

92  
Ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ASPECTOS TEORICOS Y PRACTICOS DE LA  
DEFORMABILIDAD EN TUNELES  
SEMIPROFUNDOS EN LOS SUELOS  
FIRMES DE LA CIUDAD DE  
MEXICO**

**TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
*INGENIERO*                      *CIVIL*  
P R E S E N T A :  
JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES**

MEXICO, D. F.

1988



## **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.

## C O N T E N I D O

- I. INTRODUCCION
  
- II. DESCRIPCION DE LOS TUNELES
  - 2.1. Descripción del trazo
  - 2.2. Topografía del trazo
  - 2.3. Proyecto de secciones transversales
  
- III. PROPIEDADES DEL SUBSUELO
  - 3.1. Generalidades
  - 3.2. Estratigrafía y propiedades
  
- IV. DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS
  - 4.1. Longímetro
  - 4.2. Extensómetro mecánico
  - 4.3. Inclínómetro
  - 4.4. Nivelación
  - 4.5. Celda hidráulica
  
- V. INSTRUMENTACION REALIZADA EN LOS TUNELES
  - 5.1. Secciones de convergencia
  - 5.2. Secciones de extensómetros
  - 5.3. Secciones de inclinómetros
  - 5.4. Secciones de nivelación
  - 5.5. Secciones de celdas hidráulicas

## **VI. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA INSTRUMENTACION**

- 6.1. Convergencias**
- 6.2. Extensómetros**
- 6.3. Inclínómetros**
- 6.4. Nivelación**
- 6.5. Celdas hidráulicas**

## **VII. CORRELACION DE RESULTADOS**

- 7.1. Deformaciones horizontales**
- 7.2. Deformaciones verticales**

## **VIII. COMPARACION ENTRE RESULTADOS TEORICOS Y LOS OBTENIDOS DE LAS MEDICIONES**

- 8.1. Cálculo de las presiones ejercidas sobre los revestimientos**
- 8.2. Métodos para la valuación de elementos mecánicos en el revestimiento**
- 8.3. Comparación entre resultados teóricos y los obtenidos de las mediciones**

## **IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

- A) Lista de figuras**
- B) Lista de tablas**
- C) Figuras**
- D) Tablas**
- E) Referencias**

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

Dentro de la mecánica de suelos en general ha existido incertidumbre para saber el comportamiento real de las estructuras que se construyen en el interior del subsuelo, llamese ésta cimentación de un edificio, construcción de un cajón para metro, túneles para metro, túneles para drenaje, etc.

La incertidumbre se acentúa cuando se trata de excavar túneles - en suelos firmes como los que se encuentran en la zona poniente de la ciudad de México, ya que la experiencia en nuestro país se inclina hacia la excavación de túneles en masas rocosas y en suelos suaves. Para solucionar en cierta forma este problema se ha desarrollado en los últimos años, dentro de las obras realizadas en otros países, una tendencia hacia la observación de los fenómenos que ocurren; midiendo los aspectos que se consideran esenciales para la definición de los mismos; para ello se ha recurrido a la instrumentación de túneles.

Para la construcción de la Línea 7 del Metro de la ciudad de México, se excavaron túneles semiprofundos en los suelos firmes de la zona poniente de la ciudad, el cual se le conoce comunmente - como zona de transición; la profundidad de excavación en promedio fue de 20 m aproximadamente, medido del nivel del terreno natural a la clave del túnel, la altura de las secciones, así como

los diámetros variaron entre 6 y 9 m.

Para conocer el comportamiento de las excavaciones en esta obra, se diseñó un programa de observaciones, en el que se incluyó la instalación de instrumentos que debían registrar los fenómenos antes, durante y después de la construcción. El objeto que perseguía este programa dentro de otros también importantes, fue el de controlar las deformaciones en cada frente de excavación de túnel, ya que como es sabido de antemano, estas no se deben evitar en su totalidad.

Dentro del programa de instrumentación se tenía previsto una interpretación de resultados en forma inmediata, con información diaria, esto con el objeto de tranquilizar al constructor y al dueño de la obra, en el caso que las deformaciones estuvieran en el rango de tolerancia, o por el contrario para tomar medidas precautorias encaminadas a evitar algún accidente.

También se incluían las interpretaciones a mediano y a largo plazo. Se dice que a mediano plazo por que se debían analizar los resultados en un lapso de una semana, de un mes, etc. de donde se debía concluir ya sea a cambiar métodos constructivos o a reforzarlos. La interpretación a largo plazo sería la que se haría al final de la obra y la más difícil, puesto que ésta se utilizaría para tratar de reforzar las teorías que se usaron en el proyecto o solamente a corroborar los resultados esperados y calculados a través de la misma. En esta última etapa, la interpretación de resultados es muy complejo como se podrá observar en -

esta tesis, en donde se exige que los resultados esten completos, lo cual no siempre se logró.

En este escrito se trata de realizar la última etapa del programa de observaciones diseñados para la Línea 7 del Metro de la Ciudad de México, para ello se ha ordenado de la siguiente manera; se inicia con el capítulo II en el que se hace una descripción de los túneles de la Línea 7; se habla del trazo, de la topografía y las secciones que fueron proyectadas para esta línea. En el capítulo III se habla de las propiedades del subsuelo, los cuales se han obtenido de el análisis hecho sobre las muestras, extraídas éstas de los sondeos que se realizaron a lo largo de la Línea, también se señalan las pruebas realizadas y se describe la estratigrafía general en donde se marca la profundidad a la que se excavó el túnel y los estratos que atravesó. En el capítulo IV se hace una descripción de los instrumentos que se utilizaron para la medición de deformaciones en los túneles. El capítulo V trata del programa de instrumentación, tanto la proyectada como la realizada, ya que no siempre se cumplió con el programa debido a los problemas que se presentaron en obra y que no estaban contemplados en el proyecto. El capítulo VI se presentan los resultados que se obtuvieron con cada uno de los instrumentos antes descritos y con estos se hicieron histogramas, posteriormente con estos resultados se realizó una correlación entre diferentes instrumentos en donde los resultados se corroboraron; esto último se presenta en el capítulo VII. En el capítulo

VIII se habla de la teoría a través de la cual se pueden aprovechar los resultados finales de la instrumentación, que como se dijo en un principio, es un trabajo difícil, sin embargo, se trata en este capítulo de aprovechar y sentar las bases para futuras mediciones. Finalmente en el capítulo XI se dan las conclusiones y recomendaciones extraídas del desarrollo de este trabajo.



## CAPITULO II

### DESCRIPCION DE LOS TUNELES

La Línea 7 del Metro de la Ciudad de México, se localiza en el sector poniente, la cual abarca desde Tacuba hasta Barranca del Muerto, con una extensión de aproximadamente 13 km.

La descripción del recorrido es el que se realiza a continuación nombrando las calles y las colonias en donde se contruyó, - Fig. 1.

#### 2.1. DESCRIPCION DEL TRAZO

##### ESTACION TACUBA

La estación Tacuba se ubica sobre la calle de Golfo de México entre la Calzada México-Tacuba y la calle de Golfo de Bengala en la colonia Pueblo Tacuba; su longitud es de 150 m; el eje de la estación se localiza en el cadenamiento 8+651.90, su construcción fue realizada a cielo abierto con ayuda de muros milan.

##### TRAMO: TACUBA-SAN JOAQUIN

Este tramo inicia en la cabecera sur de la Estación Tacuba y termina en la cabecera norte de la Estación San Joaquín, tiene una longitud total de 1321 m; el recorrido se realiza sobre las calles de Golfo de México, Golfo de Aden, Lago Hielmar hasta Laguna de Terminos; su construcción se realizó por medio de túneles

con el auxilio de tres lumbreras excavadas a cielo abierto a diferentes distancias a lo largo del tramo.

#### ESTACION SAN JOAQUIN

La Estación San Joaquín se construyó sobre la calle de Lago Hielmar entre las calles de Laguna de Terminos y Lago Bolsena, en la colonia Pensil, su longitud es de 150 m; es una construcción de tipo túnel a excepción de los accesos que fueron ejecutados a cielo abierto con muros milan, el eje de la estación es el cadenumiento 10+236.21.

#### TRAMO: SAN JOAQUIN-POLANCO

Este tramo inicia en la cabecera sur de la Estación San Joaquín y termina en la cabecera norte de la Estación Polanco; para su construcción fue necesario la excavación de un túnel de doble vía y una lumbrera entre estaciones, tiene una longitud total de 1079.00 m; el recorrido se realiza por las calles de Lago Hielmar, atraviesa las Av. Rfo San Joaquín y Ejército Nacional; continúa por la calle de Arquímedes hasta cruzar con la calle de Hesiodo en donde se termina dicho tramo.

#### ESTACION POLANCO

La Estación Polanco se ubica sobre la Av. Arquímedes entre las calles de Hesiodo y la Av. Horacio en la colonia Polanco, tiene una longitud de 150 m. Es una construcción de tipo túnel a ex--

cepción de los accesos que fueron realizados a cielo abierto con muros milan; el eje de la estación se encuentra en el cadenamiento 11+507.40

#### TRAMO: POLANCO-AUDITORIO

Este tramo inicia en la cabecera sur de la Estación Polanco y termina en la cabecera norte de la Estación Auditorio, tiene una longitud de 811.00 m; su recorrido se realiza por la Av. Arquimedes hasta cruzar con el Paseo de la Reforma, su construcción se realiza a base de túneles; en este tramo también fue necesario realizar la excavación de una lumbrera a cielo abierto entre las dos estaciones.

#### ESTACION AUDITORIO

La Estación Auditorio se construyó en el cruce de Paseo de la Reforma y la Av. Molino del Rey, en la colonia Chapultepec Polanco, su longitud es de 150 m, se construyó a base de túneles con excepción de los accesos que se hicieron a cielo abierto con muros milan. El eje de la estación se encuentra en el cadenamiento 12+469.15 y como caso particular fuera de la estación se restituyó un estacionamiento para automóviles.

#### TRAMO: AUDITORIO-CONSTITUYENTES

Inicia este tramo en la cabecera sur de la Estación Auditorio y termina en la cabecera norte de la Estación Constituyentes; se

desarrolla en su recorrido una longitud de 1415 m, también fue necesario para su construcción excavar dos lumbreras a diferentes distancias entre las estaciones; a excepción de los tramos anteriores este recorrido se realiza en forma paralela a la Calzada Molino del Rey por el lado poniente, hasta retornar a la misma en el cruce con la Av. Constituyentes, en donde se termina el tramo.

#### ESTACION CONSTITUYENTES

La Estación Constituyentes se contruyó sobre la Av. Parque Lira entre la Av. Constituyentes y la calle de Luis Curiel, en la colonia Ampliación D. Garza, la longitud de esta estación es de 150 m, su construcción fue a base de túneles y sus accesos se excavaron a cielo abierto. El eje de la estación se ubica en el cadenamamiento 14+030.30

#### TRAMO CONSTITUYENTES-TACUBAYA

En el tramo Constituyentes-Tacubaya inicia en la cabecera sur de la Estación Constituyentes y termina en la cabecera norte de la Estación Tacubaya, la longitud total de este tramo es de 1226.50 m; el recorrido se inicia sobre la Av. Parque Lira, posteriormente se desvía hacia el lado poniente para que al final regrese a la misma avenida en el cruce con la Av. Jalisco en donde termina el tramo; su construcción es a base de túneles con dos lumbreras entre las estaciones.

#### ESTACION TACUBAYA

La Estación Tacubaya se construyó sobre la Av. Parque Lira entre la Av. Jalisco y la calle de M. Dublan, en la colonia Tacubaya; la longitud total de la estación es de 150 m. Esta estación se caracteriza por que es una estación de transbordo a la Línea 2 - del Metro, su construcción es a base de túneles con el auxilio - de dos lumbreras excavados a los costados de la estación; el eje de ésta se ubica en el cadenamiento 15+410.81

#### TRAMO: TACUBAYA-SAN PEDRO DE LOS PINOS

El Tramo Tacubaya a San Pedro de los Pinos se desarrolla a partir de la cabecera sur de la Estación Tacubaya y termina en la cabecera norte de la Estación San Pedro de los Pinos, la longitud total de este tramo es de 1067.40 m; el recorrido se realiza en un principio sobre la Av. Parque Lira cruza el Viaducto Río de Tacubaya y continúa sobre la Av. Revolución, termina en el cruce con la calle Siete; su construcción se realiza por medio - de túneles y una lumbrera excavado a cielo abierto entre las dos estaciones.

#### ESTACION SAN PEDRO DE LOS PINOS

La construcción de la Estación San Pedro de los Pinos se realizó entre la calle Siete y la calle Trece, esto es en la colonia San Pedro de los Pinos, la longitud total de la estación es de 150 m; también fue necesario excavar túneles y una lumbrera, los acce--

Los pozos se excavaron a cielo abierto por el lado oriente y poniente de la misma, el eje de la estación se ubica en el cadenamiento 16+664.99

#### TRAMO: SAN PEDRO DE LOS PINOS-SAN ANTONIO

Este tramo se desarrolla a partir de la cabecera sur de la Estación San Pedro de los Pinos y termina en la cabecera norte de la Estación San Antonio; la longitud del tramo es de 585.80 m. Su construcción es a base de túneles y una lumbrera entre estaciones; el recorrido se realiza por la Av. Revolución a partir de la calle Trece hasta la Av. San Antonio en donde termina.

