

01121  
109



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**"REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA  
DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA  
CIUDAD DE MÉXICO"**

T E S I S  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A:  
**EDGAR PANTOJA MARTÍNEZ**

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. MIGUEL ANGEL GUZMÁN ESCUDERO



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.

FEBRERO 2003

A



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**TESIS CON  
FALLA DE  
ORIGEN**



FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/032/02

Señor  
EDGAR PANTOJA MARTÍNEZ  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. MIGUEL ANGEL GUZMAN ESCUDERO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO"**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. ANÁLISIS GEOTÉCNICO
- III. ANÁLISIS ESTRUCTURAL
- IV. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL REVESTIMIENTO
- V. CONCLUSIONES
- AGRADECIMIENTOS
- REFERENCIAS

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 8 febrero 2002  
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg

B

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

**En Paz**

"Muy cerca de mi ocaso, yo te bendigo, vida,  
porque nunca me diste ni esperanza fallida,  
ni trabajos injustos, ni pena inmerecida;

porque veo al final de mi rudo camino  
que yo fui el 'Ingeniero' de mi propio destino;

que si extraje la miel o la hiel de las cosas,  
fue porque en ellas puse hiel o mieles sabrosas:  
cuando planté rosales, coseché siempre rosas.

...Cierto, a mis lozanías va a seguir el invierno:  
¡mas tú no me dijiste que mayo fuese eterno!

Hallé sin duda largas noches de mis penas;  
mas no me prometiste tú sólo noches buenas,  
y en cambio tuve algunas santamente serenas...

Ame, fui amado, el sol acarició mi faz.  
¡Vida, nada me debes! ¡Vida, estamos en paz!"

Amado Nervo

C

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Dedico esta tesis a:

Mi Madre

Por el invaluable e insustituible rol que juega en mi vida, gracias por apoyarme.

Mi Padre

Por su infatigable fuerza de trabajo que me trajo hasta aquí.

Mis hermanos

Raquel, Nicolás, Celia, Rita, Irma, David, Juan Carlos. Que en todo momento me alentaron para concluir mis estudios.

Mis sobrinos

... y cada vez son más.

Mis amigos, amigas y compañeros de de-Generación

La lista es interminable y seguramente alguno quedará fuera, así que todos aquellos que así se consideren, aquí están incluidos.

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Jorge

Por los sueños que hemos alcanzado.

Roberto

Porque su terquedad al fin ha dado este resultado.

La nutria

Que lo apode como Agus. Por todas nuestras risas.

Liz

Sin tu apoyo no habría logrado esta meta, gracias por guiar mis pasos.

Y por nuestro gran amor.

La Universidad Nacional Autónoma de México y especialmente a su Honorable Facultad de Ingeniería, mi más querida Alma Mater.

"...a ti que estas llorando ahí  
al otro lado del espejo  
a ti que no te debo  
más que el empujón que anoche  
me llevo a escribir esta..." tesis.

(Joaquin Sabina)

**TESIS PROFESIONAL**

**REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.**

---

---

**REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y  
PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE  
DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.**

---

---



# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	3
1.1	Antecedentes .....	4
1.2	Objetivo y alcances .....	4
1.3	Tipos de túneles y lumbreras .....	5
1.4	Tipos de secciones comunes .....	6
1.5	Revestimientos usuales .....	7
1.6	Descripción del túnel estudiado y su problemática .....	9
2.	ANÁLISIS GEOTÉCNICO .....	13
2.1	Geología regional .....	15
2.2	Estratigrafía regional .....	17
2.3	Elección de parámetros geotécnicos .....	19
2.4	Empujes sobre las paredes de la lumbrera .....	21
2.5	Presiones inducidas sobre la clave del túnel .....	25
3.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	26
3.1	Características de la estructura .....	28
3.2	Método de análisis empleado .....	29
3.3	Descripción del modelo matemático de la estructura .....	32
3.4	Materiales .....	35
3.5	Cargas de diseño .....	37
3.6	Interpretación de Resultados .....	37
3.7	Análisis de la Lumbrera .....	48
4.	DISEÑO ESTRUCTURAL DEL REVESTIMIENTO .....	52
4.1	Criterio de diseño estructural .....	54
4.2	Concreto lanzado con fibras de acero (shotcrete) .....	56
4.3	Revisión y diseño estructural del revestimiento del túnel .....	68
4.4	Revisión y diseño estructural del revestimiento de la lumbrera .....	74
5.	CONCLUSIONES .....	77
6.	AGRADECIMIENTOS .....	81
7.	REFERENCIAS .....	83
	ÍNDICE DE FIGURAS .....	87

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

---

---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

---

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

## 1.1 Antecedentes

Dentro de los grandes logros de la ingeniería, las obras subterráneas ocupan un lugar muy importante, por ejemplo los túneles, los cuales desde tiempos inmemoriales han servido al hombre para solucionar muchos de sus problemas como: la conducción de aguas, residuos, petróleo y gas, ventilación en minas, vías de comunicación, desvío de ríos mientras se construye una presa, entre otros usos no menos importantes que están fuera del alcance de este trabajo. En este sentido podríamos definir a un túnel como una obra de ingeniería construida debajo de la tierra o del agua que es utilizada a beneficio del hombre para salvar obstáculos impuestos por la naturaleza.

A lo largo de su recorrido, un túnel necesita de otras obras auxiliares para su buen funcionamiento, mantenimiento o construcción, este es el caso de las lumbreras, las cuales son excavaciones verticales construidas desde la superficie de la tierra, sirven de acceso superior al túnel sin necesidad de ir a alguno de sus extremos para ingresar al mismo, una vez que está en funcionamiento y durante su construcción sirven para tener más frentes de avance de excavación.

## 1.2 Objetivo y alcances

El objetivo de esta tesis es hacer la revisión geotécnica-estructural de una sección crítica de un túnel de desagüe de la ciudad de México y una de sus lumbreras. En los capítulos siguientes se verán con detalle todos los estudios necesarios para poder analizar y resolver cabalmente este problema.

El alcance de este trabajo es presentar una forma de análisis y revisión estructural del revestimiento en un túnel y una lumbrera prismáticos de sección circular y rectangular respectivamente en un suelo tobáceo y pumítico de la ciudad de México. Según sea el resultado de esta revisión se propondrá un mejoramiento del revestimiento, usando concreto lanzado reforzado con fibras metálicas.



# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

## 1.4 Tipos de secciones comunes

La sección transversal de un túnel depende en gran medida, del tipo de suelo en que se construya y del uso al que estará destinado, ya que para una función y suelo específicos, habrá al menos una forma geométrica que resulte ser la más eficiente con respecto de otras, por ejemplo: en túneles que conducen fluidos, las secciones circulares (ver figura 1.1a) suelen ser las más adecuadas y usadas ya que con un perímetro determinado consiguen que el área que encierran sea máxima, consiguiendo con esto un ahorro en materiales de revestimiento además de tener una mayor capacidad de conducción o gasto con la mínima fricción posible con las paredes, estas ventajas hacen que ésta sección sea preferible sobre las rectangulares

En túneles para paso de vehículos la sección más común es la de herradura, dónde la parte superior es curva y la superficie de rodamiento o inferior, es prácticamente horizontal, teniendo únicamente la pendiente mínima de bombeo (alrededor del 2%) para drenaje transversal del camino.

En general, las secciones geométricas que presentan cierta curvatura en la clave (ver figura 1.1b) suelen ser las que más eficientemente transmiten las cargas verticales hacia el terreno debido al efecto de arqueo *el cual ocasiona que una parte del material se mueva hacia abajo al abrir el orificio y el resto se apoya en la zona lateral de la abertura: por lo tanto, la carga sobre el cielo del túnel será sólo la correspondiente del material movilizado*<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Olivera Bustamante F.: "Estructuración de Vías Terrestres", Edit. CECSA, 2ª Ed., México 1996, Pág. 358

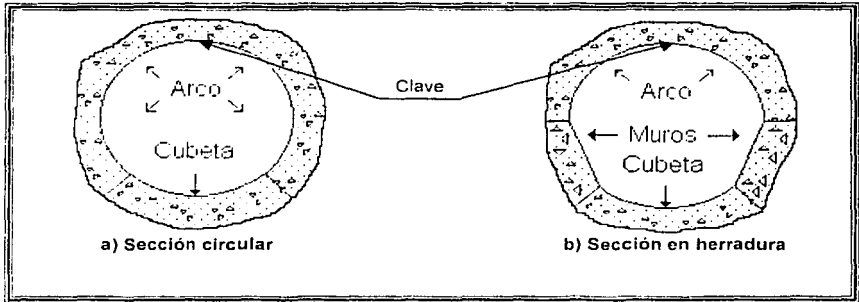


Figura 1.1 – Secciones típicas de túnel, circular y en herradura

## 1.5 Revestimientos usuales

### TESIS CON FALLA DE ORIGEN

En la actualidad se pueden distinguir dos tipos de revestimiento en túneles, el primario y el secundario. El primario se utiliza para proveer un apoyo temporal que garantice la estabilidad del túnel durante su construcción y disminuya los asentamientos en la superficie, mientras que el secundario proporciona la geometría final del túnel y asegura un comportamiento adecuado a largo plazo. No obstante también se han construido túneles con un revestimiento único que cumple con todos los aspectos anteriores.

El revestimiento primario, en túneles excavados mediante barrenación y voladuras, puede emplear estructuras temporales o definitivas como los arcos de acero con retaque de madera, el concreto lanzado, o un sistema mixto; mientras que en el caso de la excavación mediante escudo, se emplean dovelas prefabricadas. Por otro lado, el revestimiento secundario, en ambos métodos de excavación, consta generalmente de una capa final de concreto reforzado, siendo en esta etapa el uso indispensable de cimbras para el concreto.

Cuando se usan dovelas prefabricadas de concreto armado, el revestimiento se va formando por anillos constituidos por segmentos curvos anclados mecánicamente unos con otros.

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Estos segmentos o dovelas son piezas de concreto reforzadas con acero, prefabricadas en una planta en donde se les da la curvatura necesaria para formar la sección transversal del túnel. A medida que la excavación del túnel avanza, se van colocando las dovelas para formar más anillos que sustenten y sirvan de recubrimiento, algunas veces, definitivo. En la figura 1.2 se puede observar la construcción de un túnel para ferrocarril en la que se recurrió a esta técnica.

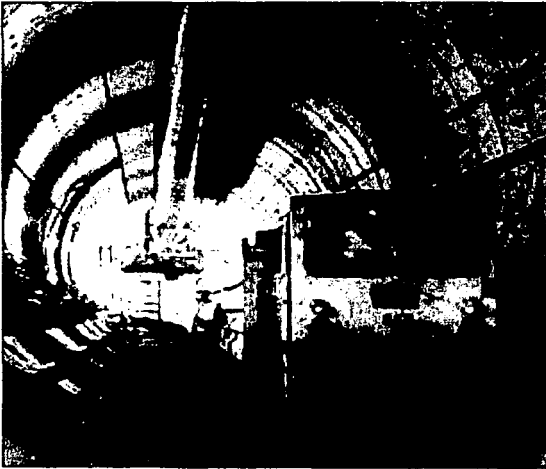


Figura 1.2 – Túnel para paso de trenes en España

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

### 1.6 Descripción del túnel estudiado y su problemática

En la ciudad de México, durante la época colonial se vivieron grandes inundaciones en las temporadas de lluvias causadas por el desbordamiento de los ríos y lagos de los alrededores, debido a que la metrópoli se ubica dentro de una cuenca lacustre que no cuenta con salidas naturales de agua y en cuyas partes más bajas existían lagos que eran alimentados por las aguas que fluían desde sus cercos montañosos.

Las inundaciones no sólo causaron molestias en la población, sino que también trajeron consigo enfermedades epidémicas que a su vez causaron la muerte a muchos de los habitantes de la ciudad, particularmente en los estratos más pobres de la época. Esto orilló al gobierno a tratar de solucionar el problema con grandes obras hidráulicas que darían drenaje artificial a la cuenca del Valle de México y fue así y en este orden que se construyeron. El Tajo de Nochistongo. El Túnel Viejo de Tequixquiac, El Túnel Nuevo de Tequixquiac y El Emisor Central

La concepción original del Tajo de Nochistongo la tuvo Enrico Martínez en 1580, pero al paso de los años resultó ser insuficiente y a mediados del siglo XIX, Francisco Garay proyectó un sistema de desagüe del Valle de México que culminaba en el Túnel Viejo de Tequixquiac que oficialmente fue inaugurado el 17 de Marzo de 1900, por el presidente de la república Porfirio Díaz. Sin embargo, los grandes esfuerzos realizados hasta esa fecha resultarían ser todavía insuficientes y los problemas de las inundaciones, aunque ciertamente mitigados, continuaron

La construcción del Emisor Central, se inició como proyecto en 1967 y comenzó a funcionar a partir de 1975, año en el que podríamos decir que las inundaciones que amenazaron al Valle de México al fin habían sido controladas parcialmente, pero debieron pasar 395 años para lograrlo

Nuestro estudio se centrará en uno de los túneles de desagüe, que actualmente forma parte del sistema de drenaje combinado de la Ciudad de México, es decir, a través de los mismos ductos, se desalojan las aguas residuales y pluviales. El agua se capta en las redes secundarias y primarias, pasa por el sistema general del desagüe y el drenaje profundo, luego es conducida a la presa Requena donde sigue su camino hasta al río Tula y a la presa



## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Endó. El río Tula es afluente del Moctezuma y éste a su vez del Pánuco que descarga en el Golfo de México. Ver figura 1.3.

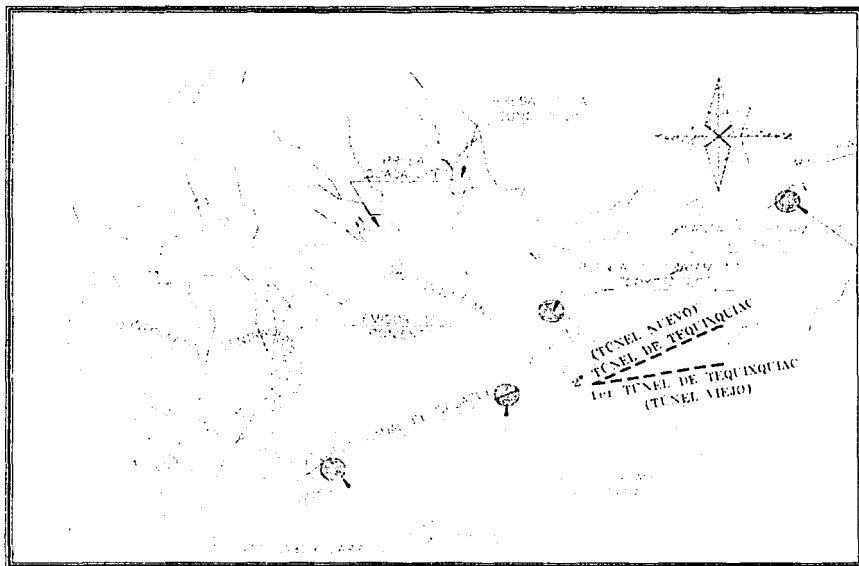


Figura 1.3 – Croquis de localización

La función principal del túnel de desagüe, era mantener a la ciudad de México incólume ante las inundaciones en los años 30. Fue proyectado con una longitud total de 11.3 km, sección transversal circular de 4 m de diámetro, 10 lumbreras de sección rectangular cada una con dimensiones ancho y largo diferentes con respecto a las otras y una de sección circular, separadas a cada 1000 m aproximadamente y debía llevar un gasto de 60 m<sup>3</sup>/seg. ver figura 1.4. En 1938 se inició la obra quedando a cargo de ésta, la Dirección de Obras Hidráulicas de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas y se finalizó hasta el año de 1954.

