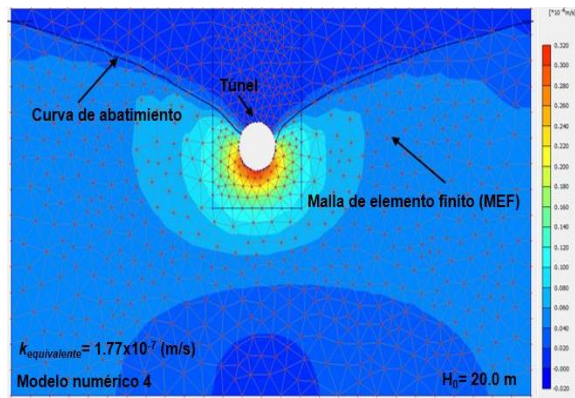
a) Modelo numérico 1 (Prof.=5 m)



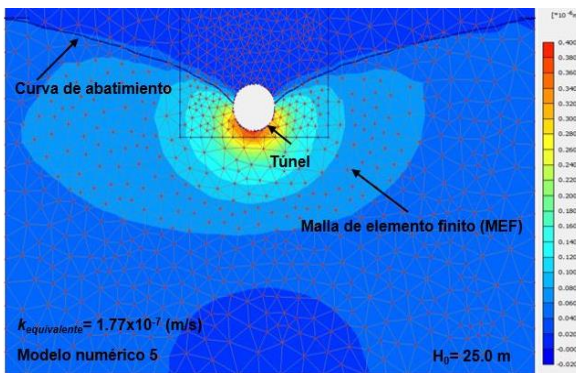
b) Modelo numérico 2 (Prof.=10 m)



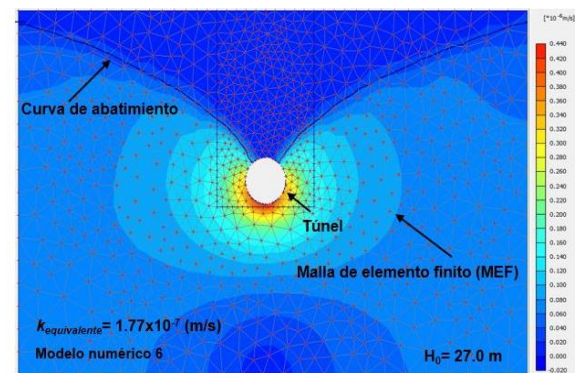
c) Modelo numérico 3 (Prof.=15 m)



d) Modelo numérico 4 (Prof.=20 m)



e) Modelo numérico 5 (Prof.=25 m)



f) Modelo numérico 6 (Prof.=27 m)

Fig 4.8 Distribución de las velocidades de flujo (análisis para condición de flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo).

En la Fig 4.9 se comparan los resultados obtenidos con los modelos analíticos del Inciso 4.1 y el modelado numérico descrito en este Inciso 4.2. Se observan diferencias importantes. Algunas precisiones al respecto son:

- Los modelos analíticos consideran el suelo en condiciones saturadas, basándose en la hipótesis de que el nivel freático se mantiene constante.
- El modelo numérico permite determinar el abatimiento del nivel freático a las distintas profundidades del túnel consideradas en los cálculos, debajo del cual el suelo se encuentra saturado y arriba de dicho nivel el medio no está saturado.

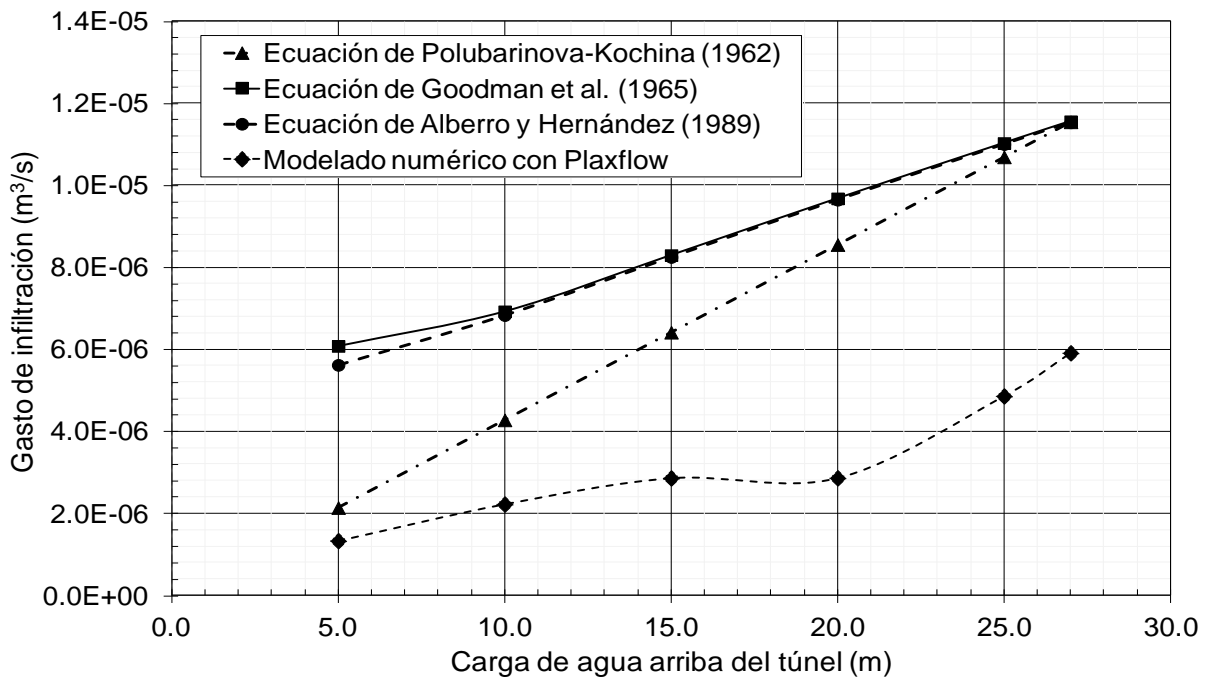


Fig 4.9 Comparación de los gastos de infiltración obtenidos con las ecuaciones analíticas y el modelado numérico.

## 4.2.2 Medio heterogéneo e isótropo

### 4.2.2.1. Geometría del modelo

En esta aplicación, donde el medio se considera heterogéneo, se asume la estratigrafía típica simplificada representativa de la Zona Lacustre de la Ciudad de México que se señaló en la Fig 4.1 (aquí no se determina una conductividad hidráulica o permeabilidad equivalente). Se considera la misma geometría del túnel de los análisis anteriores (diámetro

de 8 m), pero en este caso, el túnel está ubicado en la formación arcillosa inferior (FAI), como se ilustra en la Fig 4.10.

