

26



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES - ACATLAN

ANALISIS DE UN TUNEL  
FERROVIARIO UTILIZANDO EL METODO  
DEL ELEMENTO FINITO

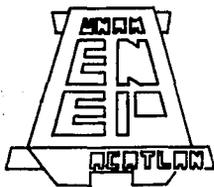
TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de :

INGENIERO CIVIL

P r e s e n t a :

ROSA ALICIA GRANADOS VAZQUEZ



Acatlán, Estado de México, 1994

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN





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

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

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

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

Le dedico esta tesis a Dios por que me ayudó a escoger la profesión que me gusta, a mis padres y hermanos por su amor y comprensión, a mi tío Chucho por ser guía de mis primeros pasos, a Peter Fritz por confiar en mi, a mis amigos por su apoyo, a la ENEP "Acatlán" y finalmente a todos los que disfrutan planeando, proyectando y construyendo los túneles de nuestro país.

Con un profundo agradecimiento al M. en I. Enrique Mendoza Otero, director de esta tesis.

**Con todo mi amor para ti**

# INDICE

## 1. INTRODUCCION

## 2. METODO DEL ELEMENTO FINITO

2.1 Generalidades

2.2 Formulación matemática

2.3 Programa de computadora RHEO-STAU

## 3. CARACTERISTICAS GEOLOGICAS Y GEOTECNICAS EN LA ZONA DEL TUNEL

3.1 Características geológicas

3.2 Características geotécnicas

## 4. MODELO DE ANALISIS

4.1 Modelo del macizo rocoso

4.2 Modelo de las cargas

4.3 Modelo macizo rocoso-revestimiento

## 5. ANALISIS NUMERICO

5.1 Datos

5.2 Estudio paramétrico

5.3 Resultados

5.4 Comentarios sobre el diseño del revestimiento definitivo

## 6. CONCLUSIONES

## REFERENCIAS

## TABLAS

## FIGURAS

## 1. INTRODUCCION

La demanda de construcción de túneles aumenta a un ritmo creciente a pesar de la incertidumbre relacionada con este tipo de obras. Según datos de la conferencia de la Organización de Cooperación Económica y Desarrollo, celebrada en Washington en 1970, en los 20 países participantes (Alemania, Estados Unidos, Francia, Inglaterra, Australia, etc.) se planteó la construcción de más de 600,000 km de túneles (incluyendo la minería) con un volumen excavado superior a 5,000 millones de m<sup>3</sup> y una inversión cercana a 10,000 millones de dólares anuales. Estas cifras dan una idea de la importancia del diseño de los soportes temporales y los revestimientos definitivos, pues cualquier economía que se logre, por ejemplo un 10 % representa cantidades considerables de dinero.

Para llevar a cabo el análisis y diseño de un túnel (excavación, soportes temporales y revestimiento definitivo) es necesario la utilización de teorías y

modelos de cómputo basados en la experiencia y en las observaciones del comportamiento de este tipo de obra y que sean capaces de predecir, de manera aproximada, las deformaciones y esfuerzos que se presentan tanto en el macizo rocoso como en el revestimiento del túnel para valuar la seguridad y economía de su proyecto. Sin embargo, algunos modelos padecen de idealizaciones inevitables que son introducidas para permitir, al menos, la obtención de algunos resultados para el dimensionamiento del revestimiento. Uno de los métodos utilizado en los últimos años en materia de túneles es el Método del Elemento Finito, el cual permite hacer el análisis de esfuerzos y deformaciones de un medio continuo formado por materiales de distintas características y con cualquier condición de frontera, además para diferentes condiciones de carga y estados iniciales de esfuerzo; por lo cual se considera que es la teoría adecuada para el análisis de distribución de esfuerzos y deformaciones en el macizo rocoso que circunda a un túnel, así como para el análisis del revestimiento de concreto del propio túnel, considerando la interacción macizo rocoso-revestimiento.

Para resolver los problemas que genera, en el sur-poniente de la Ciudad de México en el actual trazo de la vía férrea México-Cuernavaca se ha planteado un nuevo trazo de esta vía con la necesidad de construir siete tuneles.

El problema planteado en el presente trabajo, es llevar a cabo el análisis del túnel no. 3 de esa nueva vía utilizando el método del elemento finito, método que se describe en el capítulo 2, donde también se presenta el programa de computadora utilizado.

En el capítulo 3 se describen las características geológicas de la zona en donde se emplazará el túnel, así como las características geotécnicas del macizo rocoso necesarias para la definición del modelo geomecánico.

Los criterios que se revisaron para determinar la magnitud de las cargas actuantes consideradas para el revestimiento del túnel se definen en el capítulo 4.

El análisis del revestimiento, basado en las características del macizo y de las cargas actuantes, así como los comentarios sobre su diseño se presentan en el capítulo 5.

Finalmente, las conclusiones quedan descritas en el capítulo 6.

## **2. METODO DEL ELEMENTO FINITO**

### **2.1 Generalidades**

El método del elemento finito está basado en la discretización de un medio continuo (por ejemplo el macizo rocoso que circunda a un túnel). La discretización consiste en dividir el medio continuo en un número finito de elementos, los cuales están conectados en sus esquinas (llamadas nudos). Cada uno de los elementos es finito; es decir, son elementos de geometría definida y tamaño limitado. Se acepta la hipótesis fundamental de que los esfuerzos son constantes en todo el elemento. Las cargas consideradas se aplican en los nudos y los desplazamientos de los nudos son los grados de libertad que definen la configuración deformada del medio continuo.

Para la discretización del medio continuo pueden usarse diferentes elementos finitos: triángulo, rectángulo, cuadrilátero, etc. El arreglo de elementos finitos

definen la malla que idealiza al medio continuo que se estudia (fig. 2.1) y cada uno de ellos puede tener propiedades mecánicas diferentes y sus nudos estar asociados a diferentes condiciones de frontera, lo que nos permite considerar el problema macizo rocoso-revestimiento y también analizar tuneles en medios formados por estratos de materiales de diferentes características (medio heterogéneo).

El elemento triángulo permite un mejor ajuste en las fronteras del medio continuo que se idealiza, aun cuando es el elemento más sencillo con el que se obtienen resultados satisfactorios en problemas de túneles.

La interrelación entre los elementos finitos al estar interconectados en sus nudos plantea un problema matemático complejo y en el se deben considerar:

- a) El equilibrio
- b) Las condiciones de compatibilidad de desplazamientos
- c) Las relaciones esfuerzo-deformación

En resumen, el problema consiste en plantear y resolver la ecuación matricial

de equilibrio del modelo estructural definido por la malla de elementos finitos. Las incógnitas son los desplazamientos no restringidos de los nudos de la malla. Conocidos los desplazamientos nodales se determinan las deformaciones internas de cada uno de los elementos finitos y de estos los esfuerzos correspondientes.

## **2.2 Formulación matemática**

Para explicar en forma sencilla la formulación matemática del método del elemento finito consideramos el análisis de esfuerzos en dos dimensiones (Timoshenko y Goodier, 1951).

Se define una sección plana (análisis de una rebanada de espesor unitario) la cual se divide en elementos finitos triangulares (como caso particular) (fig.2.2).

El paso principal de la formulación es la suposición de un patrón de desplazamientos internos através del elemento finito, el cual se determina únicamente en términos de los desplazamientos nodales como se verá mas adelante; por ejemplo en cualquier punto  $(x,y)$  del elemento (inclusive en sus

vértices) las componentes  $u$  y  $v$  de su desplazamiento quedan descritos por:

$$\begin{aligned} u_{(x,y)} &= a_1 + a_2x + a_3y = u(x,y, a_1, a_2, a_3) \\ v_{(x,y)} &= a_4 + a_5x + a_6y = v(x,y, a_4, a_5, a_6) \end{aligned} \quad \dots (1)$$

donde las constantes  $a_i, i = 1, 6$  se determinan a continuación

Los desplazamientos de los vértices  $i, j, m$  (fig. 2.3) de un elemento finito cualquiera  $e$ , tiene por notación

$$\underline{\delta} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \end{Bmatrix} \quad \dots (2)$$

Sustituyendo las coordenadas  $(x,y)$  de los nudos  $i, j, m$  en (1) se tiene un sistema de ecuaciones simultáneas de la forma:

$$\begin{aligned} u_i &= a_1 + a_2x_i + a_3y_i \\ v_i &= a_4 + a_5x_i + a_6y_i \\ u_j &= a_1 + a_2x_j + a_3y_j \\ v_j &= a_4 + a_5x_j + a_6y_j \dots \dots \text{etc} \end{aligned} \quad \dots (3)$$

que en notación matricial se expresa como

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_m & y_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}$$

... (4)

o simplemente

$$\underline{\delta} = \underline{\underline{A}} \mathbf{a}$$

... (5)

$$\mathbf{a} = \underline{\underline{A}}^{-1} \underline{\delta}$$

... (6)

es decir las constantes  $a_i$  que nos definen el campo de esfuerzos dentro del elemento finito se obtienen con los desplazamientos de los nudos de dicho elemento.

Como se verá mas adelante,  $\underline{\delta}$  son incógnitas del problema y una vez ya conocidas se puede determinar  $\mathbf{a}$  y por lo tanto los desplazamientos  $u$  y  $v$  en

cualquier punto del elemento.

De los desplazamientos  $(u(x,y)$  y  $v(x,y))$  de un punto del elemento, se pueden calcular los valores de las deformaciones  $\epsilon(x,y)$  en ese punto del elemento (teoría de la elasticidad).

$$\epsilon_{(x,y)} = \begin{vmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 + a_5 \end{vmatrix}$$

... (7)

Como las deformaciones son funciones sólo de las constantes  $a_i$ , se concluye que en cualquier punto del elemento la deformación es la misma. La ecuación anterior se puede expresar en forma matricial

$$\epsilon_{(x,y)} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{vmatrix}$$

... (8)

o simplemente

$$\underline{\underline{\epsilon}}_{(x,y)} = \underline{\underline{B}} \underline{\underline{a}}$$

... (9)

de (6) se tiene que

$$\underline{\underline{\epsilon}}_{(x,y)} = \underline{\underline{B}} \underline{\underline{A}}^{-1} \underline{\underline{\delta}}^c$$

... (10)

Los esfuerzos en términos de las deformaciones están dadas por la ley de Hooke y en el caso de elasticidad en dos dimensiones y para un material isótropo tenemos:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = C_1 \begin{pmatrix} 1 & C_2 & 0 \\ C_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - C_2)/2 \end{pmatrix} \epsilon$$

... (11)

o simplemente

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{D}} \underline{\underline{\epsilon}}$$

... (12)

donde:

para esfuerzo plano  $C1 = E/(1 - \nu^2)$ ,  $C2 = \nu$  y

para deformación plana  $C1 = E(1 - \nu) / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$ ,  $C2 = \nu / (1 - \nu)$

de donde E = módulo de elasticidad y  $\nu$  = módulo de Poisson

Como se ve los esfuerzos obtenidos son constantes dentro del elemento y en la práctica, esos esfuerzos, se acostumbra asignarlos al centroide del elemento.