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

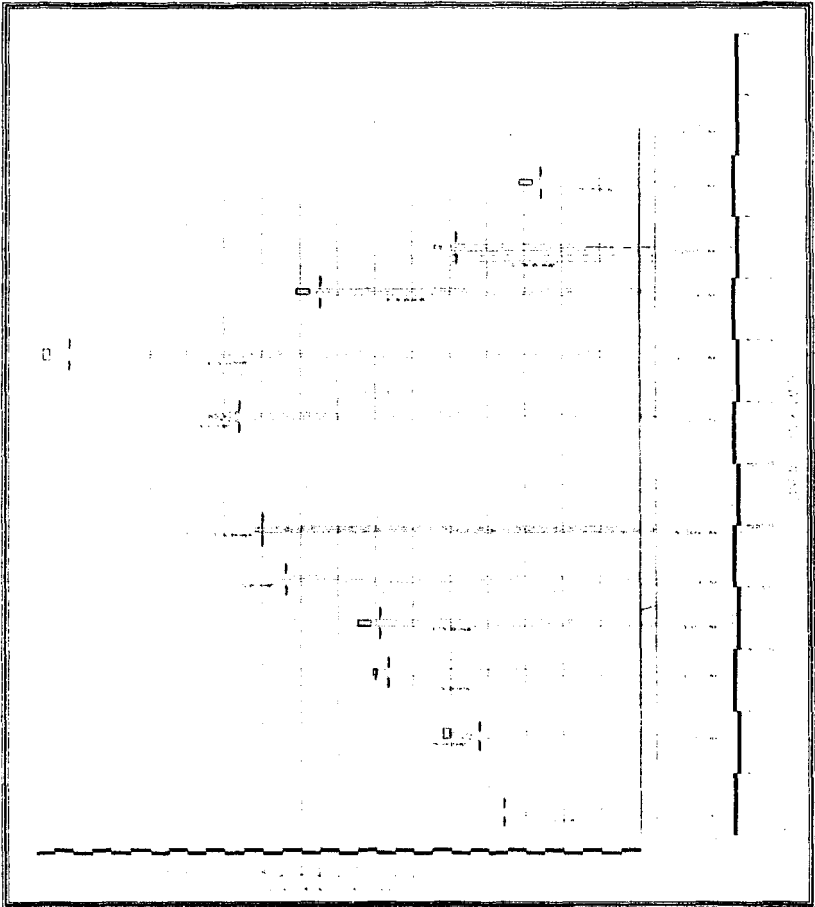


Figura 1.4 – Elevación del túnel

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO. DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Una vez terminado el túnel y con apoyo del Tajo de Nochistongo se creía que se aseguraba el desagüe de la ciudad de México dando servicio a más de 10 millones de habitantes de la urbe, pero el excesivo bombeo de aguas en el valle para la dotación del líquido a sus habitantes ocasionó serios hundimientos del terreno que provocaron que el sistema de alcantarillado colapsara y el escurrimiento por gravedad de los colectores hacia el gran canal se hizo más difícil.

Cuando se presentaban lluvias de mediana intensidad, el agua brotaba por pozos de visita y el centro de la Ciudad de México, donde los hundimientos eran mayores, quedaba inundado, por ello las autoridades se vieron en la necesidad de hacer una inversión mayor para la construcción de obras de mayor importancia como el drenaje profundo de la ciudad.

Aunado a los problemas de hundimiento, los túneles de desagüe empezaron a presentar fisuras en el recubrimiento y en algunas de sus respectivas lumbreras y en casos graves se registraron caídos, limitando el paso del agua a través de éstos.

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

---

---

## 2. ANÁLISIS GEOTÉCNICO

---

---

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Un análisis apropiado de cualquier obra de ingeniería (puentes, túneles, edificios, carreteras, etc.) debe incluir un estudio detallado de las condiciones geotécnicas del sitio como son: el valor de las propiedades índice y mecánicas del suelo, las condiciones que guarda el agua en el subsuelo, la localización geométrica en planta y en perfil de los parámetros geológicos. Dicho estudio es posible obtenerlo a través de la exploración del terreno.

Para un conocimiento adecuado del sitio será necesario proyectar suficientes sondeos en toda el área del proyecto para conseguir la disposición en planta y en perfil de las diferentes componentes geológicas, además de poder definir en que parte de estos sondeos se extraerán muestras inalteradas del material con la finalidad de realizar las pruebas de laboratorio posteriormente

El conocimiento de la Ingeniería Geotécnica de la zona en estudio es básico, ya que una apropiada exploración de las propiedades índice y mecánicas del suelo y/o rocas, influye directamente en el diseño estructural del revestimiento. Por otra parte, es primordial para que la obra se desarrolle sin contratiempos por condiciones imprevistas del suelo, además de conseguir que tenga un adecuado funcionamiento durante su vida útil.

La Geología es la ciencia que estudia el origen del planeta Tierra, su historia, su forma, la materia que lo configura y los procesos que actúan o han actuado sobre él, una de sus aplicaciones básicas es la determinación de medios estables, desde el punto de vista geológico para las construcciones humanas. Su profunda comprensión, combinada con otras ramas del conocimiento científico como la Física y en particular la Mecánica, han dado lugar a lo que hoy se conoce dentro de la Ingeniería Civil como Geotecnia o Mecánica de Suelos.

Es necesario averiguar perfectamente la estratigrafía de la región, la presencia de fallas geológicas, el plegamiento, fisuras, hidrología, etc., con la finalidad de poder calcular las presiones que obrarán tanto sobre el túnel como en las paredes del mismo, una vez que se tienen las cargas de diseño definitivas ya es factible proceder con el análisis estructural del revestimiento.

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

## TESIS CON FALLA DE ORIGEN

### 2.1 Geología regional

La zona del túnel de desagüe, geológicamente hablando, se ubica dentro de depósitos constituidos por suelos tobáceos y pumíticos de origen piroclástico (lluvias de cenizas) como se puede observar en la figura 2.1. Estos depósitos tienen importantes espesores de tobas lacustres bentoníticas (Tpel) que se formaron durante el periodo Terciario.

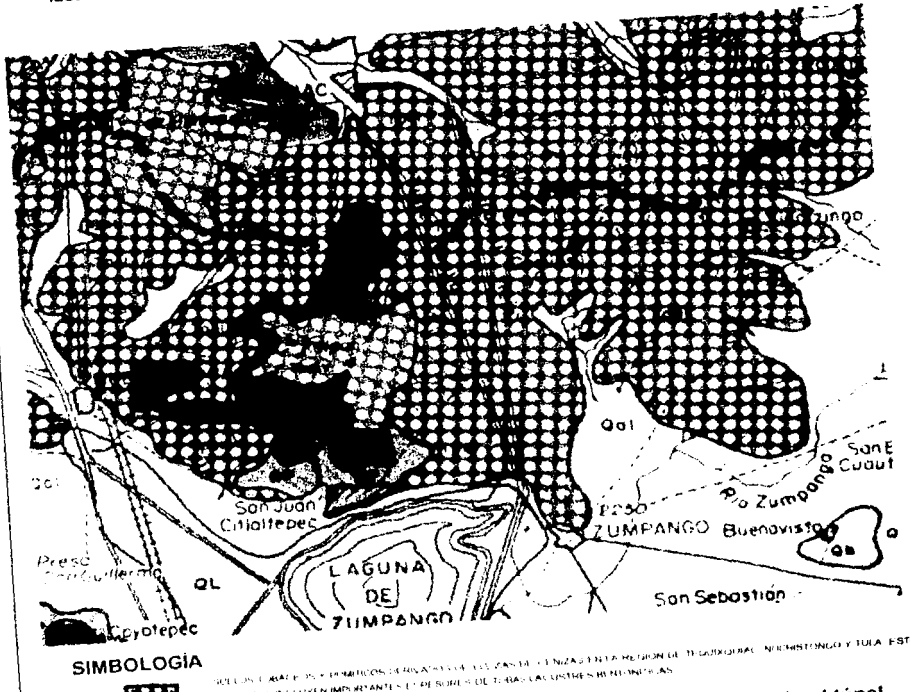


Figura 2.1 – Carta geológica de la zona en donde se encuentra ubicado el túnel

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

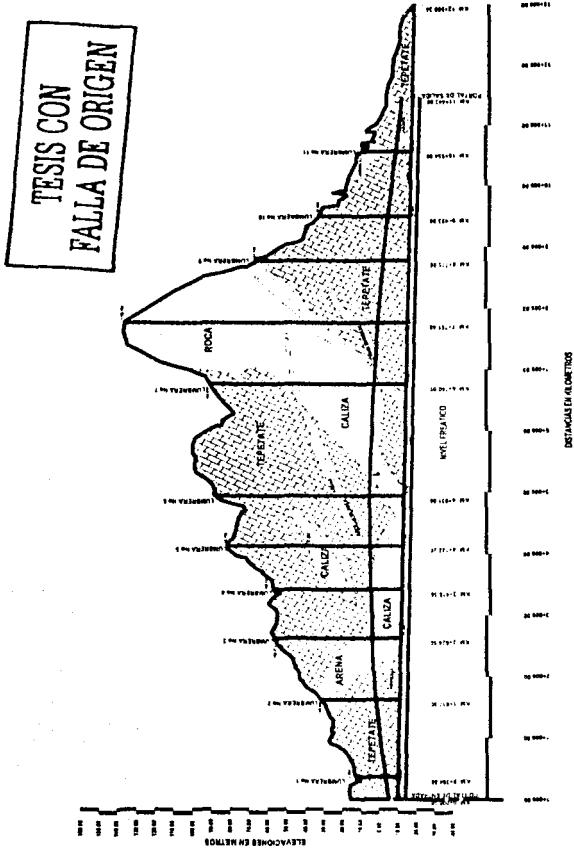


Figura 2.2 – Perfil Geológico

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

En las figuras 2.1 y 2.2 se pueden observar los depósitos de suelos predominantes, que corresponden a materiales conocidos como tepetates (suelos tobáceos), los cuales están intercalados por lentes de arena, arcilla, jaboncillos, conglomerados y rocas.

En cuanto a rigidez y resistencia del subsuelo, las condiciones más desfavorables lo constituyen los suelos duros de origen piroclástico anteriormente mencionados. Cuando están saturados los suelos duros, se puede advertir una importante reducción en su resistencia, están identificados en el perfil geológico como "tepetate" a los que se les puede considerar características similares a las de la formación Tarango.

## 2.2 Estratigrafía regional

Apoyándonos en estos datos geológicos investigados, se buscaron estudios que corroboraran el tipo de depósitos de esa zona. La estratigrafía representativa es el sondeo que se ilustra en la figura No. 2.3 y se resume en la siguiente tabla 2.1.

TABLA 2.1- ESTRATIGRAFÍA

PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN
0 0-0 9	Limo arenoso de color café claro de consistencia rígida a dura
0 9-5 0	Limo arenoso café de alta plasticidad y consistencia dura (toba)
5 0-6 0	Limo arenoso café de alta plasticidad y consistencia dura (toba)
6 0-8 2	Limo arenoso café de alta plasticidad y consistencia dura (toba)
8 2-13 2	Limo poco arenoso gris verdoso de alta plasticidad y consistencia de muy firme a dura con arena (toba)
13 2-14 1	Grava limosa compacta con escasos boleos
14 1-17 1	Limo café de alta plasticidad y consistencia dura (toba)
17 1-22 8	Limo gris verdoso de alta plasticidad y consistencia dura
22 8-25 7	Limo café de alta plasticidad y consistencia dura (toba)
25 7-31 6	Limo gris verdoso de alta plasticidad y consistencia dura (toba)
31 6-37 0	Limo café de alta plasticidad y consistencia dura (toba)
37 0-39 0	Limo café de alta plasticidad y consistencia dura (toba)
39 0-41 0	Limo café de alta plasticidad y consistencia dura (toba)
41 0-42 1	Limo poco arenoso café de alta plasticidad y consistencia dura
42 1-51 0	Limo gris verdoso de alta plasticidad y consistencia dura (toba)





# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Del análisis de la información de esta tabla y de la geología regional presentada en el subcapítulo 2.1, se puede concluir que los materiales que predominan en la zona del túnel tienen la misma formación (suelos tobáceos).

Con base en esta información se decidió que los valores de la Formación Tarango, que se localizan al Noroeste del vaso de Cristo, se pueden extrapolar para la revisión del túnel y una de sus lumbreras.

## 2.3 Elección de parámetros geotécnicos

Con base en el subcapítulo anterior, los sedimentos predominantes a lo largo del túnel son los depósitos tobáceos, esto implica que los parámetros que se elegirán para el análisis geotécnico serán básicamente los que se encuentran por encima del nivel de aguas freáticas o en condición seca y los localizados bajo éste o en estado saturado.

### a) Parámetros de resistencia al esfuerzo cortante para la condición seca y saturada

En los análisis de estabilidad de las paredes de la lumbrera y del túnel se utilizan los siguientes parámetros geotécnicos en **condición seca**:

Resistencia en compresión simple:	$q_u = 144 \text{ t/m}^2$
Cohesión:	$c = 40 \text{ t/m}^2$
Angulo de fricción Interna:	$\phi = 32^\circ$

Por otra parte, los valores medios representativos de las propiedades del terreno para suelos tobáceos en **condición saturada**, se seleccionaron de las pruebas triaxiales indicadas en la figura 2.4 y son los siguientes:

Peso volumétrico	$\gamma = 1.65 \text{ t/m}^3$
Cohesión	$c = 15 \text{ t/m}^2$
Angulo de fricción interna	$\phi = 27^\circ$

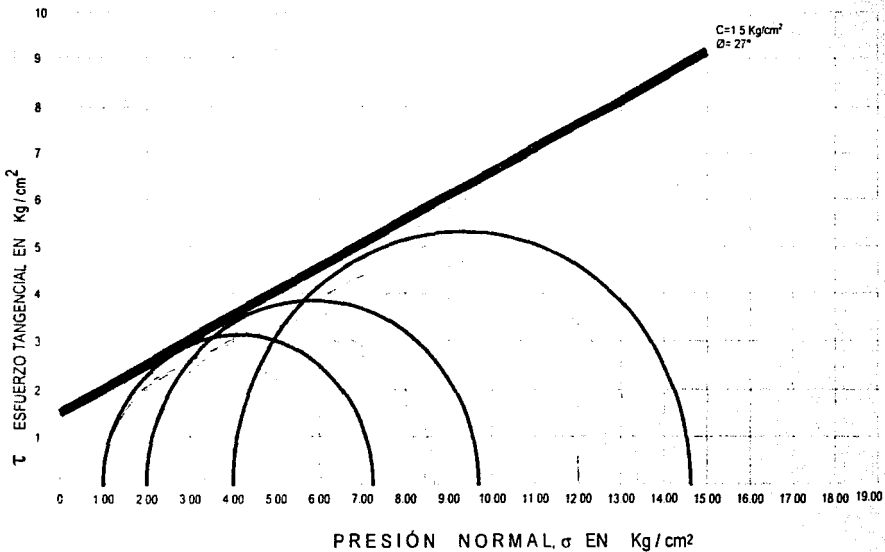


Figura 2.4 - Pruebas triaxiales

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

### b) Módulo de Elasticidad

Debido a que no se cuenta con la información del estudio de mecánica de suelos del túnel analizado, se estimó que el módulo de elasticidad del terreno tiene el valor  $E = 1135 \text{ kg/cm}^2$ , el cuál fue tomado del informe del Túnel del Emisor Poniente II correspondiente a los depósitos de la formación Tarango, este tipo de material es similar a la zona del proyecto.

### 2.4 Empujes sobre las paredes de la lumbrera

Como se vio anteriormente, el túnel cuenta con varias lumbreras de acceso y ventilación, las cuales han presentado problemas similares a los del túnel y por esta razón también deben revisarse geotécnicamente y estructuralmente.