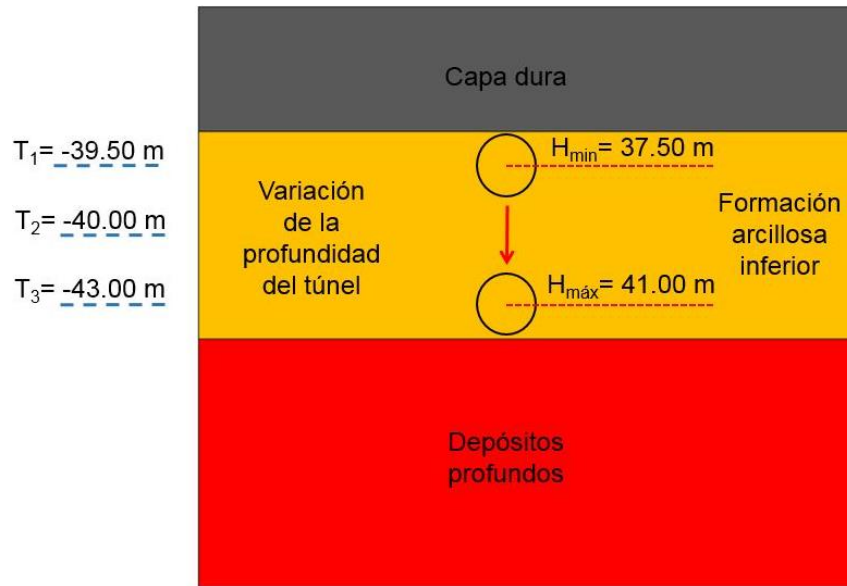


Fig 4.10 Representación esquemática de los análisis considerando el túnel ubicado a diferentes profundidades dentro de la formación arcillosa inferior (FAI).

Para definir la geometría del modelo se consideraron los espesores de los estratos que se indicaron en la Fig 4.1. De esta manera, la longitud asumida del modelo fue 110 m y una altura de 62 m, como se indica en la Fig 4.11.

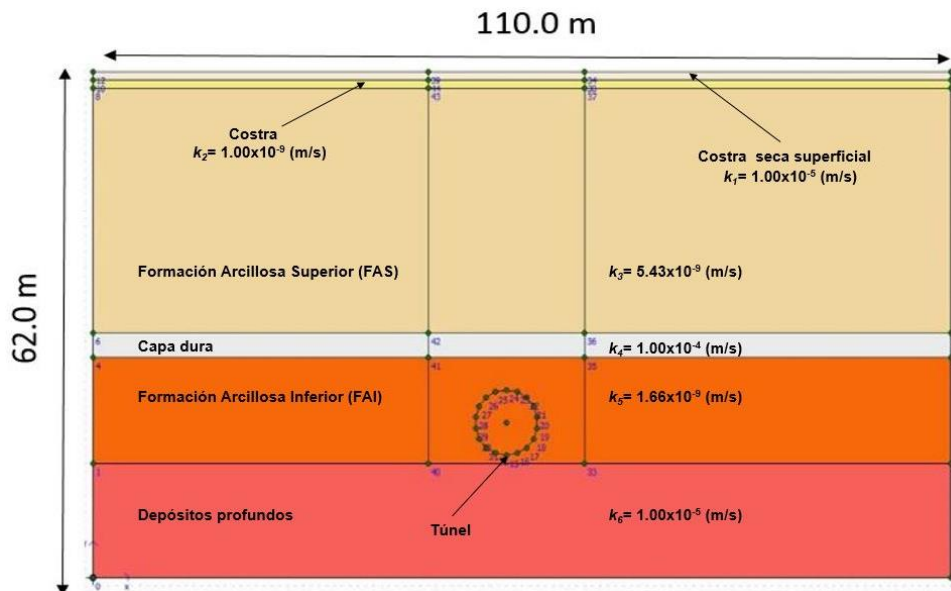


Fig 4.11 Geometría del modelo (análisis para condición de flujo establecido en un medio heterogéneo e isótropo).

#### 4.2.2.2. Malla de elementos finitos

La discretización de la región de flujo consistió en una malla de elementos finitos de tipo triangular. Se generaron discretizaciones del medio de acuerdo con cada modelo analizado. Asimismo para un mejor detalle de los resultados en la periferia del túnel, se creó una subregión adicional (*cluster*) que permitió el refinamiento de las áreas cercanas al túnel.

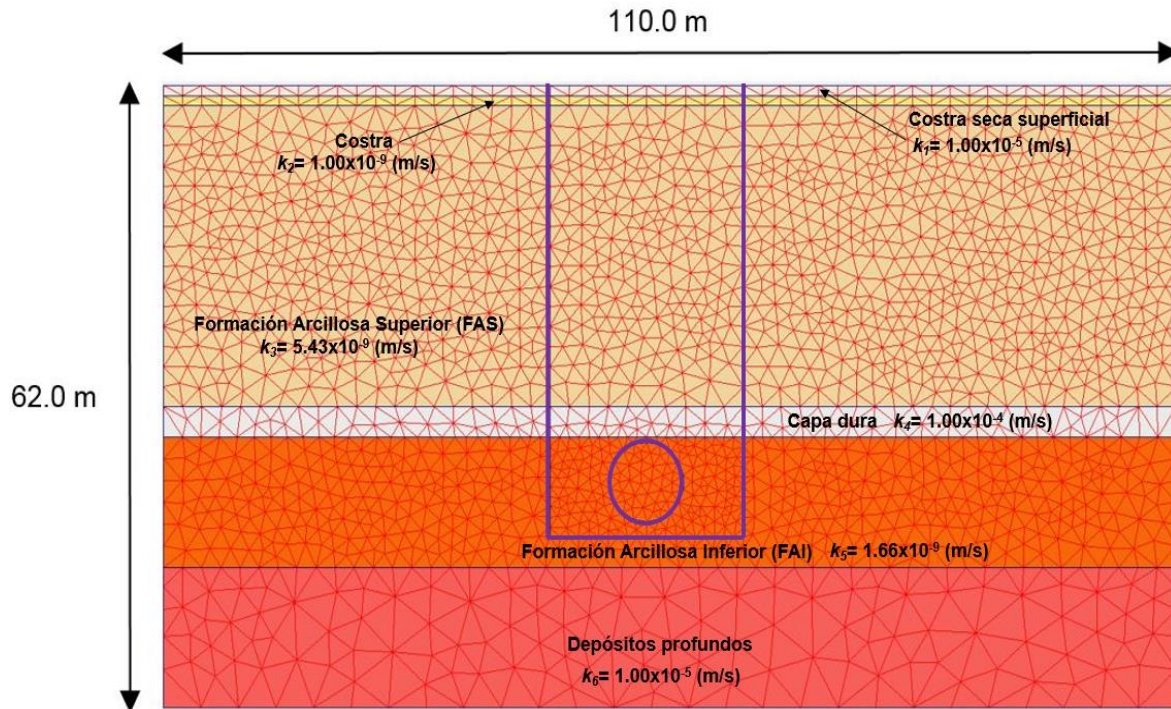


Fig 4.12 Discretización de la región de flujo (análisis para condición de flujo establecido en un medio heterogéneo e isótropo).