Introduciremos ahora el concepto de fuerzas nodales

$$F = \begin{pmatrix} U_i \\ V_i \\ U_j \\ V_j \\ U_m \\ V_m \end{pmatrix}$$

... (13)

las cuales, son equivalentes estáticamente a la resultante de los esfuerzos a lo largo de los bordes del elemento finito. Para su determinación es conveniente usar el principio del trabajo virtual, imponiendo al elemento algunos desplazamientos virtuales  $\delta$ . que a su vez introducen deformaciones virtuales iguales dentro del elemento, según la expresión (11), a

$$\underline{\epsilon}_e = \underline{B} \underline{A}^{-1} \underline{\delta}_e$$

... (14)

El trabajo externo de las fuerzas nodales es la suma del producto de cada una de las fuerzas por su correspondientes desplazamientos, que expresado en forma matricial es

$$W_E = \underline{\delta}_e^T \underline{F}$$

... (15)

donde: T significa vector transpuesto

El correspondiente trabajo interno es la integral en el volumen del elemento del producto de la deformación y de los esfuerzos

$$W_i = \iiint (\underline{\epsilon}_e)^T \sigma \, d(\text{Vol})$$

... (16)

Dado que el trabajo interno debe ser igual al trabajo externo, sustituyendo

tenemos que

$$\underline{\delta}^T \underline{F} = \iint (\underline{\epsilon}_e)^T \underline{\sigma} d(\text{Vol}) \quad \dots(17)$$

por conveniencia, supongamos que  $\underline{\delta}_e = \underline{I}$ , donde  $\underline{I}$  es una matriz identidad, lo cual es claramente permitido dado que las relaciones de trabajo virtual son válidas para cualquier desplazamiento arbitrario; tenemos que:

$$\underline{I}^T \underline{F} = \iint (\underline{B} \quad \underline{A}^{-1})^T \underline{I}^T \underline{\sigma} d(\text{Vol}) \quad \dots(18)$$

utilizando las ecuaciones (11) y (13) se tiene que

$$\underline{F} = \iint (\underline{B} \quad \underline{A}^{-1})^T \underline{D} (\underline{B} \quad \underline{A}^{-1})^T \underline{\delta} d(\text{Vol del elemento}) \quad \dots (19)$$

si se supone un espesor unitario del elemento entonces

$$\underline{F} = (\underline{B} \ \underline{A}^{-1})^T \underline{D} (\underline{B} \ \underline{A}^{-1})^T \underline{\delta} \text{ (Area del elemento)}$$

... (20)

la ecuación anterior se puede expresar como:

$$\underline{F} = \underline{k} \underline{\delta}$$

... (21)

donde

$$\underline{k} = (\underline{B} \ \underline{A}^{-1})^T \underline{D} (\underline{B} \ \underline{A}^{-1})^T \text{ (Area del elemento)}$$

k es la matriz de rigidez del elemento que es una matriz de 6 x 6; cada elemento de la malla tiene su propia matriz de rigidez k.

La matriz de rigidez de la malla de elementos finitos K es el ensamble de las matrices de rigidez de cada uno de los elementos de la malla y se obtiene sumando los componentes de rigidez apropiadas de los elementos que rodean a cada nudo de la malla (regla de la suma).

La ecuación matricial de equilibrio que se resuelve es

$$[ \underline{K} ] \underline{d} = \underline{F}$$

... (22)

y de la cual se obtienen los desplazamientos nodales  $\underline{d}$ .

Una vez determinados los desplazamientos de cada nudo de la malla, se calculan los esfuerzos en cada elemento finito usando las relaciones esfuerzos en elemento( $\sigma$ )-desplazamiento de los nudos del elemento ( $d$ ). Con las ecuaciones (10) y (12) se obtiene dichas relaciones.

$$\sigma = \underline{D} \underline{\epsilon} = (\underline{D} \underline{B} \underline{A}^{-1})^T \underline{\delta}$$

... (23)

Finalmente se calculan los esfuerzos principales y su orientación para cada elemento.

### 2.3 Programa de computadora

El programa de computadora empleado en esta tesis es el RHEO-STAU (Fritz, 1989) versión extendida del programa de elementos finitos STAUB, el

cual ha sido desarrollado, durante mas de 25 años, por ingenieros especialistas en mecánica de suelos y rocas del Instituto Federal de Tecnología de Zurich, Suiza.

Basado en el campo teórico como el práctico, el objetivo principal del programa es el resolver problemas de estructuras subterráneas mediante el método del elemento finito. El programa resuelve problemas de medios continuos en dos dimensiones bajo condiciones planas de esfuerzo ó deformación.

La modelación del problema a resolver por medio de RHEO-STAU B toma en cuenta los siguientes factores:

- a) Geometría de la sección de excavación
- b) La estratigrafía del medio circundante a la excavación
- c) Las cargas externas debidas a la excavación
- d) Las etapas de excavación
- e) Modelos de comportamiento elástico, elastoplástico y reológico
- f) Estado inicial de esfuerzos y deformación del medio circundante previo a aplicación de las cargas, por ejemplo las debidas a la excavación

g) Los sistemas de soporte temporal (anclas) y/o definitivos  
revestimiento)

El programa tiene la capacidad de graficar los resultados (desplazamientos, esfuerzos, etc.). La idealización comprende el proceso completo de modelación de las condiciones reales a las que se encuentra sometida la excavación, por lo que ésta debe reproducir, de una manera comprensible y bastante aproximada, el comportamiento de los materiales (roca, concreto), comportamiento estructural, magnitud de las cargas así como los sistemas de soporte.

Los resultados obtenidos con la utilización del programa proporcionan: desplazamiento de los nudos, esfuerzos y deformaciones de los triángulos, esfuerzos y deformaciones en los nudos que son el promedio de los triángulos que lo rodean, vectores y trayectorias de desplazamientos, esfuerzos y deformaciones; zonas plastificadas; así como los elementos mecánicos en el revestimiento.

### **3. CARACTERÍSTICAS GEOLOGICAS Y GEOTECNICAS EN LA ZONA DEL TUNEL**

#### **3.1 Características geológicas**

El túnel se localiza al norte del Estado de Morelos, cerca del poblado de Santo Domingo Ocotitlán ( fig 3.1 ).

En la mayor parte de su longitud atraviesa una formación de andesitas (Formación Tepoztlán), pero en uno de sus extremos (emporalamiento oriente) se encuentra con materiales volcánicos (Formación Chichinautzin). La formación de andesitas es basáltica de color gris oscuro y negro, es sana pero se encuentra fracturada y de acuerdo a la intensidad del fracturamiento que presenta se dividió en andesita fracturada (Ta, a2) y andesita intensamente fracturada (Ta, a3). Los materiales volcánicos están conformados por coladas lávicas y brechas. En general las coladas lávicas son de color negro y se

encuentran muy fracturadas. Las brechas volcánicas son de matriz arenarcillosa de color café claro poco compacta y suave. Estos materiales volcánicos se clasifican, de acuerdo a su grado de fracturamiento, como basaltos fracturados (Qbs, bs1).

### 3.2 Características geotécnicas

En base a las características geológicas y a la obtención de núcleos del macizo rocoso por excavar se llevó a cabo la clasificación geotécnica. En las tablas 3.1 y 3.2 se presenta la calidad de las unidades de roca según la clasificación de Barton (Barton, 1974) y Bieniawski (Bieniawski, 1974) que serán atravesadas por el túnel; de los resultados de las tablas 3.1 y 3.2 se resume lo siguiente:

#### Basaltos fracturados ( Qbs, bs1 )

Calidad RMR (Bieniawski)	Mala (24 puntos)
Calidad Q (Barton)	Muy pobre (0.77 puntos)
Presencia de agua	Sólo en época de lluvias (agua vadosa)

Andesita intensamente fracturada (Ta. a3)

Calidad RMR (Bieniawski)	Mala (25 puntos)
Calidad Q (Barton)	Muy pobre (0.33 puntos)
Presencia de agua lluvias	Poco probable sólo en época de

Andesita fracturada (Ta. a2)

Calidad RMR (Bieniawski)	Regular (33 puntos)
Calidad Q (Barton)	Pobre (4.5 puntos)
Presencia de agua	Se considera poco probable aún en época de lluvias

De acuerdo a lo anterior el lado oriente y la tercera parte siguiente del túnel se excavará en roca de mala calidad geotécnica; sin embargo en la mayor parte de la excavación se tiene roca de calidad aceptable, como se muestra en la fig. 3.2.

El emportalamiento poniente se programó en roca fracturada pero sana, se considera que su ubicación es adecuada, como se muestra en la fig. 3.2.

Una zona que se estudia en esta tesis es la que corresponde a la sección transversal A-A'(fig 3.2), la cual presenta el techo máximo del túnel, por lo que se tomó como la sección característica para llevar los análisis correspondientes.

## 4. MODELO DE ANALISIS

### 4.1 Modelo del macizo rocoso

Con base a las características geológicas y geotécnicas, a la experiencia y al apoyo bibliográfico sobre propiedades mecánicas de roca (Farmer, 1968), se realizó la modelación del medio circundante al túnel en cuestión en la sección transversal del cadenamiento de mayor cobertura como se indicó al final del capítulo anterior. En esta modelación se consideró que la mayor parte del macizo rocoso lo constituye un estrato de andesitas fracturadas ( $T_{a,a2}$ ) con un módulo de elasticidad que fluctua entre las 60,000 y 80,000  $\text{ton/m}^2$  y se tomó en cuenta la presencia, en la parte superior del macizo rocoso, de un estrato de basaltos fracturados ( $Q_{bs, bs1}$ ) de un espesor de aproximadamente 15 m y módulo de elasticidad de 12,000  $\text{ton/m}^2$ . Ambos estratos presentan un peso volumétrico promedio de 2.4  $\text{ton/m}^3$  y un módulo de Poisson de 0.4 como se muestra en la fig 4.1.

## 4.2 Modelo de las cargas

Los diferentes tipos de carga de roca que se consideran para el análisis de un túnel son los siguientes:

- a) Carga de aflojamiento
- b) Presión genuina de montaña
- c) Presión de expansión

Para la explicación de cada una de ellas ver la referencia (Kovari, 1979).

Después de estudiar el comportamiento de la excavación del túnel estudiado en este trabajo, sin la presencia del soporte definitivo, se encontró que ésta es estable; de ahí que sea válido considerar a la carga de aflojamiento como sollicitación para el diseño del soporte definitivo (revestimiento de concreto) del túnel.