#### ESTACION SAN ANTONIO

Esta estación se construyó entre la Av. San Antonio y la calle de Tintoreto en la colonia Nonoalco, la longitud total es de 150 m; su construcción fue por medio de túneles con el auxilio de una lumbrera excavado a cielo abierto por el lado poniente de la estación; el eje de la misma se ubica en el cadenamiento 17+400.80

#### TRAMO: SAN ANTONIO-MIXCOAC

Este tramo se desarrolla sobre la Av. Revolución a partir de la calle de Tintoreto hasta terminar en la calle de Empresa aproximadamente, la longitud total es de 787.70 m; su construcción es a base de túneles y una lumbrera excavada entre las dos estaciones.

#### ESTACION MIXCOAC

La Estación Mixcoac se excavó a base de túneles y una lumbrera - por el lado poniente; se ubica sobre Av. Revolución entre las ca- lles de Empresa y Donatello en la colonia Mixcoac, la longitud - total de la estación es de 150 m y en el cadenamiento 18+398.46 se ubica el eje de la estación.

#### TRAMO: MIXCOAC-BARRANCA DEL MUERTO

Este tramo se construyó sobre la Av. Revolución iniciando en la calle de Donatello y terminando en la Av. Barranca del Muerto, - su construcción fue a base de túneles con una lumbrera entre las estaciones; la longitud total de su desarrollo es de 1476.00 m.

#### ESTACION BARRANCA DEL MUERTO

Esta es la última estación que constituye la Línea 7, su ubica- ción es en Av. Revolución entre las calles de Manuel Padilla y - Alcalá en la colonia Guadalupe Inn; para su construcción fue ne- cesario excavar una lumbrera y túneles, la longitud total de la estación es de 150m, cuyo eje está en el cadenamiento 19+964.54

Para el estacionamiento y cambio de vias de los trenes del Metro fue necesario prolongar las excavaciones hacia el norte de la - Estación Tacuba y hacia el sur de la Estación Barranca del --- Muerto aproximadamente 1 km en cada una de ellas; la excavación fue a base de túneles en los dos casos.

## 2.2. TOPOGRAFIA DEL TRAZO

La topografía del trazo por donde circula el tren del Metro, se refiere principalmente a las pendientes que se diseñaron en el recorrido, se hará una descripción de las pendientes en los diferentes tramos ya que en todas las estaciones la pendiente fue nula.

### TRAMO: TACUBA-SAN JOAQUIN

En este tramo se inicia con una pendiente a partir de la lumbreira 3-TJ-A de -2.0% hasta 70 m adelante, continúa con una pendiente de -0.2% a lo largo de los siguientes 520 m, posteriormente cambia a +0.36% a lo largo de los últimos 570 m, así con esta pendiente termina en la cabecera norte de la Estación San Joaquín, que como se dijo anteriormente, en ésta se tiene una pendiente de 0.0%

### TRAMO: SAN JOAQUIN-POLANCO

A partir de la cabecera sur de la Estación San Joaquín hasta 520 m adelante se tiene una pendiente de -0.6%, después en los 450 m siguientes es de +0.4% y en los últimos 100 m cambia a +0.45%, con esta pendiente se conecta a la cabecera norte de la estación.

### TRAMO: POLANCO -AUDITORIO

Después de la Estación Polanco en donde la pendiente es 0% el --



trazo continúa con una pendiente de  $-0.2\%$  a lo largo de 240 m, - posteriormente continúa con una de  $+0.8\%$  en una longitud de 515m hasta llegar a la Estación Auditorio.

TRAMO: AUDITORIO-CONSTITUYENTES

A partir de la cabecera sur de la Estación Auditorio se inicia - este tramo con una pendiente de  $+0.7\%$  a lo largo de 475 m des---pués cambia a  $+4\%$  en una longitud de 460 m, continúa el trazo -- con  $+0.45\%$  en un tramo de 130 m, posteriormente cambia a  $-4\%$  en una longitud de 380 m es decir hasta la cabecera norte de la Es tación Constituyentes.

TRAMO: CONSTITUYENTES-TACUBAYA

Después de la Estación Constituyentes a partir de la cabecera -- sur hasta la cabecera norte de la Estación Tacubaya la pendien te es  $-0.2\%$  a lo largo de 1125 m.

TRAMO: TACUBAYA-SAN PEDRO DE LOS PINOS

De la cabecera sur de la Estación Tacubaya hasta 140 m adelante la pendiente es de  $+0.4\%$ , después cambia a  $-0.4\%$  a lo largo de - 895 m hasta la cabecera norte de la Estación San Pedro de los Pi nos.

TRAMO: SAN PEDRO DE LOS PINOS-SAN ANTONIO

Después de la Estación San Pedro de los Pinos a partir de la ca-

becera sur hasta 260 m adelante la pendiente es de +2.6%, posteriormente cambia a +1.0% hasta llegar a la cabecera norte de la Estación San Antonio.

#### TRAMO: SAN ANTONIO-MIXCOAC

A partir de la cabecera sur de la Estación San Antonio hasta 175 m adelante de ésta, la pendiente es de -0.2%, después en los siguientes 350 m de este tramo, la pendiente es de +0.2%, es decir hasta la lumbrera norte de la Estación Mixcoac.

#### TRAMO: MIXCOAC-BARRANCA DEL MUERTO

El último tramo del recorrido de la Línea 7, se desarrolla con una pendiente constante de +1.6% desde la cabecera sur de la Estación Mixcoac hasta la cabecera norte de la Estación Barranca del Muerto.

Finalmente se podrá concluir que en todos los tramos de la Línea 7 del Metro, la máxima pendiente ha sido de +4% y -4%, se ha tenido principal cuidado en que las pendientes cambien de manera paulatina y no en cambios bruscos.

### 2.3. PROYECTO DE SECCIONES TRANSVERSALES

Con base en la teoría sobre diseño de túneles se calculan las secciones transversales, consideran de manera importante las propiedades mecánicas del suelo en el cual se va a construir, de

esta manera en el proyecto de la Línea 7 del Metro, se calcularon secciones circulares, semicirculares y secciones de doble túnel - semicirculares, así se tiene que con excepción de la Estación Tacuba que se excavó a cielo abierto y con el auxilio de muros milan, el resto de la Línea fue construida con túneles de diferentes secciones. En el tramo comprendido entre la Lumbrera 3-TJ-4 de cadenamiento 8+736.89 a la Lumbrera 4-TJ-B de cadenamiento 8+987.72 se proyectó y se excavó un túnel de sección circular para comunicar las dos lumbreras cuyo diámetro es de 9.14 m, la excavación se realizó con un escudo de frente abierto con capacidad de colocar el recubrimiento definitivo de inmediato, este revestimiento se integra con 3 dovelas de 0.30 m de espesor y 0.80 m de ancho los cuales al ser colocados forman anillos que sostienen el perímetro excavado del túnel, en forma gráfica se observa esta sección en la Fig. 2; una de las razones por las cuales se proyectó el uso de esta sección, ha sido por que el túnel al iniciar en este tramo la profundidad fue mínima, además el suelo por encima de la clave del túnel contenía una capa de arcilla de alta compresibilidad. De la misma manera que el caso anterior, se utilizó una sección similar en el tramo entre las Estaciones Constituyentes-Tacubaya a partir de la Lumbrera 14<sup>a</sup> CTA hasta la Estación Tacubaya, que están en el cadenamiento 14+314.70 y 15+335.80 respectivamente, en este segundo caso - el uso de la sección circular con revestimiento a base de dovelas y excavación con el mismo escudo utilizado en el tramo ----

3-TJ-A al 4-TJ-B, fue debido a un caído de gran magnitud que se originó en un primer trazo de este tramo, (que inicialmente se desarrollaba por la Av. Parque Lira a partir de la Av. de los Constituyentes hasta terminar en la Av. Jalisco y que posteriormente fue cambiado a un trazo en paralelo a la Av. Parque Lira hacia el lado poniente) el caído del que se hace mención sucedió en lo que anteriormente se le llamaba Lumbreira 14-CTA, la que se encontraba en la esquina que forman las calles de Parque Lira y Vicente Egúfa. Estos fueron los dos únicos casos en que se usó la sección circular; posteriormente en el resto de los tramos entre Estaciones de la Línea 7, desde la Lumbreira 4-TJ-B hasta la cabecera norte de la Estación Barranca del Muerto, se proyectó y se construyó a base de secciones en forma semicircular de diámetro ---- 10.04 m y de altura 8.404 m, Fig. 3.

Para construir las estaciones, se utilizó una sección en doble túnel de tipo semicircular Fig. 4, la característica de ésta ha sido que los túneles gemelos son simétricos y se unen en la parte central a través de un muro con ventanas a lo largo de la estación, el diámetro de cada túnel es de 8.57 m, la altura de ---- 8.404 m y el diámetro total de 17.14 m. A cada túnel gemelo se le ha nombrado con una letra, el túnel de estación A es el que se encuentra en el lado poniente del trazo y el B en el lado --- oriente del mismo; principalmente fueron las Estaciones San Joaquín, Polanco, Auditorio, Constituyentes, Tacubaya, San Pedro de los Pinos y San Antonio los que se construyeron utilizando este

tipo de sección. El resto de las estaciones, como son la de Mixcoac y Barranca del Muerto se diseñó para su construcción un túnel cuya sección fue semicircular de diámetro 14.86 m para doble vía y andenes a los lados, Fig. 5. Estas han sido las secciones más importantes de túneles que sirvieron como base para la construcción de la Línea 7 del Metro.

## CAPITULO III

### PROPIEDADES DEL SUBSUELO

#### 3.1. GENERALIDADES

Con el propósito de conocer la estratigrafía del subsuelo en la zona por donde se construiría la Línea 7 del Metro, se realizaron sondeos de muestreo mixto, a cada 100 m aproximadamente a lo largo del eje de trazo y a una profundidad promedio de 40 m. En los sondeos mixtos se alternó el muestreo inalterado con el alterado, para obtener muestras inalteradas se utilizó el método de hincado de tubo de pared delgada de 10.2 cm de diámetro (4") tipo shelby en tramos de 90 cm de longitud y para obtener muestras inalteradas se utilizó el procedimiento de penetración estándar, colectando muestras alteradas continuamente y registrando el número de golpes necesarios para avanzar los 30 cm centrales en cada tramo de 60 cm. Con las muestras obtenidas en la exploración, se efectuaron ensayos de laboratorio, éstas fueron requeridas para precisar la clasificación de los distintos materiales, pero también para determinar las propiedades mecánicas, mismas que intervienen en los análisis de estabilidad de los túneles; los ensayos más importantes que se efectuaron son dos: las pruebas índice y de clasificación y las pruebas para determinar las propiedades mecánicas de resistencia al esfuerzo cortante y de deformabilidad, dentro del primer caso se realizaron pruebas

de clasificación visual y manual en humedo, contenido natural de agua, reclasificación visual y al tacto en seco, límites de consistencia (líquido y plástico), análisis granulométrico mediante cribado mecánico con mallas y densidad de sólidos; para el segundo caso las pruebas más importantes fueron la de peso volumétrico natural, resistencia a la compresión simple, resistencia en --- pruebas de compresión triaxiales y consolidación unidireccional.

### 3.2. ESTRATIGRAFIA Y PROPIEDADES

Con la ayuda de la exploración para la obtención de muestras , - posteriormente con los ensayos de laboratorio, se ha elaborado - un perfil estratigráfico general a lo largo del eje de trazo de la Línea 7 del Metro, el cual se presenta en la figura N° 6, en esta figura se podrá observar en forma general que el túnel ha - sido proyectado y excavado en suelos firmes de la zona de transi - ción, ubicados hacia el poniente de la ciudad de México, éstos es - tan formados de limos arenosos y arenas con grava de diferentes - compacidades y resistencia al esfuerzo cortante. Es importante - señalar que se presentaron casos particulares como es el Tramo - Tacuba-San Joaquín en la parte norte de la Línea, donde se encon - tró una capa de arcilla de baja compresibilidad por encima de la - clave del túnel, otro caso particular ha sido la Estación Audito - rio donde se encontró una capa de arena en la clave del túnel ex - cavado, también en la Estación Barranca del Muerto a partir de - la cabecera norte se encontró una capa de arena pumfítica poco --

compacta, que provocó problemas en la clave del túnel. Los valores de las propiedades mecánicas del subsuelo a nivel de la excavación a todo lo largo de la Línea 7 del Metro, fueron -- determinados por medio de las pruebas de laboratorio sobre las - muestras extraídas de los sondeos, como se ha dicho anteriormen- te, pero también fueron confirmadas posteriormente, con las prue- bas realizadas sobre las muestras cúbicas extraídas de los dife- rentes frentes de excavación. Los valores de la resistencia a - la compresión simple, la cohesión y el ángulo de fricción inter- na principalmente a nivel de túnel se agrupan en la tabla N° 1. En ésta se vacían los promedios calculados en cada tramo de la - Línea, así como los rangos generales de estas propiedades; para ejemplificar se puede extraer de la tabla, que en el tramo Tacu- ba-San Joaquín, se tiene una arcilla de baja compresibilidad en la parte norte, después hacia la parte sur se encuentra una are- na arcillosa también de baja compresibilidad; el promedio de la resistencia a la compresión simple en este tramo es de ----- 5.71 kg/cm<sup>2</sup>, el de la cohesión es de 2.32 kg/cm<sup>2</sup> y el ángulo de fricción interna es de 33.7°; por otro lado los rangos en que -- oscilan cada una de las propiedades mecánicas son de 0.90 a ---- 11.50 kg/cm<sup>2</sup> para la compresión simple, de 0.90 a 5.24 kg/cm<sup>2</sup> - para la cohesión y de 26.6° a 43.2° para el ángulo de fricción interna - de los materiales; así como se ejemplifica este tramo, se puede hacer un análisis para los tramos subsecuentes.



## CAPITULO IV

### DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS (Ref. a)

#### GENERALIDADES

En forma genérica, la aplicación de la instrumentación en la excavación de túneles persigue los siguientes objetivos.