En la Tabla 4.5 se señalan las distintas mallas de elementos finitos que se consideraron en cada análisis (tres modelos distintos en total, cuyas profundidades del túnel dentro de la FAI se muestran en la Fig 4.10).

Tabla 4.5 Variación de la malla de elementos finitos para las diferentes condiciones de análisis.

	Modelo 1 Prof.=37.5 m	Modelo 2 Prof.=38.0 m	Modelo 3 Prof.=41.0 m
Número de elementos	1757	1763	1851
Número de Nodos	929	932	976

### 4.2.2.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera asignadas al modelo numérico analizado se definieron de la siguiente manera (Fig 4.13):

- El nivel freático (NAF) se posicionó a dos metros de profundidad con respecto al nivel del terreno natural.
- En las fronteras laterales de cada modelo se asignó una carga hidráulica constante correspondiente a la elevación del nivel de agua freática (considerando que el nivel de referencia se ubica en la línea horizontal inferior de la región de flujo), representando las *fronteras de flujo libre* que se señalan en la Fig 4.13.
- La línea horizontal inferior de la región de flujo se asumió como una *frontera impermeable* (sin flujo de agua en la dirección transversal a ella).
- En el perímetro del túnel se asignó una condición de frontera de presión constante, que se consideró igual a cero (representativa de la presión atmosférica en el interior del túnel).

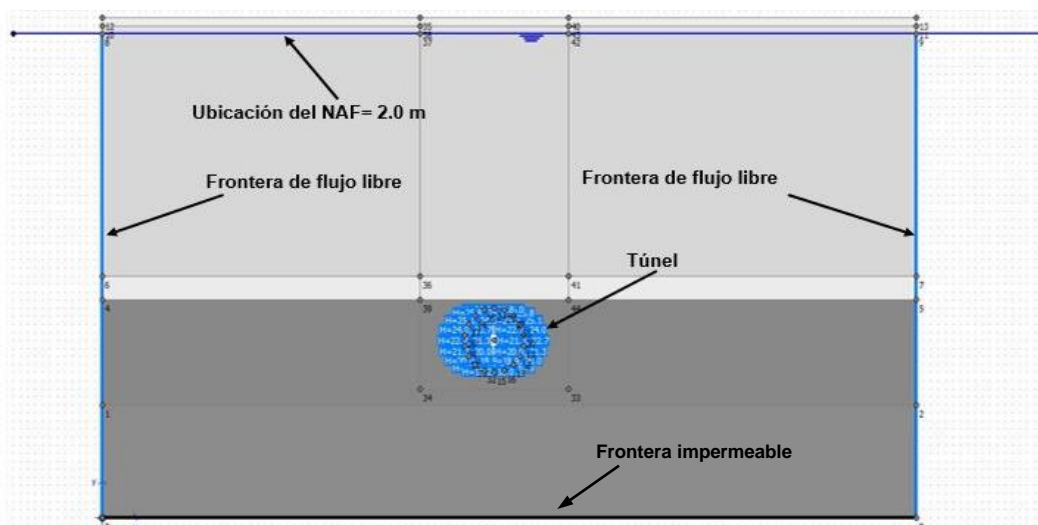


Fig 4.13 Condiciones de frontera consideradas en el modelo numérico (análisis para condición de flujo establecido en un medio heterogéneo e isótropo).

### 4.2.2.4. Resultados

En la Fig 4.14 se presenta la distribución obtenida de las cargas hidráulicas. Se observa que en este caso donde el medio es estratificado, los resultados señalan unas líneas equipotenciales con una tendencia más concéntrica respecto al túnel (especie de elipses



alrededor del túnel) en comparación con las líneas equipotenciales que se obtuvieron cuando el medio se consideró homogéneo (Fig 4.7). Asimismo debido a que el análisis se realiza en condiciones establecidas no se aprecia un abatimiento del nivel freático (NAF). Resulta conveniente un análisis transitorio (variable en el tiempo) para distinguir en qué momento se comienza a hacer evidente el abatimiento del NAF (como se explicó en la Figura 3.13 del Inciso 3.3.2.1).

En la Fig 4.15 se muestra la distribución de los vectores de velocidad en el medio estratificado de estudio. Se observa que los vectores de velocidad tienen una magnitud considerablemente mayor en los estratos permeables (capa dura y depósitos profundos) que en la formación arcillosa inferior (FAI), confinada por dichos estratos. Asimismo como señala la teoría, en estos estratos permeables considerados como acuíferos se distingue un flujo predominantemente horizontal, y en los estratos arcillosos considerados como acuitardos el flujo es más bien vertical.

En cuanto al gasto de infiltración estimado hacia el interior del túnel cuando éste se ubica a distintas profundidades dentro de la FAI, en la Tabla 4.6 se aprecia que su magnitud es menor que cuando el túnel se ubica en la FAS (ver Fig 4.9).