Durante la excavación de un túnel el comportamiento del macizo rocoso esta influenciado principalmente por sus fracturas o fallas y por el esfuerzo cortante a lo largo de ellas. Generalmente, casi la totalidad de las deformaciones de la

roca se presentan antes de la introducción de cualquier soporte ( anclas, concreto lanzado o revestimiento definitivo); sin embargo, existe el peligro de la falla de la roca debido a los defectos locales mencionados, falla que en muchos casos puede ser evitada por la presencia del soporte temporal y/o soporte definitivo.

Las condiciones desfavorables de fallas y fracturas del macizo rocoso, la pérdida de la resistencia al cortante a lo largo de ellas, las fracturas ocasionadas por la utilización de explosivos y la percolación de agua subterránea, contribuyen a que en la clave de la excavación se afloje un cierto volumen de la roca que gravitará sobre el revestimiento definitivo (carga de aflojamiento), ejerciendo una presión correspondiente a su peso muerto (fig 4.2). Dado que el proceso de pérdida de volumen de roca (aflojamiento) ocurre en ciertas partes a lo largo del túnel, ésta no puede ser determinada a priori, ya que intervienen los diversos factores antes mencionados.

Para estimar la carga de aflojamiento se han desarrollado diferentes teorías en base a la experiencia y en base a modelos analíticos. A continuación se presentan algunos de los criterios más conocidos para valuar esta carga.

### a) Criterio de Terzaghi

La carga de roca de Terzaghi (Terzaghi, 1946) se determina en base a las características geológicas de la roca ( Terzaghi define nueve tipos o condiciones de roca) y en la geometría de la excavación (ancho y alto); cabe señalar que este método es conservador y que provee un factor de seguridad alto.

De acuerdo a la geología presentada en el capítulo 3, se define que ésta se encuentra en el tipo 5 de la clasificación de Terzaghi. Para el tipo 5, la carga de aflojamiento se estima con la siguiente expresión:

$$H_R = ( 0.35 \text{ a } 1.10 ) ( B + H_t )$$

donde:

$H_R$  = altura de la roca que se afloja medida desde la clave  
del túnel, en m

$B$  = ancho del túnel, en m

$H_t$  = altura de túnel, en m

Para las características geológicas de la roca del túnel en cuestión, se consideró

un valor intermedio (entre 0.35 y 1.10), por lo que la altura queda definida mediante:

$$H_r = 0.55 ( B + H_t )$$

así para la geometría del túnel estudiado tenemos que

$$B = 7 \text{ m} \quad \text{y} \quad H_t = 9.5 \text{ m}$$

por lo que se obtiene

$$H_r = ( 0.55)(16.5) = 9.05 \text{ m}$$

de altura de la roca que se afloja medida desde la clave de la excavación.

#### **b) Criterio de Barton (sistema Q)**

Con este criterio la carga de aflojamiento se recomienda como un valor de la carga de la clave en  $\text{kg}/\text{cm}^2$  que se define de acuerdo a la calidad geomecánica de la roca (Barton, 1974).

El valor de la carga unitaria que gravita sobre el revestimiento queda definida por:

$$P_{\text{roof}} = \frac{2.0 J_n^{1/2}}{J_r} Q^{-1/3}$$

donde:

$P_{\text{roof}}$  = carga unitaria de roca aflojada, en  $\text{kg/cm}^2$

$J_r$  = características de la rugosidad de las juntas del macizo rocoso

$J_n$  = número de familias de discontinuidades

$Q$  = calidad de la roca según Barton

de acuerdo a la calidad geomecánica de la roca definida en el capítulo 3, se consideraron los siguientes valores:

$$J_r = 2 \quad J_n = 12 \quad Q = 4.5$$

por lo que:

$$P_{\text{roof}} = \frac{2.0(12^{1/2})}{2.0} (4.5)^{-1/3}$$

$$P_{\text{roof}} = 19.05 \text{ ton/m}^2$$

Si el peso volumétrico de la roca es igual a  $2.4 \text{ ton/m}^3$ , la altura de la roca aflojada es de aproximadamente 8 m.

### **c) Carga de aflojamiento en macizos rocosos sanos**

Si un macizo rocoso, en el cual se excavará un túnel, presenta discontinuidades (fallas y fracturas) considerablemente pequeñas, se puede considerar que es sano (homogéneo); Bray (Bray, 1967) demostró que si la roca presenta 10 o menos arreglos de discontinuidades entonces se puede considerar como un medio homogéneo e isótropo. En estas condiciones, durante la excavación del túnel podrá presentarse en el macizo rocoso y alrededor de la excavación una zona con esfuerzos de tensión, bóveda de descarga (Alberro, 1983). Si durante la excavación el macizo rocoso se comporta elásticamente esa bóveda de descarga se obtiene mediante la solución de Kirsh (Schézy, 1973) para el caso de esfuerzos tectónicos previos a la excavación. Si ocurre un comportamiento inelástico de la roca, la zona de tensión en el campo elástico se puede definir con el criterio del profesor Alberro (fig. 4.3)

Para determinar la frontera hasta donde se extiende la zona plastificada que se

genera alrededor de la excavación del túnel, analizado en este trabajo, se utilizó la siguiente expresión (Alberro, 1983):

$$r(\Theta) = a \frac{H(1+j)^{(1/\phi)}}{S_1 + S_2 + 2H} \left[ 1 + \frac{2(S_2 - S_1) \cos 2\phi}{(j-1)(S_1 + S_2 + 2H)} \right]$$

donde:

$r(\Theta)$  = distancia desde del centro de la excavación para un ángulo  $\Theta$  medido desde el eje horizontal

$a$  = radio de la excavación, 3.5 m

$H$  =  $c \operatorname{ctg} \phi$ ,  $c$ =cohesión,  $\phi$ =ángulo de fricción interna  
 $c = 150 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi = 30^\circ$

$j = (1 + \operatorname{sen} \phi) / (1 - \operatorname{sen} \phi)$

$S_1 = \sigma_v = \gamma h = 100.74 \text{ ton/m}^2$

$S_2 = \sigma_h = K_o \sigma_v = 201.48 \text{ ton/m}^2$

$K_o$  = coeficiente de esfuerzos en estado de reposo

se obtuvieron los siguientes resultados:

$\Theta$	90	80	70	60	50	45	40	30	20	10	0
$r$	2.73	2.75	2.82	2.99	3.05	3.11	3.18	3.03	3.41	3.47	3.5

Como se aprecia en la tabla anterior no existe zona plastificada ya que los valores calculados son menores al radio de la excavación, por lo que se procede a analizar la excavación de acuerdo a la teoría de Kirsch (Schézy, 1973).

Basada en la teoría de la elasticidad y en el concepto de deformación plana, la teoría de Kirsch define los esfuerzos tangenciales alrededor de un túnel de sección circular sometido a esfuerzos  $\sigma_v$  y  $\sigma_h$  lejos de la excavación de acuerdo a con la siguiente expresión:

$$\sigma_t = \frac{p_v}{2} \left[ (1+K_0) \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-K_0) \left( 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

donde:

$\sigma_t$  = esfuerzo tangencial en un punto definido por las coordenadas  $(\theta, r)$

$p_v$  = estado inicial de esfuerzos en el sentido vertical ( $\sigma_v$ )

$K_0$  = coeficiente de esfuerzos en estado de reposo

$a$  = radio de la excavación

Los esfuerzos calculados para nuestro túnel a lo largo del eje vertical para diferentes valores de  $K_0$  se presentan en la figura 4.4 donde puede apreciarse, que los esfuerzos tangenciales son de compresión.

### 4.3 Modelo macizo rocoso-revestimiento

El modelo macizo rocoso-revestimiento se define mediante las siguientes consideraciones:

- 1) Se supone como sollicitación una carga  $w$  que actúa en la zona de la clave del túnel y que corresponde al peso de un volumen estimado de material aflojado (fig.4.5a).
- 2) El efecto trabajo conjunto del revestimiento con el macizo rocoso, es decir, las fuerzas de interacción del revestimiento-macizo rocoso (fig. 4.5b), se toma en cuenta mediante el encajamiento parcial del revestimiento del túnel en un medio elástico continuo, cuyo módulo de elasticidad corresponde a la deformabilidad del terreno.
- 3) En el modelo revestimiento-macizo rocoso se toma en cuenta la no transmisión de esfuerzos de tensión entre el macizo rocoso y el revestimiento en toda la intercara roca-concreto

## 5. ANALISIS NUMERICO

### 5.1 Datos

En la fig 5.1 se presentan las dimensiones del revestimiento del túnel. En ella se indican los espesores de la bóveda y de la pared supuestos en el análisis.

Para el análisis del revestimiento del túnel se consideró el área y el momento de inercia de la sección transversal completa (no agrietamiento) no transformada definida por los espesores indicados anteriormente y por un metro de longitud de túnel. El módulo de elasticidad del concreto se tomó como  $E_c = 14,000 \sqrt{f_c}$  y  $f_c = 250 \text{kg/cm}^2$

Los datos del macizo rocoso (módulo de elasticidad y relación de Poisson) se indicaron en el capítulo anterior. La carga de aflojamiento se varió de 10 a 20 ton/m tomando en cuenta los cálculos indicados en el capítulo anterior.

## 5.2 Estudio paramétrico

El análisis del modelo macizo rocoso-revestimiento del túnel se llevó a cabo con el Método del Elemento Finito considerando un problema de deformación plana. Se utilizó el programa de computadora RHEO-STAU B descrito en el capítulo 2. La malla de elementos finitos generada para resolver el problema se ilustra en la fig. 5.2. En ella se muestra la geometría de la sección transversal, el revestimiento, el macizo rocoso con sus fronteras y la superficie libre. En la fig. 5.2a se muestra una ventana de la malla de elementos finitos con el revestimiento y los elementos (triángulos) vecinos de la roca. Como se observa en la figuras mencionadas anteriormente, se aprovechó la simetría del problema.

El ancho de la zona aflojada que actúa sobre la clave del túnel en el modelo, así como una serie de datos (mencionados en el inciso anterior), resulta de un proceso iterativo. De los resultados de los análisis se establecen relaciones entre factores tales como la forma y el tamaño de la sección transversal, la rigidez del revestimiento, la deformabilidad del macizo rocoso y la extensión del posible aflojamiento. La rigidez del macizo rocoso y la carga de aflojamiento supuesta son los factores decisivos. En el presente trabajo se consideraron los siguientes casos:

Caso	Módulo de elasticidad del macizo rocoso (ton/m <sup>2</sup> )	Carga de aflojamiento (ton/m)
1a	40,000	15
1b	80,000	15
1c	150,000	15
2	80,000	10
3	80,000	20

### 5.3 Resultados

Se obtuvieron los elementos mecánicos del revestimiento (fuerza normal, fuerza cortante y momento flexionante; figs. 5.3a, 5.3b, 5.3c a lo largo del túnel para los casos 1a, 1b y 1c, mencionados en la tabla anterior. De acuerdo con la fig. 5.3c se aprecia que la relación que se presentó en los momentos para los diferentes módulos de elasticidad es entre 1.4 y 0.8.