1.- El comportamiento de la deformación convergente o divergente de las paredes del túnel, medido desde su interior, después de realizar la excavación del mismo.

2.- El comportamiento de los movimientos que sufre la masa del subsuelo que rodea al túnel, medido desde la superficie del terreno antes, durante y después de efectuar la excavación del túnel.

3.- El registro de cargas en los marcos de acero que forman parte de la estructura del túnel.

Ref. a. Curso de Diseño y Construcción de Túneles. Tema: Instrumentación de Túneles. División de Educación Continua.  
Ing. Eduardo Anaya Mora. Septiembre de 1986.

Para poder obtener el registro de cada uno de los parámetros antes mencionados con la instrumentación, es necesario conocer los diferentes tipos de instrumentos que existen en el mercado, para que de ellos, se escoja el aparato apropiado para la aplicación del mismo en la obtención de cada parámetro en particular.

A continuación se describen algunos instrumentos, mencionando de cada uno de ellos el parámetro que registran, algunas de sus características particulares, su instalación y una explicación de su funcionamiento para la obtención del parámetro que se busca.

#### 4.1. LONGIMETRO

Para obtener los movimientos convergentes o divergentes que se producen en las paredes de un túnel, inmediatamente después de que éste es excavado, se mide la variación de la distancia a través del tiempo entre varios puntos instalados en las paredes de la oquedad, en una distribución diametral. La colocación de estos puntos de referencia puede ser, según sea el caso, sobre el suelo mismo, sobre el revestimiento provisional, o bien sobre el revestimiento definitivo.

Uno de los objetivos principales que persigue la obtención de este tipo de parámetro, es conocer y controlar los movimientos del túnel para mantener durante el proceso constructivo del mismo, -- una máxima seguridad desde el punto de vista de su estabilidad.

Es de suponerse que toda la información obtenida sobre las deformaciones de las paredes de un túnel, podrá ser utilizada en forma paralela para realizar una revisión del diseño, así como un refinamiento de las teorías existentes.

El longímetro es un instrumento que registra la distancia entre dos puntos de referencia, con una aproximación de  $\pm 0.5$  mm, tomando como lectura cero o lectura base de comparación a la primera que se realice entre los puntos, a partir de ésta se compararán las subsecuentes y de esta manera se podrán registrar los movimientos que definan por un lado, si los puntos se separan o se juntan entre sí con el paso del tiempo y por otro, si estos movimientos son o no de consideración.

La Fig. 7 muestra en forma esquemática al longímetro, el cual consiste principalmente de un cinta invar marcada a cada 5 mm, con una argolla integrada en uno de sus extremos, para ser colocada a uno de los puntos de referencia, normalmente la cinta tiene una longitud de 25 m; la otra parte integrante del instrumento, es una caja de registro que tiene en uno de sus extremos un tramo de cinta invar con otra argolla, que servirá para sujetar al instrumento al otro gancho de referencia. La caja tiene en su interior los dispositivos que permiten producir una tensión en el instrumento después de que las argollas se hayan colocado en los puntos de referencia, además de que la cinta se haya sujeta-

do a la caja de registro, es importante que esta tensión sea la misma cada vez que se realice una lectura, la cual puede ser registrada en el aparato, siendo normalmente de 15 kg.

Referente a la instalación de los puntos de referencia en las paredes del túnel para cuando sea el caso de un túnel sin revestimiento, éstos se instalarán directamente en el material que forma parte de las paredes, en el interior de un barreno perforado previamente con un diámetro de  $\frac{1}{4}$ " y una longitud de 60 cm, la armella tiene un diámetro de  $\frac{1}{4}$ " y una longitud de 50 cm, para fijar la armella en la perforación, se introduce una lechada en la misma Fig. 8a. Normalmente se instalan puntos con la distribución que se muestra en la figura 9, realizando 10 mediciones diametrales definidas en la misma figura, se puede ver que cualquier cuerda medida, forma un triángulo con otras dos, permitiendo así una corroboración de las lecturas.

Cuando se tiene el caso en que los puntos de referencia deban instalarse sobre un revestimiento, ya sea provisional o definitivo, se instala una armella de una longitud de 10 cm y  $\frac{1}{4}$ " de diámetro en el interior de una perforación de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro, colocando una mezcla de cemento con aditivo acelerante del fraguado, entre lo que es la armella y las paredes de la perforación, Fig. 8b.

También, se puede tener el caso en que los puntos de referencia deban soldarse directamente en los marcos de acero que en un momento dado formarán parte del revestimiento del túnel, Fig. 8c.

Para llevar el control de la magnitud de las deformaciones y definir además la tendencia y comportamiento de las mismas, se --- construye una gráfica que contenga en su ordenada el valor de la deformación en milímetros y en su abscisa el tiempo en días, como la que se muestra en la Fig. 10. Sobre este tipo de gráfica se podrá definir claramente la velocidad de la deformación, - que es uno de los parámetros que participa de manera importante en la toma de decisiones, en cuanto a si los movimientos que se representan en las paredes del túnel son estables o inestables, y en función de ello, si fuera el caso, realizar algunas medidas correctivas en el procedimiento constructivo o bien, la implementación de algún reforzamiento en el revestimiento provisional que se haya decidido colocar en el túnel o hasta la colocación inmediata del revestimiento definitivo.

#### 4.2. EXTENSOMETRO MECANICO

Este tipo de instrumento mide el desplazamiento relativo entre - dos o más puntos. Es muy usado en la instrumentación de túneles excavados en suelo o roca, sobre todo si éstos son de poca profundidad, de acuerdo a su funcionamiento, existen diversos tipos de extensómetros, el más aplamente empleado es aquel que posee

una forma de lectura directa a través de un micrómetro de carátu la nombrado extensómetro mecánico, que es el que se describe a - continuación.

En túnel, este tipo de instrumento es instalado desde la superficie del terreno natural o desde el interior mismo del túnel, en un barreno previamente perforado a través de la masa del subsuelo. El instrumento consiste básicamente de unas anclas (tantas como puntos de medición se requieran, hasta 8), que se fijan en las paredes del barreno a la profundidad que se desee conocer el movimiento del suelo, alambre de acero inoxidable que sujeta a cada ancla y una bocina de registro con un número de cantilevers - igual al de las anclas instaladas en el barreno, prevista de su elemento de salida, así como de su registro y tapa, estas partes del instrumento se tienen esquematizadas en la Fig. 11

El proceso de instalación de este instrumento, inicia con la ejecución de una perforación de 2½" a 3" de diámetro desde el terreno natural o desde el interior del túnel, en ambos casos siempre en forma radial, en la dirección en que se desean conocer los desplazamientos del subsuelo antes, durante y después del paso de la excavación del túnel por la sección de instrumentación.

Cuando el extensómetro es instalado desde la superficie del terreno, la perforación que deba efectuarse, se realizará de mane-

ra que el fondo del barreno se ubique a una distancia cercana a lo que será la pared o la clave del túnel, teniendo cuidado que el barreno no intersecte la zona que constituirá la sección del túnel, para que la excavación de éste no alcance al ancla más -- próxima y de esta manera inhabilitarla, perdiendo la informa-- ción de los movimientos. Ya efectuado el barreno, se prosigue a descender las anclas una por una, unidas a los cables, de modo - que al estar a la profundidad deseada se fijen a las paredes del barreno. Las anclas poseen un orificio en su parte central que permite el paso del alambre de los puntos de medición ubicados - por debajo de ellas. Una vez que todas las anclas han sido fija-- das a las paredes del barreno en la posición requerida, se efec-- túan los trabajos necesarios para colocar el elemento de salida, la bocina de medición y el registro de protección del aparato, - posteriormente se unen los extremos libres de los cantilevers de la bocina a cada uno de los extremos de los cables de las anclas instaladas, induciendo una pequeña tensión inicial en el ca--- ble.

La operación del instrumento consiste en que, cuando el suelo al rededor del túnel cambia en su estado de esfuerzos y se generan - desplazamientos en la masa del mismo, éstos arrastran consigo a las anclas del extensómetro, provocando una tensión adicional en el cable y con ello un movimiento transmitido al cantilever de la bo-- cina, en donde con el auxilio de un micrómetro de carátula se re

gistran las deformaciones, como se muestra en la Fig. 11.

Finalmente, las diferencias que se obtienen al comparar las lecturas posteriores a la inicial, tomada en la fecha de instalación del instrumento, permitirán conocer los desplazamientos que se generan en el subsuelo provocados por la excavación del túnel. De estos valores se puede llevar un control gráfico como el que se muestra en la Fig. 12.

Es importante señalar que en túneles someros, el brocal en donde se fija la bocina de medición del instrumento, puede también estar sujeto a sufrir desplazamientos hacia el interior del túnel, por lo que, en estos casos, se recomienda efectuar nivelaciones del brocal en la superficie, para poder de esta manera obtener el valor total de los movimientos que se presentan en los puntos de ubicación de las anclas del extensómetro, sumando los registros obtenidos a base de nivelación con los obtenidos del extensómetro.

#### 4.3. INCLINOMETRO

Una forma de medir las deformaciones horizontales que se presentan en las paredes del túnel por el paso de la excavación del mismo, es mediante el empleo del inclinómetro. Su principal aplicación es la determinación de los desplazamientos laterales en una masa de suelo o roca debido al cambio en su estado de es



fuerzos. De hecho, el inclinómetro es un instrumento provisto de deformímetros eléctricos fijados a un péndulo, que acoplado a un puente de medición y calibrado previamente con él, mide las desviaciones angulares del eje longitudinal del aparato a la vertical; la integración trigonométrica de estas inclinaciones a lo largo de una longitud de medición conduce a determinar los desplazamientos laterales que se presentan en la masa del subsuelo.

Todo el sistema de medición consiste en un torpedo, provisto de un sistema alineado de rodaje que en su interior contiene el péndulo instrumentado con los deformímetros eléctricos, dicho péndulo queda aislado en un compartimiento hermético lleno de aceite delgado, el cual proporciona un aislamiento térmico durante las mediciones, además evita que el péndulo oscile en forma brusca, este detalle se puede ver en la Fig. 13.

El torpedo va unido a un cable de transmisión de los impulsos eléctricos, y éste a su vez, a un carrete de enrollamiento del mismo, dispuesto con las conexiones necesarias para acoplarlo al puente de registro.

Por otra parte, en la masa del suelo se coloca una tubería de aluminio provista de cuatro ranuras dispuestas ortogonalmente y que funcionan como guía para el paso de las ruedas del torpedo, un corte transversal de esta tubería se muestra en la Fig. 14.

El procedimiento de instalacion de la tuberfa, comienza con la -- realizaci3n de una perforaci3n en la masa del subsuelo de 6" - de diámetro, a una profundidad tal que el fondo del barreno que de por debajo del piso del túnel a una distancia aproximada de 2 veces el diámetro de éste. Dicha perforaci3n debe quedar sepa rada de la pared del túnel 50 cm aproximadamente Fig. 15.

Se procede a armar tramos de tuberfa de 3 m de longitud, uniendo pequeños tramos de tubo de 0.75 ó 1.5 m, con coples de 30 cm - de longitud remachados y flejados a la tuberfa, impermeabilizan do las uniones con capas de cinta plástica y parafina como se -- puede ver en la Fig. 14. Estos coples consisten en medias cañas de aluminio cuyo diámetro interior es ligeramente mayor al diáme tro exterior de la tuberfa, con ranuras también dispuestas en -- forma ortogonal para provocar su alineaci3n con las ranuras de - la tuberfa. En la parte mas profunda de la tuberfa se coloca - un tap3n y se impermeabiliza su uni3n; aproximadamente a 0.75m de dicho tap3n se coloca un perno a manera de tope del torpedo, - con el fin de que los sedimentos que pudieran escurrir en el inte rior del tubo se depositen en el espacio comprendido entre este perno y el tap3n inferior, de modo que no interfieran con el des lizamiento del torpedo.

Posteriormente cada uno de los tramos de 3 m de tuberfa es baja do dentro del barreno, uniéndose entre sí con coples remachados,

flejados e impermeabilizados como se dijo anteriormente.

En el caso de que el barreno esté inundado por haber atravesado un acuffero y debido a ello la tuberfa tienda a flotar dificultando su descenso, la tuberfa puede ser lastrada añadiendo agua limpia en su interior. Es importante mencionar que las ranuras deben de estar orientadas de tal forma que dos de ellas diametralmente opuestas, estén alineadas en la dirección de los desplazamientos que se pretenden medir.

Finalmente, una vez que el total de la tuberfa se encuentra alojada dentro del barreno, se procede a rellenar el espacio anular entre la tuberfa y el barreno con arena limpia o bien, con lechada de cemento, de tal forma que toda la tuberfa quede perfectamente confinada dentro del barreno. Luego que esta lechada ha fraguado, se coloca el tapón superior y su registro de protección para que ningún cuerpo extraño pueda introducirse dentro de la tuberfa y de esta manera sea dañada, imposibilitando la introducción del torpedo.

La forma de efectuar las mediciones es, introduciendo el torpedo hasta el fondo de la tuberfa, asegurándose que las ruedas del aparato deslicen dentro de las ranuras alineadas en el sentido de los desplazamientos del suelo, posteriormente y con auxilio de una polea fijada al brocal del aparato, el torpedo, es lenta-

mente izado, tomando las lecturas en el puente de registro en cada posición que se defina y asegurándose que la lectura se estabilice, hasta que finalmente se extrae el instrumento de la tubería, las posiciones de lectura se muestran en la Fig. 16

Por último, las lecturas se someten a un proceso de cálculo, definiendo la deformación de la tubería en cada posición de lectura comparando las configuraciones posteriores de la tubería con respecto de la original. Las Fig. 17 y 18, muestran un ejemplo de este tipo de resultados.