Para el cálculo de las presiones horizontales que ejerce el suelo sobre la lumbrera, se utiliza la expresión propuesta por Beresantsev, que se usa para estructuras cilíndricas enterradas a gran profundidad. Cabe aclarar que la lumbrera en estudio es de sección rectangular, sin embargo, para utilizar esta ecuación se idealiza como circular con un perímetro equivalente al de la sección original.

$$\sigma_r = r \gamma \frac{Ka}{\lambda - 1} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_h} \right)^{\lambda - 1} \right] + q \left( \frac{r}{r_h} \right) + c \cdot \cot \phi \left[ \left( \frac{r}{r_h} \right)^\lambda (Ka - 1) \right]$$

$$Ka = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\lambda = 2 \tan \phi \tan \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$r_h = r + z \quad Ka$$

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

donde:

- $\sigma_r$  = Presión horizontal radial.
- $\phi$  = Ángulo de fricción interna del terreno: considerado igual a  $32^\circ$  para condición seca y  $27^\circ$  para condición saturada.
- $r$  = Radio de la excavación en m.
- $Z$  = Profundidad analizada, en m.
- $q$  = Sobrecarga en la periferia de la lumbrera; considerada igual a  $2.0 \text{ t/m}^2$ .
- $\gamma$  = Peso volumétrico del suelo igual a  $1.65 \text{ t/m}^3$ .
- $K_a$  = Coeficiente de empuje de tierras en estado activo.
- $c$  = Cohesión aparente del terreno =  $40 \text{ t/m}^2$  para condición seca y  $c = 15 \text{ t/m}^2$  en condición saturada.

En la siguiente página se muestran los cálculos, utilizando las expresiones anteriores, con los que se obtienen la variación de los esfuerzos horizontales actuantes con la profundidad, y con los resultados obtenidos se dibuja la distribución como se indica en la gráfica de la figura 2.5

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

**Datos:**

c =	40.00	ton/m <sup>2</sup>	Ka = 0.3073
φ =	32.00	°	
γ =	1.65	ton/m <sup>3</sup>	λ = 2.2546
r =	2.51	m	
q =	2.00	ton/m <sup>2</sup>	

**TIPO LUMBRERA: RECTANGULAR**

ancho=	2.3	
largo=	5.6	
perimetro de la lumbrera=	15.8	
radio equivalente=	2πr	r = 2.51464

**CALCULO DE DATOS PREVIOS**

$$r \cdot \gamma \cdot Ka = 1.8298 \quad c \cdot \cos(\phi) = 64.01 \quad Ka - 1 = -0.6927$$

$$(\lambda - 1)$$

z (m)	r <sub>n</sub>	r / r <sub>b</sub>	r / r <sub>b</sub>	r / r <sub>b</sub>	σ <sub>z</sub> (ton/m <sup>2</sup> )
0	2.5100	1.0000	1.0000	1.000	-42.3446
5	5.2815	0.4752	0.3932	0.187	-6.2265
10	8.0531	0.3117	0.2316	0.072	-1.1723
15	10.8246	0.2319	0.1598	0.037	0.3576
20	13.5962	0.1846	0.1201	0.022	0.9963
25	16.3677	0.1534	0.0951	0.015	1.3154
26	16.9220	0.1483	0.0912	0.014	1.3593
30	19.1393	0.1311	0.0782	0.010	1.4943
35	21.9108	0.1146	0.0660	0.008	1.6030
40	24.6824	0.1017	0.0568	0.006	1.6730
45	27.4539	0.0914	0.0497	0.005	1.7201
50	30.2255	0.0830	0.0441	0.004	1.7530
55	32.9970	0.0761	0.0395	0.003	1.7765
60	35.7685	0.0702	0.0357	0.003	1.7939
65	38.5401	0.0651	0.0325	0.002	1.8068
70	41.3116	0.0608	0.0298	0.002	1.8166
75	44.0832	0.0569	0.0274	0.002	1.8242
80	46.8547	0.0536	0.0254	0.001	1.8300
82	47.9633	0.0523	0.0247	0.001	1.8320
82	51.4969	0.0487	0.0794	0.004	2.7408
85	53.2891	0.0471	0.0772	0.004	2.7486
90	56.2761	0.0446	0.0737	0.003	2.7604
95	59.2631	0.0424	0.0706	0.003	2.7707
100	62.2501	0.0403	0.0677	0.003	2.7800

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

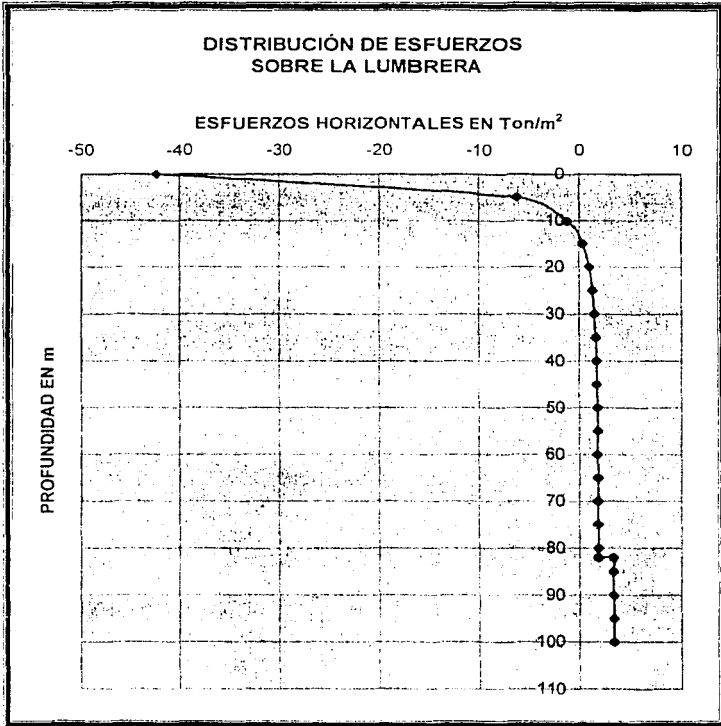


Figura 2.5 – Distribución de Esfuerzos Actuantes con la Profundidad

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

En la figura anterior observamos dos aspectos interesantes, primero, los esfuerzos calculados cercanos a la superficie adquieren un valor negativo. Esto se debe en gran medida a que el suelo tiene la suficiente cohesión para ser autosoportable, lo que físicamente significa que en estos metros iniciales el terreno no estaría ejerciendo presión alguna contra las paredes de la lumbrera. El otro punto es que a partir de la profundidad de 82 m, la gráfica tiene un salto. Este hecho tiene relación con el nivel de aguas freáticas, dado que precisamente a esta profundidad se encuentra.

### 2.5 Presiones inducidas sobre la clave del túnel

En el siguiente capítulo se verá con detalle que la presión interna actuante en la clave del túnel, es calculada tomando en cuenta la interacción con el suelo circundante mediante una malla de elementos finitos, que más adelante se definirán y que representa un estado plano de esfuerzos y deformaciones en una sección crítica del modelo.

Una vez obtenido el estado de esfuerzos se podrán calcular los elementos mecánicos del recubrimiento del túnel (Momento Flexionante, Fuerza Cortante y Carga Axial), y se estará en la posibilidad de revisar que en toda sección se cumpla con los estados límite de falla y de servicio



# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

---

---

## 3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

---

---

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Una de las partes sustanciales en el desarrollo de cualquier proyecto geotécnico-estructural, es la correcta ejecución del análisis estructural, éste puede basarse en planteamientos tradicionales por aproximaciones sucesivas de iteraciones como el de Cross o bien mediante métodos matriciales como el de las flexibilidades, rigideces o elementos finitos.

La elección del mejor método a utilizar, debe fundamentarse en el tipo de estructura por analizar y en los recursos con los que se cuenta para realizarlo. Los medios necesarios y el método empleado para analizar una estructura, están en función de la complejidad que ésta presente, por ejemplo, el análisis estructural de una presa requiere de métodos de análisis refinados y herramientas de cálculo sofisticadas como son las computadoras digitales, mientras que el análisis estructural de una viga isostática simplemente apoyada se puede llevar a cabo con los métodos convencionales de la Estática y en los casos más sencillos sin la ayuda de herramientas de cálculo.

En este capítulo veremos la secuela detallada que se siguió para obtener el análisis estructural del túnel y una de sus lumbreras. Primero se tuvo que clasificar la estructura con referencia al reglamento empleado, luego se verá qué método de análisis es el más apropiado para resolver este problema y los materiales y cargas que componen el modelo estructural, así como una descripción del mismo y por último haremos una interpretación de los resultados obtenidos.

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

### 3.1 Características de la estructura

El tipo de estructura objeto de este estudio, no está considerado específicamente en las Normas Técnicas y Reglamentos actuales de construcción; sin embargo, se decidió adoptar los criterios para evaluación de acciones, combinaciones y factores de carga, así como los de dimensionamiento de elementos y factores de resistencia indicados en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal 1997 (RCDF-97) vigente a pesar de que la obra no está precisamente en el Distrito Federal, por considerar que los criterios de diseño ahí establecidos son de aplicación general.

Por lo anterior, se clasifica a la estructura como grupo A considerando que en el Título Sexto, artículo 174 del RCDF-97, se marcan las condiciones que se deben cumplir para que una estructura sea perteneciente al Grupo A o al Grupo B. A continuación se transcribe el mencionado artículo

*"Artículo 174.- Para los efectos de este Título las construcciones se clasifican en los siguientes grupos*

*I.- Grupo A.- Edificaciones cuya falla estructural podría causar la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas o culturales excepcionalmente altas, o que constituyan un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o explosivas, así como edificaciones cuyo funcionamiento es esencial a raíz de una emergencia urbana, como: hospitales, escuelas, terminales de transporte, estaciones de bomberos, centrales eléctricas y de telecomunicaciones, estadios, depósitos de sustancias inflamables o tóxicas; museos y edificios que alojen archivos y registros públicos de particular importancia, a juicio del Departamento y*

*II.- Grupo B - Edificaciones comunes destinadas a vivienda, oficinas y locales comerciales, hoteles y construcciones comerciales e industriales no incluidas en el Grupo A, las que se subdividen en*

*a) Subgrupo B1. Edificaciones de más de 30 m de altura o con más de 6,000 m<sup>2</sup> de área total construida, ubicadas en las zonas I y II a que se alude en el artículo 175, y*

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGUE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

*construcciones demás de 5m de altura o 3.000 m<sup>2</sup> de área total construida, en zona III; en ambos casos las áreas se refieren a un sólo cuerpo de edificio que cuente con medios propios de desalojo, (acceso y escaleras), incluyen las áreas de anexos, como pueden ser los propios cuerpos de escaleras. El área de un cuerpo que no cuente con medios propios de desalojo se adicionará a la de aquél otro a través del cual se desaloje. Además templos, salas de espectáculos y edificios que tengan: salas de reunión que puedan alojar más de 200 personas. y*

### **b) Subgrupo B2 – Las demás de este grupo <sup>10</sup>**

En este artículo, no se mencionan estructuras especiales de gran importancia y generalmente de alto costo como podrían ser los puentes y túneles, sin embargo, clasificaremos ésta estructura como concerniente al Grupo A, debido a que su falla provocaría una pérdida económica excepcionalmente alta y a que debe estar en funcionamiento permanente para evitar problemas de inundaciones como se vio en la introducción

### **3.2 Método de análisis empleado**

Dada la geometría de la estructura, es conveniente idealizarla de una manera más simple, subdividiéndola en formas geométricas sencillas como pueden ser polígonos de tres o cuatro lados y así poder emplear el método del elemento finito, el cual es ampliamente usado en la ingeniería estructural para analizar estructuras complejas por computadora para obtener desplazamientos, esfuerzos, deformaciones y vibraciones, por esto resulta ser el método más apropiado para el análisis de este tipo de estructuras

Un elemento finito es una representación matemática de una pieza o parte de la estructura, su fundamento principal es que sus miembros, aunque complejos, pueden ser representados por un número determinado de elementos finitos simples que vinculados forman una abstracción o modelo matemático que constituye la estructura completa. Están caracterizados por un grupo de nodos que delimitan sus condiciones de frontera y su

<sup>10</sup>Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Diario Oficial de la Federación, Junio 1997

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

geometría, por un conjunto de propiedades mecánicas que definen el comportamiento interno y por una serie de acciones externas como cargas aplicadas, vibraciones, esfuerzos, entre otros.

El método consiste en subdividir la estructura compleja en piezas pequeñas de formas sencillas, como pueden ser los elementos planos de tres o cuatro nodos. El tamaño de estos elementos puede ser tal, que los tramos alabeados podrán suponerse rectos en lugar de considerar la curvatura de la sección transversal del túnel. En consecuencia, el modelo matemático que se analiza será una aproximación de la estructura real y a medida que los elementos son cada vez más pequeños la idealización tiende a ser la real.

En la práctica, el tamaño de los elementos depende en gran parte de la exactitud que se requiera en la solución o de las zonas de mayor interés. En las regiones donde se presentan huecos o grandes curvaturas (de radios pequeños), es imperante tener una mayor exactitud debido a que el gradiente de esfuerzos es muy alto. Los esfuerzos presentarán una gran variación con respecto a la posición de los elementos finitos, es decir, hay concentración de esfuerzos en estas zonas puntuales pero su valor decrece rápidamente a medida que los elementos se alejan de los huecos o curvaturas muy pronunciadas. En estas áreas es aconsejable ubicar los elementos más pequeños posibles para que la solución de las ecuaciones tenga la precisión necesaria.

La exactitud del método depende principalmente de los siguientes factores:

- ┃ **Tamaño de los elementos:** A medida que las dimensiones de los lados de los elementos tienden a cero, la solución converge a la solución real y por lo tanto la precisión sería total.
- ┃ **La relación de aspecto:** En elementos triangulares se define como la razón de la dimensión del lado mayor a la dimensión del lado menor, en cuadriláteros como la razón entre la distancia más larga entre puntos medios de lados opuestos y la más corta. Se recomienda que esta relación sea cercana a la unidad o al menos menor que cuatro, pero no mayor que diez. Los elementos con relaciones de aspecto altas (elementos muy delgados o en forma de aguja) producen ecuaciones nodales mal condicionadas que pueden no tener solución en el conjunto de los números reales.

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO. DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

- **El número de nodos de cada elemento:** La estructura podrá dividirse en elementos planos triangulares o cuadriláteros en los que cada uno de sus lados necesita de al menos tres nodos para definirse. esto es con la finalidad de que la aproximación de las funciones empleadas en la solución puedan ser cuadráticas, completas e isoparamétricas en lugar de lineales

La formulación cuadrática completa e isoparamétrica se refiere a aquellos elementos en los que los puntos que definen su geometría, coinciden con los puntos de análisis del elemento finito, o bien los puntos en donde la integración numérica de las ecuaciones de solución nos darán los esfuerzos internos actuantes de dicho elemento y en los demás puntos dentro del elemento finito los esfuerzos se obtienen interpolando mediante una aproximación polinomial de segundo grado.

Expresado de otra manera más simple, son aquellos elementos en los cuales se utilizan las mismas funciones, tanto para definirlos como para la aproximación funcional de la solución.

- **Angulo interno de los elementos:** Los ángulos internos de los elementos poligonales (de tres o cuatro nodos) deberán ser menores a  $180^\circ$ , sin embargo, los mejores resultados para los cuadriláteros se obtienen cuando estos ángulos son cercanos a  $90^\circ$  o al menos dentro del rango de  $45^\circ$  a  $135^\circ$ .

Cabe mencionar que estos factores de exactitud son inherentes al método del elemento finito sin embargo existen otros hechos que pueden conducir a errores más graves en la solución y que en la practica son a menudo los mas comunes, como puede ser una mala aproximación de la geometría, la elección incorrecta de los parámetros elásticos de los materiales, la alimentación de datos erróneos a la computadora y en general descuidos de índole humana

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

### 3.3 Descripción del modelo matemático de la estructura

Las fuerzas internas y deformaciones producidas por las acciones de diseño se determinaron mediante un análisis estructural de esfuerzos plano en una sección plana representativa del túnel, mediante el uso del programa *SAP2000 NonLinear Version 7.40 (Copyright 1984-2000 Computers and Structures Inc.)*.

El túnel se modeló utilizando elementos tipo cascaron o "SHELL" (Según la propia nomenclatura del programa de análisis) de cuatro lados que simulan un estado plano de esfuerzos y deformaciones, considerando que es una estructura prismática de gran longitud se considera que puede asumirse que los efectos longitudinales del túnel pueden ser despreciables o de poca influencia.