Para verificar los resultados de los análisis con elementos finitos se revisó el equilibrio en el caso 1b (fig. 5.4) a partir de las fuerzas actuantes y reacciones del revestimiento calculadas con el programa RHEO-STAU B.

En la fig. 5.5 se muestran las trayectorias de los desplazamientos del revestimiento y en la fig. 5.6 las trayectorias de los esfuerzos en el macizo rocoso.

Para revisar el espesor considerado así como a obtener sus armados, se consideraron los elementos mecánicos del caso 1b.

#### **5.4 Comentarios sobre el diseño del revestimiento definitivo**

Con los elementos mecánicos determinados en el inciso anterior (fig. 5.7 y tabla 5.1), se procede al diseño del revestimiento definitivo del túnel para lo cual se siguieron las especificaciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal ( Departamento de D.F., 1987a ) y sus Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCC del Departamento del D.F., 1987b).

##### **a) Diseño por cortante**

Con este criterio se revisó el espesor propuesto de 40 cm para el

revestimiento definitivo (fig. 5.1). Debido a la ausencia de refuerzo por cortante (estribos), toda la fuerza cortante será tomada por la sección de concreto del revestimiento. Como el revestimiento no cumple con la tercera condición para que sea considerado como elemento ancho (2.1.5, a); II NTCC) se tiene que tomar en cuenta la cuantía de su refuerzo longitudinal a tensión como se indica en la siguiente expresión (2.1.5, a), I; NTCC):

$$\text{Capacidad del concreto: } V_{cr} = F_r b d (0.2 + 30p) \sqrt{f_c^*}$$

para:  $F_r = 0.8$  (1.6; NTCC);  $b = 100$  cm;  $p = 0.0005$  (supuesto para la revisión);

$f_c^* = 0.8 \times 250$  kg/cm<sup>2</sup> (1.4.1, b); NTCC) y  $d = 40 - 5 = 35$  cm, tenemos que:

$$V_{cr} = [(0.8)(100)(35)(0.2+30(0.0005))(200)]/1000 = 14 \text{ ton}$$

Como el revestimiento esta sujeto a fuerzas normales de compresión a todo lo largo de él, el valor anterior de  $V_{cr}$  se puede incrementar (2.1.5, a), III; NTCC).

En nuestro caso despreciamos este incremento.

Del análisis tenemos que

Fuerza cortante última máxima = 6.8 ton <  $V_{cr}$

Por lo que el espesor de 40 cm del revestimiento es suficiente.

### **b) Diseño por flexocompresión**

De acuerdo con el análisis, el acero longitudinal en la sección que corresponde a la clave del revestimiento debe diseñarse para una excentricidad

$$e = M_u / P_u = 6.6/31.8 = 20 \text{ cm}$$

que es mayor que la mínima especificada ( $e_{\min} = 0.05 \times 40 \text{ cm} = 2 \text{ cm}$ )(2.1.3, a);NTCC)

Con las hipótesis de diseño por flexocompresión (2.1.3, NTCC) y para un porcentaje de acero total de 1% tenemos:

$$N_R = 214 \text{ ton}$$

Del análisis tenemos que:

$$\text{Fuerza normal última} = N_u = 32 \text{ ton} < N_R$$

De acuerdo con la revisión anterior, no es necesario revisar otra sección.

Por lo tanto el área de acero propuesta es adecuada.

Debido al efecto favorable de la curvatura del revestimiento y la acción directa de la carga de aflojamiento, para las varillas del lecho inferior y superior respectivamente, no es necesario un armado especial para restringir el pandeo de las varillas longitudinales colocadas a lo largo del perímetro del revestimiento y se asignará esta función a los separadores necesarios para su colocación.

### **c) Refuerzo por cambios volumétricos**

El acero en la dirección longitudinal del revestimiento para los efectos por cambios volumétricos se calculó con la expresión (3.10; NTCC):

$$a_s = 1.5 \left[ \frac{660 x_1}{f_y (x_1 + 100)} \right], \text{ cm}^2 / \text{ cm de ancho en la dirección}$$

perimetral del revestimiento.

Para:  $x_1 = 40$  cm y  $f_y = 4,200$  kg/cm<sup>2</sup>, se tiene que:

$a_s = 0.070$  cm<sup>2</sup> por cada cm del perímetro del revestimiento.

Se proponen varillas del No. 4 a cada 35 cm en ambos lechos (2% de acero total) (fig. 5.8).

## 6. CONCLUSIONES

La primera conclusión que se tiene del desarrollo del presente trabajo, es que se ha demostrado e ilustrado que el Método del Elemento Finito es una herramienta de análisis que permite analizar en forma racional y eficiente el comportamiento de una estructura representada por el revestimiento definitivo interactuando con el macizo rocoso que lo rodea. El análisis con Elemento finito del macizo rocoso-revestimiento nos proporciona las deformaciones y esfuerzos del primero y los desplazamientos y los elementos mecánicos en el segundo con estos podemos revisar los estados límite de servicio y condiciones de falla del revestimiento y la capacidad de soporte de la roca, es decir, es un método que nos permite tener la solución completa de nuestro problema; a diferencia de otros métodos que sólo son aplicables a problemas sencillos (soluciones cerradas: matemáticas y analíticas a través de fórmulas) o métodos numéricos en los que se introducen simplificaciones que nos limitan las soluciones del problema (modelo del macizo rocoso mediante resortes).

También esperamos que se considere visto que la aplicación del Método del Elemento Finito en la solución de problemas de túneles no es un método "sofisticado" dado que su planteamiento y utilización resulta sencillo si se tienen claros los conceptos; y además de que en la actualidad disponemos en nuestro país de varios programas comerciales de elementos finitos (SAP80, SAP90, NISA, etc.)

También se concluye de esta tesis que es muy importante durante la modelación geomecánica tomar en cuenta los parámetros mecánicos y de resistencia del macizo rocoso en donde se emplazará un túnel ya que participan en forma directa en la definición de las secciones que conviene analizar a lo largo del túnel.

Mucho se menciona en nuestro medio sobre las incertidumbres de las propiedades mecánicas del macizo rocoso y de las cargas que se deben considerar para el análisis, por lo que otra conclusión de esta tesis es que mediante un estudio paramétrico con valores de estas variables dentro de un rango suficientemente amplio es posible determinar su influencia en los elementos mecánicos del revestimiento que son finalmente los resultados que nos interesan y así poder obtener sus espesores y armados económicos con un grado de seguridad aceptable.

Por último, por lo que corresponde a la revisión de la sección del revestimiento del túnel estudiado en esta tesis, hemos encontrado que el espesor y el armado propuesto nos proporciona una capacidad muy por encima de lo que se le solicita, por lo que se concluye que es conveniente proponer un revestimiento de menor espesor que nos conduzca a un economía importante.

## **REFERENCIAS**

**Barton, N., Lien R. and Lunde J. (1974), Engineering Clasification of Rock Masses for the Desing of Tunnel Supports, Rock Mechanics 6, Springer Verlag.**

**Bieniawski, Z.T. (1974), Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling, Proceiding 3rd. International Conference on Rock Mechanics, Denver.**

**Bray, J.W. (1967), A Study of Jointed and Fractured Rock, Rock Mechanics and Engineering Geology.**

**Departamento del Distrito Federal (1987a), Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, Diario Oficial.**

**Departamento del Distrito Federal (1987b), Normas Técnicas Complementarias**

para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, Gaceta Oficial del D.D.F.

Farmer, I.W. (1968), Engineering Properties of Rocks. E. and F.N. SPON LTD. Barnes Noble Inc.

Fritz, P. (1989), RHEO-STAU, User's Manual, Institute for Geotechnics, Department for Rock Engineering and Tunneling. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

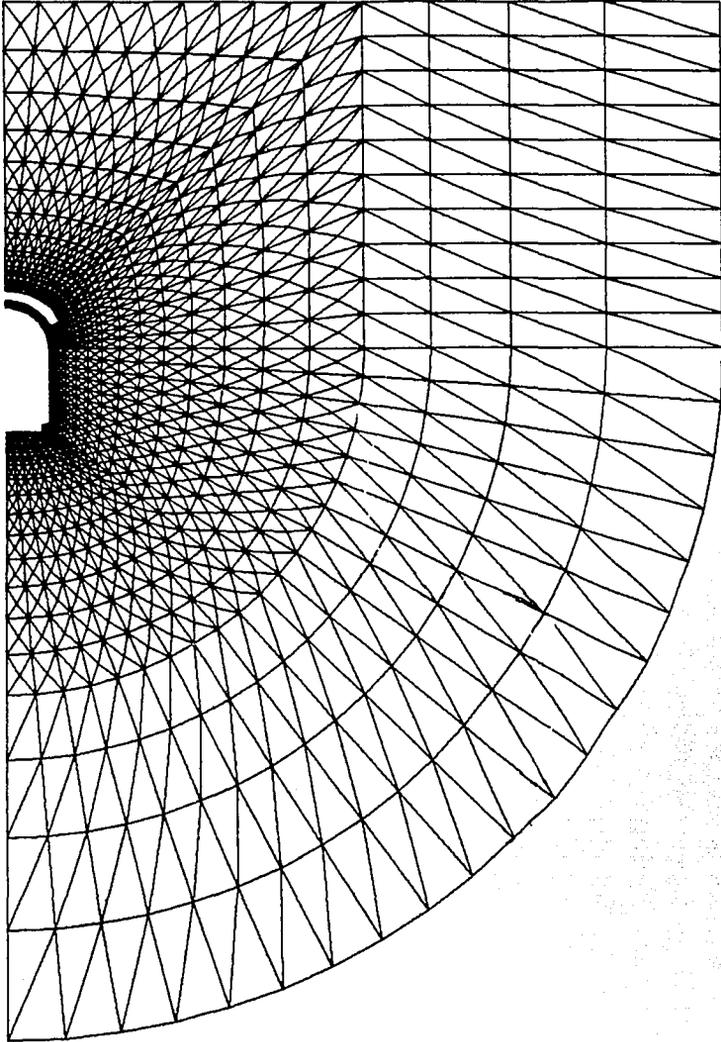
Kovari, K. (1979), Basic Considerations on the Design of Underground Openings, IABSE SURVEYS S-10/79, 9/79.

Schézy, K. (1973), The Art of Tunneling, Akadémiai Kiadó, Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest.

Shina, R.S. (1989) Underground Structures, Design and Instrumentation, Elsevier Science Publishers B.V.

Terzaghi, K. (1946), In Rock Tunneling Whit Steel Supports, Proctor, R.V. and White, T.L. Commercial Shearing, Youngstown, Ohio.