#### 4.4. NIVELACIONES

Para registrar los asentamientos en la superficie del terreno, -- que se presentan debido a la excavación del túnel, se utiliza el método más conocido y sencillo, que es el colocar una serie de puntos distribuidos en la superficie del terreno y nivelarlos topográficamente en forma periódica. Cuando en la superficie se tiene la presencia de concreto o asfalto, es suficiente la colocación de tornillos cabeza de gota como indicadores de los puntos que deberán nivelarse, para el caso en que se tenga directamente la presencia del suelo convendrá la colocación de una mojonera, que consiste en un cubo de concreto en cuya superficie se ahogará el tornillo cabeza de gota.

En las nivelaciones, es muy importante definir un punto de refe-

rencia fijo fuera de la zona de influencia de las excavaciones, para asegurar que los movimientos que se registren sean exclusivamente debidos a la excavación del túnel. En ocasiones, en la zona de interés pueden existir movimientos regionales que, si fuera el caso el querer registrarlos, se tendría que colocar un banco de nivel profundo o bien, buscar la existencia de alguno en la zona, para poder referenciar las lecturas a este banco y de esta manera obtener los elementos necesarios para hacer la corrección en los movimientos verticales sobre el túnel, obteniendo por separado los movimientos provocados exclusivamente por las excavaciones del túnel.

En algunos casos para tener un registro de los movimientos verticales que se tienen adelante del frente de excavación y su comportamiento a medida que el frente avanza, se colocan puntos de nivelación sobre el eje del túnel separados a 10 m en una longitud que se defina como suficiente, ya sea para controlar alguna zona conflictiva, o bien, para definir en forma clara y precisa tal influencia.

El registro de los asentamientos ayuda a conocer y controlar el comportamiento y tendencia de los movimientos en la superficie debido a la excavación del túnel. Este registro se puede llevar a una gráfica en cuyo eje vertical se marquen los hundimientos en milímetros y en el eje horizontal el tiempo en días. Esta --

gráfica puede definir claramente la tendencia del comportamiento de los movimientos a nivel del terreno natural, un ejemplo de esta gráfica se podrá ver en la Fig. 19

Al combinar estos movimientos con los obtenidos con la extensometría, se puede definir el movimiento total de la clave de un túnel antes, durante y después de su excavación como ya se mencionó. Este tipo de combinación de movimientos obtenidos con diferentes instrumentos se puede ver en la Fig. 20

#### 4.5. CELDAS HIDRAULICAS

En algunas construcciones de túneles para Metro, se tienen estaciones que se contruyen a base de túneles gemelos en forma paralela, generalmente a cada túnel se le conoce como "A" y "B" --- Fig.21.

El procedimiento de construcción de dichas estaciones consiste en excavar primero el túnel A y revestirlo con concreto hidráulico en forma definitiva, posteriormente se procede a la excavación del túnel B, el cual normalmente se le reviste en forma provisional. Debido a este procedimiento de excavación, se tiene la necesidad de instalar tensores de acero en el túnel A sobre el revestimiento definitivo, a cada determinada distancia a lo largo de la estación, en forma transversal y en la parte superior de la sección como se observa en la Fig.21, esto se hace principalmente para evitar las deformaciones excesivas del túnel

por influencia de la excavación del túnel gemelo y para ayudar a soportar las cargas que se ejercen en la clave del túnel ya excavado.

Las celdas son cilindros hidráulicos huecos en la parte central, equipados con manómetro, Fig. 22.

La presión se transmite al manómetro cuando existe una carga de compresión sobre el pistón. Este instrumento es calibrado antes de instalarse de manera que las lecturas que se registran en el manómetro se relacionan con una carga ya conocida, esto se vacía en una gráfica de calibración en cuyo eje horizontal se indican las cargas reales conocidas y en el eje vertical las lecturas -- del manómetro de la celda hidráulica.

El proceso de instalación de las celdas hidráulicas se inicia -- con la excavación del suelo en la parte externa del muro central del túnel como se indica en la Fig. 23, posteriormente se coloca el tensor, empotrando uno de sus extremos al revestimiento definitivo y en el otro se le une con soldadura un tramo de coll-rolled. Después de estos preparativos previos se procede a instalar la - celda hidráulica en la parte externa del muro central, para -- ello se coloca una placa de 25 X 25 cm y 1" de espesor ha-- ciendo pasar el coll-rolled por la perforación que tiene en el - centro, posteriormente se instala la celda sobre el coll-rolled haciendo pasar este a través del hueco que tiene la celda, ésta

se coloca con la base apoyada sobre la placa que queda hacia el muro, después sobre el pistón y el coll-rolled se coloca una placa de las mismas dimensiones que la placa anterior para que finalmente se le instale una tuerca que servirá como tope de todo este dispositivo. La tuerca se aprieta hasta dejarla con una carga máxima sobre la celda de 2 ton.

Los resultados que se obtienen de las lecturas realizadas antes, durante y después de que se excava el túnel B de la estación, se grafican como se indica en la Fig.24, en esta se indica la variación de la tensión en el elemento de acero con respecto a la excavación del túnel de andén B a través del tiempo.



## CAPITULO V

### INSTRUMENTACION REALIZADA EN LOS TUNELES

#### GENERALIDADES

Para la instrumentación de los túneles de la Línea 7 del Metro - fue necesario realizar un programa de instrumentación. Este programa consistió en instalar cuatro instrumentos integrando una sola estación; los cuales fueron: Las convergencias, los extensómetros, los inclinómetros y las nivelaciones. Cada una de estas estaciones así integradas, fueron colocadas a lo largo de la Línea 7 distribuidas equitativamente. La distribución no se debió a alguna razón científica, simplemente se trató de cubrir toda la línea y controlar así las deformaciones por mínimas que fueran:

A través de este capítulo se describirán las ubicaciones y la forma de instalación de cada instrumento, así como los casos muy particulares en donde no se siguió la regla general.

#### 5.1. SECCIONES DE CONVERGENCIA

Las secciones de convergencia tuvieron el propósito de medir diámetros dentro de cualquier tipo de túnel; para ello fue necesario realizar la instalación de puntos de referencia fijos al perímetro de la excavación, cuya distribución estuvo de acuerdo a las necesidades de la obra, es decir, cuando fue necesario medir líneas horizontales se instalaron puntos a la misma altura;

en la sección media del túnel o en la parte inferior, estos puntos de referencia se combinaron para hacerse mediciones en líneas diagonales; también fue importante medir las deformaciones que se presentaban en la clave y para ello fue necesario instalar un punto de referencia en esta ubicación, que combinado con algunos que se supone que no sufrirían deformaciones considerables como son los instalados en los patines, se pudo realizar la medición en forma diagonal. La distribución de los puntos, así como las líneas de medición para un túnel de sección semicircular se puede observar en la Fig. 25.

A lo largo de toda la línea las secciones de convergencia se instalaron de acuerdo a una especificación. En ésta se indicaba -- que en cada inicio de un frente de excavación se debía instalar la primera sección a 5 m, las siguientes 3 secciones a cada 10 m, otras 3 a cada 50 m y las demás a cada 100 m hasta que dicho --- frente conectara con alguna lumbrera u otro frente de excavación. También a 5 m antes de efectuar la conexión se debía instalar -- una sección de convergencias. La razón por la cual se debía hacer de esta manera es porque al iniciar un frente de excavación, normalmente el comportamiento es incierto y a medida que el frente continúa se va conociendo dicho comportamiento.

Durante la construcción de los túneles se presentaron 3 casos de instrumentación a base de puntos de referencia debido a la variación en las secciones transversales de los túneles. En primer termino se tiene la sección semicircular de 9.04 m de diámetro, en la que se instalaron 7 puntos de referencia y se tomaron lec-

turas en 10 líneas de medición.

En la Fig. 25 se observa detalladamente esta distribución, después se tiene la sección circular de 9.14 m de diámetro en la que se instalaron 8 puntos de referencia y se tomaron lecturas en 16 líneas de medición como se indica en la Fig. 26. Finalmente se tienen los túneles de estación los cuales se instrumentaron de la misma manera que un túnel de sección semicircular, es decir en cada túnel de las 2 que se construyen se instalaron 7 puntos y se tomaron lecturas en 10 líneas, en la Fig. 27 se observa la distribución de los puntos de referencia así como las líneas de medición para este caso. Es importante señalar que la instrumentación se realizó primero en el túnel con revestimiento definitivo o sea en el túnel "A" y cuando se realizó la excavación del túnel contiguo o túnel "B" éste se instrumentó de la misma forma que en el túnel anterior.

## 5.2. SECCIONES DE EXTENSOMETROS

Los extensómetros son instrumentos mecánicos que registran las deformaciones de los estratos de suelo que se encuentran por encima de la clave del túnel, tomando como punto de referencia el nivel de terreno natural. El registro de los movimientos se realizó a través de 4 anclas instaladas a diferentes profundidades dentro de un barreno de 2½" de diámetro, sujetos con un alambre acerado e indeformable, este a su vez se conectó a un punto fijo sobre el nivel de terreno natural en donde se realizaron las mediciones. Una descripción más amplia de este instrumento se po-

drá consultar en el capítulo IV.

A diferencia de las secciones de convergencia los extensómetros se instalaron antes de que se contruyera el túnel; bajo esta condición fue posible conocer las deformaciones de un túnel antes, durante y después de realizarse la excavación.

Las estaciones de extensómetros se integraron de dos formas: La primera consistió de tres extensómetros colocados en forma radial a la clave del túnel, es decir un extensómetro instalado sobre el eje del túnel en forma vertical y los otros dos instalados hacia cada lado del eje, inclinados y en forma radial hacia la clave del túnel. La distribución de estos extensómetros se observa en forma detallada en la Fig. 28, en donde también aparece la distribución de una sección de convergencia. La segunda estación consistió de 4 extensómetros instalados en túneles de estación, éstos se distribuyeron de manera que dos quedaron instalados en forma vertical sobre la clave de los túneles y los otros dos quedaron en forma radial hacia cada lado del eje central, en la Fig. 29 se observa esta última distribución.

La instalación de los instrumentos en una sección transversal, como se ha indicado fue muy difícil de realizar, sin embargo, se agruparon éstos, defasados en una distancia no mayor a 10 m. En toda la Línea 7 se instalaron 79 extensómetros.

### 5.3. SECCIONES DE INCLINOMETROS

Los inclinómetros son instrumentos que miden las deformaciones horizontales a la profundidad de la excavación del túnel.

El registro de los movimientos del suelo se realiza a través de una tubería de aluminio flexible que se instala dentro de un barrenado de 6" de  $\varnothing$ .

La medición se realiza con un inclinómetro también llamado torpedo, el cual se introduce dentro de la tubería de aluminio para tomar lecturas de la inclinación del mismo a diferentes profundidades.

Es importante que la tubería de aluminio se instale a una profundidad tal que quede a 2 diámetros abajo del piso del túnel, esto es para tener un punto fijo de referencia. Una descripción más detallada de este instrumento se puede consultar en el capítulo IV. Este instrumento se instala antes de realizar la construcción del túnel para medir los movimientos antes, durante y después de la excavación.

Su instalación en los túneles se realiza desde la superficie del terreno natural en forma vertical, de tal manera que a la profundidad donde se tiene el túnel, quede a 50 cm de la pared del mismo, en los dos lados de la sección transversal.

En la Línea 7 del Metro se tuvieron dos casos, uno cuando el túnel fue semicircular de tramo y el otro cuando los túneles fueron de estación. En las Figs. 28 y 29 se presentan las distribuciones de estos aparatos en combinación con los extensómetros y secciones de convergencia; repitiendo lo que se dijo anteriormente, no siempre se instalaron los inclinómetros en una misma sección sin embargo no rebazaron los 10 m de defasamiento.

De esta manera a lo largo de la Línea 7 se instalaron 57 tube---

rfas para medir con inclinómetro.

#### 5.4. SECCIONES DE NIVELACIONES

Las secciones de nivelaciones, son puntos de referencia instalados transversalmente sobre una línea ortogonal al eje de trazo. - éstos sirven como referencia para realizar la nivelación y así registrar los hundimientos presentados a causa de la excavación.

Las secciones de nivelación se instrumentan con tornillos cabeza de gota, los cuales se instalan a partir del eje de trazo a cada 10 m de distancia sobre una línea ortogonal hasta 100 m alejados de dicho eje hacia los dos lados; a esta distancia se instala un banco de nivel, el cual queda hincado a una profundidad de un metro. Solo en casos muy especiales donde los hundimientos se presentaron de gran magnitud se instalaron puntos de nivelación sobre el eje de trazo a cada 10 m, esto último sucedió en el tramo Tacuba-San Joaquín, Estación Tacubaya y la Estación San Pedro de los Pinos.

En toda la longitud de la Línea 7 se instalaron dos tipos de secciones transversales; éstos se indican en las Fig. 28 y 29 los cuales se diferencian una de otra en que, una es para túnel semicircular y la otra para doble túnel de estación.

Para controlar los movimientos a lo largo de la Línea 7 se instalaron 1252 puntos de nivelación.

#### 5.5. SECCIONES DE CELDAS HIDRAULICAS

Las celdas hidráulicas son instrumentos que miden cargas de ten-

sión o de compresión en algún elemento estructural.

En la Línea 7, las celdas hidráulicas se utilizaron para medir las cargas de tensión en los tensores colocados para evitar el pandeo de las columnas de los túneles de estación. Dichos tensores fueron colocados en forma horizontal en la parte superior de las columnas de los túneles "A" empotrando uno de sus extremos al concreto de revestimiento definitivo y el otro transpasan dolíbremente a la columna y apoyándose sobre la pared con placas y tuercas.