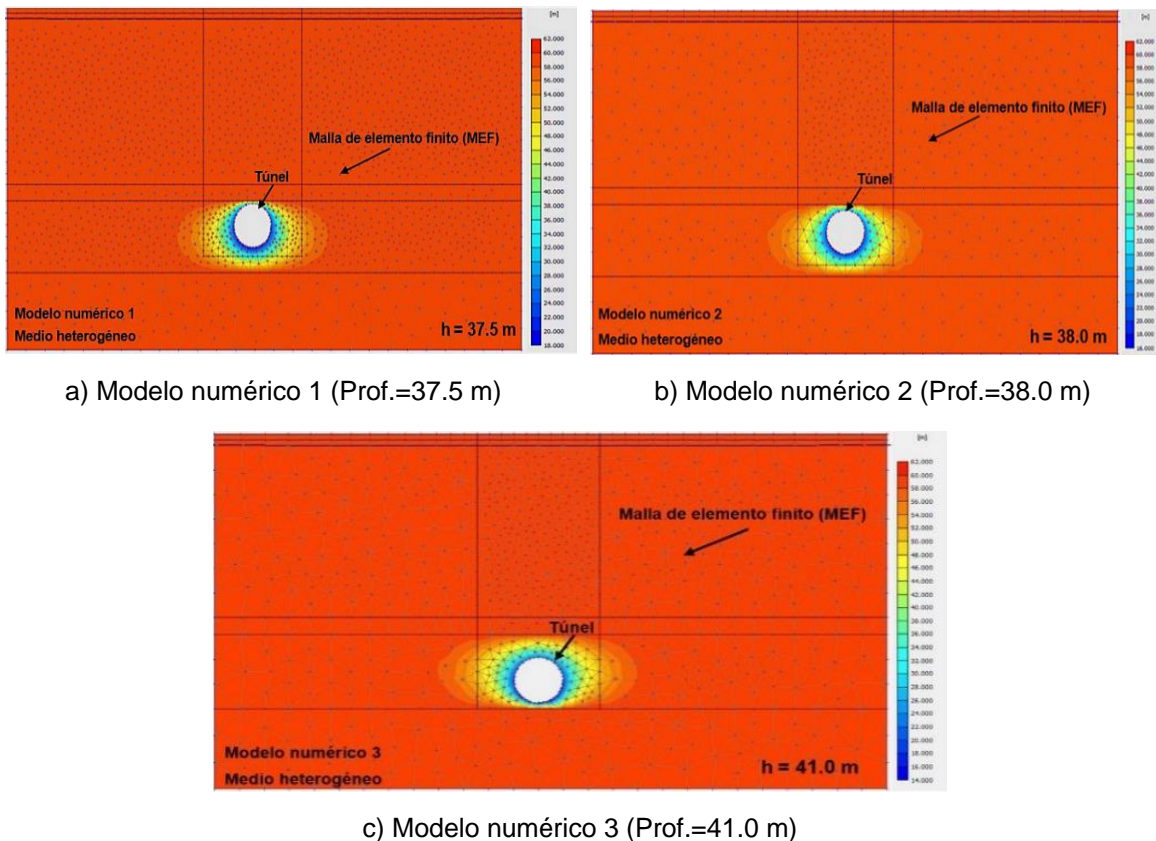
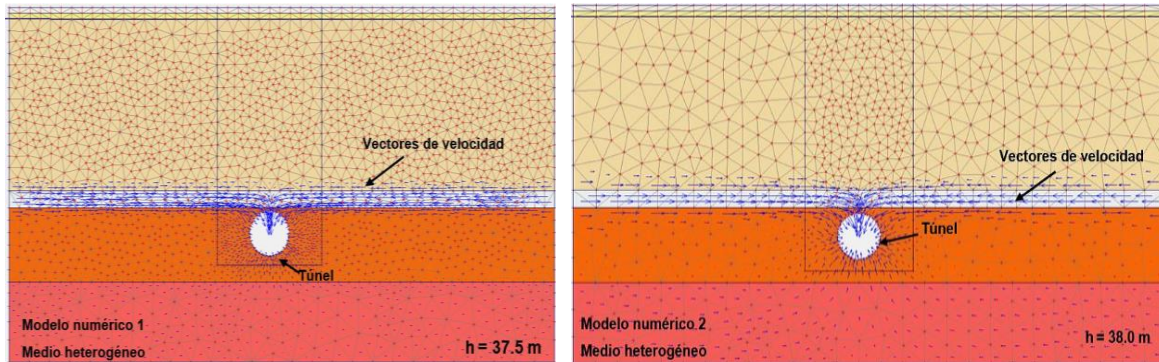
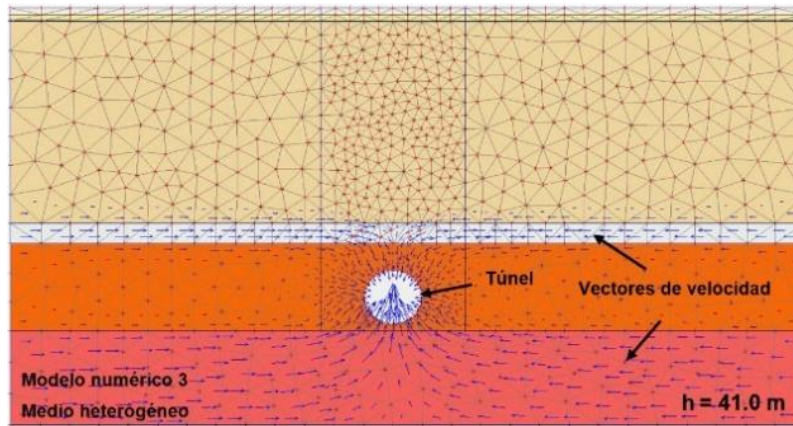


Fig 4.14 Distribución de cargas hidráulicas (análisis para condición de flujo establecido en un medio heterogéneo e isótropo).



a) Modelo numérico 1 (Prof.=37.5 m)

b) Modelo numérico 2 (Prof.=38.0 m)



c) Modelo numérico 3 (Prof.=41.0 m)

Fig 4.15 Vectores de velocidad (análisis para condición de flujo establecido en un medio heterogéneo e isótropo)

Tabla 4.6 Gastos de infiltración hacia el interior del túnel en el medio heterogéneo de estudio con la sección del túnel localizada en la formación arcillosa inferior (FAI).

Profundidad del túnel (m)	Gasto resultante ( $m^3/s$ ) del modelo numérico MEF (PLAXFLOW)
37.5	$6.46 \times 10^{-7}$
38.0	$3.77 \times 10^{-7}$
41.0	$4.01 \times 10^{-7}$



## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El propósito de esta tesis fue mostrar una metodología para evaluar la infiltración de agua en túneles en suelos homogéneos e isótropos, pero también en suelos heterogéneos, poniendo en evidencia las cualidades y limitaciones de las principales soluciones analíticas disponibles para estos fines y comparando los resultados obtenidos mediante modelación numérica a través del método de elementos finitos (MEF).

Entre los datos más importantes para evaluar la infiltración de agua en un túnel están los parámetros hidráulicos de los materiales, los cuales deben obtenerse de pruebas de campo o de laboratorio, mismas que en la práctica común no se realizan generalmente, ya sea por tiempo, por costo o porque algunos tipos de ensayos requieren personal y equipo más especializado. Aunado a lo anterior, dada la heterogeneidad de los materiales resulta difícil asignar valores representativos a la permeabilidad de un suelo, lo que deriva en imprecisiones y dificultades para realizar los cálculos.

La tesis se dividió en cinco partes. En la primera parte, se dio una breve introducción sobre la problemática de las filtraciones de agua en túneles excavados en el terreno. Se señaló el objetivo general de la investigación y se indicaron los alcances y la metodología seguida para el desarrollo del trabajo. En la segunda parte, se presentó una reseña histórica sobre el origen de los túneles y sus aplicaciones, estudios previos y su clasificación. Se explicaron problemáticas de excavaciones en túneles observadas en México y en otros países. En la tercera parte, se estudiaron los principales modelos analíticos y numéricos disponibles para la evaluación del flujo de agua en túneles construidos en suelos. Se expusieron las principales ecuaciones matemáticas para la evaluación de filtraciones en túneles bajo régimen establecido y transitorio en medios homogéneos y heterogéneos. En cuanto a la modelación numérica, el énfasis se centra en el método del elemento finito (MEF). Se establecieron las consideraciones generales para la aplicación del MEF, y se explicó con detalle el funcionamiento y manejo del programa de computadora PLAXFLOW. Se expuso la metodología sugerida para realizar cálculos numéricos mediante este programa especializado, el cual, aplica la teoría de los elementos finitos y permite efectuar análisis de flujo establecido y transitorio en condiciones saturadas y parcialmente saturadas.