Timoshenko S.P. and Goodier (1951), Theory of Elasticity. Mc Graw-Hill,  
Kogakushua, Ltd.



• RHEO- •  
• STAUB •

Alicia Granados V. Tesis profesional. ENEP-ACATLAN

fig. 2.1. Ejemplo de una malla de elementos finitos

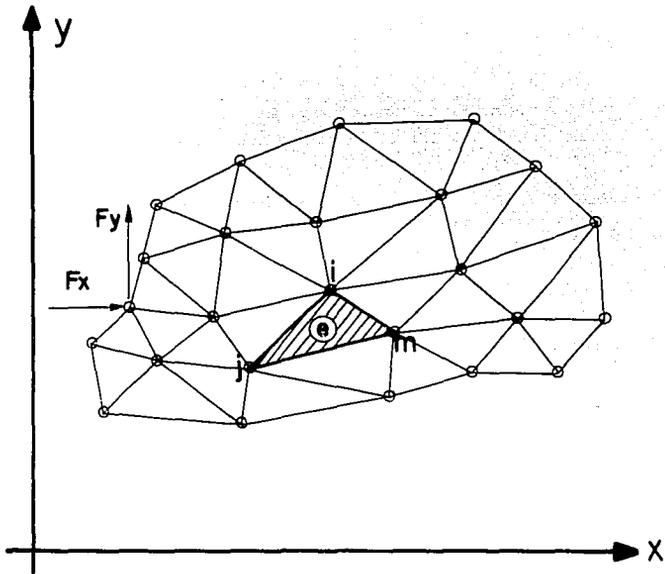


fig. 2.2 Malla de elementos finitos triangulares

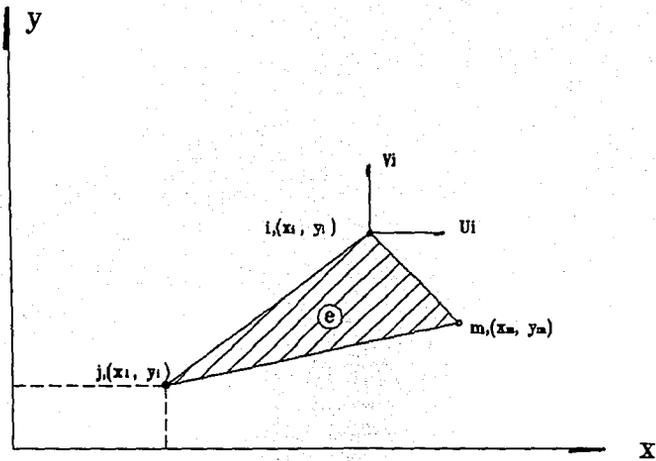
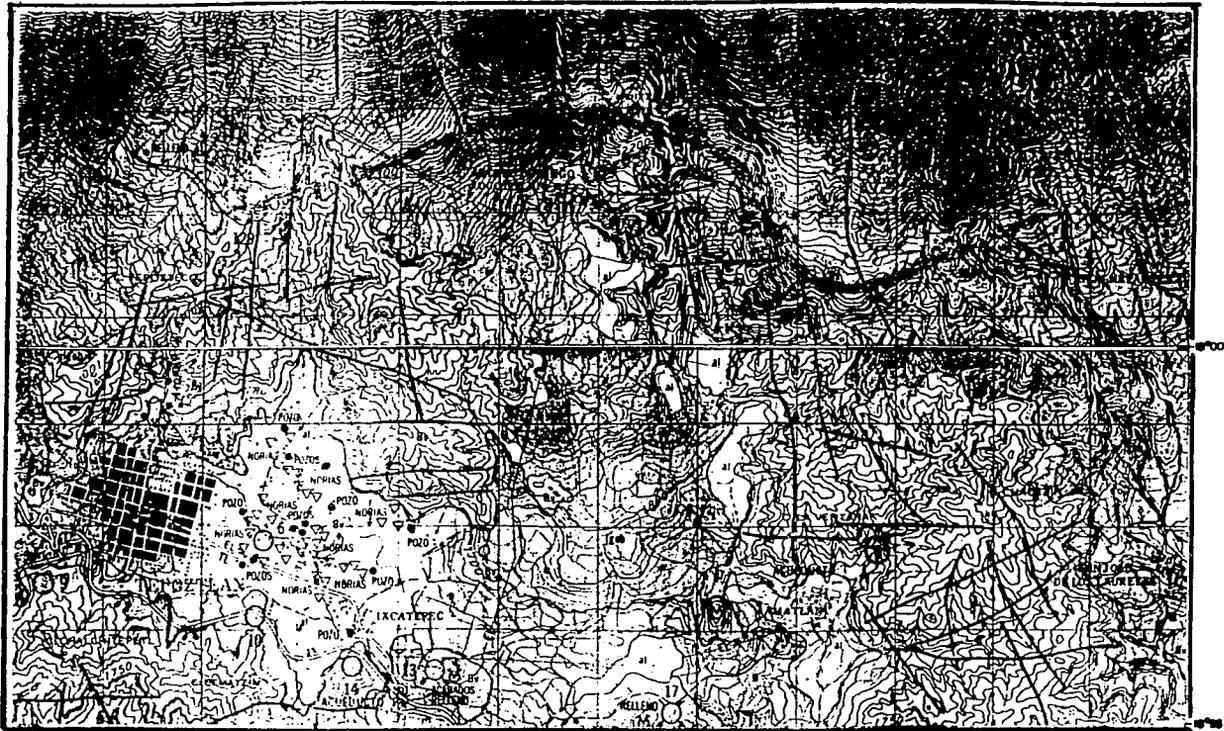


fig 2.3 Elemento finito triangular



99°00' 1 Km

**SIMBOLOGIA**

- VIA DE FERROCARRIL
- TUNEL

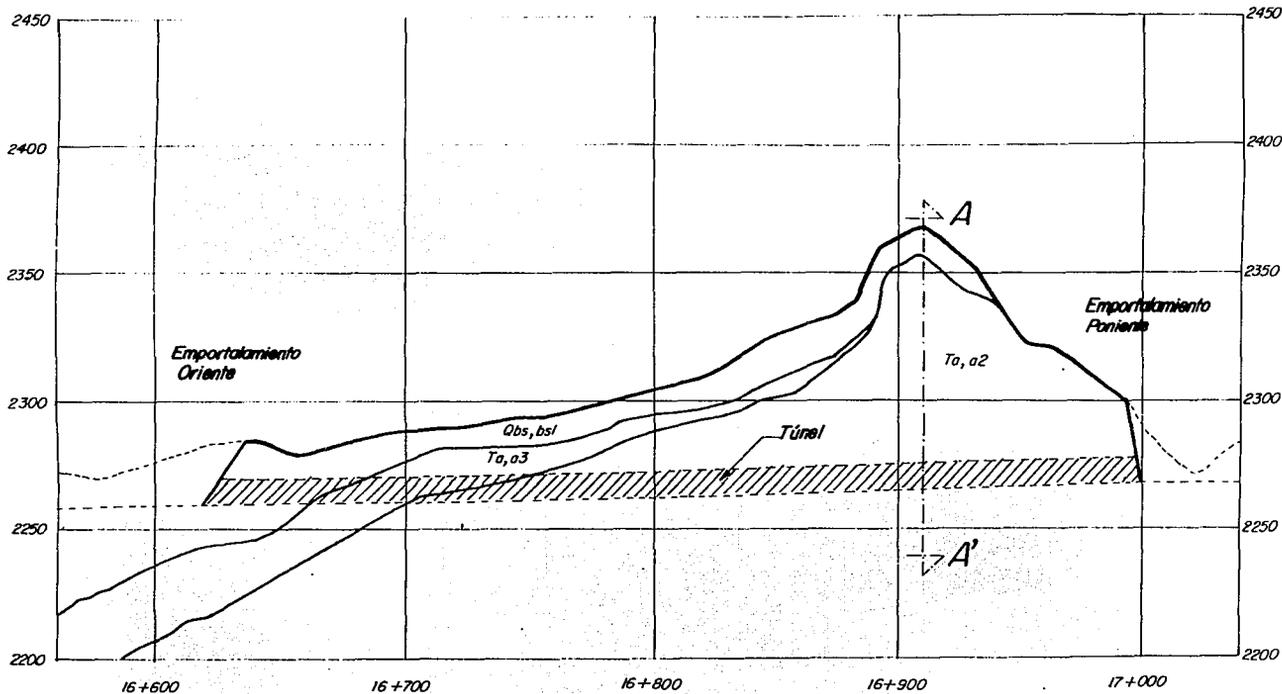
**LEYENDA**

- al ALUVION
- lgeb FORMACION CHICHINAUTZIN
- Bb FORMACION TEPOZTLAN

fig. 3.1 : CROQUIS GEOLOGICO REGIONAL Y LOCALIZACION DEL TUNEL

NOTA: TOMADA DE LAS CARTAS E-14 A49 Y A59 DE INEGI

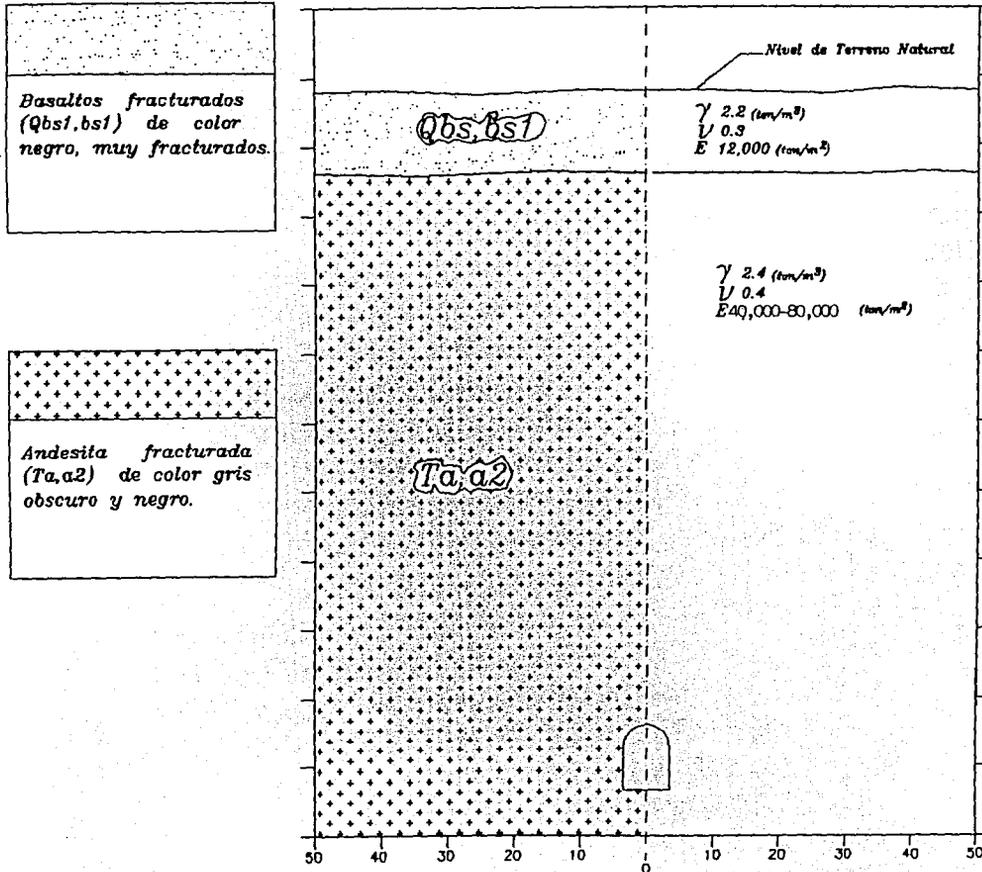
ESCALA 1:80 000



ESCALA 1:2000  
Anotaciones en metros

fig. 3.2 Sección geológica

fig. 4.1. Sección transversal del túnel  
( corte A-A' de la fig. 3.2 )



ESCALA 1:750  
Anotaciones en metros.