La colocación exacta se puede observar en la Fig. 23 en donde se puede ver que el túnel "A" se encuentra con revestimiento definitivo.

La colocación de las celdas hidráulicas se realizó antes de que el túnel "B" fuera excavado.

En cada estación se colocaron 6 celdas hidráulicas distribuidas en dos grupos de tres; cada grupo se colocó en los extremos de túnel o en donde la presión del suelo se presentó más elevado debido a la conexión de otros túneles. De esta manera se colocaron celdas en las estaciones San Joaquín, Polanco, Auditorio, Constituyentes, Tacubaya, San Pedro de los Pinos y San Antonio; en total se colocaron 37 celdas hidráulicas.

## CAPITULO VI

### RESULTADOS OBTENIDOS DE LA INSTRUMENTACION

#### GENERALIDADES

La instrumentación y las mediciones que se llevaron a cabo en la Línea 7, dieron como resultado una variedad de deformaciones. En este capítulo se hace un análisis de éstos, los cuales se agrupan por instrumentos y se presentan en histogramas. Los histogramas dejan ver la frecuencia con que se presentaron los resultados, así como el rango de su magnitud. En algunos casos hubo deformaciones que por su magnitud se salieron del rango analizado, éstos por lo tanto son presentados como casos particulares y no intervienen en el cálculo de los promedios. El número de instrumentos en los que se hizo la medición, también es un dato importante que aparece en cada histograma.

#### 6.1. SECCIONES DE CONVERGENCIA

Los resultados que se presentan en este inciso son los obtenidos de las mediciones hechas en 4 diferentes secciones de túnel. Estos son, los túneles de sección circular de 9.14 m de diámetro -- con revestimiento definitivo a base de dovelas, de sección semi-circular con un diámetro de 10.04 m y revestimiento provisional y los túneles de 8.22 m de diámetro construidos para las estaciones, en las que se instrumentaron sobre revestimiento definitivo en un caso y sobre revestimiento provisional en otro. Las de--



formaciones obtenidas fueron de tipo convergente y divergente, con éstas se elaboraron histogramas agrupando resultados de las mismas líneas de medición y misma sección de túnel. En las Figs. 30 a la 43 se presentan los histogramas mencionados y en la tabla N<sup>o</sup> 2 se hace un resumen de los promedios obtenidos en dichos histogramas. De esta tabla se puede extraer que para túneles se micirculares de 8.22 m de diámetro con revestimiento definitivo se consideran un total de 51 secciones y de cuyos resultados se obtiene un promedio de 1.48 mm de deformación en el sentido convergente, esta medición se realiza en la línea horizontal ubicada a nivel de piso; en esta misma línea se obtiene un promedio de (-) 3.59 mm tomando en cuenta solo las deformaciones que se presentan en el sentido divergente; al englobar las deformaciones obtenidas en esta línea para calcular el promedio general se tiene como resultado un valor de (-) 1.70 mm en sentido divergente, de esta manera se calculan los promedios para los casos restantes de secciones de túneles cuyos resultados se presentan en esta misma tabla como se dijo anteriormente.

En los histogramas de las Figs. 30 a la 43 se observan casos particulares, debido a que las deformaciones medidas fueron de --- gran magnitud, analizando la Fig. 42 se puede ver que en el tramo San Pedro de los Pinos-San Antonio, se presenta una deformación de 26 mm en la sección media de un túnel semicircular de 10.02 m de diámetro con revestimiento provisional, cuando el promedio general para éste tipo de túneles fue de 2.37 mm. Tratando de presentar dichos resultados de otra manera en la tabla 3

se resumen todos los casos particulares nombrando el tramo o la estación en donde se obtuvieron, así como la magnitud y el sentido de las deformaciones.

Finalmente después de analizar estos resultados, se puede decir que en toda la Línea 7 del Metro, se registraron deformaciones de las que abundaron las de tipo convergente, así también tuvieron especial significado por su gran magnitud, las que se presentaron en tres zonas de toda la Línea, estas son: Tacuba, Auditorio y San Pedro de los Pinos.

## 6.2. SECCIONES DE EXTENSOMETROS

Los extensómetros colocados en la superficie del suelo, para medir deformaciones desde este punto hasta otro cercano a la clave del túnel, es decir a través de la masa del subsuelo que existe entre la superficie y la clave del túnel, son instrumentos que registran deformaciones relativas ya que no toman en cuenta las deformaciones presentadas por hundimientos, bajo esta consideración, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de dos formas de instalación de extensómetros, que son el vertical y el inclinado, en las dos secciones típicas de túnel, la primera de 8.22 m de diámetro con revestimiento provisional, que comúnmente se le ha llamado túnel B ya que se encuentra contiguo a uno similar de igual diámetro, solo que con revestimiento definitivo y la segunda de 10.04 m de diámetro con revestimiento también provisional. En este último tipo de sección se incluye el túnel A que para su excavación siempre se realizó a un diámetro

de 10.04 m que finalmente se le coló el revestimiento definitivo a un diámetro de 8.22 m. En el capítulo IV durante la descripción de los instrumentos colocados, se dijo que en la instalación de estos instrumentos se colocan 4 anclas a diferentes profundidades, iniciando de la máxima profundidad del barreno que generalmente queda a 50 cm antes de atravesar la clave del túnel; de todos ellos se obtuvieron resultados de deformaciones que siempre fueron diferentes, es decir fueron mayores las deformaciones registradas en la clave del túnel y conforme se alejaban de ella, las deformaciones fueron disminuyendo, para efectos de este trabajo, aquí solo se presentan los resultados obtenidos del ancla más profunda, de éstos últimos se han realizado histrogramas que se presentan en las Figs. de la 44 a la 46 y a su vez en la tabla N° 4, se presenta un resumen de los resultados extraídos de las figuras anteriores, a manera de ejemplo se puede observar en esta tabla, que para extensómetros instalados en forma vertical en túneles de 8.22 m de diámetro, se tiene un promedio de deformaciones de 4.86 mm. Estos datos se pueden observar en la Fig. 44. De aquí también se puede ver que en la estación San Pedro de los Pinos, se presentó un caso particular de deformación de 19 mm hacia el túnel, es importante mencionar que todas las deformaciones que se registraron tuvieron una tendencia hacia la excavación.

### 6.3. SECCIONES DE INCLINOMETROS

Los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en los in-

clinómetros instalados a lo largo de la Línea 7 del Metro, se refirieron principalmente a los túneles de sección semicircular de 8.22 m de diámetro y a los túneles también de sección semicircular de 10.04 m, en los dos casos con revestimiento provisional; las deformaciones que se registraron fueron de tipo horizontal - siempre con movimientos en dirección hacia el túnel; la ventaja de este instrumento es que su instalación se realiza antes de -- que la excavación llegue a la sección de instrumentación y por lo menos haya una distancia de tres diámetros entre ésta y la -- sección de instrumentación. Con ésto se obtienen las deformaciones antes, durante y después de la excavación. En las Figs. 47 y 48 se presentan las deformaciones horizontales obtenidas de todos los inclinómetros instalados, además con estos resultados se realizó la tabla N° 4 en donde se resumen los resultados promedio. Como caso particular se puede ver en la Fig. 48 dos deformaciones - que fueron de gran magnitud y que se presentaron, en el tramo Tacubaya-San Joaquín en el cual, la primera tuvo una magnitud de 22.00 mm y la otra de 29.00 mm en este histograma el promedio fue de 4.96 mm. Como se dijo anteriormente este tipo de deformación es horizontal y hacia el túnel. Cabe hacer notar en este momento que las deformaciones no se presentaron a lo largo de toda la tubería de inclinómetro instalado, sino exclusivamente en la zona, a la profundidad en donde se excavó el túnel co---rrespondiente.

#### 6.4. SECCIONES DE NIVELACION

Para complementar las deformaciones registradas con la instrumentación antes mencionada, como son los extensómetros, las secciones de convergencia y los inclinómetros, se realizaron mediciones en secciones de nivelación transversal y además en algunos casos se realizó la instrumentación en secciones longitudinales al eje del túnel. Los resultados se vacian en los histogramas de las Fig. de la 49 a la 52, en las que se grafican los hundimientos para tres tipos de túneles semicirculares. La primera sección es de 8.22 m, la segunda de 10.04 m y la tercera de 14.68 m de diámetro. Estos hundimientos han sido los máximos registrados a lo largo de la Línea 7 del Metro antes, durante y después de que fueron excavados y revestidos con concreto lanzado. En la Fig. 52 se presenta el caso de hundimientos de dos estaciones: La Estación Tacubaya y la Estación San Pedro de los Pinos. Se hace notar que sobre el túnel revestido definitivamente, estos últimos hundimientos fueron provocados por influencia de la excavación del túnel gemelo; estos resultados, así como los anteriores, fueron enlistados en la tabla de resumen 4, los cuales han sido el promedio extraído de las Figs. de la 49 a la 52 ya mencionadas. De la Fig. 49, también se puede observar que se agrupan los resultados en zonas muy definidas, como es el caso de la estación Tacubaya y la zona norte de la Línea 7 (túneles de 8.22 m de diámetro cuyo promedio de hundimientos fue de 20.44 mm); en el mismo caso de sección, la estación San Pedro de los Pinos, donde el promedio de hundimientos fue de 61.57 mm.

Es importante señalar que en la estación San Pedro de los Pinos se excavó primero el túnel A y se revistió con concreto lanzado para posteriormente revestirlo definitivamente con concreto hidráulico. En la primera etapa de excavación se registraron hundimientos de 69.58 mm en promedio, posteriormente se continuó con la excavación del túnel gemelo "B" y por influencia de esta excavación hacia el túnel A, los hundimientos se incrementaron -- hasta en 65.54 mm, sumando estos dos resultados nos arroja un total de hundimientos presentado sobre el eje y en la superficie del terreno natural del túnel A de 135.12 mm, estos resultados se presentan en las Figs. 50 y 52 respectivamente.

#### 6.5. CELDAS HIDRAULICAS

En los túneles gemelos de las estaciones, donde la sección de túnel es semicircular con un diámetro de 8.22 m, el proceso de ata que en la excavación fue como se dijo anteriormente, éste -- consiste en excavar primero uno de los túneles hasta dejarlo -- con revestimiento definitivo; posteriormente se realiza la excavación del túnel gemelo sólo que para evitar las deformaciones -- excesivas en el túnel con revestimiento definitivo, se instalan tensores transversales en el tercio superior del túnel, a cada 25 cm a lo largo de toda la estación. En tres de estos tensores de cada extremo de la estación, se instalaron las celdas hidráulicas, las cuales registraron las cargas de tensión inducidas a -- los tensores. Estos resultados se presentan en el histograma de la Fig. 53, en la que se puede ver que en promedio se tuvo una -

carga de 10.63 ton, en un rango que va de 2 ton a 20 ton. Las estaciones en donde se realizaron estas instalaciones son: San -- Joaqufn, Polanco, Auditorio, Constituyentes, Tacubaya, San Pedro de los Pinos y San Antonio.

## CAPITULO VII

### CORRELACION DE RESULTADOS

#### GENERALIDADES

El objeto de correlacionar los resultados de diferentes instrumentos fue para comprobar la bondad de cada uno de ellos, de esta manera, cuando en una sección se colocaron, instrumentos como -- las nivelaciones, inclinómetros, extensómetros y secciones de -- convergencia o por lo menos en una misma zona de  $\pm 10$  m de distancia; en este caso fue posible correlacionarlos. debido a que los resultados obtenidos de las nivelaciones, sumados a los de los extensómetros, reflejan los movimientos sufridos por el suelo en la zona de la clave del túnel; estos resultados pueden ser confirmados después de la excavación del túnel, por medio de -- los resultados de las secciones de convergencia a través de las líneas diagonales proyectados a la vertical. Por otro lado los inclinómetros registran movimientos horizontales hacia el túnel; estos pueden ser comparados con los resultados obtenidos de las líneas horizontales medidas con las convergencias.

Como se ha dicho en anteriores capítulos, las secciones de convergencia se instalan e inician el registro de las deformaciones después de que han sido excavados los túneles, por lo tanto no alcanzan a registrar la totalidad de las deformaciones presentadas; por esta razón la comparación y correlación que se hace con los resultados de los otros instrumentos, es solamente en la última etapa de deformaciones.



### 7.1. COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES VERTICALES.

Para poder correlacionar los resultados de diferentes instrumentos instalados en una misma zona, éstos deberán registrar las deformaciones en una misma dirección, es decir verticales y horizontales.

De esta manera las nivelaciones, los extensómetros y las convergencias registran los movimientos verticales de la masa de suelo que se encuentra por encima de los túneles.

Tanto los puntos de nivelación como los extensómetros son colocados antes de que sea excavado el túnel en proyecto. Estos registran las deformaciones antes, durante y después de dicha excavación; entonces se puede decir que cualquier deformación que se presente es registrada por estos dos instrumentos, sin embargo - las mediciones con las líneas de convergencias, solo registran parte de la deformación total presentada ya que su instalación solo se puede realizar después de la excavación del túnel.