Con estos elementos "SHELL" se formó una malla de elementos finitos con una apertura circular que representa el paso del túnel, las dimensiones generales y las condiciones de frontera se detallan en la figura 3.1.

La profundidad de la clave del túnel con respecto a la superficie del terreno es variable, sin embargo, la sección que se está analizando está situada en una zona profunda donde el material no es rocoso o que ejercería más presión sobre éste, al ser más deformable. En dicha sección, la clave del túnel se encuentra a 100 m de profundidad contados desde la superficie del terreno y su sección transversal es circular de 4 m de diámetro.

La sección transversal típica de casi todas las lumbreras es rectangular, cuyo lado largo mide 3 m y el corto 2 m.

TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

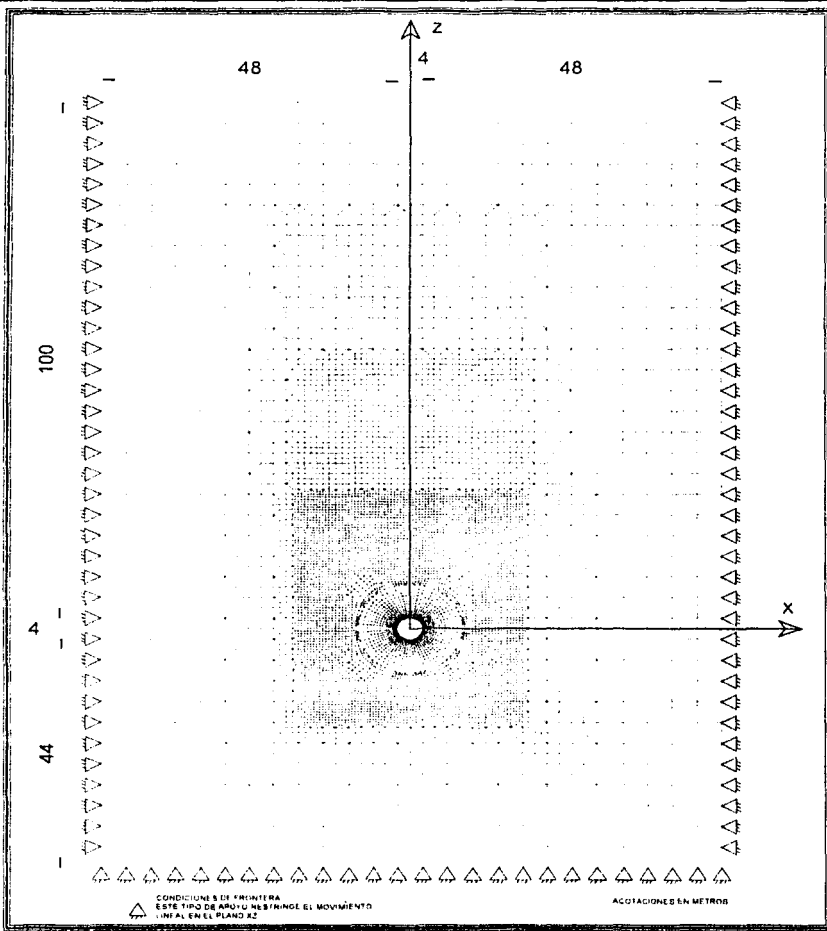


Figura 3.1 – Malla de elementos finitos y condiciones de frontera



TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.



RECUBRIMIENTO DE CONCRETO  
CICLOPEO 45 cm DE ESPESOR

Figura 3.2 – Detalle en zona de apertura

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

La discretización del recubrimiento del túnel en elementos finitos, se efectuó dividiendo el perímetro de la sección circular a cada  $5.625^\circ$ , esto es, aproximando la circunferencia a un polígono regular de 64 lados.

En todas las regiones del modelo se tomaron en cuenta las recomendaciones descritas con anterioridad sobre la precisión del método. Se cuidó que la relación de aspecto de todo elemento sea cercana a uno, la gran mayoría de ellos son cuadriláteros cuyos ángulos internos se encuentran dentro de los límites establecidos y los más pequeños se encuentran en la región de apertura del túnel; las tres primeras capas de elementos de 15 cm de espesor representan el recubrimiento existente de concreto ciclópeo existente del túnel y juntas forman el grosor completo que es de 45 cm, ver figura 3.2

Las condiciones de frontera en los límites laterales y en el fondo consideradas en el modelo, son tales que restringen los desplazamientos lineales en la dirección de los ejes globales X y Z, pero son libres al giro sobre el eje Y. Debido a que es un problema de esfuerzos en el plano, los desplazamientos longitudinales (sobre el eje Y) y los giros sobre los ejes X y Z son restringidos en toda la malla. La superficie del terreno es libre de todo movimiento en el plano y giro en el eje Y.

El modelo consta de 9595 puntos nodales que forman 9508 elementos tipo cascarón y junto con las condiciones de frontera impuestas, se empeararon en la solución un total de 28585 ecuaciones de equilibrio con el mismo número de incógnitas.

### 3.4 Materiales

Todos los materiales que se consideran en el modelo son medios homogéneos, es decir, que tienen las mismas propiedades físicas en todos sus puntos e isotrópicos o que en todas las direcciones tienen el mismo comportamiento mecánico.

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Otra de las hipótesis principales es que los materiales son elásticos lineales que se rigen por la ley de Hooke, en la cual, la deformación unitaria en cualquier dirección es directamente proporcional al esfuerzo en esa misma dirección que la produce.

Ley de Hooke:  $\sigma = E \cdot \epsilon$

Donde:

- $\sigma$ : Esfuerzo
- E: Módulo de Elasticidad o Módulo de Young
- $\epsilon$ : Deformación Unitaria

A los elementos que representan al suelo, se les asignó las mismas propiedades elásticas de este, mientras que los que constituyen el recubrimiento de concreto ciclópeo existente se asumieron con las características de este material.

Las propiedades de los materiales considerados en el modelo se describen a continuación:

Se considera en el modelo estructural que el concreto ciclópeo existente tiene las siguientes propiedades

**Resistencia a la compresión simple:**

$$f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$$

**Módulo de Elasticidad:**

$$E = 8000 \cdot f'c = 97980 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

**Relación de Poisson:**

$$\nu = 0.2$$

**Peso Volumétrico:**

$$\gamma = 2.2 \text{ ton/m}^3$$

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

El suelo que conforma el resto del modelo se estima que tiene las siguientes propiedades:

Módulo de Elasticidad:	$E = 1135 \frac{kg}{cm^2}$
Relación de Poisson:	$\nu = 0.3$
Peso Volumétrico:	$\gamma = 1.66 \text{ ton/m}^3$

### 3.5 Cargas de diseño

Las cargas que obran sobre el túnel en forma permanente son las presiones inducidas por el peso del suelo, el peso propio del recubrimiento y una sobrecarga de  $2 \text{ ton/m}^2$  actuando en la superficie del terreno

Sobre las paredes de las lumbreras actúan las presiones horizontales calculadas en el punto 2.4, además de su peso propio.

### 3.6 Interpretación de Resultados

Cada elemento finito tipo "SHELL" tiene sus propios ejes locales de coordenadas que se usan para definir las propiedades del material, cargas y resultados. Los ejes locales 1 y 2 se ubican en el plano del elemento. El eje local 3 es normal al plano en un sistema de coordenadas derecho. El eje local 1 se define por el vector en dirección del punto medio de la recta  $j_1-j_3$  al punto medio de la recta  $j_2-j_4$ . El eje local 2 se define como el producto cruz de los ejes locales 1 y 3 como se muestra en la figura 3.3.

La interpretación de los resultados producidos por el programa en cada uno de los elementos que componen el modelo estructural, se define en la figura 3.3. De acuerdo con esta definición, un valor positivo de los esfuerzos normales indica que el elemento está sometido

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

a tensión y un valor negativo se interpreta como compresión. Las fuerzas se calculan por unidad de longitud en el plano. La convención de signos para los esfuerzos y las fuerzas internas se muestran en la figura 3.4.

Las fuerzas internas en los elementos SHELL corresponden a la integración de los esfuerzos en la sección de la placa sobre su espesor (ver SAP2000, Vol. 1, Pág. 198) y están dadas como fuerzas y momentos por unidad de longitud, como se indica a continuación:

Fuerzas directas de membrana

$$F_{11} = \int_{-th/2}^{th/2} \sigma_{11} dx$$

$$F_{22} = \int_{-th/2}^{th/2} \sigma_{22} dx$$

Fuerzas de cortante de membrana

$$F_{12} = \int_{-th/2}^{th/2} \sigma_{12} dx$$

Momentos flexionantes de placa

$$M_{11} = \int_{-thb/2}^{thb/2} t \sigma_{11} dx$$

$$M_{22} = \int_{-thb/2}^{thb/2} t \sigma_{22} dx$$

Momentos de torsión de placa

$$M_{12} = \int_{-thb/2}^{thb/2} t \sigma_{12} dx$$

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Fuerzas cortantes transversales de placa

$$V_{13} = \int_{-th/2}^{th/2} t\sigma_{13}dx$$

$$V_{23} = \int_{-th/2}^{th/2} t\sigma_{23}dx$$

Donde la variable  $x$  representa la coordenada en el espesor de la placa, medida a partir de la sección media del elemento y los números 1, 2 y 3 se refieren a los ejes locales.

TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

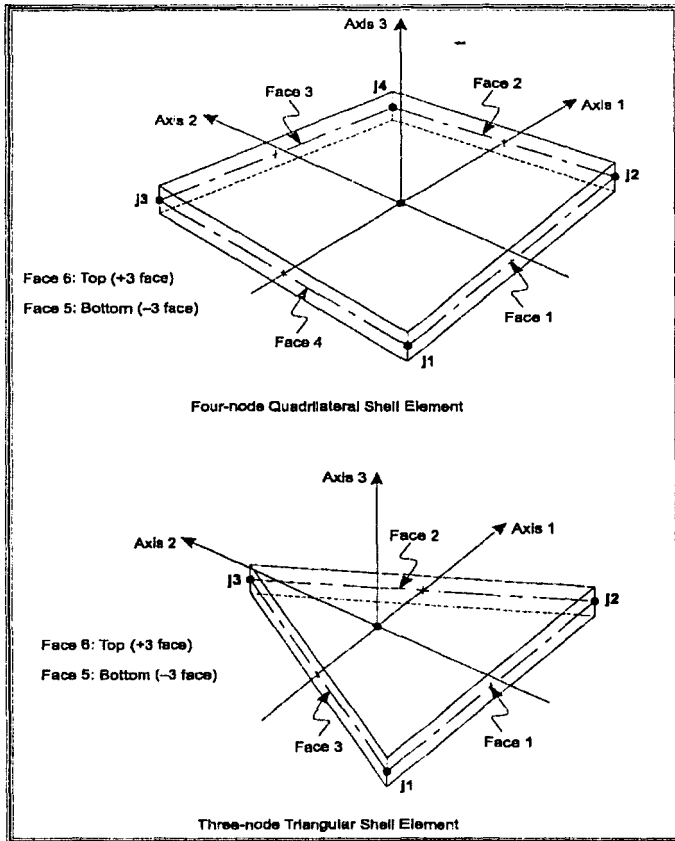


Figura 3.3 – Definición de Elementos Tipo "Shell" para cuatro y tres nodos<sup>3</sup>

<sup>3</sup> SAP2000 Analysis Reference, Vol. 1, Pág. 181

TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

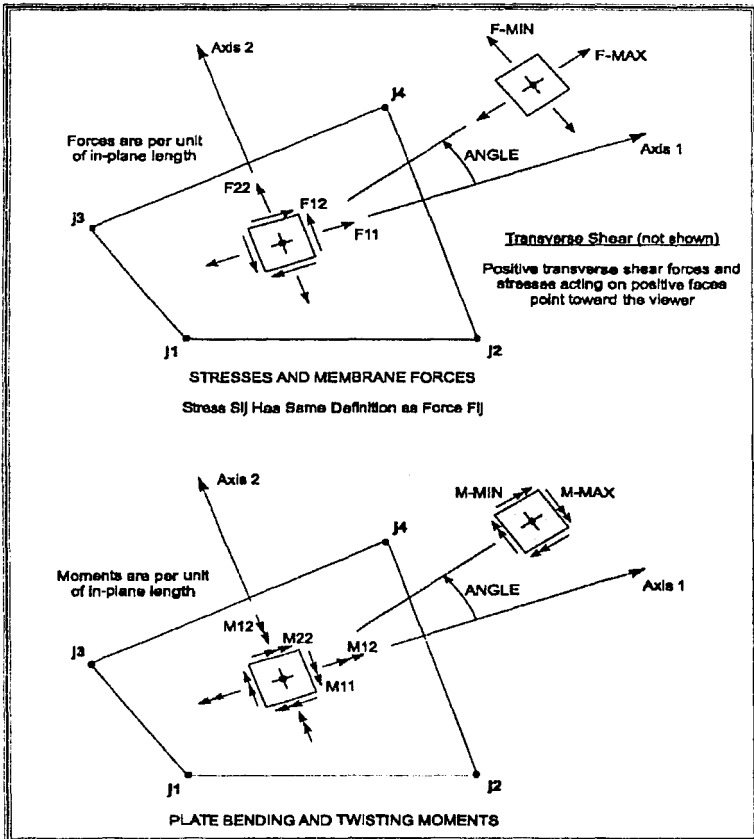


Figura 3.4 – Direcciones de Fuerzas y Momentos en Elementos Finitos Tipo "Shell"<sup>4</sup>

<sup>4</sup> SAP2000 Analysis Reference, Vol. 1, Pág. 200



## TESIS PROFESIONAL

ANÁLISIS GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Por claridad de las figuras, únicamente se presentan los resultados del análisis en el recubrimiento primario del túnel y no así en toda la malla de elementos finitos.

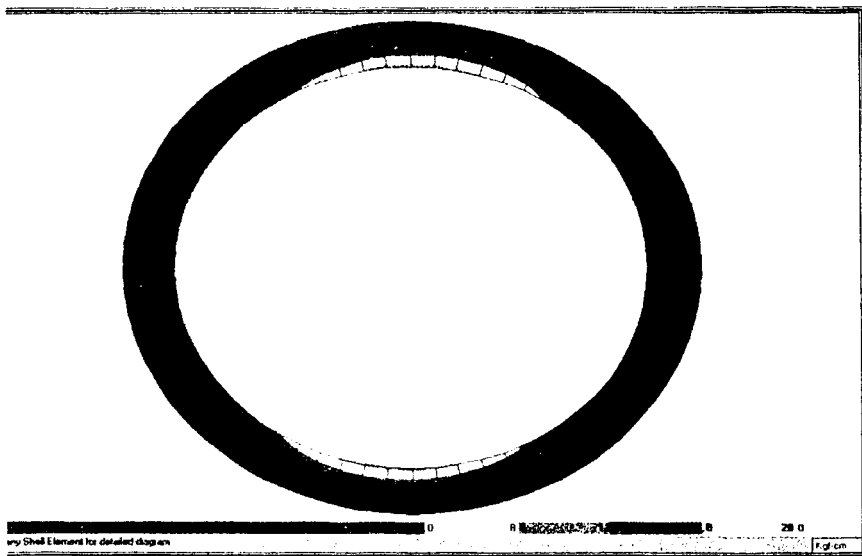


Figura 3.5 – Diagrama de esfuerzos radiales, S11

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

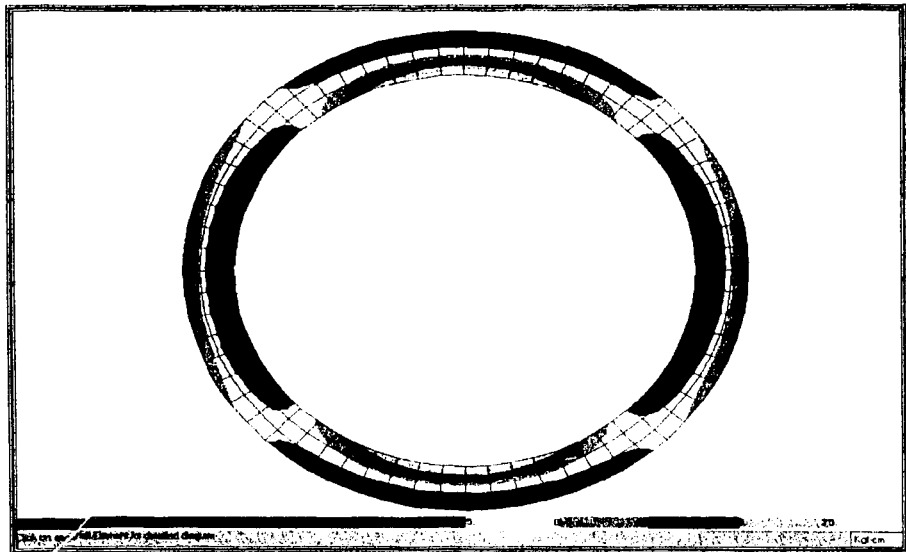
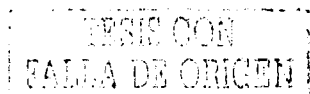


Figura 3.6 – Diagrama de esfuerzos circunferenciales, S22

Con los valores obtenidos de estas figuras y empleando las ecuaciones para las fuerzas internas de los elementos, se pueden inferir los diagramas de elementos mecánicos del recubrimiento por unidad de longitud del túnel, a saber, momento flexionante, fuerza cortante y fuerza axial. Estos cálculos se plasman en la tabla 3.1 y posteriormente se utilizan para dibujar dichos diagramas.



# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

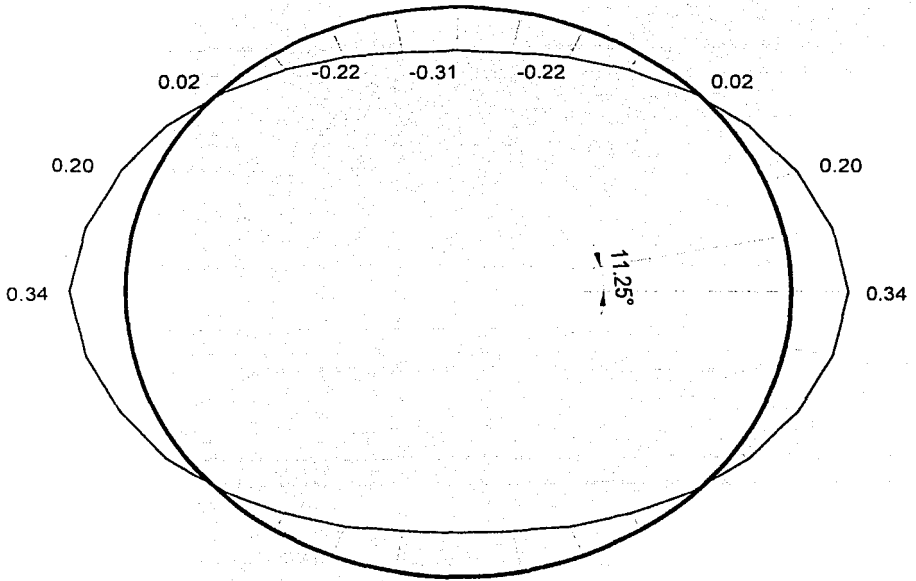
Tabla 3.1. Cálculo de Elementos Mecánicos

	S <sub>1</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	S <sub>2</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	H <sub>1</sub> (cm)	d <sub>1</sub> (cm)	Z <sub>1</sub> (cm)	F <sub>1</sub> (kg)	F <sub>2</sub> (kg)	(ton)	(ton)		
0 00	51.39	-148.44	11.57	33.43	18.64	-11.36	297.38	-2480.99	0.00	-2.18	0.34
11.25	40.51	-133.95	10.45	34.55	19.02	-10.98	211.68	-2314.02	0.32	-2.10	0.29
22.50	19.73	-96.03	7.67	37.33	19.94	-10.06	75.67	-1792.42	0.45	-1.72	0.20
33.75	0.92	-56.43	0.72	44.28	22.26	-7.74	0.33	-1249.42	0.48	-1.25	0.10
45.00	-23.72	-14.61	117.15	-72.15	-16.55	-46.55	-1389.19	526.95	0.52	-0.86	-0.02
56.25	-48.51	27.49	28.72	16.28	12.93	-17.07	-696.67	223.71	0.48	-0.47	-0.13
67.50	-69.39	63.26	23.54	21.46	14.65	-15.35	-816.72	678.74	0.36	-0.14	-0.22
78.75	-82.93	86.77	21.99	23.01	15.17	-14.83	-911.84	998.20	0.19	0.09	-0.29
90.00	-86.80	93.98	21.61	23.39	15.30	-14.70	-937.80	1099.21	0.00	0.16	-0.31
101.25	-82.93	86.77	21.99	23.01	15.17	-14.83	-911.84	998.20	0.19	0.09	-0.29
112.50	-69.39	63.26	23.54	21.46	14.65	-15.35	-816.72	678.74	0.36	-0.14	-0.22
123.75	-48.51	27.49	28.72	16.28	12.93	-17.07	-696.67	223.71	0.48	-0.47	-0.13
135.00	-23.72	-14.61	117.15	-72.15	-16.55	-46.55	-1389.19	526.95	0.52	-0.86	-0.02
146.25	0.92	-56.43	0.72	44.28	22.26	-7.74	0.33	-1249.42	0.48	-1.25	0.10
157.50	19.73	-95.03	7.67	37.33	19.94	-10.06	75.67	-1792.42	0.45	-1.72	0.20
168.75	40.51	-133.95	10.45	34.55	19.02	-10.98	211.68	-2314.02	0.32	-2.10	0.29
180.00	51.39	-148.44	11.57	33.43	18.64	-11.36	297.38	-2480.99	0.00	-2.18	0.34
191.25	40.51	-133.95	10.45	34.55	19.02	-10.98	211.68	-2314.02	0.32	-2.10	0.29
202.50	19.73	-96.03	7.67	37.33	19.94	-10.06	75.67	-1792.42	0.45	-1.72	0.20
213.75	0.92	-56.43	0.72	44.28	22.26	-7.74	0.33	-1249.42	0.48	-1.25	0.10
225.00	-23.72	-14.61	117.15	-72.15	-16.55	-46.55	-1389.19	526.95	0.52	-0.86	-0.02
236.25	-48.51	27.49	28.72	16.28	12.93	-17.07	-696.67	223.71	0.48	-0.47	-0.13
247.50	-69.39	63.26	23.54	21.46	14.65	-15.35	-816.72	678.74	0.36	-0.14	-0.22
258.75	-82.93	86.77	21.99	23.01	15.17	-14.83	-911.84	998.20	0.19	0.09	-0.29
270.00	-86.80	93.98	21.61	23.39	15.30	-14.70	-937.80	1099.21	0.00	0.16	-0.31
281.25	-82.93	86.77	21.99	23.01	15.17	-14.83	-911.84	998.20	0.19	0.09	-0.29
292.50	-69.39	63.26	23.54	21.46	14.65	-15.35	-816.72	678.74	0.36	-0.14	-0.22
303.75	-48.51	27.49	28.72	16.28	12.93	-17.07	-696.67	223.71	0.48	-0.47	-0.13
315.00	-23.72	-14.61	117.15	-72.15	-16.55	-46.55	-1389.19	526.95	0.52	-0.86	-0.02
326.25	0.92	-56.43	0.72	44.28	22.26	-7.74	0.33	-1249.42	0.48	-1.25	0.10
337.50	19.73	-96.03	7.67	37.33	19.94	-10.06	75.67	-1792.42	0.45	-1.72	0.20
348.75	40.51	-133.95	10.45	34.55	19.02	-10.98	211.68	-2314.02	0.32	-2.10	0.29
360.00	51.39	-148.44	11.57	33.43	18.64	-11.36	297.38	-2480.99	0.00	-2.18	0.34



# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

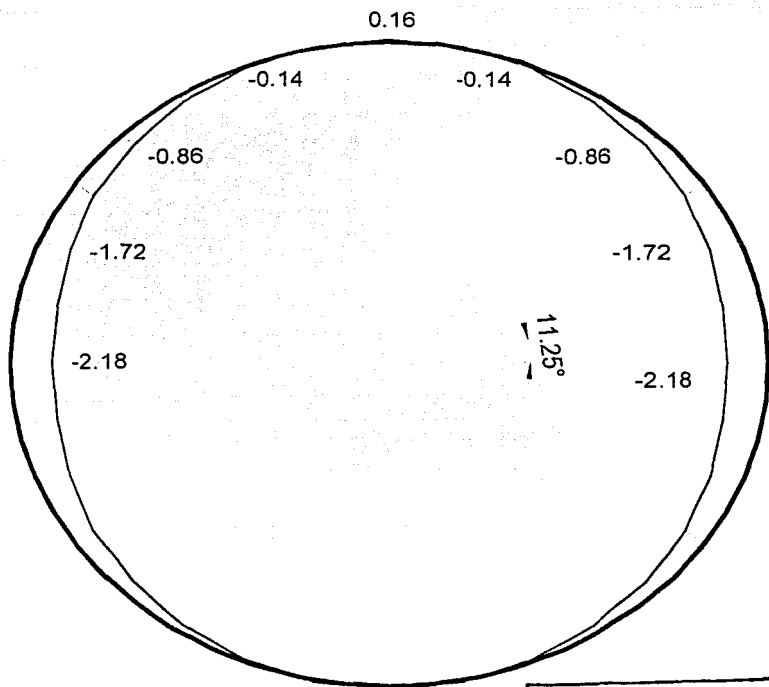


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.7 – Diagrama de Momento [Ton-m]

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.8 – Diagrama de Carga Axial [Ton]

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

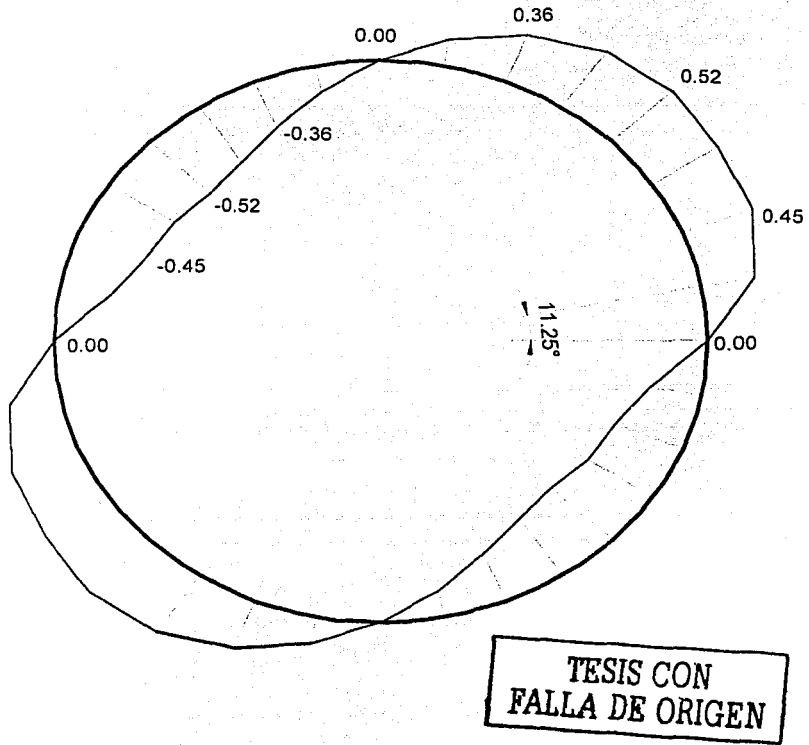


Figura 3.9 – Diagrama de Fuerza Cortante [Ton]

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

### 3.7 Análisis de la Lumbraera

El modelo de análisis de la lumbraera consiste en un tramo de longitud unitaria, como se puede ver en la figura 3.10. Las propiedades de los materiales de las paredes de mampostería son las mismas que para el túnel y la sección que se analizó coincide con el sitio dónde la presión radial del terreno sobre la lumbraera toma un valor máximo, esto sucede aproximadamente a 100 m de profundidad justo antes de la unión con el túnel. El valor que adquiere la carga sobre el túnel es de 2.78 ton/m<sup>2</sup> como se puede ver en el subcapítulo 2.4.

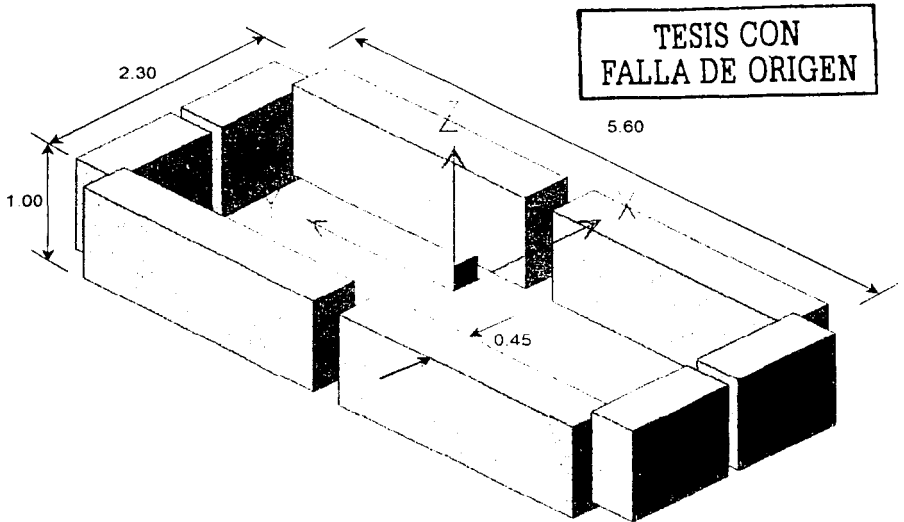
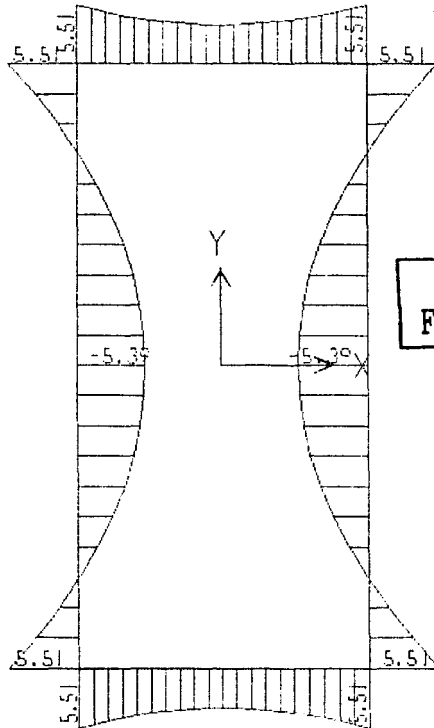


Figura 3.10 – Geometría del Modelo de Análisis de la Lumbraera

Con estos datos se realiza el análisis estructural de la lumbraera y se obtienen los siguientes diagramas de elementos mecánicos.