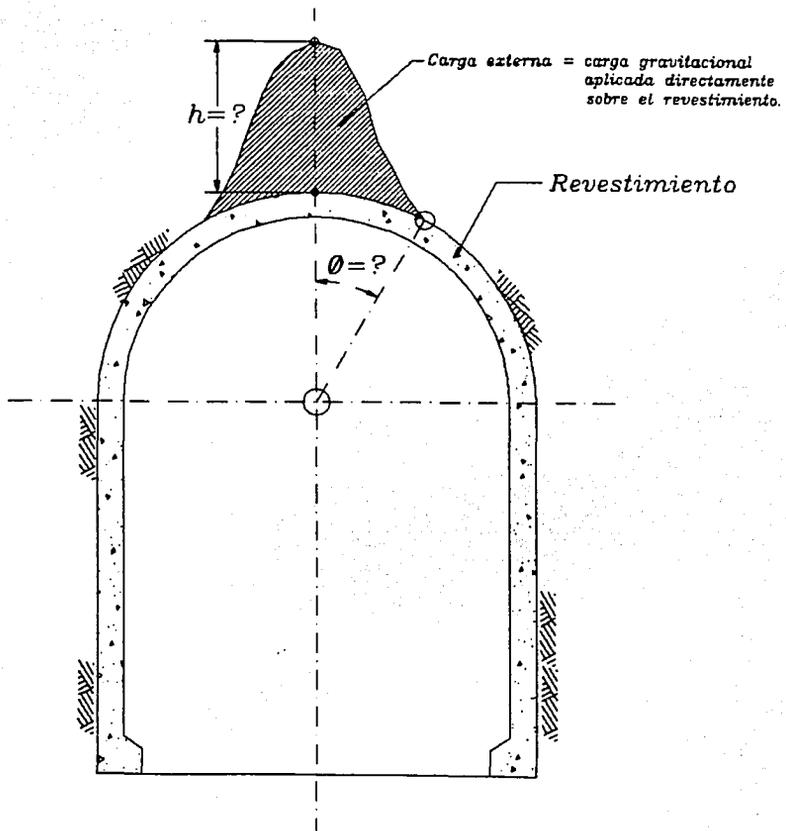


fig. 4.2. Modelo de la carga de aflojamiento

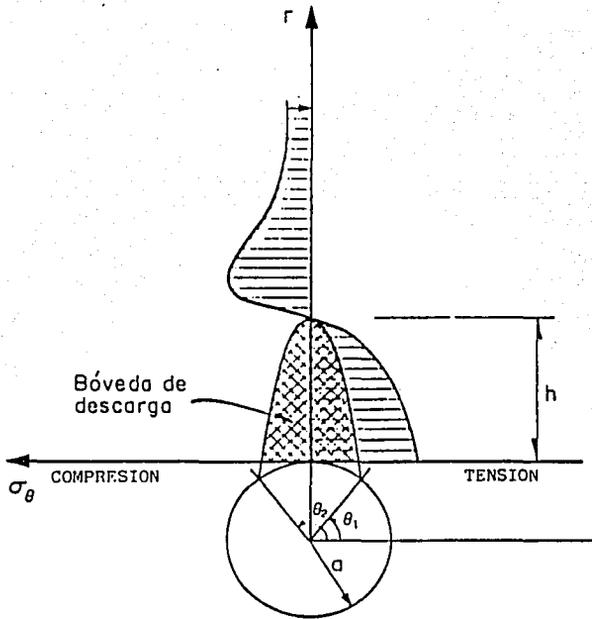


fig. 4.3 Bóveda de descarga según Alberro

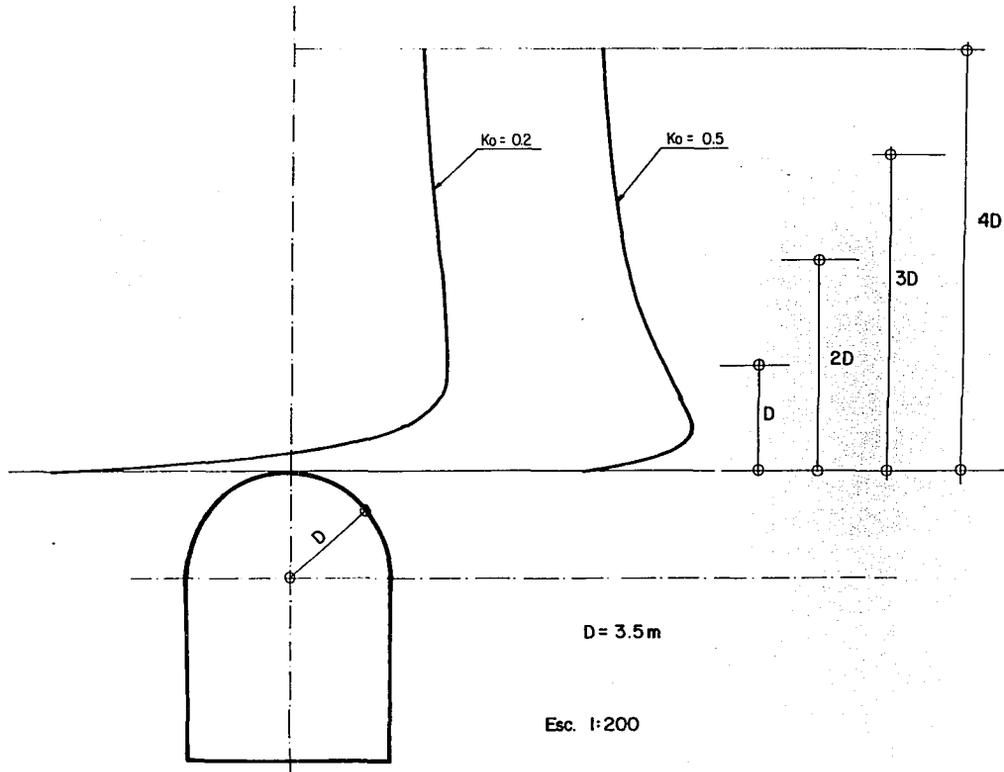
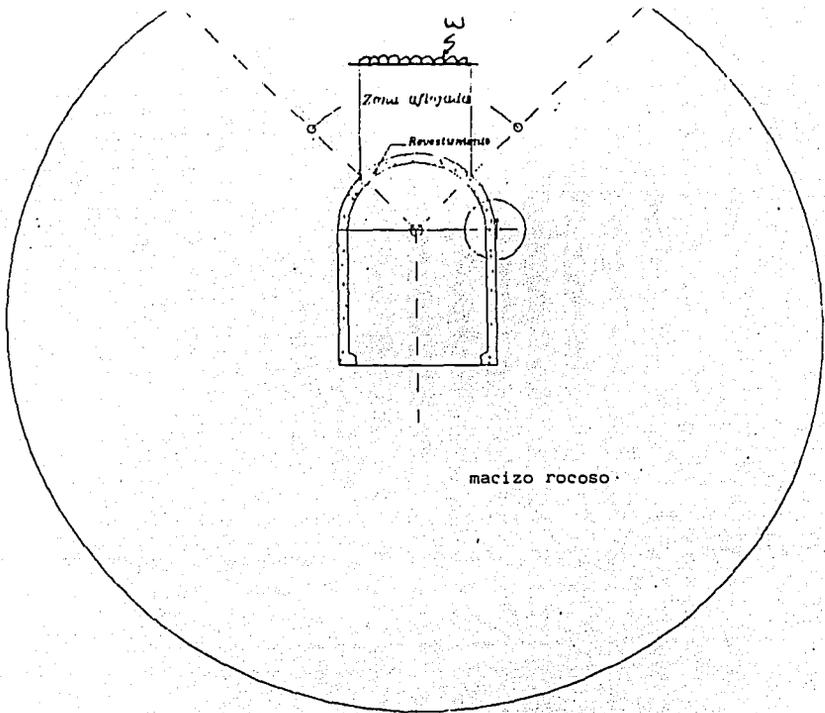
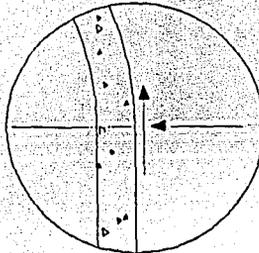