La correlación de resultados de estos tres instrumentos, se realiza inicialmente sumando los hundimientos sufridos por el extensómetro medido a través de las nivelaciones, con las deformaciones registradas en el mismo; esta adición da como resultado la deformación total presentada en la clave del túnel. Por dentro -- del túnel, es posible registrar parte de estas deformaciones a -- través de las líneas diagonales de las secciones de convergencia, que proyectadas a una vertical permiten calcular las deformaciones reales de la clave del túnel. Este último resultado se correlaciona -

con la sumatoria anterior a partir del dfa en que la excavación pasa la sección en donde estan instalados los instrumentos. La comparación de resultados se debe hacer como se indica a continuación:

- 1.- Se realiza la gráfica de deformaciones de los hundimientos en donde se indica el dfa en que la excavación pasa por dicha sección.
- 2.- Se grafican los resultados de los extensómetros haciendo coincidir el dfa en que la excavación pasa por este instrumento con el de la nivelación.
- 3.- Se suman las deformaciones de los extensómetros con los hundimientos en los dfas correspondientes y se grafican los resultados.
- 4.- Se grafican los resultados de las líneas diagonales de convergencia proyectados a la vertical, también haciendo coincidir el dfa en que pasa la excavación en donde se instala dicha sección, con el dfa en que pasa en los otros dos instrumentos.
- 5.- A partir del dfa en que se inician las lecturas de convergencias se traza una línea vertical hasta cruzar a la curva de la sumatorio de resultados de las nivelaciones y extensómetros.
- 6.- En el cruce de la línea vertical con la curva de deformaciones de la sumatoria de los dos instrumentos (nivelación y extensómetros) se traza una línea horizontal; la curva que queda dentro de estos dos últimos ejes debe ser igual o parecida

a la de los resultados de convergencias.

De esta manera se pueden corroborar los resultados de los tres instrumentos.

En las figs. de la 54 a la 70 se presentan algunas gráficas de correlación de resultados que se obtuvieron en toda la línea 7. De estas últimas gráficas se hizo un resumen de resultados los cuales se enlistan en la tabla No. 5. En esta tabla se apuntan las deformaciones máximas registradas por los extensómetros más las de los hundimientos, la deformación máxima presentada por las convergencias, los días que se tardó en instalarse y tomar lecturas de convergencia en la sección de instrumentación. Finalmente, en esta tabla se indica el porcentaje de deformación que las líneas de convergencia registraron con respecto a la total registrada por los extensómetros y las nivelaciones.

Con estos últimos resultados, se elabora la gráfica No. 71; en cuyo eje horizontal se indican los días transcurridos entre la excavación del túnel y la instalación de la sección de convergencia y en el eje vertical se indican los porcentajes de deformación que registraron las líneas de convergencia con respecto a la total registrada por los otros dos instrumentos. En esta gráfica se observa que mientras más pronto se instalen las secciones de convergencia, el porcentaje de registro de deformación es mayor, pero no puede rebasar al 80% de la deformación total y si la instalación se tarda más, el porcentaje para medir las deformaciones totales, disminuyen hasta alcanzar un 10% de la total.

## 7.2. COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES HORIZON- TALES.

Los resultados obtenidos a través de los inclinómetros, son de-  
formaciones horizontales, que pueden ser correlacionados con los  
resultados de las mediciones con secciones de convergencia, en la  
línea horizontal.

Las deformaciones medidas con los inclinómetros en las paredes -  
de los túneles son las que se presentan antes, durante y después  
de la excavación de dichos túneles y las deformaciones medidas -  
con las convergencias, son las que se presentan después de la ex-  
cavación.

Para hacer la correlación de resultados, se deben de sumar los ob-  
tenidos en los dos inclinómetros instalados a los lados del tú-  
nel y compararse con los obtenidos en las convergencias, a partir  
del día en que cruza la excavación en las secciones de instrumen-  
tación. De forma similar como se hizo la correlación para las -  
deformaciones verticales de un túnel, se hace para las deforma-  
ciones horizontales.

En las Figs. de la 72 a la 98 se presentan las gráficas de las -  
secciones en donde se hizo la correlación de resultados; de és-  
tas se observa que los resultados de cada instrumento, son simi-  
lares entre ellos tanto en magnitud como en la tendencia a tra-  
vés del tiempo.

En la tabla No. 6 se han resumido los resultados de las deforma-  
ciones máximas, presentadas a través del tiempo en los inclinóme-  
tros; también se enlistan las deformaciones de las convergencias,

los días que transcurrieron para su instalación después de haber sido excavado el túnel y el porcentaje de deformación que registraron las líneas de convergencia con respecto al total registrado por los inclinómetros.

Finalmente, con estos últimos resultados se hizo la gráfica de la Fig. 99 en la que se indica en el eje horizontal, los días que transcurrieron antes de instalarse la sección de convergencia y de tomar lecturas en la línea horizontal, después de haberse excavado la sección; en el eje vertical se indican las deformaciones registradas en porcentaje con respecto al total registrado por los inclinómetros. En forma general podemos decir, como consecuencia de esta gráfica, que hasta 5 días después de haberse excavado el túnel, es posible medir un 80% de la deformación total y alrededor de 25 días después ya no se logra medir deformación alguna con las secciones de convergencia.

## CAPITULO VIII

### COMPARACION ENTRE RESULTADOS TEORICOS Y LOS OBTENIDOS DE LAS MEDICIONES.

#### GENERALIDADES

Los valores más importantes que se obtienen a través de la teoría para un túnel de determinada sección, son los esfuerzos (presión del suelo sobre los ademes, las reacciones unitarias de los elementos estructurales, los esfuerzos generados dentro del suelo), los momentos flexionantes y las deformaciones.

Las secciones de los túneles en la Línea 7 del Metro de la Ciudad de México, fueron definidos por los encargados del proyecto, sin embargo para poder comparar los resultados que se obtienen con la instrumentación con los que se obtienen en la teoría, aquí solo se hará una revisión aproximada de dichas secciones.

#### 8.1. CALCULO DE LAS PRESIONES EJERCIDAS SOBRE LOS ADEMES

Para realizar el cálculo de las presiones que se ejercen sobre un ademe, ya sea provisional o definitivo, es posible emplear cualquier método desarrollado por autores extranjeros, sin embargo en México existe un método desarrollado por el Ing. Arturo A. Bello Maldonado, cuyo título es: "Método simplificado para el análisis de estabilidad de grandes excavaciones subterráneas"; este método ha sido empleado para el análisis de excavaciones subterráneas hechas para la explotación de minerales y se han certificado los resultados a través de la instrumentación; como

ejemplo se pueden nombrar las minas de "Charcas y de "La Encantada" en donde se verificó la bondad del método de análisis.

Para la obtención de los valores de las presiones ejercidas sobre los ademes, se ha empleado este último método, el cual utiliza el concepto de arqueó de la masa de suelo alrededor de una excavación subterránea; también se basa en el principio de "Trabajo de deformación mínimo".

En forma resumida se describirá dicho método, sin desarrollar el modelo matemático, el cual se podrá consultar en la referencia - Nº 1. La hipótesis de que un arco se genera naturalmente en la masa de suelo, se ha adoptado para el desarrollo de este método y se considera que su forma es parabólica. La disposición del arco de carga en relación con la excavación se muestra en la --- Fig. Nº100; se considera que la presión por arriba del arco de -- carga es distribuida por este elemento hacia los lados de la excavación y un arco similar, imagen del mostrado en dicha figura con respecto a la ubicación de la excavación, es el mecanismo -- con que los esfuerzos son redistribuidos bajo la excavación. La geometría y las dimensiones del arco de carga deben ser determinadas y para este propósito se utiliza el principio de trabajo - de deformación mínima; el arco que de manera natural se genere - en la masa de suelo para estabilizar la excavación, es aquel en que el cual el trabajo de deformación producida por los esfuer-- zos inducidos es un mínimo, para simplificar el establecimiento de las fórmulas que representan el comportamiento señalado, se - considera también que los esfuerzos inducidos en el arco de car-

ga son uniformes en todo su espesor Fig. 100, los cuales se obtienen de las hipótesis desarrolladas en la Ref. 1.

Las características obtenidas para el arco de carga, son linealmente dependientes del ancho de la excavación, Fig. 101, ésta también se obtiene de las mismas hipótesis.

Para que el arco de carga generado de manera natural sea responsable de la estabilidad de la excavación, los esfuerzos máximos inducidos en su espesor no deben exceder la resistencia a la compresión simple de la masa de suelo en ninguna sección; la ubicación crítica en una masa uniforme puede identificarse en la sección donde el arco de carga es tangente al perimetro de la excavación, Fig. 102.

Después de valuar las cargas ejercidas sobre un ademe y de haber obtenido los esfuerzos que se generan dentro de la masa de suelo alrededor de una excavación subterránea, se procede a calcular por medio de alguno de los métodos de análisis estructural desarrollados para este fin, los elementos mecánicos como, son: las reacciones en los apoyos y los momentos generados por las cargas, considerando la interacción con el suelo adyacente a la excavación. Posteriormente se calculan las deformaciones, como consecuencia de los momentos y reacciones en los apoyos de los elementos estructurales, es decir los revestimientos provisionales y los definitivos.



## 8.2. METODO PARA LA VALUACION DE ELEMENTOS MECANICOS EN EL REVESTIMIENTO.

El cambio de curvatura  $\Delta \mathcal{K}$  que se induce en un elemento estructural cualquiera, en el que actúa un momento flexionante "M" que genera esfuerzos dentro del rango elástico está dado por:

$$d\mathcal{K} = \frac{M}{EI} dx$$

$$\frac{d\mathcal{K}}{dx} = \frac{M}{EI}$$

$$\frac{d\mathcal{K}}{dx} = \Delta \mathcal{K}$$

$$\Delta \mathcal{K} = \frac{M}{EI} \text{-----} \textcircled{1}$$

$\Delta \mathcal{K}$  = Curvatura del elemento resistente en un punto dado.

M = Momento actuante en el elemento sobre el punto considerado.

I = Módulo de inercia de la sección transversal del elemento que gira bajo la acción del momento M.

E = Módulo de elasticidad.

Para túneles de sección circular, la curvatura inicial del revestimiento, antes de que haya sido deformado por la acción de las cargas externas, es:

$$\mathcal{K} = \frac{1}{a} \text{-----} \textcircled{2}$$

Donde:

a = Radio del túnel circular

Cuando el revestimiento se deforma bajo acción de las cargas impuestas por el suelo circundante, la configuración deformada de la sección cambiará la geometría y el cambio de curvatura puede valerse como sigue:

$$\begin{aligned} \mathcal{K} &= a^{-1} \\ \frac{d\mathcal{K}}{da} &= -1 a^{-2} da \\ \Delta \mathcal{K} &= \frac{d\mathcal{K}}{da} \\ \Delta \mathcal{K} &= -\frac{1}{a^2} \Delta a \text{ ----- (3)} \end{aligned}$$

" $\Delta a$ " representa el cambio de radio inducido en el revestimiento. Igualando las ecuaciones (1) y (3) se tiene

$$\frac{M}{EI} = -\frac{\Delta a}{a^2} \text{ ----- (4)}$$

Despejando el momento de esta última ecuación queda:

$$M = -\frac{\Delta a}{a^2} EI \text{ ----- (5)}$$

Lo anterior significa, que para poder valorar el momento flexionante actuante en una porción del revestimiento, se hace necesario conocer el cambio de radio que tiene lugar por efecto de las cargas externas.

Para un arco circular de radio "a" cuerda y flecha iniciales "c" y "h" respectivamente (ver Fig. Nº 103), se tiene:

$$\begin{aligned}
 a^2 &= (a-h)^2 + \left(\frac{c}{2}\right)^2 \\
 a^2 &= a^2 - 2ah + h^2 + \frac{c^2}{4} \\
 0 &= -2ah + h^2 + \frac{c^2}{4} \\
 2ah &= h^2 + \frac{c^2}{4} \\
 2ah &= \frac{4h^2 + c^2}{4} \\
 a &= \frac{4h^2 + c^2}{8h} \quad \text{---(6)}
 \end{aligned}$$

El cambio en el radio " $\Delta a_f$ " causado por un cambio en la flecha " $\Delta h$ " considerando la cuerda " $c$ " constante esta dado por:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{1}{2}h + \frac{c^2}{8h} \\
 \frac{da}{dh} &= \frac{1}{2} dh - \frac{c^2}{8h^2} dh \\
 \frac{da}{dh} &= \frac{1}{2} dh - \frac{1}{2} \left(\frac{c}{2h}\right)^2 dh \\
 \frac{da}{dh} &= \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{c}{2h}\right)^2\right] dh \\
 \frac{da}{dh} &= \Delta a_f \\
 \Delta a_f &= \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{c}{2h}\right)^2\right] \cdot \Delta h \quad \text{---(7)}
 \end{aligned}$$

Por otro lado el cambio en el radio " $\Delta a_c$ " causado por el cambio en la cuerda, " $\Delta c$ ", considerando que la flecha " $h$ " permanece constante es:

$$a = \frac{4h^2 + c^2}{8h}$$

$$a = \frac{1}{2} h + \frac{1}{8} \frac{c^2}{h}$$

$$\frac{da}{dc} = 0 + \frac{2c}{8h} \cdot dc$$

$$\frac{da}{dc} = \Delta a_c$$

$$\Delta a_c = \frac{c}{4h} \cdot \Delta c \text{ ----- } \textcircled{8}$$

considerando ambos efectos, el cambio total en el radio " $a$ " resulta

$$a = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{c}{2h} \right)^2 \right] \cdot \Delta h + \frac{c}{4h} \cdot \Delta c \text{ ---- } \textcircled{9}$$

con la expresión anterior es posible calcular el cambio de radio de un arco circular cuando las sollicitaciones externas inducen cambios geométricos representados por " $\Delta h$ " y " $\Delta c$ ". Esta evaluación del cambio de radio de curvatura aplicada a la ecuación 5, permite obtener el momento flexionante actuante en el revestimiento.

$$M = - \frac{\Delta a}{a^2} \cdot EI \text{ ----- } \textcircled{5}$$

Sustituyendo:

$$M = - \frac{\left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{c}{2h} \right)^2 \right] \cdot \Delta h + \frac{c}{4h} \cdot \Delta c \right\} \cdot EI}{a^2}$$

### 8.3. COMPARACION DE RESULTADOS TEORICOS CON LOS MEDIDOS.

Con el propósito de comprobar el grado de aproximación del procedimiento de evaluación de los momentos flexionantes aquí descritos, se efectuó el análisis estructural de un túnel de tramo de la Línea 7 con revestimiento de 50 cm de espesor; en este caso se calculó con el método simplificado para el análisis de estabilidad de grandes excavaciones (Ref. 1), una presión vertical actuante uniformemente repartida en su clave con valor de ----- 7.10 ton/m<sup>2</sup>/m; que indujo reacciones laterales del subsuelo con magnitud máxima de 6.178 ton/m<sup>2</sup>/m, con una configuración como la que se muestra en la Fig 104; esto último se obtuvo aplicando el procedimiento desarrollado por Zurabov y Bougayeva (Ref.2.)