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.11 – Diagrama de Momento [Ton-m]



# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

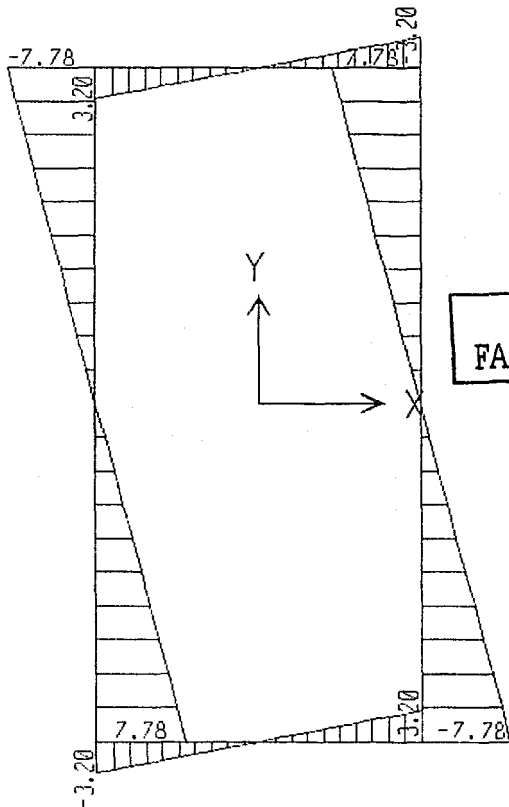


Figura 3.12 – Diagrama de Cortante [Ton]

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

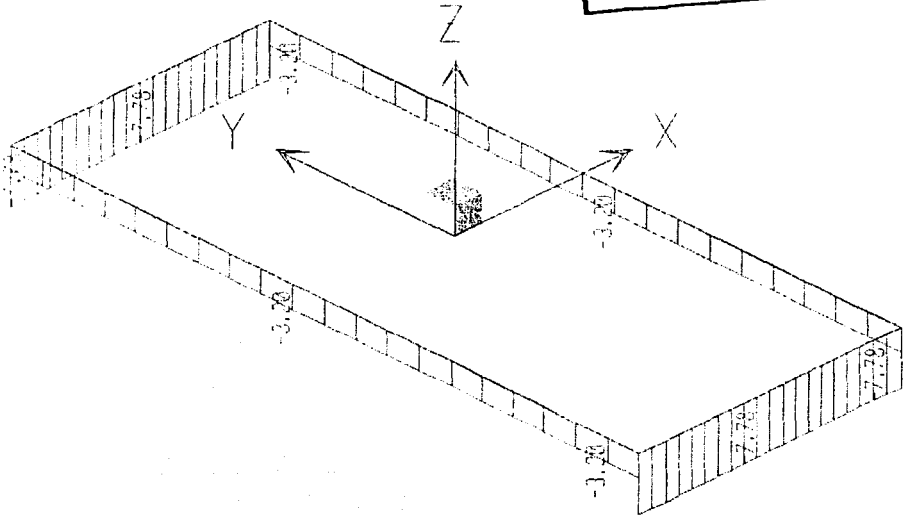


Figura 3.13 – Diagrama de Fuerza Axial [Ton]

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

---

---

## 4. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL REVESTIMIENTO

---

---

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

El proceso de diseño estructural comprende varias actividades que determinan tanto las características generales como las de detalle de una estructura, es decir, se establecen las dimensiones y la forma que tendrá.

En esta etapa, el desarrollo creativo de un proyecto particular hará que el sistema estructural funcione de la manera más óptima. "El objetivo de un sistema estructural es resistir las fuerzas a las que va a estar sometido, sin colapso o mal comportamiento"<sup>5</sup>. La parte fundamental de esta etapa considera tres aspectos principales, mencionados de manera enunciativa más no limitativa, a saber: la estructuración, el análisis y el dimensionamiento.

Cabe aclarar que la finalidad de cualquier estructura no es su resistencia en sí, sino que se construyen para alguna función específica pero, llevan de manera implícita la condición substancial de mantener sus características y aspecto hasta el término de su vida útil. La resistencia es imprescindible, sin embargo no es el único fin que se pretende lograr, sino que además debe prestar algún servicio útil para los usuarios

En la actualidad las técnicas empleadas en el diseño estructural han experimentado mejoras y un nivel de refinamiento mayor como resultado directo de la gran cantidad de programas para computadora que existen. Estos han hecho que las tareas más difíciles y entretenidas se lleven a cabo con gran facilidad en pocos segundos; además de que pueden tomar en cuenta otras consideraciones especiales de los materiales de diseño como el hecho de que estos no tengan un comportamiento lineal o que no siguen la ley de Hooke, el comportamiento dinámico y la interacción de la estructura con el terreno de apoyo.

---

<sup>5</sup> Meli, Piralla R.: "Diseño Estructural", Edit. LIMUSA, 2ª Ed., México 2000, Pág. 21

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

## 4.1 Criterio de diseño estructural

El diseño estructural del revestimiento se hace basado en el criterio de **Estado Limite de Falla**, el cuál consiste en comparar la resistencia nominal de cualquier elemento, afectado por un factor de reducción de resistencia, contra la acción o acciones últimas que tengan que ser soportadas por dicho elemento, afectado por un factor de carga. Este criterio se puede resumir mediante la siguiente desigualdad:

$$F_R R_N \geq F_C A_N$$

Donde:

- R<sub>N</sub>: Resistencia Nominal
- F<sub>R</sub>: Factor de Reducción de Resistencia
- A<sub>N</sub>: Acción Nominal (Carga axial, Cortante, Momento, etc.)
- F<sub>C</sub>: Factor de Carga

Bajo este criterio, los factores de reducción de resistencia son siempre menores que 1, mientras que los factores de carga son generalmente mayores a la unidad.

En el artículo 183 del RCDF se define el estado limite de falla como:

*Artículo 183.— Se considerará como estado limite de falla cualquier situación que corresponda al agotamiento de la capacidad de carga de la estructura o de cualesquiera de sus componentes, incluyendo la cimentación, o al hecho de que ocurran daños irreversibles que afecten significativamente la resistencia ante nuevas aplicaciones de carga. Las Normas Técnicas Complementarias establecerán los estados limite de falla más importantes para cada material y tipo de estructura.*<sup>6</sup>

Se revisaron los estados limites de servicio, entendidos como la ocurrencia de combinaciones de esfuerzos correspondientes a acciones normales de operación, que no produjeran desplazamientos, agrietamientos, deterioro o vibraciones que afecten el correcto funcionamiento del túnel y lumbrera.

<sup>6</sup> Op. Cit., pag 29

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

El recubrimiento de lumbrera y túnel, constituido por concreto ciclópeo, debe ser capaz de aceptar los esfuerzos de tensión y compresión dentro de su rango elástico, de no ser así, se mejorará incrementándolo con una capa de concreto lanzado reforzado con fibras metálicas.

La resistencia media a tensión por flexión o módulo de rotura del concreto se define en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCDCEC-95) del RCDF-97 como:

$$f_t = 2 f_c' \quad \text{Clase 1}$$

$$f_t = 1.4 f_c' \quad \text{Clase 2}$$

Para diseño, debe emplearse un valor nominal definido por:

$$f_t^* = 0.75 f_t$$

En el diseño de las estructuras se considera la acción de las cargas permanentes, las cuales actúan en forma continua sobre la estructura y cuya intensidad varía poco con el tiempo, a este tipo de acciones corresponden la carga muerta y el empuje estático de tierras o líquidos. También se supuso una sobrecarga en la superficie del terreno, que a pesar de ser variable se estimó un valor máximo probable. El cálculo de los empujes sobre las lumbreras y túneles se indicó en el Capítulo 2

La seguridad de la estructura se verificó para el efecto combinado de todas las acciones con probabilidad no despreciable de ocurrir simultáneamente. Se empleó la siguiente combinación de carga:

$$F_c(CM + E_s + S_c)$$

donde:

- CM : Carga Muerta
- E<sub>s</sub> : Empuje de Suelo (en condición seca o húmeda)
- S<sub>c</sub> : Sobrecarga en la Superficie del Terreno
- F<sub>c</sub> : Factor de carga, igual a 1.5

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO. DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

### 4.2 Concreto lanzado con fibras de acero (shotcrete)

El término "shotcrete" es un nombre genérico introducido en 1930 por la *American Railway Engineering Association*, sin embargo, el *American Concrete Institute (ACI)* no adoptó el término sino hasta 1945. Proviene de la combinación de dos palabras del idioma inglés, *shot* (lanzar) y *concrete* (concreto), por lo que su definición literal sería "lanzar concreto" o "concreto lanzado".

El ACI define el concreto lanzado como un mortero o concreto transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie. Dicha superficie puede ser concreto, piedra, terreno natural, mampostería, acero, madera, poliestireno, etc. A diferencia del concreto habitual, que se coloca y luego se compacta en una segunda operación (vibrado), el concreto lanzado se coloca y se compacta al mismo tiempo, debido a la fuerza con que se proyecta desde la boquilla de la pistola lanzadora. El concreto conducido a través de tubería de acero y que no se proyecta ni transporta a altas velocidades se conoce como concreto bombeado.

Si la mezcla que se va a lanzar cuenta sólo con agregados finos, se le llama mortero lanzado, y si los agregados son finos y gruesos se le nombra concreto lanzado. Por otra parte, el concreto con agregado fino es conocido como "gunite", y cuando incluye agregado grueso, como shotcrete, aunque también se llama gunite al concreto lanzado por la vía seca, y shotcrete al concreto lanzado por la vía húmeda.

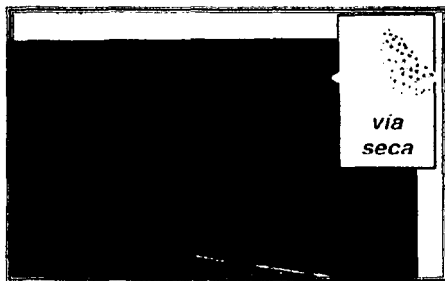
El concreto lanzado puede clasificarse en dos tipos, según su forma de aplicación:

- **Proceso de mezcla seca:** En este método se mezclan todos los componentes, a excepción del agua, la cuál se agrega en la boquilla. El cemento más empleado es el Portland normal, aunque pueden usarse también cementos de alta resistencia, fraguado rápido o resistentes a los sulfatos, este se mezcla con la arena primero y se almacena en un recipiente mecánico presurizado por aire llamado "lanzador", posteriormente se inyecta en una manguera de descarga que transporta la mezcla a

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

través de esta hacia una boquilla especial. En la boquilla se atomiza el agua bajo presión, consiguiéndose así una mezcla lista para lanzarse. Por último el concreto humedecido sale de la boquilla lanzado a gran velocidad sobre la superficie en que va a colocarse. Ver figura 4.1.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.1 – Proceso de mezcla seca

- ❑ **Proceso de mezcla húmeda:** En este proceso se incorporan previamente todos los componentes del concreto, incluyendo el agua, y se almacena la mezcla en un recipiente que esta conectado al equipo de lanzamiento. La mezcla es repartida a las mangueras, las cuales la conducen por aire comprimido hasta la boquilla por donde sale para ser colocado en su posición final. Ver figura 4.2.

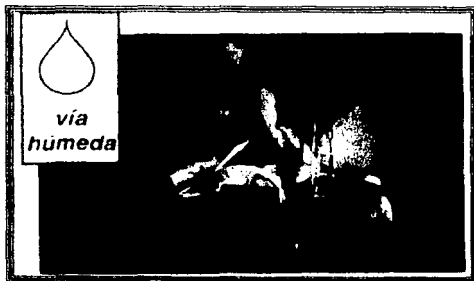


Figura 4.2 - Proceso de mezcla húmeda



## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

En casi todas las aplicaciones, el método a elegir se determina por cuatro elementos: existencia de materiales y equipo, economía, acceso a la obra, así como por la habilidad y predirección del contratista. Sin embargo, cualquiera de los dos métodos puede ser empleado indistintamente, la tabla 4.1 muestra una comparación entre ambos.

Tabla 4.1- Comparación entre los procesos de mezclado

Proceso de mezcla seca	Proceso de mezcla húmeda
1. Control instantáneo del agua y consistencia de la mezcla en la boquilla para conocer las condiciones variables de campo.	1. El agua de mezclado se controla en el equipo de entrega y puede ser dosificada con mayor precisión.
2. Mejor compatibilidad para mezclas en el lugar que contengan agregados de peso ligero, materiales refractarios y concreto lanzado que requiera de altas resistencias a temprana edad	2. Mejor seguridad de que el agua es mezclada minuciosamente con los otros ingredientes.
3. Capaz de ser transportado largas distancias	3. Menos polvo y pérdida de cemento.
4. Las características de arranque y paro de colocación son mejores con un gasto mínimo y flexibilidad de instalación.	4. Normalmente tiene menos rebote de material por lo que la pérdida resulta menor.
5. Competente con altas resistencias	5. Competente en grandes producciones.

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

El concreto lanzado ha evolucionado enormemente, estos son algunos de los hechos más representativos de su historia:

- 1895: Desarrollo de la pistola original de cemento (Chicago, EUA)
- 1907: Invento del rociado de concreto y mortero a alta velocidad por el doctor Carl E. Akeley
- 1910: Patente en Estados Unidos. Registro del nombre gunito por la Cement Gun Co. de Allentown, PA
- 1920: Patente en Alemania
- 1930: Introducción del nombre genérico de shotcrete por la American Railway Engineering Association
- 1940: Uso inicial de agregado grueso en concreto lanzado
- 1945: Adopción del término shotcrete por el ACI
- 1950: Creación del Comité ACI 506 Desarrollo de la pistola tipo rotatoria en Michigan
- 1955: Introducción del método de vía húmeda
- 1970: Primer uso práctico de concreto lanzado con fibra de acero por el US Army Corps of Engineers
- 1975: Primer uso de concreto lanzado con microsilica en Noruega
- 1980: Primer uso de microsilica en Norteamérica (Vancouver, BC) Introducción de mezclas preembolsadas
- 1985: Primer uso de aire incluido en concreto lanzado vía seca
- 1998: Formación de la American Shotcrete Association

A pesar de ser una tecnología con más de cien años de existencia, es en la actualidad que se la ha dado mayor difusión como consecuencia de la búsqueda de nuevas tecnologías y soluciones cada vez más económicas a problemas comunes de la industria de la construcción. Hoy en día, las aplicaciones del concreto lanzado son muy variadas y entre las más comunes podríamos enlistar las siguientes:

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

- Estabilización de taludes y muros de contención
- Refuerzo estructural
- Túneles y minas
- Concreto refractario para chimeneas, hornos y torres
- Tanques, cisternas, silos y en general todo tipo de depósitos para líquidos o semillas
- Albercas y lagos artificiales
- Rocas artificiales
- Canales y drenajes
- Recubrimiento sobre panel de poliestireno
- Muelles, diques y represas
- Paraboloides, domos geodésicos y cascarones

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Las siguientes figuras muestran el uso del concreto lanzado en diferentes partes del mundo.



**Figura 4.3 – Estabilización de talud en Wakayama, Japón**

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.4 – Línea de tren subterráneo en Lyon, Francia

Los beneficios que brinda el concreto lanzado, entre otros, es prescindir de cimbras, admite el diseño de formas libres; es altamente impermeable, se pueden conseguir concretos de gran resistencia, adhesividad y durabilidad, las grietas por temperatura son más controlables, el acabado y coloración puede ser de cualquier tipo, ésta técnica se puede llevar a lugares de difícil acceso que pueden alcanzarse hasta 300 m horizontales y 100 m verticales, se adapta mejor al contorno natural evitando así la presencia de oquedades y en estructuras de pared delgada encuentra su uso ideal.

Existe la posibilidad de introducir un refuerzo al concreto lanzado basado en fibras, ésta es una técnica empleada ancestralmente. Al principio, aún antes de la invención del concreto lanzado, los materiales de construcción se mejoraron con fibras naturales como la paja, aprovechada para la fabricación de ladrillos de adobe secados al sol o crines de caballo usados como refuerzo del mortero para mampostería y yeso. En tiempos más recientes se ha empleado la fibra de asbesto mezclada en una matriz de cemento, con este material se han fabricado comercialmente muchos productos como tubería hidráulica y sanitaria y tinacos, sin embargo, este material dejó de emplearse en la Unión Americana a partir de la

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

década de los sesentas debido principalmente a riesgos en la salud asociados con estas fibras y nuevos tipos alternativos de fibras fueron introducidos.

El concreto lanzado puede reforzarse también con malla electrosoldada de acero o con varillas. otra posibilidad es añadirle pequeñas fibras delgadas de acero que se colocan desde que se inicia la producción del concreto como un agregado extra, estas fibras sustituirán a los emparrillados de varillas o malla.

Al agregarle fibras al concreto se mejoran sus características físicas. en tensión falla solo hasta que las fibras se rompen y son sacadas de la matriz de concreto, su capacidad para deformarse (absorber energía) es mayor por lo que aumenta su ductilidad, resiste mejor los impactos, resistencia a la fatiga y en un pequeño grado la resistencia a compresión. El incremento de estas propiedades puede variar desde substancial hasta ser despreciable dependiendo de la cantidad y tipo de fibras usadas, su tamaño, resistencia y configuración.