fig. 4.4 Distribución de esfuerzos tangenciales según Kirsh

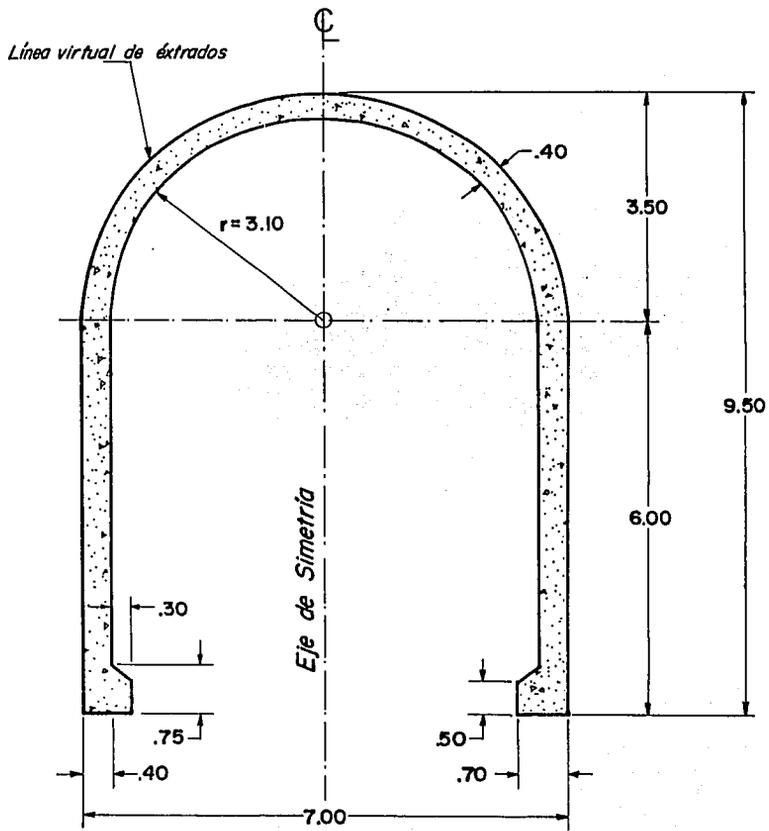


a. *Modelo roca-revestimiento.*



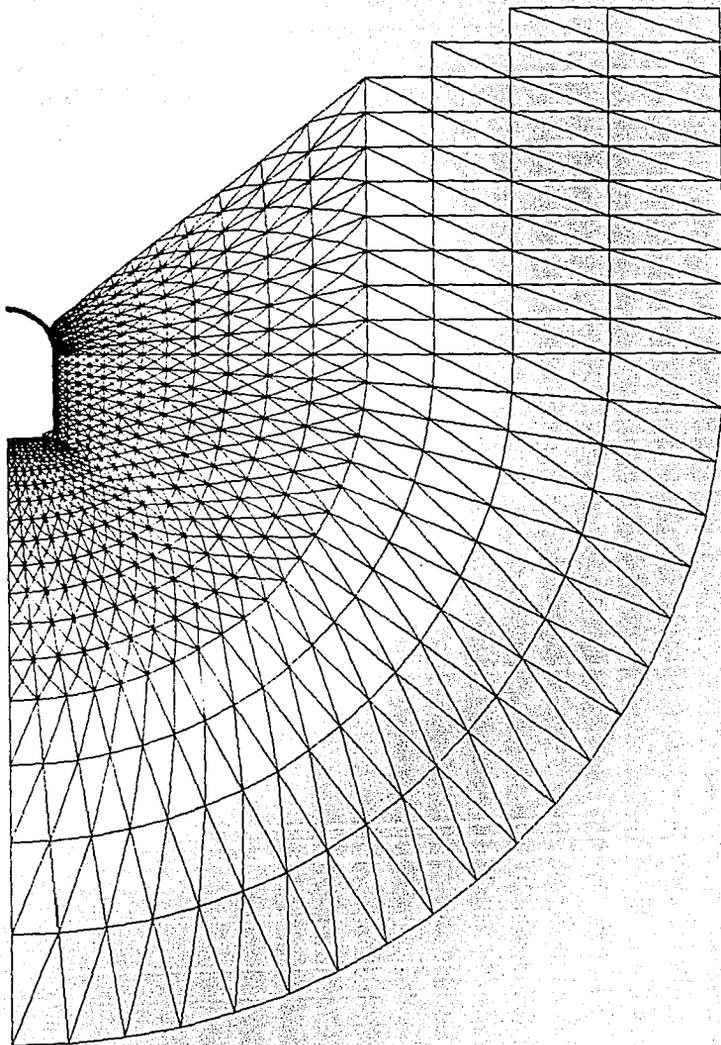
b. *Fuerzas de interacción roca-revestimiento.*

fig. 4.5 Modelo macizo rocoso-revestimiento



Acotaciones en m

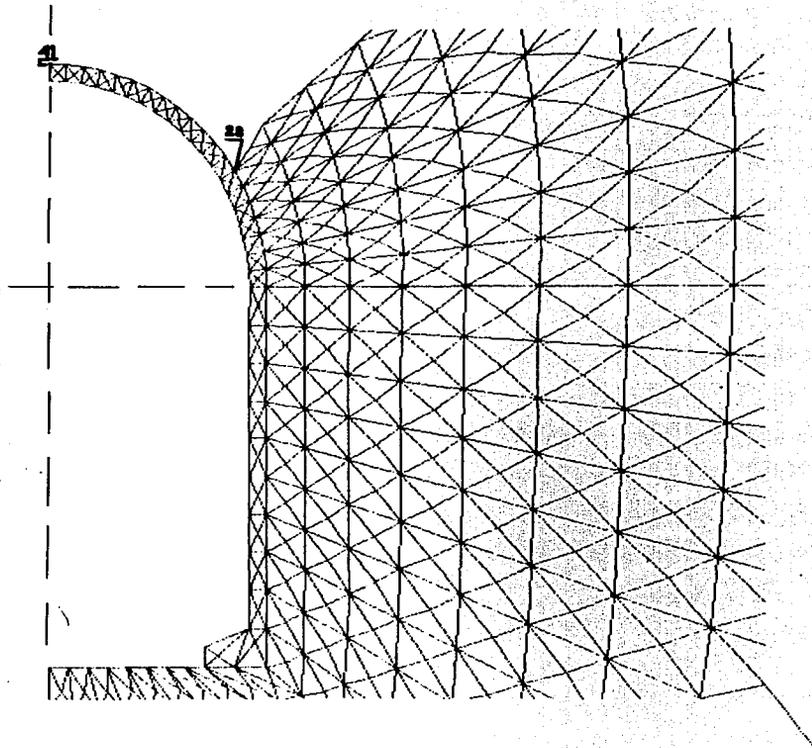
fig. 5.1 Geometría del Revestimiento



• RHEO- •  
• STAUB •

Alicia Granados V. Tesis profesional. ENEP-ACATLAN

fig. 5.2. Malla completa de elementos finitos

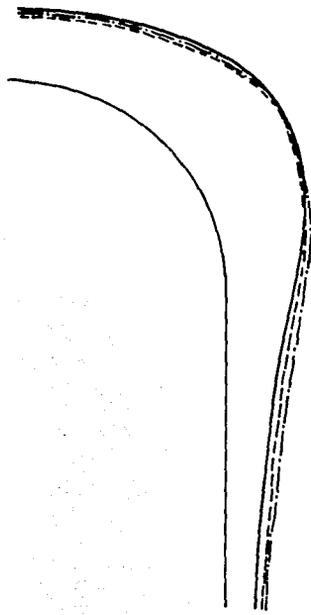


Alicia Granados V. Tesis profesional. ENEP-ACATLAN

fig. 5.2a Ventana de la malla de elementos finitos

\* RHEO \*

\* STAIR \*



$E = 80,000 \text{ ton/m}^2$  - - - - -  
 $E = 40,000 \text{ ton/m}^2$  . . . . .  
 $E = 150,000 \text{ ton/m}^2$  ———

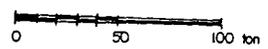


fig. 5.3a Diagrama de Fuerzas Normales

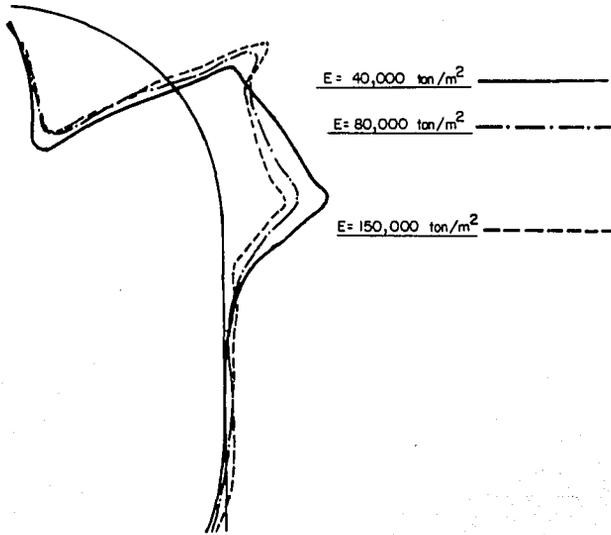


fig. 5.3b Diagrama de Cortante

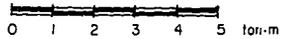
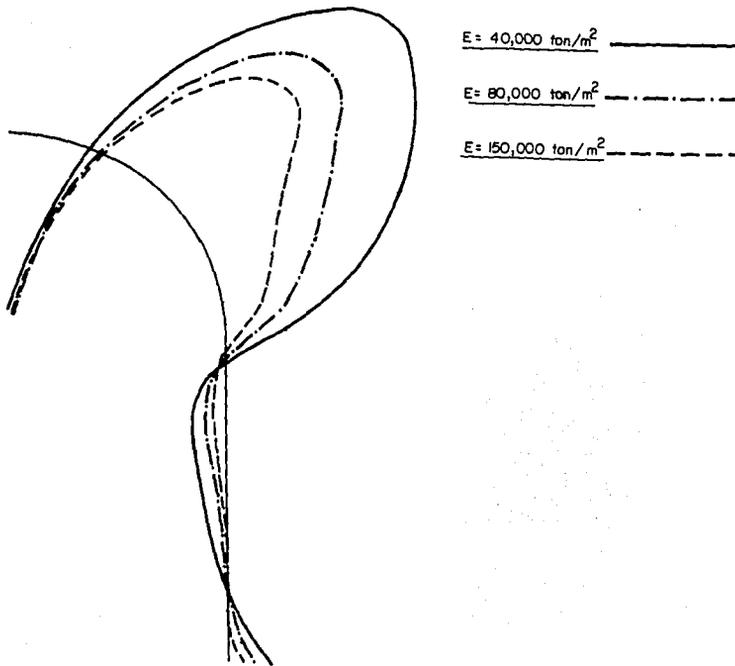