La geometría del revestimiento considerado en este análisis, las acciones y reacciones del subsuelo y los momentos flexionantes resultantes, se muestran en la misma figura; la configuración de formada del revestimiento inducida por esta condición de carga se representa en la Fig. 105. Tomando como base las deformaciones calculadas para los puntos ubicados a cada 15° desde la clave del revestimiento, se valoró el cambio de cuerda  $\Delta c$ , y de flecha  $\Delta h$ , para pares de puntos ubicados simétricamente con respecto a la clave y con estos valores se obtuvieron los momen-

tos flexionantes que se muestran en la Fig. 106 como "M calc". En esta figura se indica la variación de la relación entre los momentos calculados y los momentos actuantes obtenidos estructuralmente. La curva de variación es de tipo parabólica cuyos valores inician de un 100% al centro de la clave hasta un 60% a -- 4 m alejado del centro de la misma. Esto indica que los momentos calculados con base en la deformada, son relativamente menores a los momentos actuantes calculados estructuralmente, sin embargo, dan una idea de los momentos que se presentan en la zona de la clave de un túnel. La relación de momentos calculados y los actuantes en las paredes es aproximadamente constante; esto es, que el momento calculado con base en la deformada es del orden del 88% del actuante en esta zona, como se podrá observar en la misma figura. Esto indica que los momentos calculados de esta manera son confiables bajo estas reservas.

Utilizando el procedimiento de estimación de los momentos flexionantes descritos en este capítulo, se efectuó el análisis para un túnel de estación de la Línea 7. Para este tipo de túnel se calculó, con los métodos descritos en las Ref. 1 y 2, una carga vertical linealmente decreciente desde un máximo de ----- 18.51 ton/m<sup>2</sup>/m en la clave, hasta un valor de 6.57 ton/m<sup>2</sup>/m en la tangencia de la vertical con las paredes y que obliga a una acción lateral máxima del subsuelo sobre el ademe de ----- 7.538 ton/m<sup>2</sup>/m cuyas variaciones se presentan en la Fig. 107, -- posteriormente al calculo anterior, se procedio a un análisis estructural con alguno de los métodos propuestos para este fin, -

del que se obtienen las reacciones y los momentos flexionantes - cuyo diagrama se puede observar también en la Fig. 107. Con las cargas actuantes, las reacciones en los apoyos y los momentos -- flexionantes obtenidos, se calcularon las deformaciones los cuales aparecen en la Fig. 108 como un diagrama de deformaciones, - cabe hacer notar que el revestimiento considerado en todos los - análisis es de 50 cm de espesor, cuya geometría se presenta en las dos últimas figuras, finalmente se valoraron los cambios de cuerda y de flecha del diagrama de deformaciones, para que con -- ellos se obtuvieran las variaciones de los momentos flexionantes en puntos ubicados a cada 15° sobre el revestimiento, tanto en la clave como en las paredes del túnel, los resultados se presentan en la Fig. 109 como "M'calc".

En esta figura se observa que la variación de la relación de los momentos flexionantes deducidos de la deformada "M'calc" y los actuantes en la clave es muy similar a la que se obtuvo para un túnel de tramo, por lo que puede concluirse que, a partir de las deformaciones de puntos cercanos al eje del tú-- nel de andén, se puede obtener una estimación del momento fle-- xionante actuante en la clave, tomando en cuenta las variaciones que se muestran en la Fig. 109, la diferencia entre un túnel de tramo y uno de estación consiste en que el momento flexionante - en la pared del túnel, calculado con base en la deformada, será del orden del 90% del momento actuante.

Después de haber realizado los dos análisis anteriores, es de--- cir, para túneles de tramo y de estación en los que se comprobó

que el método para obtener los momentos flexionantes basado en las deformaciones es satisfactorio, se procedió a aplicarlo con resultados reales obtenidos a través de la instrumentación. Para ello se analizaron las secciones de túneles de las estaciones Auditorio, Tacubaya y San Pedro de los Pinos; los resultados se presentan en la tabla 7. En esta tabla se hace la comparación de los momentos flexionantes calculados estructuralmente con los calculados con base en las deformaciones medidas. La comparación se hace para dos casos: los momentos presentados en el centro de la clave y los que se presentan en las paredes. Se observa que la aproximación de los momentos calculados y los actuantes en la clave varía de 37 a 77%; sin embargo los momentos flexionantes que se presentan en las paredes varían de 44 a 110%; exceptuando los casos de las Estaciones Tacubaya y San Pedro de los Pinos los cuales se incrementan hasta 161.9 y 199.9% respectivamente; esto puede ser resultado de que el análisis estructural no haya tomado en cuenta algunas capas de suelo que provocaron grandes deformaciones.

Otra de las razones por las cuales algunos de estos valores no coinciden con lo esperado es debido a que el análisis estructural se hizo para un caso general; entonces, lo que se recomienda para estos casos es hacer un análisis para cada uno de ellos en particular, en donde se tome cuenta la variación de la estratigrafía del suelo; para ello se estaría hablando ya de un análisis de interacción suelo estructura.

En las Figs. 110 a 115 se muestran las configuraciones original



y deformada del revestimiento de túneles de estación, resultado de la interpretación de las mediciones en las secciones de convergencia.

Tomando como base las deformaciones verticales en la clave de túneles de tramo, consideradas éstas como la suma de las deformaciones medidas con extensómetros y con las deformaciones medidas con la nivelación de la base del extensómetro, comparando tales deformaciones con la deformación vertical teórica calculada mediante el análisis estructural de un túnel de tramo, con un revestimiento de 15 cm de espesor en el que se supuso una presión vertical uniforme actuante en la clave del túnel y con una magnitud de  $7.10 \text{ ton/m}^2/\text{m}$ , se valoró la presión vertical real actuante sobre la clave de los túneles reportados en la tabla 8.

En dicha tabla se señalan las deformaciones obtenidas con la instrumentación colocada en las ubicaciones indicadas y se comparan éstas con la deformación teórica calculada.

Como se puede notar, el rango de variación de la relación entre las deformaciones de la clave medidas y las calculadas varía entre el 20 y el 49%, lo que es indicativo de que el valor de la presión vertical real actuante para las ubicaciones analizadas estuvo comprendido entre  $1.4$  y  $3.4 \text{ ton/m}^2/\text{m}$ .

Cabe señalar que las deformaciones medidas con la instrumentación son precisamente las deformaciones del túnel cuando éste fue excavado y soportado sólo con ademe provisional a base de concreto lanzado, y que esta condición está representada por el análisis estructural de un revestimiento de 15 cm de espesor.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Por otra parte, con el fin de conocer la forma en que se comporta el revestimiento del túnel, después de que el frente de excavación deja de ejercer influencia en el comportamiento del resto del túnel, se analizaron las deformaciones medidas en cada una de las líneas de secciones de convergencia de túneles de tramo para alojar dos vías del Metro.

En las Figs. 116 a 120 se señalan las configuraciones deformadas del revestimiento, para las secciones en donde se midieron las convergencias de las paredes y de la clave. En dichas figuras se han dibujado a manera comparativa las configuraciones deformadas del revestimiento.

Es preciso señalar que las deformaciones en los túneles se presentan en mayor magnitud cuando estos están recién excavados y que las deformaciones no son registradas en su totalidad debido al procedimiento de instalación de los puntos de referencia; por tal motivo estas medidas no son indicativas del comportamiento deformacional total de la excavación y solo dan idea de la tendencia general del comportamiento. Es por ello que en el planteamiento de la instrumentación de los túneles se debe considerar también la colocación de instrumentos que permitan registrar los movimientos del túnel antes de que éste sea excavado, como son los extensómetros, los inclinómetros y los puntos de nivelación superficial.

## CAPITULO IX

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de la descripción y análisis de las deformaciones obtenidas a través de la instrumentación, se establecen a continuación las siguientes conclusiones:

1.- Las zonas de la Línea 7 en que se detectaron movimientos --- fuertes y velocidades de deformación altas, corresponden a Tacuba, Auditorio, Tacubaya y San Pedro de los Pinos, en las cuales gracias a la detección oportuna de estos comportamientos desfavorables se realizaron medidas correctivas, como fue la colocación de una capa de concreto lanzado y malla de acero, adicional a otra ya existente, o bien sobre las dovelas de concreto, según -- fueron los casos de Auditorio y Tacuba respectivamente; otro tipo de medida correctiva fue el cambio en el proceso constructivo de los túneles en la estación San Pedro de los Pinos, en donde - en vez de excavar totalmente y colocar el revestimiento provisional en el túnel B de 150 m de longitud, se realizaron avances de solo 10 m para colar el revestimiento provisional y definitivo inmediatamente después de la excavación, caso similar fue el de la estación Tacubaya.

2.- En el resto de los túneles excavados en la Línea 7, se registraron magnitudes de deformación dentro del rango de seguridad - de la excavación desde el punto de vista de estabilidad.

3.- Las deformaciones registradas resultan ser compatibles, tanto en la magnitud de las deformaciones como en el comportamiento de las mismas a través del tiempo, entre diferentes grupos de instrumentos.

4.- El lapso entre la excavación del túnel y la fecha de instalación de los puntos de convergencia, influye en el porcentaje de deformación que se registra en este instrumento con respecto a la total que se presenta; se recomienda que este lapso sea de cuando más de 4 días para obtener un porcentaje de deformación del orden de 70-75%, del total presentado.

5.- El uso de los inclinómetros, extensómetros y puntos de nivelación superficial, permitió conocer de manera completa la magnitud de la deformación total, tanto horizontal como vertical, que se presentó en el subsuelo circundante al túnel provocada por la excavación del mismo.

6.- De las configuraciones deformadas del revestimiento de túneles, se puede obtener aproximadamente el valor de los momentos flexionantes máximos, positivos y negativos, que actúan en la clave y en las paredes y así también, se puede deducir el valor de la presión que actúa en la clave para producir los momentos estimados y las deformaciones medidas.

7.- Las deformaciones de donde se obtienen los momentos flexio

nantes y presiones sobre la clave actuantes en los revestimientos deben ser totales, esto es, deben ser las obtenidas con mediciones iniciadas previa, durante y después de la ejecución de la excavación y hasta verificar que se han estabilizado con el tiempo. Las mediciones de convergencia no proporcionan esta información; se requiere de resultados como los obtenidos con los inclinómetros y extensómetros, que son la información apropiada para retroalimentar al diseñador de los túneles.

Con base en las conclusiones establecidas, se enlistan a continuación las siguientes recomendaciones.

1.- Es importante mantener actualizadas las gráficas que contienen los registros de las deformaciones obtenidas con los instrumentos para su interpretación inmediata, con la finalidad de prever con tiempo un comportamiento que pueda calificarse de inestable o indeseable y buscar la solución más apropiada para su control.

2.- Es recomendable, antes de iniciar los trabajos de interpretación con base en la instrumentación, tener conocimiento del comportamiento que se espera del suelo, en el cual se planea la excavación de un túnel, desde el punto de vista de deformaciones totales y velocidades de deformación.

3.- Para el caso de la instalación de los puntos de referencia -

para medición de convergencias en el interior del túnel, es recomendable que el lapso de instalación sea hasta de 4 días después del paso de la excavación, ya que a medida que pasa el tiempo el registro de la deformación de convergencia será cada vez menor - en porcentaje, con respecto a la total que se presenta.

4.- Para conocer la magnitud total de la deformación esperada en el suelo circundante al túnel excavado, se recomienda la instalación de los extensómetros, las tuberías para inclinómetro y los puntos de nivelación superficial, es decir el uso de instrumentos que se instalen antes de que el túnel se excave.

5.- Es conveniente aprovechar la medición de una misma deformación con diferentes instrumentos para corroborar la veracidad de los resultados obtenidos.

6.- Se recomienda continuar la investigación de métodos de medición y análisis que permitan mejorar el grado de aproximación -- con que puede lograrse la verificación del comportamiento de revestimiento de túneles que se describen en esta tesis y que, aun que puede considerarse aceptable, debe mejorarse su grado de --- aproximación.