En la parte principal de la tesis, se presentaron los análisis efectuados para determinar el gasto de infiltración en un túnel sin revestimiento que se encuentra ubicado en un suelo representativo de la Zona Lacustre de la Ciudad de México con base en métodos analíticos y numéricos. Los métodos analíticos expuestos correspondieron a las ecuaciones de Polubarinova-Kochina (1962), Goodman *et al.* (1965) y Alberro y Hernández (1989) aplicables a medios homogéneos e isótropos. Los modelos analíticos previos se compararon con la solución obtenida mediante modelación numérica fundamentada en el método elementos finitos (MEF), con ayuda del programa PLAXFLOW. Los análisis numéricos se realizaron considerando inicialmente el medio como homogéneo y

posteriormente como heterogéneo. Asimismo los cálculos se efectuaron en condiciones de flujo establecido. Los resultados se resumieron en gráficas comparativas para facilitar su interpretación.

De los análisis efectuados se derivan los siguientes comentarios:

a) Con respecto a los modelos analíticos empleados en esta tesis

- Los resultados obtenidos con los métodos de Goodman *et al.* (1965) y Alberro y Hernández (1989) son muy similares. Sin embargo, existen diferencias entre los modelos anteriores y el modelo de Polubarinova-Kochina (1962). En este último caso, las diferencias más significativas ocurren cuando la carga de agua y la profundidad del túnel son muy superficiales, no obstante, conforme la profundidad del túnel se incrementa, los resultados obtenidos parecen ajustarse en gran medida a los gastos calculados con Goodman *et al.* (1965) y Alberro y Hernández (1989).
- Se destaca que en todos los cálculos anteriores, el túnel en estudio se consideró sin revestimiento. También es importante mencionar que los métodos analíticos asumen distintas hipótesis simplificadoras para su aplicación, una de las más trascendentales es que el medio donde se ubica el túnel es homogéneo e isótropo, lo que difícilmente refleja la realidad ya que un suelo es en general heterogéneo y anisótropo.

b) Con respecto a la modelación numérica con elementos finitos

b.1) Medio asumido como homogéneo e isótropo

- Para el caso en el que se consideró el medio como homogéneo e isótropo, se puso especial énfasis en los resultados de la distribución de la carga hidráulica y la distribución de las fuerzas de filtración hacia el interior del túnel. Se mostraron las distintas posiciones obtenidas del abatimiento del nivel freático por la influencia del túnel a las diferentes profundidades analizadas dentro de la formación arcillosa superior (FAS). Asimismo se determinó que las mayores velocidades de flujo se presentan en la parte inferior del perímetro del túnel.
- Los análisis se realizaron en condiciones de flujo establecido, y debido a que el túnel se encuentra sin revestimiento, el nivel freático se ve afectado hasta la profundidad del túnel, no obstante, esta situación pocas veces es representativa de la realidad, ya que en la práctica el túnel generalmente se encuentra sin revestimiento por un periodo de tiempo corto.
- De la comparación de los resultados obtenidos entre los métodos analíticos y el modelado numérico se observaron diferencias importantes. Algunas precisiones al

respecto son: 1) Los modelos analíticos consideran el suelo en condiciones saturadas, basándose en la hipótesis de que el nivel freático se mantiene constante, 2) El modelo numérico permite determinar el abatimiento del nivel freático a las distintas profundidades del túnel consideradas en los cálculos, debajo del cual el suelo se encuentra saturado y arriba de dicho nivel el medio no está saturado.

#### b.2) Medio asumido como heterogéneo

- En la distribución obtenida de las cargas hidráulicas, donde el medio es estratificado, los resultados señalan unas líneas equipotenciales con una tendencia más concéntrica respecto al túnel (especie de elipses alrededor del túnel) en comparación con las líneas equipotenciales que se obtuvieron cuando el medio se consideró homogéneo.
- Debido a que el análisis se realizó en condiciones establecidas no se aprecia un abatimiento del nivel freático (NAF). Resulta conveniente un análisis transitorio (variable en el tiempo) para distinguir en qué momento se comienza a hacer evidente el abatimiento del NAF.
- Los vectores de velocidad obtenidos en este caso indicaron una magnitud considerablemente mayor en los estratos permeables (capa dura y depósitos profundos) que en la formación arcillosa inferior (FAI), confinada por dichos estratos. Asimismo como señala la teoría, en estos estratos permeables considerados como *acuíferos* se distingue un flujo predominantemente horizontal, y en los estratos arcillosos considerados como *aquitardos* el flujo es más bien vertical.
- En cuanto al gasto de infiltración estimado hacia el interior del túnel cuando éste se ubicó a distintas profundidades dentro de la FAI, la magnitud calculada fue menor que cuando el túnel se ubicó en la FAS.

Algunos comentarios concluyentes y recomendaciones derivados de este trabajo son:

- ✓ Entre los dos tipos de metodologías comparadas en esta tesis (modelos analíticos y numéricos), existen diferencias importantes. Los métodos analíticos introducen distintos tipos de hipótesis simplificadoras para poder efectuar los cálculos, que ocasionan que el gasto de infiltración calculado en el interior de un túnel sea sobre-estimado o sub-estimado. Los métodos numéricos presentan la ventaja de permitir resolver problemas más complejos considerando la heterogeneidad y la anisotropía del subsuelo, y condiciones de frontera de complejidad variable, permitiendo una representación más real del problema a resolver.



- ✓ A pesar de sus limitaciones, las ecuaciones analíticas constituyen una herramienta significativa para obtener soluciones con una aproximación adecuada para fines prácticos.
- ✓ Los modelos analíticos solamente permiten el cálculo del gasto de infiltración en el interior de un túnel. En cambio, las soluciones numéricas además de calcular el gasto de infiltración en el contorno de un túnel permiten determinar la distribución de la carga hidráulica, la presión de poro o del agua, las velocidades de flujo, entre otros resultados de análisis típicos de flujo de agua.
- ✓ Los programas de computadora especializados como PLAXFLOW, facilitan el estudio del flujo establecido y transitorio, y del estado parcialmente saturado de los suelos, casos que intentar resolverlos de forma analítica resulta más complicado y laborioso. Sin embargo, se debe reconocer que ningún programa de computadora sustituye el buen juicio de un ingeniero.
- ✓ Una recomendación importante para trabajos futuros es evaluar la infiltración hacia el interior de un túnel con modelación numérica bajo condiciones de flujo transitorio. Asimismo se recomienda, que siempre que sea posible, en la asignación de los parámetros hidráulicos necesarios para los cálculos, se utilice la información obtenida de pruebas de campo y de laboratorio efectuadas en función del tipo de problema a resolver, buscando obtener resultados que representen la realidad de la mejor forma posible.



## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Alberro, J. y Hernández, R. (1989). *Efecto del flujo de agua en el contorno de túneles*. Coordinación de Geotecnia. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Bertomeu Bo, J. (2010). Libro de ruta para un ingeniero de turno de una tuneladora. Tesis de especialidad. Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Borgo Valdez, G. (1998). Modelo matemático SHARP para el estudio de la intrusión salina en el acuífero del Valle de Guaymas. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Matemáticas, Universidad de Sonora.
- Borthagaray J. P. (2012). Flujo de fluidos estratificados. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
- Cuenca Alfaro, B. R. (2009). Túneles en suelos con énfasis en carreteras Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- García-Flores, C., López-Acosta, N. P. & Auvinet Guichard, G. (2012). Análisis teórico para la inyección de agua en el subsuelo del Valle de México. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A. C.* Cancún, Quintana Roo, México.
- De la Fuente Utrilla, H. A., López-Acosta, N. P. & Auvinet Guichard, G. (2012). Evaluación de bordos de protección bajo condiciones de vaciado rápido mediante análisis numéricos acoplados a flujo transitorio-deformación y análisis de estabilidad. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A. C.* Cancún, Quintana Roo, México.
- De la Fuente Utrilla, H.A. (2013). Evaluación de la seguridad de los bordos de protección sometidos al fenómeno del vaciado rápido. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Flores B. (2000). *Flujo de agua a través de los suelos*. Cuarta edición corregida y aumentada. Asociación Mexicana de Hidráulica. Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA).
- Fuensanta, P. (1993). Los modelos casuales aplicados al estudio de las variables de aprendizaje de una L2. *Revista española de lingüística aplicada*. 69-83.
- García Flores, C. (2013). Control local del hundimiento regional mediante inyección de agua en el subsuelo del Valle de México. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Gattinoni, P., Scesi, L. & Terrana, S. (2009). Tunnel inflow assessment in discontinuous rock masses from numerical modeling to empirical equations. *Politecnico di Milano (Dept. of Environmental, Infrastructures and Surveying Engineering)*. I-20133, (1-9).



- Gianfranco Perroni, (2010). Filtraciones en túneles de la línea 1 del metro de Caracas. XIX Seminario Venezolano de Geotecnia, *Ingeniería Geotécnica en Venezuela-Estudios y soluciones de Casos Prácticos. Geomecánica C. A.* Caracas, Venezuela.
- González, L. & López Acosta, N. P. (2014). Aplicación de la técnica Sobre-relajación Sucesiva a problemas de flujo de agua confinado y no confinado. XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotecnia A. C.* Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Hernández Robles, D. A. (1990). Modelo de Hele-Shaw aplicado al estudio del flujo de agua en suelos. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Hernández, F. & Muñoz, J. F. (2009). Influencia de las curvas de retención en la estimación de la evaporación de acuíferos someros. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Vol. IX, 1-8.
- Huang Hwang, J. & Chieh Lu, C. (2006). A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow. *ScienceDirect. Tunnelling and Underground Space Technology*, 22 (2007), 1-46.
- Juárez B., y Rico R. (2008). Mecánica de Suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos I. (Tomo 1). Editorial Limusa, México.
- Junca Ubierna, J. A. (1990). Los sorprendentes túneles submarinos de carretera noruegos, *Segundo Simposio sobre el Cruce de Estrechos*, ESPAIS, 3-20.
- Kacimov, A., Al-Jabri, S., Sherif, M. & Al-Shidi, S. (2009). Slumping of groundwater mounds: revisiting the Polubarinova-Kochina theory. *Hydrological Sciences Hydrologiques*, 54 (1), 174-188.
- Kunikai, S. (1983). Hydraulic character of discharge hydrograph for tunneling. *Soil and foundations*. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 23, 1-7.
- Lei, Shizhong (1999). An analytical solution for Steady flow into a tunnel. *Groundwater*, Vol. 37, 23-26., volumen No. 37, número 1, 23-26.
- Lezama-Campos, J. L. (2010). Estudio del fenómeno de llenado y vaciado rápido en bordos de protección de áreas urbanas expuestas a inundaciones. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- López-Acosta, N. P. (1999). Flujo de agua en suelos con permeabilidad aleatoria. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- López-Acosta, N. P. y Auvinet G. (2010). *Flujo establecido y transitorio en la excavación de un dique seco*. Ideas CONCYTEG, 5(62), 820-844.
- López-Acosta, N. P., Pérez, M. A. & Auvinet, G. (2010). Efecto de las filtraciones en condiciones de flujo establecido en lumbreras de gran profundidad. XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A. C.*, Acapulco, Guerrero, México.





- López-Acosta, N. P. (2014). Modelado numérico de problemas de flujo de agua. XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A.C.* Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- López-Acosta, N. P. (2015). "Cap. B.2.9 Flujo de agua en suelos" Capítulo 9 (nuevo) del *Manual de Diseño de Obras Civiles [Sección B. Geotecnia. Tema 2. Mecánica de Suelos]*, (En revisión). México D.F. Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- Ríos Manrique, A. (2010). Procedimiento de excavación con escudo para la construcción del Túnel Emisor Oriente en el Valle de México. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Marsal R. J. y Reséndiz D. (1968). Análisis de flujo de agua, Capítulo 6 del libro *Fundamentos del diseño y construcción de presas de tierra y enrocamiento*.
- Medaña S. (2004). Algunas novedades importantes de los actuales escudos de frente de presión de tierras, *Ciencia Técnica de la Ingeniería Civil, Revista de Obras Públicas*.
- Mendoza-Promotor, J. A. (2015). Contribución a los análisis de flujo de agua en suelos parcialmente saturados. Tesis de licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Zacatenco, IPN.
- Ming, H., Meng-Shu, W., Zong-Sheng, T. & Xiu-Ying, W. (2010). Analytical solutions for steady seepage into an underwater circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 25, (2010), 391-396.
- Molinero Huguet, J., Samper Calvete, F. J. & Juanes Silva. R. (2000). Filtración hacia túneles en medios fracturados: Simulación dinámica del avance de la excavación. *Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil. Revista de Obras Públicas*, N°. 3,937, 33-49.
- Montoya Orozco, A. y Palma López, S. (2006). Fabricación de un permeámetro de pared flexible para el laboratorio de mecánica de suelos de la ESIA Zacatenco. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Zacatenco, IPN.
- Moon, L. & Fernández, G. (2009). Effect of excavation-Induce groundwater level drawdown on tunnel inflow in jointed rock mass. *Engineering Geology* 110, (2010), 33-42.
- Ortíz Mendoza, M. A. (2005). Determinación de los coeficientes de permeabilidad para un flujo de pozo en un simulador hidrológico. Tesis de licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Zacatenco, IPN.
- Padilla Benítez, F. (2011). Ingeniería y morfología del terreno. 2°Curso. ETSICCP. Ingeniería geológica, Universidad de A. Coruña, España.
- Pérez Cuevas, J. (2013). Interacción suelo-estructura utilizando el método de elementos finitos. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Pérez, C. (2009). Modelado del hundimiento de la zona lacustre del Valle de México. Aspectos estratigráficos y piezométricos. Tesis de: maestría. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Zacatenco, IPN.