fig. 5.3c Diagrama de Momentos

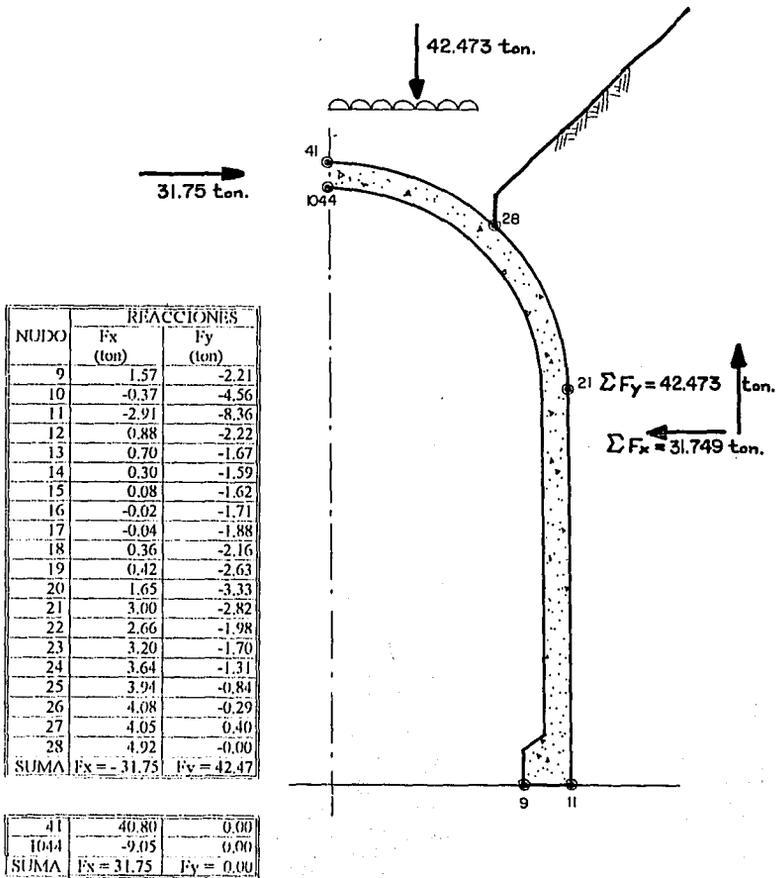
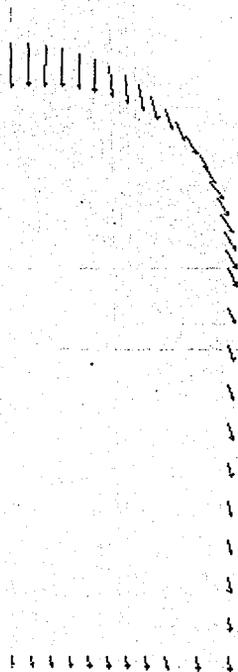


fig. 5.4 Diagrama de equilibrio



Nudo	UX (mm)	UY (mm)
21	0.61	-0.10
22	0.66	-0.14
23	0.69	-0.10
24	0.72	-0.10
25	0.74	-0.10
26	0.75	-0.11
27	0.74	-0.11
28	0.71	-0.11
29	0.67	-0.11
30	0.61	-0.12
31	0.53	-0.13
32	0.43	-0.14
33	0.33	-0.15
34	0.23	-0.17
35	0.13	-0.19
36	0.06	-0.21
37	0.01	-0.23
38	-0.01	-0.24
39	-0.02	-0.26
40	-0.02	-0.27
41	0.00	-0.29

fig. 5.5 Desplazamientos

Alicia Granados V. Tesis Profesional. ENEP-ACATLAN

\* RHEO- \*

\* STAUB \* ©

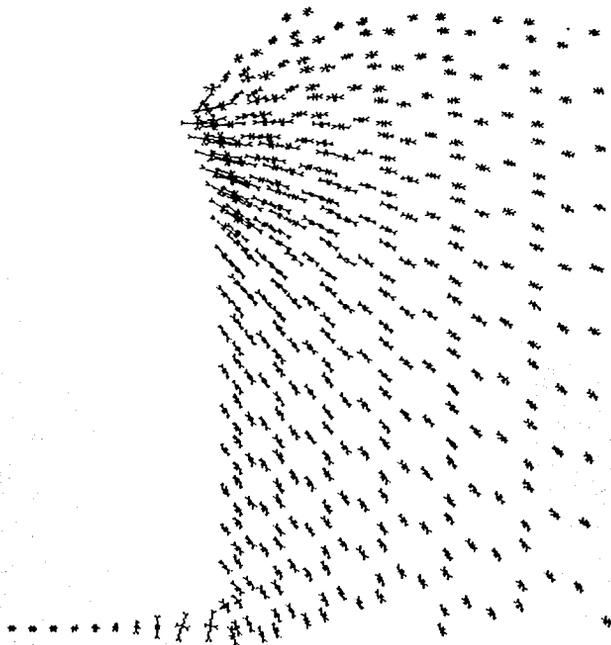


fig. 5.6 Esfuerzos

Alicia Granados V. Tesis Profesional. ENEP-ACATLAN

\* RHEO- \*

\* STAUB \*

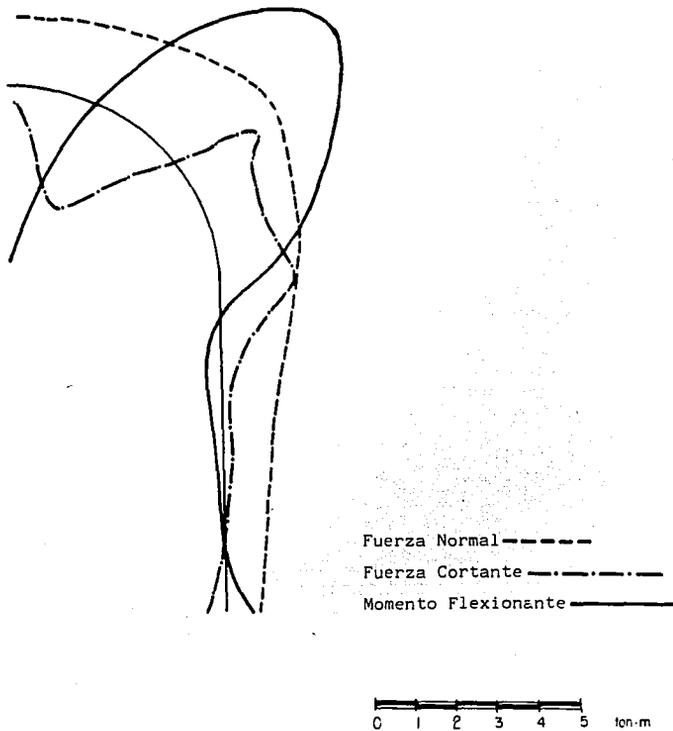


fig. 5.7 Diagramas de elementos mecánicos, caso 1b

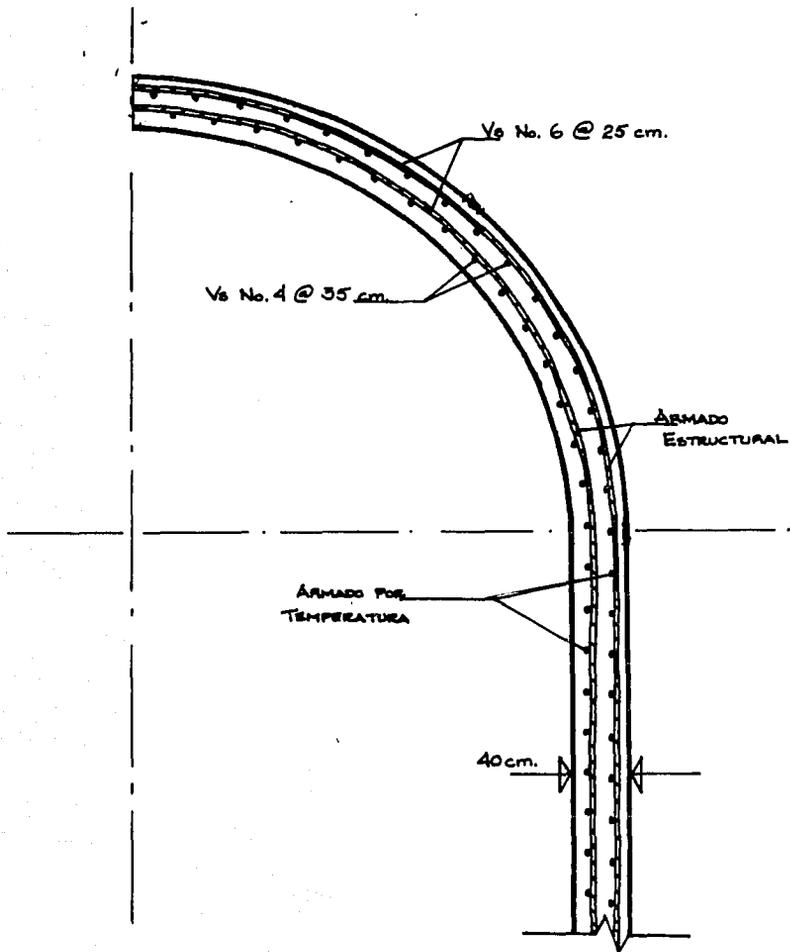


fig. 5.8. Armado del acero de refuerzo

PARAMETRO	BASALTOS	ANDESITAS	
	Qbs, bs1	T <sub>a</sub> , a3	T <sub>a</sub> , a2
RQD	35.00	25.00	45.00
Jn	12.00	15.00	12.00
Jr	2.00	2.00	2.00
Ja	1.00	2.00	1.00
Jw	0.66	1.00	1.00
SRF	5.00	5.00	5.00
RQD/Jn	2.92	1067.00	3.75
Jr/Ja	2.00	1.00	2.00
Jw/SRF	0.13	0.20	0.20
Q	0.77	0.33	4.50
Calidad	Muy Pobre	Muy Pobre	Regular

**Tabla 3.1 CALIDAD (Q) DE LAS UNIDADES DE ROCA SEGUN BARTON.**

PARAMETRO	BASALTOS	ANDESITAS	
	Qbs, bs1	T <sub>a</sub> , a3	T <sub>a</sub> , a2
Rc	0.00	1.00	2.00
RQD	8.00	5.00	10.00
Esp. / Discont.	3.00	6.00	6.00
Caract. de Discont.	5.00	5.00	5.00
Cond. de Agua	8.00	8.00	10.00
RMR	24.00	25.00	33.00
Clase	IV	IV	III
Calidad	Roca Mala	Mala	Regular

**Tabla 3.2 CALIDAD (RMR) DE LAS UNIDADES DE ROCA SEGUN BIENIAWSKI.**

Alicia Granados Vazquez. Tesis profesional. ENEP-ACATLAN  
Tunel

SECCION	FUERZA NORMAL (ton)	FUERZA CORTANTE (ton)	MOMENTO FLEXIONANTE (ton-m)
1	17.140	-.725	.593
2	18.826	-.060	.107
3	20.428	.223	-.079
4	22.054	.304	-.156
5	23.772	.291	-.224
6	25.655	.252	-.328
7	27.819	.287	-.469
8	30.461	.691	-.541
9	33.804	2.307	-.099
10	36.837	3.722	.700
11	39.334	3.193	1.313
12	41.805	2.869	1.813
13	44.223	2.708	2.253
14	46.544	2.659	2.677
15	48.704	2.693	3.122
16	50.502	2.919	3.650
17	53.845	4.137	4.169
18	53.003	.689	4.946
19	50.931	-1.655	5.093
20	48.665	-3.506	4.689
21	46.301	-4.853	3.859
22	43.926	-5.699	2.730
23	41.627	-6.064	1.423
24	39.488	-5.979	.057
25	37.579	-5.485	-1.261
26	35.969	-4.644	-2.435
27	34.712	-3.524	-3.388
28	33.851	-2.201	-4.059
29	33.412	-.746	-4.405

Tabla 5.1 Elementos Mecanicos en el Revestimiento