Las fibras para el concreto lanzado pueden ser hechas de acero, vidrio, materiales sintéticos y naturales. Las mas comúnmente empleadas son las fibras metálicas y las de polipropileno, nuestro estudio se centra únicamente en las fibras metálicas.

Un parámetro empleado para caracterizar las fibras es su relación de aspecto, definida como la longitud de la fibra dividida entre su diámetro, cuando la sección transversal de la fibra no es circular (cuadrada o semicircular) se emplea el diámetro equivalente de un círculo que tenga la misma área

Las relaciones de aspecto típicas varían en rangos que van desde 30 hasta 150 para dimensiones de longitud de 6 a 75 mm. Para concreto lanzado las dimensiones comunes son de 20 a 40 mm. Los diámetros usuales en fibras de acero van desde 0.25 hasta 40 mm. En la especificación norteamericana ASTM A 820 se definen las propiedades requeridas por las fibras de acero, esta norma establece como mínimo esfuerzo de fluencia para el acero de las fibras de 3450 kg/cm<sup>2</sup> mientras que en otras especificaciones se establece 5520 kg/cm<sup>2</sup> como mínimo

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

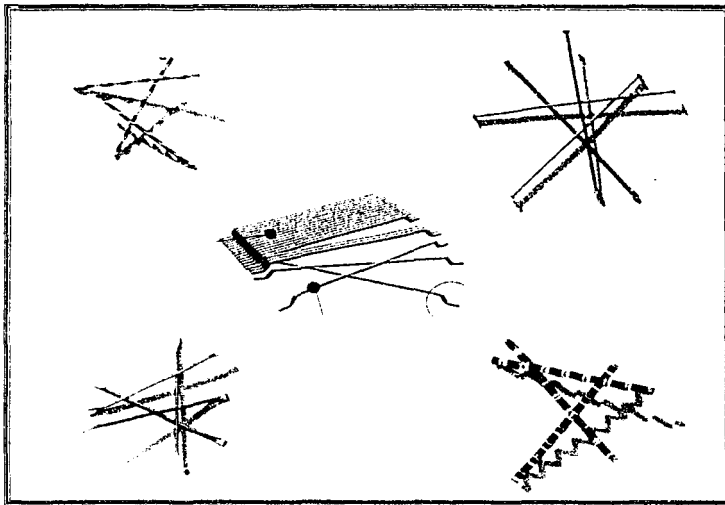


Figura 4.5 – Tipos diferentes de fibras comerciales

Las dosificaciones de fibra metálica se recomienda que este entre el 0.5 al 2% del volumen total de la mezcla como máximo. Mezclas que contienen mas del 2% del volumen de fibras son poco manejables

En cuanto a sus propiedades mecánicas se puede mencionar que su resistencia a la compresión a los 28 días puede alcanzar valores desde 200 a 480 kg/cm<sup>2</sup> con relaciones agua-cemento de 0.30 a 0.50 cuando se usa el proceso de mezclado en seco y de 0.40 a 0.55 con el proceso de mezcla húmeda. se recomienda que para mezclas con una resistencia superior a los 350 kg/cm<sup>2</sup> sean especificadas únicamente para trabajos cuidadosamente ejecutados y supervisados

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

El efecto de las fibras de acero en la resistencia a la compresión es variable, varía desde ser insignificante hasta un 23% para un concreto con 2% de volumen de fibras con relación de aspecto de 100. Ver figuras 4.6 y 4.7.

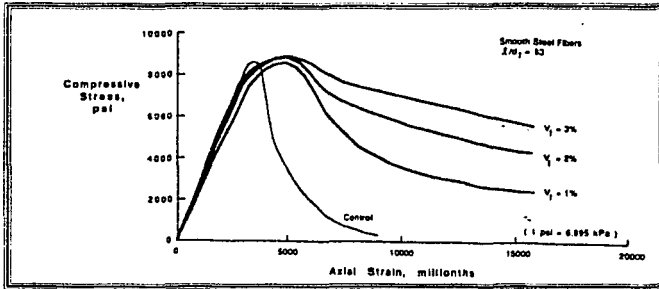


Figura 4.6 – Influencia de la cantidad de fibra sobre la resistencia a compresión

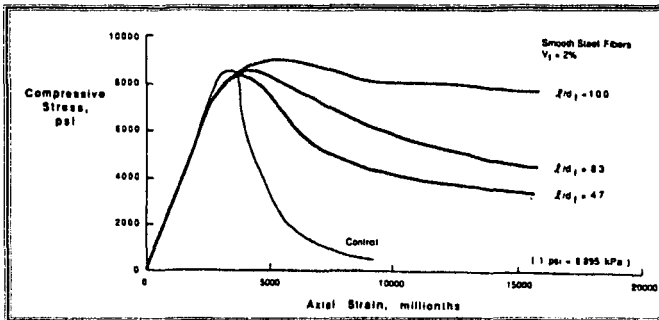


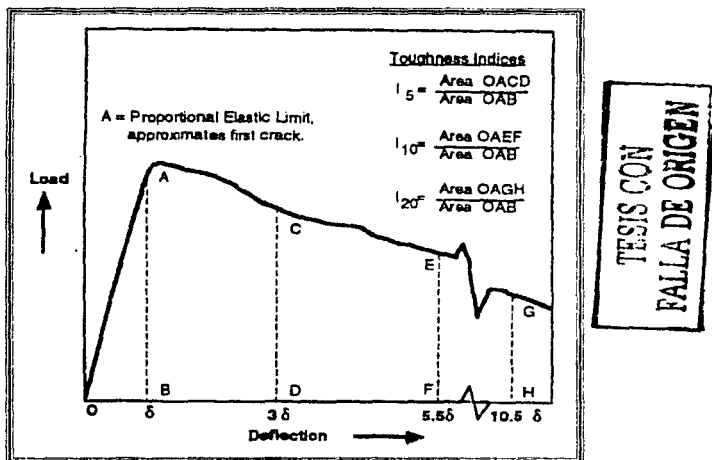
Figura 4.7 – Influencia de la relación de aspecto sobre la resistencia a compresión, para un volumen de fibra fijo del 2%

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MEXICO.

La dureza es una medida de la capacidad de absorber energía durante la deformación y representa el área bajo la curva esfuerzo-deformación. Esta variable puede verse favorecida cuando el concreto se refuerza con fibras de acero ya que su comportamiento cambia ante la falla debido a que aumenta su ductilidad. La dureza mejorada por la presencia de fibras es útil para prevenir fallas repentinas bajo cargas estáticas y absorber energía bajo cargas dinámicas. La figura 4.8 indica el método para calcular la dureza según la norma ASTM C 1018.



**Figura 4.8 – Gráfica esquemática esfuerzo-deformación y parámetros de dureza**

En tensión directa aún no existe un método estandarizado de prueba que determine la curva esfuerzo-deformación del concreto reforzado con fibras de acero. Las curvas que existen actualmente dependen del tamaño del espécimen, del método de prueba, rigidez de la máquina de ensaye, longitud del dispositivo de medición de deformaciones (*strain gage*).





## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

La resistencia en tensión directa va desde los 20 a 40 kg/cm<sup>2</sup>, sin embargo, su dureza puede ser del orden de 1 a 2 veces mayor en magnitud.

El ACI propone la siguiente ecuación, como resultado del análisis de la parte descendiente de la curva esfuerzo-deformación, para calcular la resistencia a tensión del concreto reforzado con fibras, ver figura 4.10.

$$\sigma_t = \alpha r l_f \frac{f_c}{d_f}$$

donde:

$$\alpha r = 46.37 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$\sigma_t$  : Esfuerzo de tensión

$r$  : Esfuerzo cortante interfacial

$\alpha$  : Factor de eficiencia

$l_f$  : Longitud de la fibra

$d_f$  : Diámetro de la fibra

$V_f$  : Fracción del volumen de fibra

La influencia de las fibras de acero en la resistencia a flexión es mayor que para la tensión directa y compresión. En los ensayos a flexión de vigas de concreto reforzado con fibras, comúnmente se reportan dos valores, uno que corresponde al valor cuando aparece la primera grieta y corresponde al pico de la curva esfuerzo deformación, a partir de este valor la gráfica deja de ser lineal. El otro valor se relaciona con la máxima carga soportada por el espécimen, normalmente se le conoce como resistencia última a flexión o módulo de ruptura.

La resistencia última a flexión generalmente incrementa en relación con la concentración de fibras y su relación de aspecto  $l/d$ . Concentraciones menores al 0.5% y relaciones de aspecto bajas (menores a 50) tienen un efecto despreciable sobre las propiedades de resistencia bajo cargas estáticas.

Las mas altas resistencias a flexión son más fáciles de alcanzar en concretos con relación agua-cemento de 0.45 a 0.55, reportando valores de 65 a 100 kg/cm<sup>2</sup> para una concentración de fibras del 1.5% pudiendo alcanzar hasta 130 kg/cm<sup>2</sup> con una concentración del 2.5% dependiendo del tipo de fibra y su relación de aspecto.

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

La contracción por secado del concreto lanzado varía según las proporciones de la mezcla, normalmente esta en el rango del 0.06 al 0.10%. El peso por unidad de volumen de un buen concreto lanzado usualmente oscila entre 2230 y 2390 kg/cm<sup>3</sup> muy similar al concreto normal. El módulo de elasticidad generalmente cae entre 170x10<sup>3</sup> a 410x10<sup>3</sup> kg/cm<sup>2</sup>.

### 4.3 Revisión y diseño estructural del revestimiento del túnel

El concreto lanzado que se empleará para las reparaciones tendrá una resistencia a la compresión simple a los 28 días de  $f'c=250$  kg/cm<sup>2</sup>, elaborado con cemento tipo CPO 30 RS (cemento pórtland normal resistente a los sulfatos) conforme a la norma NMX C-414-ONNCCE-1999, con aditivo estabilizador de volumen no ferroso. Se considera un módulo de elasticidad de  $E = 14000$   $f'c = 221359.44$  kg/cm<sup>2</sup>.

En la superficie que quedará expuesta al flujo de agua se deberá tener un acabado pulido fino a base de cemento-arena en proporción 1:3.

Con los datos anteriores se hace la siguiente revisión en las secciones críticas del túnel.

Datos Generales

b= 100 cm

h= 45 cm

$f_t = 12.86$  kg/cm<sup>2</sup>

$f'c = 120$  kg/cm<sup>2</sup>

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

**TABLA 4.2 - TÚNEL EN ESTADO ACTUAL**

SECCION	$\sigma(-)$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma(+)$ kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma(-)/f^*c$	$\sigma(+)/f_t$	RESULTADO
0°	-148.40	51.36	1.24	3.99	NO PASA
45°	-23.70	0.00	0.20	0.00	ACEPTABLE
90°	-86.79	93.96	0.72	7.31	NO PASA
135°	-23.70	0.00	0.20	0.00	ACEPTABLE
180°	-148.40	51.36	1.24	3.99	NO PASA
225°	-23.70	0.00	0.20	0.00	ACEPTABLE
270°	-86.79	93.96	0.72	7.31	NO PASA
315°	-23.70	0.00	0.20	0.00	ACEPTABLE

Como puede observarse en la tabla 4.2. existen secciones en el recubrimiento existente del túnel para las cuales se ve rebasada su resistencia, es decir, están fuera de los límites de falla aceptables. Por esta razón, se hará un nuevo análisis como el descrito en el capítulo anterior pero considerando el refuerzo propuesto para el túnel, el cual consiste en una capa de concreto lanzado reforzado con fibras metálicas de 20 cm de espesor. Adicionalmente la mezcla estará caracterizada por los siguientes parámetros:

Concentración de fibras  $V_f = 2\%$

Relación de aspecto  $l/d = 80$

Los resultados de este análisis son los siguientes:

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

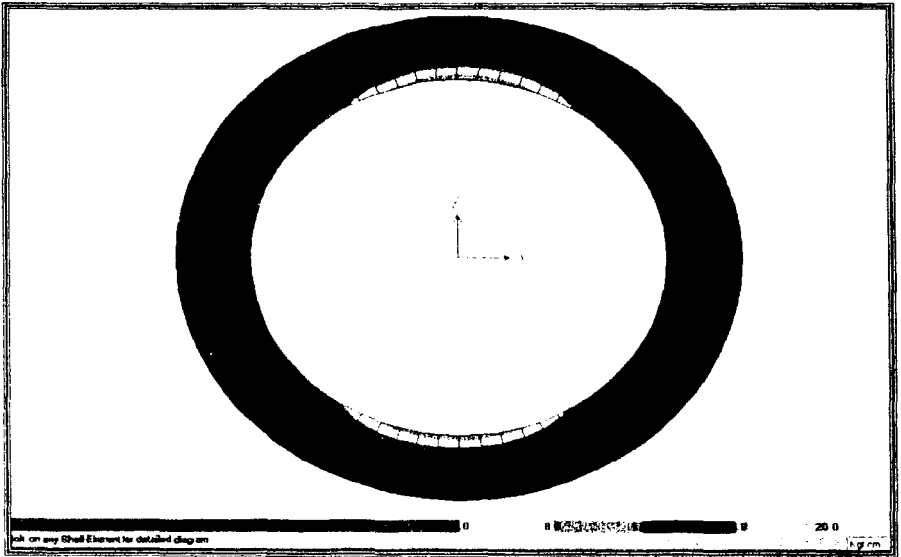


Figura 4.11 – Esfuerzo Radial S11 en Túnel Reforzado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

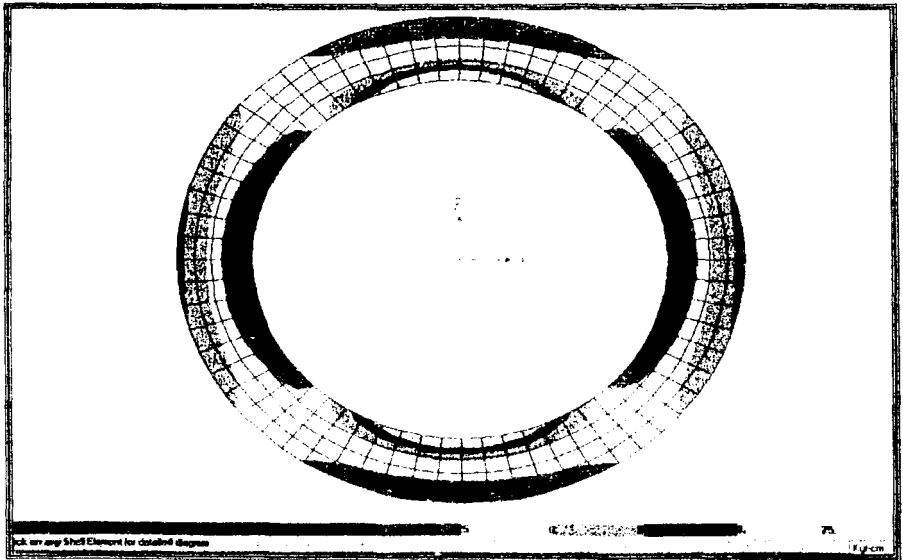


Figura 4.12 - Esfuerzo Circunferencial S22 en Túnel Reforzado

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

En la tabla 4.3 se resume la revisión del túnel reforzado, se considera que el concreto reforzado con fibras tiene la siguiente resistencia a tensión:

$$\alpha r = 46.37 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}, \quad V_f = 2\% \quad \frac{f}{d_f} = 80$$

$$\sigma_r = \alpha r V_f \frac{f}{d_f} = (46.37)(0.02)(80) = 74.192 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Aplicando el factor de reducción, obtenemos el esfuerzo de diseño a tensión:

$$f_r^* = (0.75)(74.192) = 55.64 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Datos Generales:

b= 100 cm  
 h= 45 cm  
 f<sub>t</sub>= 55.56 kg/cm<sup>2</sup>  
 f'<sub>c</sub>= 200 kg/cm<sup>2</sup>