- Poon Hung, C. (2013). Innovaciones en el diseño y construcción de túneles. Especialidad: Ingeniería Civil. Academia de Ingeniería A. C.
- Quezada Curiel, J. U. (2012), Aplicación de la triangulación de Delauna al método de elementos finitos. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Ramírez Granados, P. (2007). Caracterización de la dinámica de flujo mediante la aplicación de un modelo numérico hidrogeológico. Caso de la cuenca del Río Birris, Cártago, Costa Rica. *Revista geológica de América Central*, 34-35: 83-97.
- Rangel Núñez, J. L. (2012). Análisis del tuneleo en suelos blandos. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotecnia A. C.* Cancún, Quintana Roo, México.
- Reyes, J. A. (2013) Imágenes fotográficas tomadas durante las prácticas profesionales del Túnel Emisor Oriente (TEO) de la Lumbreira L-10 del tramo III con Grupo Carso. Colegio de Ingenieros Civiles de México A. C. (CICM).
- Reyna, E. E & Reyna, S. M. (2012). Modelos analíticos y numéricos para la determinación de infiltración en presas de material suelto. Análisis de uso y sensibilidad. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Mecánica computacional*, Vol. XXXI, 279-303.
- Richards, L. A. (1931). *Capillary Conduction of Liquids Through Porous Medium* (Vol. 1). J. Physics.
- Romana Ruíz, M. (1983). Planificación de reconocimiento para excavación de túneles en rocas. *Revista de obras públicas*, Febrero-Marzo, 73-87.
- Sánchez Solís, M. A. (2013). Comportamiento hidrogeomecánico de bordos bajo condiciones de flujo transitorio. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Soto Saavedra, P. R. (2004). Construcción de Túneles. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Construcción Civil, Universidad Austral de Chile.
- Schmitter, M. J., Méndez, M. R., Pereyra, V. J. & Romero, Z. L. (2013). Micro-tuneleo en suelos granulares gruesos, bajo el nivel freático. 3<sup>er</sup> Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca, *Amitos*.
- Torres, A., Angelove, S. & Garibay, T. (2010). *Geología y Geotecnia, Tema: Filtraciones*.
- Vargas Frutos, A. T. (2012), Influencia en la disposición de los estratos de estabilidad del frente del túnel. E. T. S. I. de Caminos, Canales y Puertos de España, Universidad Politécnica de Madrid.
- Vargas Navarrete, E. (2010). Planeación general del Túnel Emisor Oriente en la Zona Metropolitana del Valle de México. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Vedat, D. (2005). Assessment of groundwater inflow into a metro tunnel (Ankara), *Geoline* 2005, (23), 1-8.



- Zaldívar Reyes, S. F. (2013). Metodología para el análisis y diseño de conexiones túnel-lumbrera y túnel-túnel en suelos blandos sometido a hundimiento regional. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Zaldívar, S. F., Rodríguez, J. F. & Auvinet, G. (2012). Análisis numérico de la interacción lumbrera-túnel en suelos blandos sometidos a hundimiento regional. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A. C.* Cancún, Quintana Roo, México.
- Zuluaga Betancourt, D. (2015). Métodos analíticos y numéricos para la evaluación de filtración en túneles. Proyecto Final de la materia de "Flujo de agua en suelos" (impartida por Dra. Norma Patricia López Acosta). Posgrado de Ingeniería, UNAM.

### Referencias de internet

- [http://www.smie.org.mx/SMIE\\_Articulos/co/co\\_17/te\\_07/ar\\_12.pdf](http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_17/te_07/ar_12.pdf)
- <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/Noticias/InformeDifusionIngenieriaPSHCVM.pdf> (fecha de consulta: 06/08/2015)
- <http://tunnels.piarc.org/es/aspectos-medioambientales/impacto-agua.htm> (fecha de consulta: 06/08/2015)
- <http://tunnels.piarc.org/tunnels/ressources/4/542,Chap-5-Environmental-issues-v-11.10..pdf> (fecha de consulta: 06/08/2015)
- <http://www.elmundo.es/elmundo/2009/05/19/castillayleon/1242714124.html> (fecha de consulta: 06/08/2015)
- [http://www.oas.org/cip/docs/la\\_comision/reuniones\\_pasadas/ordinarias/3reunion\\_mexico2003/15\\_modelos\\_fis\\_escala\\_redu\\_doc127\\_03.pdf](http://www.oas.org/cip/docs/la_comision/reuniones_pasadas/ordinarias/3reunion_mexico2003/15_modelos_fis_escala_redu_doc127_03.pdf) (fecha de consulta: 06/08/2015).
- <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2548/011-MPM-Cap8-Final.pdf?sequence=11> (fecha de consulta: 06/08/2015)
- [https://books.google.com.mx/books?id=0Riz-5qZERcC&pg=PA164&lpg=PA164&dq=Custodio+%281983a%29&source=bl&ots=PhOQC\\_vAiH&sig=r3zpKRB9HS-ky1OYnRVsDwJh1UE&hl=es-419&sa=X&ei=MeERVdKYHISfyASNtoDQBA&ved=0CDUQ6AEwBA#v=onepage&q=Custodio%20\(1983a\)&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=0Riz-5qZERcC&pg=PA164&lpg=PA164&dq=Custodio+%281983a%29&source=bl&ots=PhOQC_vAiH&sig=r3zpKRB9HS-ky1OYnRVsDwJh1UE&hl=es-419&sa=X&ei=MeERVdKYHISfyASNtoDQBA&ved=0CDUQ6AEwBA#v=onepage&q=Custodio%20(1983a)&f=false) (fecha de consulta: 06/08/2015)
- <http://www.ctta.org/FileUpload/ita/2009/papers/P-02/P-02-02.pdf> (fecha de consulta: 06/08/2015)
- <http://www.mmc.igeofcu.unam.mx/smc-2009/Archivos/GHZ.pdf> (fecha de consulta: 06/05/2015)
- [http://issuu.com/ramonrosales8/docs/tesis\\_\\_entrega\\_final\\_](http://issuu.com/ramonrosales8/docs/tesis__entrega_final_) (fecha de consulta: 06/08/2015)



<http://www.h2ogeo.upc.es/publicaciones/2005/Alicante%202005/CUANTIFICACION%20DE%20LOS%20IMPACTOS%20GENERADOS%20POR%20LA%20CONSTRUCCION%20DE%20UN%20TUNEL%20ANEL%20A%20TRAVES%20DE%20UN%20ACU%20DFERO%20ALUVIAL.pdf> (fecha de consulta: 06/08/2015)

<http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=14&ved=0CFsQFjAN&url=http%3A%2F%2Ftesis.ipn.mx%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F367%2FBinder4.pdf%3Fsequence%3D1&ei=1ko6VYTCNcfvtQWY2IDQCg&usg=AFQjCNG6OcFkLQl1m4SfXbvHfC2obmC0jg> (fecha de consulta: 06/08/2015)

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-6584.1999.tb00953.x/pdf> (fecha de consulta: 06/08/2015)

<http://es.slideshare.net/freddyamirofloresvega/4diseo-geotecnico-en-excavaciones-de-tuneles> (fecha de consulta: 06/08/2015)

<http://archivo.eluniversal.com.mx/ciudad-metropoli/2015/nuevas-fallas-amenazan-con-cierre-total-de-l12-1097224.html#grafico040515> (fecha de consulta: 06/08/2015)

[http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672013000200013&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672013000200013&script=sci_arttext) (fecha de consulta: 02/10/2015)

[http://www.researchgate.net/profile/Jesus\\_Ramirez8/publication/242559111\\_SOBRE\\_LA\\_INTERACCION\\_ENTRE\\_ACUFEROS\\_Y\\_OBRAS\\_SUBTERRNEAS/links/544a33110cf2f6388084fa3f.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Jesus_Ramirez8/publication/242559111_SOBRE_LA_INTERACCION_ENTRE_ACUFEROS_Y_OBRAS_SUBTERRNEAS/links/544a33110cf2f6388084fa3f.pdf) (fecha de consulta: 06/08/2015)

[http://scholar.google.com.mx/scholar?hl=en&q=An+analytical+solution+for+steady+flow+into+a+tunnel&btnG=&as\\_sdt=1%2C5&as\\_sdtp=](http://scholar.google.com.mx/scholar?hl=en&q=An+analytical+solution+for+steady+flow+into+a+tunnel&btnG=&as_sdt=1%2C5&as_sdtp=) (fecha de consulta: 31/07/2015)

<http://tgc.com.mx/tgc/wp-content/uploads/2013/11/TURBANOS3.pdf> (fecha de consulta: 04/08/2015)

[http://www.geoasbuilt.es/tutoriales/mecanica/Clase5\\_Tuneles\\_Laminas.pdf](http://www.geoasbuilt.es/tutoriales/mecanica/Clase5_Tuneles_Laminas.pdf) (fecha de consulta: 05/08/2015)

<https://sites.google.com/site/disenodetuneles/> (fecha de consulta: 05/08/2015)

<http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/category/excavaciones-y-voladuras/metodos-y-equipos-de-excavacion-en-tuneles/> (fecha de consulta: 05/08/2015)

[https://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/TMR\\_Clase10\\_Tuneles\\_en\\_Suelos.pdf](https://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/TMR_Clase10_Tuneles_en_Suelos.pdf) (fecha de consulta: 05/08/2015)

[https://books.google.com.mx/books?id=TXevPSBtQX4C&pg=PA339&lpg=PA339&dq=M%C3%A9todos+de+excavaci%C3%B3n+para+t%C3%B3neles&source=bl&ots=\\_vEkwLB-vt&sig=IxATelp1EWZKMyZxaRQdDpH-BmA&hl=es-419&sa=X&ved=0CFwQ6AEwCWovChMI4Y\\_o6P-SxwIVQzCIC3gZA\\_n#v=onepage&q=M%C3%A9todos%20de%20excavaci%C3%B3n%20para%20t%C3%B3neles&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=TXevPSBtQX4C&pg=PA339&lpg=PA339&dq=M%C3%A9todos+de+excavaci%C3%B3n+para+t%C3%B3neles&source=bl&ots=_vEkwLB-vt&sig=IxATelp1EWZKMyZxaRQdDpH-BmA&hl=es-419&sa=X&ved=0CFwQ6AEwCWovChMI4Y_o6P-SxwIVQzCIC3gZA_n#v=onepage&q=M%C3%A9todos%20de%20excavaci%C3%B3n%20para%20t%C3%B3neles&f=false) (fecha de consulta: 05/08/2015)



- [http://www.opandalucia.es/verdocumento.php?documento=capitulo%20XIII\\_Construccion%20de%20tuneles.pdf](http://www.opandalucia.es/verdocumento.php?documento=capitulo%20XIII_Construccion%20de%20tuneles.pdf) (fecha de consulta: 05/08/2015)
- <http://tuneles-unet.webnode.com.ve/lostuneles/metodos-de-construccion/> (fecha de consulta: 05/08/2015)
- <http://megaconstrucciones.net/?construccion=tunel-ferroviario-guadarrama> (fecha de consulta: 07/08/2015)
- <http://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/09MaquinasIntegrales.pdf> (fecha de consulta: 09/08/2015)
- <http://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/08natm.pdf> (fecha de consulta: 09/08/2015)
- <http://civilgeeks.com/2011/09/22/metodos-de-perforacion-de-tuneles/> (fecha de consulta: 09/08/2015)
- <http://www.etcg.upc.edu/asg/TiMR/descargas/01Historia.pdf> (fecha de consulta: 10/08/2015)
- [http://www.milenio.com/df/filtraciones\\_agua\\_metro-mero\\_filtraciones\\_agua\\_agua\\_filtraciones\\_metro\\_0\\_477552345.html](http://www.milenio.com/df/filtraciones_agua_metro-mero_filtraciones_agua_agua_filtraciones_metro_0_477552345.html) (fecha de consulta: 10/08/2015)
- <http://www.24-horas.mx/invierten-4-7-mdp-para-sellar-filtraciones-de-agua-en-metro/> (fecha de consulta: 10/08/2015)
- <http://www.metro.df.gob.mx/imagenes/organismo/fideicomiso/informe11compromisos.pdf> (fecha de consulta: 10/08/2015)
- <http://www.proceso.com.mx/?p=345314> (fecha de consulta: 10/08/2015)
- [http://ropdigital.ciccp.es/detalle\\_articulo.php?registro=17647&anio=2000&numero\\_revista=3397](http://ropdigital.ciccp.es/detalle_articulo.php?registro=17647&anio=2000&numero_revista=3397) (fecha de consulta: 10/07/2015)
- [http://juanesgroup.mit.edu/publications?action=AttachFile&do=get&target=molinero\\_sampler\\_juanes\\_rop\\_2000.pdf](http://juanesgroup.mit.edu/publications?action=AttachFile&do=get&target=molinero_sampler_juanes_rop_2000.pdf) (fecha de consulta: 10/07/2015)
- [http://aguas.igme.es/igme/publica/libros1\\_HR/libro107/pdf/lib107/in\\_05.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro107/pdf/lib107/in_05.pdf) (fecha de consulta: 10/08/2015)
- [http://scholar.google.com.mx/scholar?q=Los+modelos+casuales+aplicados+al+estudio+de+las+variables+de+aprendizaje+de+una+L2&btnG=&hl=en&as\\_sdt=0%2C5](http://scholar.google.com.mx/scholar?q=Los+modelos+casuales+aplicados+al+estudio+de+las+variables+de+aprendizaje+de+una+L2&btnG=&hl=en&as_sdt=0%2C5) (fecha de consulta: 11/08/2015)
- [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/539/1/rojas\\_rh.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/539/1/rojas_rh.pdf) (fecha de consulta: 28/08/2015)