**TABLA 4.3 - TÚNEL CON REFUERZO**

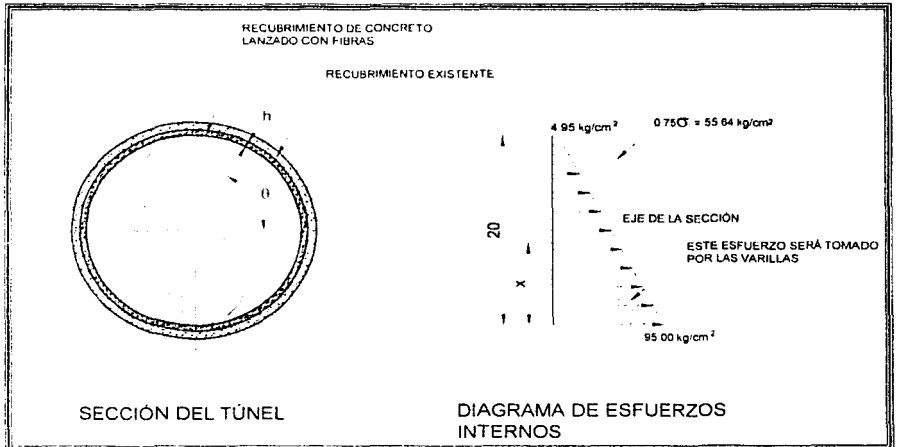
SECCION	σ(-) kg/cm <sup>2</sup>	σ(+) kg/cm <sup>2</sup>	σ(-)/f' <sub>c</sub>	σ(+)/f <sub>t</sub>	RESULTADO
0°	-146.26	0.00	0.73	0.00	ACEPTABLE
45°	-51.28	0.00	0.26	0.00	ACEPTABLE
90°	0.00	95.00	0.00	1.71	NO PASA
135°	-51.28	0.00	0.26	0.00	ACEPTABLE
180°	-146.26	0.00	0.73	0.00	ACEPTABLE
225°	-51.28	0.00	0.26	0.00	ACEPTABLE
270°	0.00	95.00	0.00	1.71	NO PASA
315°	-51.28	0.00	0.26	0.00	ACEPTABLE

En esta tabla se observa que aún quedan dos secciones críticas para las cuales los esfuerzos actuantes rebasan su resistencia, son las que corresponden a la clave y la cubeta del túnel como se observa en la figura 4.12

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

En estas secciones se propone que además del concreto lanzado se refuerce con varillas de acero que tomarán la tensión excedente que el recubrimiento no es capaz de soportar. En la figura 4.12 se muestra el estado de esfuerzos que se presenta en estas secciones.



**Figura 4.13 – Estado de Esfuerzos en la Sección de la Clave y la Cubeta**

De esta figura obtenemos la fuerza de tensión que no soporta el concreto lanzado de la siguiente manera

$$\frac{20}{95.00 - 4.95} = \frac{x}{95.00 - 55.64} \Rightarrow x = 8.74 \text{ cm}$$

$$T = \frac{(8.74)(95.00 - 55.64)(100)}{2} = 17200.39 \text{ kg}$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Dividiendo esta fuerza entre el esfuerzo de fluencia  $f_y$  del acero, obtenemos el área necesaria para soportarla.

$$a = \frac{17200.39 \text{ kg}}{4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 4.095 \text{ cm}^2$$

Esta cantidad de acero esta dada por unidad de longitud del túnel, es decir un metro, por lo que deberá ser distribuida en esta longitud.

Si empleamos varillas #3 obtenemos una separación de:

$$s = \frac{100 \times 0.71}{4.095} = 17.33 \text{ cm}$$

Con estos datos el diseño finalmente queda de la siguiente manera:

Una capa de 20 cm de concreto lanzado reforzado con fibras metálicas con una concentración del 2% y relación de aspecto de 80.

Refuerzo adicional en la clave y cubeta del túnel basado en varillas de acero grado R42 del #3 colocadas a cada 15 cm.

#### 4.4 Revisión y diseño estructural del revestimiento de la lumbrera

Según los resultados del análisis estructural hecho para la lumbrera, estos son sus elementos mecánicos últimos que actúan en ella:

$$M_u = 5.51 \text{ ton-m}$$

$$V_u = 7.78 \text{ ton}$$

$$P_u = 7.78 \text{ ton (compresión)}$$

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TUNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

La fuerza cortante que resiste el concreto, según las NTCDCEC-95 del RCDF se puede cuantificar mediante la siguiente expresión:

$$V_{cr} = 0.5F_c b d f_c'$$

Para este caso, el factor de reducción es  $F_R = 0.8$ , sustituyendo valores tenemos:

$$V_{cr} = 0.5(0.8)(45)(100)(120) = 19718.01 \text{ kg}$$

Este valor es mayor que la fuerza actuante, por lo tanto no hay problema por cortante

La carga axial de compresión que resiste la sección es:

$$P_p = F_c b h f_c' = (0.7)(45)(100)(120) = 378000 \text{ kg} > P_c$$

Esta acción, tampoco rebasa la capacidad de la sección, por lo tanto no hay problema debido a carga axial.

Debido a que el recubrimiento de la lumbrera esta compuesto únicamente por concreto ciclópeo sin refuerzo de acero, supondremos una distribución lineal de los esfuerzos asociados con el momento último actuante y aplicando la fórmula de la escuadría se obtiene el siguiente esfuerzo a tensión:

Fórmula de la escuadría

$$f_s = \frac{6M}{h^2 b}$$

Donce:

$f_s$  = Esfuerzo actuando en la fibra más alejada de la sección transversal

$h$  = 45 cm, espesor de la sección

$b$  = 100 cm, ancho de la sección

$$f_s = \frac{6(5.51 \times 10^5)}{(45^2)(100)} = 16.33 \text{ kg/cm}^2$$

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

El esfuerzo resistente a tensión vale:

$$f_t = 1.4 \cdot 150 = 17.15 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

El esfuerzo de diseño adquiere el siguiente valor:

$$f_t^* = 0.75(17.15) = 12.86 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} < f_a$$

Como el esfuerzo a tensión producido por la flexión es menor que el que resiste el material, se propone que la lumbrera sea reparada con una capa de 10 cm de concreto lanzado reforzado con fibras de acero con un 2% del volumen de la mezcla y una relación de aspecto de 80

Este refuerzo también servirá para rellenar grietas y oquedades presentes en la lumbrera y poder mejorar su comportamiento mecánico, ante futuras sollicitaciones.

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

---

---

## 5. CONCLUSIONES

---

---

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGUE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

1. En esta tesis se presenta uno de los métodos de diseño usuales de revestimiento en túneles, que inicia desde la revisión estructural hasta la propuesta de refuerzo.
2. El túnel de desague estudiado, presenta características geométricas muy interesantes, su sección circular hace que sea muy eficiente para el escurrimiento de agua, además de poder transmitir las cargas hacia el terreno, no obstante, ha presentado problemas de fisuramiento y caídos. Esto en gran parte se ha atribuido al tipo de elementos que circulan por él, aguas residuales con altas concentraciones de contaminantes y gases que erosionan extraordinariamente su recubrimiento.
3. El poco mantenimiento recibido por el túnel aunado a su edad, ya que fue construido a mediados del siglo XX, han conseguido que la funcionalidad original del túnel se haya visto disminuida, sin embargo en los últimos años, se han hecho grandes esfuerzos por rescatar éste y otros túneles de desague para que nos sigan brindando el imprescindible servicio como desde el día de su inauguración.
4. El conocimiento de la geología y de los parámetros geotécnicos imperantes en la zona, fue sumamente importante ya que sin estos datos se hubieran tenido que suponer bastantes valores que con seguridad no serían representativos de la zona.
5. Se buscó en estudios reales publicados hechos con anterioridad, toda la información geológica existente hasta la fecha, desafortunadamente no se pudo conseguir el estudio geotécnico específico de la zona pero se obtuvieron datos de zonas muy cercanas y mediante una extrapolación, fueron sugeridos los valores presentados en el capítulo 2.
6. Debemos recordar que la seguridad de las construcciones esta íntimamente ligada con la economía, porque si se aumenta indiscriminadamente el factor de seguridad, estaremos concibiendo una obra con un costo demasiado alto, que el proyecto en si mismo no lo justifique o si excede los límites económicos, no se construya.
7. En el problema que se discutió en esta tesis, siempre se tuvo presente el grado de seguridad que debe tener el túnel, por esta razón se le aplicaron los factores previstos por el RCDF-97 para obras de particular importancia, como se subrayo en el capítulo 3.



## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

14. En este caso se siguió un proceso de ensayo y error, primero se propuso un espesor de 10 cm. se analizo la sección y se observó que aún era insuficiente, por lo que fue aumentándose cada vez 5 cm hasta llegar a su diseño final de 20 cm. En el capitulo 4 únicamente se presenta el resumen del diseño final
  
15. Se propone, dado el resultado de esta revision, que el túnel sea reparado con una capa de 20 cm de concreto lanzado reforzado con fibras de acero, para rellenar completamente las zonas caidas por la erosión y grietas, mejorando así el comportamiento del revestimiento existente y así evitar la corrosión y futuros caidos.
  
16. También se plantea que las lumbreras tengan un recubrimiento del mismo material que para el túnel, pero de menor espesor 10 cm, debido a que sus solicitaciones fueron menores, en una altura que va desde el nivel de la clave del túnel y hasta donde se alcanza el nivel freático del suelo. Con la finalidad de poder abatir este nivel y reducir los esfuerzos actuantes deberán colocarse drenes en toda esta altura.

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

---

---

## 6. AGRADECIMIENTOS

---

---



## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Agradezco al asesor y director de este trabajo, el Ing. Miguel Ángel Guzmán Escudero, profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, que fue quien me impulsó para desarrollar este interesante tema. De manera personal, muchas gracias por todas las atenciones prestadas a este compromiso desde el comienzo; sin su valiosa participación no habría llegado a buen término esta tesis.

De igual forma quiero hacer extensiva mi retribución, mencionando al experto en Mecánica de Suelos, el Ing. Ricardo Colunga Rodríguez por sus consejos y excelentes aportaciones para el integro desarrollo del capítulo 2.

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

---

---

## 7. REFERENCIAS

---

---

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE RÉFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

### Referencias Técnicas y Bibliográficas:

1. Alcantarillado 2000. Estrategia para la Ciudad de México.
2. Sistema Hidráulico del Distrito Federal (Cronología) México D.F. 1994.
3. El desagüe del Valle de México en la Epoca Independiente
4. Inspección del Interior de las Lumbreras y del Túnel, pertenecientes al Túnel Nuevo de Tequiquiac, ubicado en el municipio de Tequiquiac, Edo. de México. Elaborado por Lumbreras y Túneles S. A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua.
5. Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal. Tomo II.
6. Olivera Bustamante F.: "Estructuración de Vías Terrestres", Edit. CECSA, 2ª Ed., México 1996.
7. Curso Victor Hardi 1995. Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C. Agosto de 1995.
8. Curso Victor Hardi 1998. Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C. Octubre de 1998.
9. Foundation Analysis and Design. Joseph E. Bowles. Editorial Mc Graw Hill. 1977.
10. Foundation Engineering Handbook. Autores: Hans. F. Winterkorn and Hsai-Yang Fang. Van Nostran Reinhold Company. 1975.

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

11. La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Autores: Alfonso Rico Rodríguez, Hermilo del Castillo Editorial Limusa Volumen 2. 1996
12. Revisión geotécnica estructural al Túnel Emisor del Poniente II, marzo 1997.
13. Chandrupatla T. R., Belegundu A. D., "Introducción al Estudio del Elemento Finito en Ingeniería", Edit. PRENTICE HALL, 2ª Ed., México 1999
14. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., "The finite element method", 4ª ed.
15. Livesley R. K., "Elementos finitos introducción para ingenieros", 1ª ed.
16. SAP2000, "Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Analysis Reference", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California 94704, EUA, Vol. 1
17. Meli Piralla R.: "Diseño Estructural", Edit LIMUSA, 2ª Ed., México 2000
18. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Diario Oficial de la Federación, Junio 1997
19. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, Diario Oficial de la Federación, Junio 1997
20. ACI 506R-90, "Guide to Shotcrete". 1990, (reaprobada en 1995)
21. ACI 506 1R-98, "Committee Report on Fiber Reinforced Shotcrete", 1998

## TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

22. ACI 506.2-95, "Specification for Shotcrete", 1995
23. ACI 506.3R-91, "Guide to Certification of Shotcrete Nozzlemen", 1991
24. ACI 506.4R-94, "Guide for the Evaluation of Shotcrete", 1994
25. ACI 544.1R-96 "Fiber Reinforced Concrete", 1996
26. ACI 544.4R-88 "Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete",  
(Reaprovada en 1999)
27. Gunite: a Handbook for Engineers, T.F. Ryan, Cement and Concrete Association,  
1973
28. Engineering Properties of Shotcrete, W.R. Lorman, University Microfilms International,  
1978
29. Sprayed Concrete: Properties, Design and Application, S. Austin and P. Robins,  
McGraw-Hill, 1995
30. The Theory and Practice of Dry Shotcrete for Underground Mines, Northern Centre for  
Advance Technology

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Secciones típicas de túnel, circular y en herradura .....	7
Figura 1.2 – Túnel para paso de trenes en España .....	8
Figura 1.3 – Croquis de localización .....	10
Figura 1.4 – Elevación del túnel.....	11
Figura 2.1 – Carta geológica de la zona en donde se encuentra ubicado el túnel.....	15
Figura 2.2 – Perfil Geológico .....	16
Figura 2.3 – Sondeos del Terreno .....	18
Figura 2.4 – Pruebas triaxiales .....	20
Figura 2.5 – Distribución de Esfuerzos Actuantes con la Profundidad .....	24
Figura 3.1 – Malla de elementos finitos y condiciones de frontera.....	33
Figura 3.2 – Detalle en zona de apertura.....	34
Figura 3.3 – Definición de Elementos Tipo "Shell" para cuatro y tres nodos .....	40
Figura 3.4 – Direcciones de Fuerzas y Momentos en Elementos Finitos Tipo "Shell" ..	41
Figura 3.5 – Diagrama de esfuerzos radiales, S11 .....	42
Figura 3.6 – Diagrama de esfuerzos circunferenciales, S22.....	43
Figura 3.7 – Diagrama de Momento [Ton-m].....	45
Figura 3.8 – Diagrama de Carga Axial [Ton] .....	46
Figura 3.9 – Diagrama de Fuerza Cortante [Ton].....	47
Figura 3.10 – Geometría del Modelo de Análisis de la Lumbreira.....	48
Figura 3.11 – Diagrama de Momento [Ton-m].....	49
Figura 3.12 – Diagrama de Cortante [Ton] .....	50
Figura 3.13 – Diagrama de Fuerza Axial [Ton].....	51
Figura 4.1 – Proceso de mezcla seca.....	57
Figura 4.2 – Proceso de mezcla húmeda .....	57
Figura 4.3 – Estabilización de talud en Wakayama, Japón.....	60
Figura 4.4 – Línea de tren subterráneo en Lyon, Francia.....	61
Figura 4.5 – Tipos diferentes de fibras comerciales .....	63
Figura 4.6 – Influencia de la cantidad de fibra sobre la resistencia a compresión .....	64
Figura 4.7 – Influencia de la relación de aspecto sobre la resistencia a compresión, para un volumen de fibra fijo del 2%.....	64
Figura 4.8 – Gráfica esquemática esfuerzo-deformación y parámetros de dureza.....	65

# TESIS PROFESIONAL

REVISIÓN GEOTÉCNICA-ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE REFUERZO, DE UN TÚNEL DE DESAGÜE DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Figura 4.9 – Gráfica esfuerzo–deformación de un espécimen sujeto a carga axial.....	66
Figura 4.10 – Parte descendiente de la curva esfuerzo deformación, normalizada.....	66
Figura 4.11 – Esfuerzo Radial S11 en Túnel Reforzado .....	70
Figura 4.12 – Esfuerzo Circunferencial S22 en Túnel Reforzado.....	71
Figura 4.13 – Estado de Esfuerzos en la Sección de la Clave y la Cubeta.....	73