## LISTA DE FIGURAS

- | Nº  | CONCEPTO  |
|-----|---|
| 1.  | Recorrido de la Línea 7 del Metro de la Ciudad de México.   |
| 2.  | Sección de túnel circular de 9.14 m de diámetro, para tramo entre estaciones.                             |
| 3.  | Sección de túnel semicircular de 10.04 m de diámetro y 8.404 m de altura, para tramo entre estaciones.    |
| 4.  | Sección de doble túnel semicircular para estación de 8.57 m de diámetro.                                  |
| 5.  | Secciones de túnel semicircular de 14.86 m de diámetro para las estaciones Mixcoac y Barranca del Muerto. |
| 6.  | Perfil estratigráfico general de la Línea 7 del Metro de la Ciudad de México.                             |
| 7.  | Longímetro para medir diámetros dentro del túnel.   |
| 8.  | Instalación de los puntos de referencia para medir distancias o diámetros.                                |
| 9.  | Distribución de los puntos de referencia sobre las paredes de un túnel.                                   |
| 10. | Gráfica de deformación medido con longímetro contra el tiempo.  |
| 11. | Extensómetro mecánico de bocina.  |
| 12. | Gráfica de deformación medido con extensómetro mecánico contra el tiempo.                                 |

13. Inclínómetro.
14. Tubo de ademe y cople de aluminio extruido para medición de desplazamientos horizontales.
15. Instalación de la tuberfa de aluminio para inclinómetro.
16. Posición del inclinómetro durante el proceso de toma de lecturas.
17. Gráfica de las deformaciones finales de la tuberfa medidas con inclinómetro.
18. Gráfica de deformación medida con inclinómetro contra el tiempo.
19. Gráfica de hundimientos del terreno en una sección -- transversal, medido con nivel topográfico.
20. Correlación de resultados entre diferentes instrumentos de medición.
21. Sección de túnel para estación con tensores de acero.
22. Celda hidráulica.
23. Instalación de una celda hidráulica.
24. Gráfica de la carga de tensión en una celda hidráulica.
25. Sección de convergencias en túnel de tramo con revestimiento provisional a base de concreto lanzado.
26. Sección de convergencias en túnel de tramo con revestimiento a base de dovelas.
27. Secciones de convergencias sobre revestimiento provisional y definitivo en los túneles de andén "A" y "B".



28. Sección típica de instrumentación de un túnel sencillo.
29. Sección típica de instrumentación para doble túnel.
- 30 a 43. Histogramas de deformaciones medidas con líneas de convergencia.
- 44 a 46. Histogramas de deformaciones medidas con extensómetros.
- 47 y 48. Histogramas de deformaciones medidas con inclinómetros.
- 49 a 51. Histogramas de hundimientos medidos con puntos de nivelación.
52. Histograma de hundimientos medidos con puntos de nivelación para el caso de túneles "A" de las estaciones revestidos definitivamente.
53. Histograma de tensiones medidas con celdas de carga.
- 54 a 70. Gráficas de correlación de resultados de deformaciones verticales.
71. Gráfica de deformaciones registradas con convergencias en las líneas 1-4 y 7-4, en comparación con las registradas con extensómetro y nivelación.
- 72 a 98. Gráficas de correlación de deformaciones horizontales.
99. Gráfica de deformaciones registradas con convergencias en la línea 6-2 en comparación con las registradas con inclinómetro.
100. Conceptos fundamentales del método simplificado propuesto.

101. Características geométricas del arco de carga de generación natural.
102. Sección crítica para un túnel semicircular.
103. Nomenclatura geométrica del arco original analizado.
104. Momentos flexionantes para túnel de tramo,  $e = 50$  cm.
105. Análisis de momentos flexionantes considerando la deformada.
106. Aproximación de los momentos flexionantes calculados, considerando la deformación del revestimiento.
107. Distribución de momentos flexionantes para túnel de estación;  $e = 50$  cm.
108. Diagrama de deformaciones.
109. Diagrama de momentos flexionantes considerando la deformada.
- 110 a 115. Configuración deformada de los túneles de estación.
- 116 a 120. Configuración deformada de los túneles de tramo, con revestimiento provisional.

## L I S T A D E T A B L A S

Nº

CONCEPTO

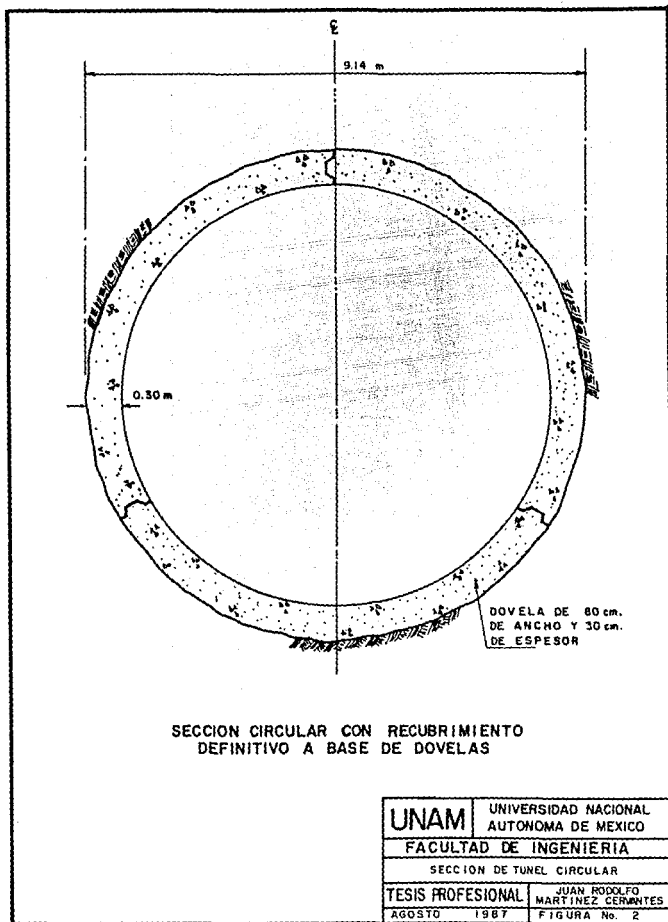
1. Propiedades mecánicas del suelo en el túnel de la Línea 7 -- del Metro de la Ciudad de México.
2. Deformaciones promedio de convergencias y divergencias deducidas de los histogramas.
3. Casos particulares de deformaciones medidas con secciones de convergencia.
4. Deformaciones promedio de extensómetros, inclinómetros y nivelaciones deducidas de los histogramas.
5. Comparación de registros de deformación vertical, registrada con diferentes tipos de instrumentos en una misma sección de instrumentación, en los túneles del Metro de la Ciudad de México.
6. Comparación de registros de deformación horizontal, registrada con diferentes tipos de instrumentos en una misma sección de instrumentación, en los túneles del Metro de la Ciudad de México.

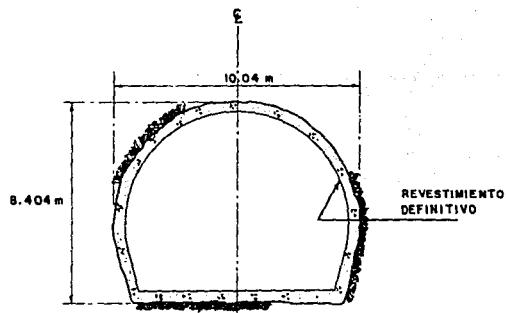
Nº

CONCEPTO

7. Momentos flexionantes deducidos de las deformaciones medidas en secciones de convergencia de túneles de estación y su comparación con los anticipados por el análisis estructural.
  
8. Estimación de la presión vertical actuante en la clave de túneles de tramo con base en las deformaciones registradas con extensómetro y nivelaciones.

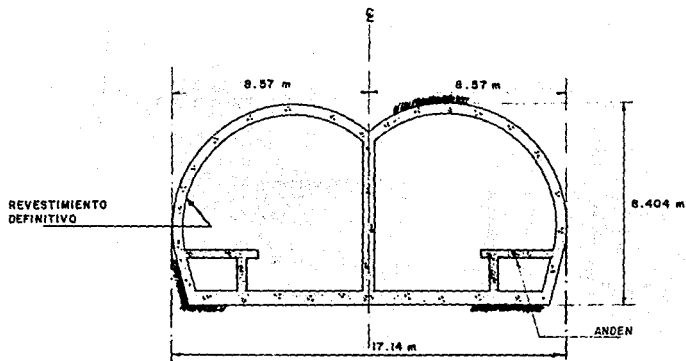






SECCION SEMICIRCULAR PARA DOS VIAS UTILIZADO  
EN TUNELES DE TRAMO ENTRE ESTACIONES

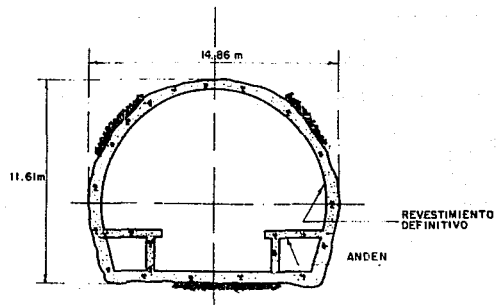
<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
SECCION DE TUNEL SEMI-CIRCULAR	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 3



SECCION DE DOBLE TUNEL SEMICIRCULAR PARA ESTACION

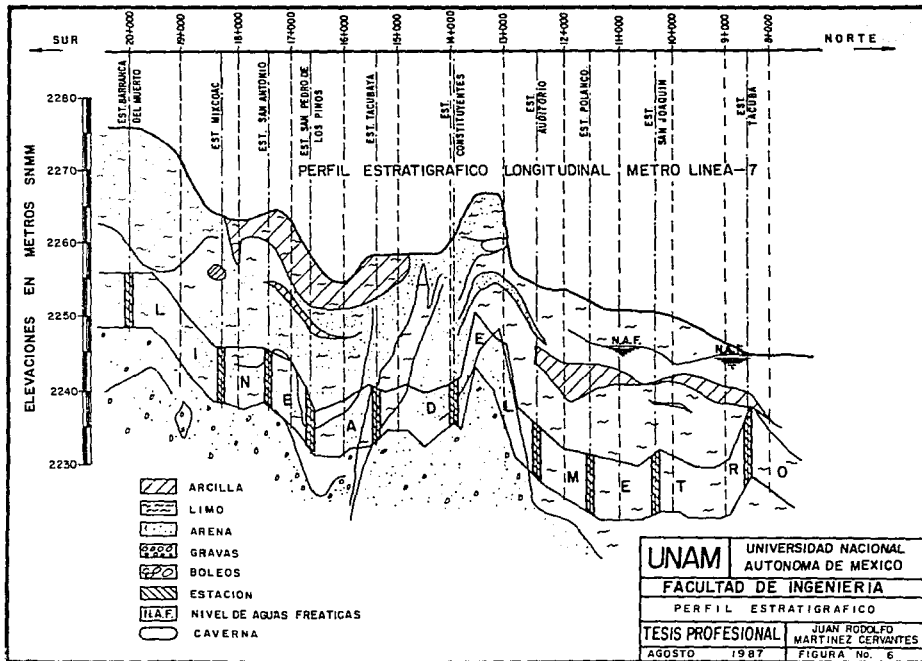
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
SECCION DE TUNEL DOBLE SEMICIRCULAR	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 4



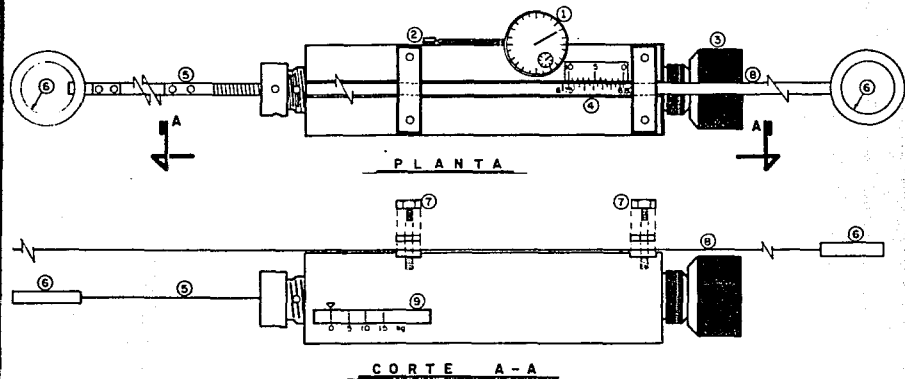


SECCION SEMICIRCULAR PARA LAS ESTACIONES  
MIXCOAC Y BARRANCA DEL MUERTO

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
SECCION DE TUNEL SEMICIRCULAR	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 5



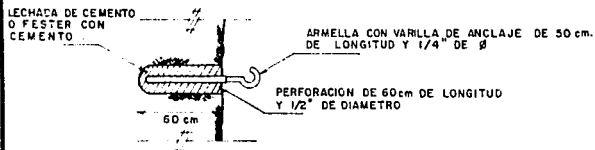
## LONGIMETRO DE CINTA INVAR



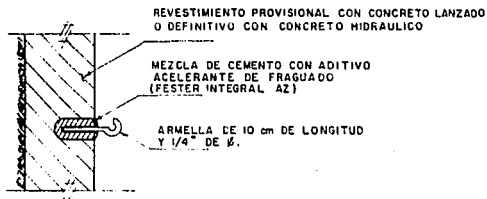
- ① MICROMETRO (0.01 mm)
- ② SOPORTE ACTIVADOR DEL MICROMETRO
- ③ TORNILLO PARA APLICAR TENSION
- ④ ESCALA DE VERNIER PARA FIJAR LA CINTA
- ⑤ CINTA INVAR DE LONGITUD CONSTANTE
- ⑥ ARGOLLA PARA FIJARSE AL PUNTO DE MEDICION
- ⑦ TORNILLOS Y ROLDANAS PARA ASEGURAR LA CINTA
- ⑧ CINTA INVAR CON LONGITUD DE 25 m.
- ⑨ ESCALA PARA LA TENSION APLICADA

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
LONGIMETRO	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 7

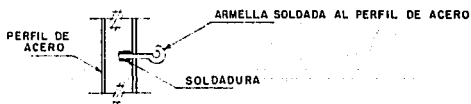
## INSTALACION DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA PARA MEDIR DISTANCIAS



### a.- INSTALACION SOBRE MATERIAL DE LAS PAREDES DEL TUNEL

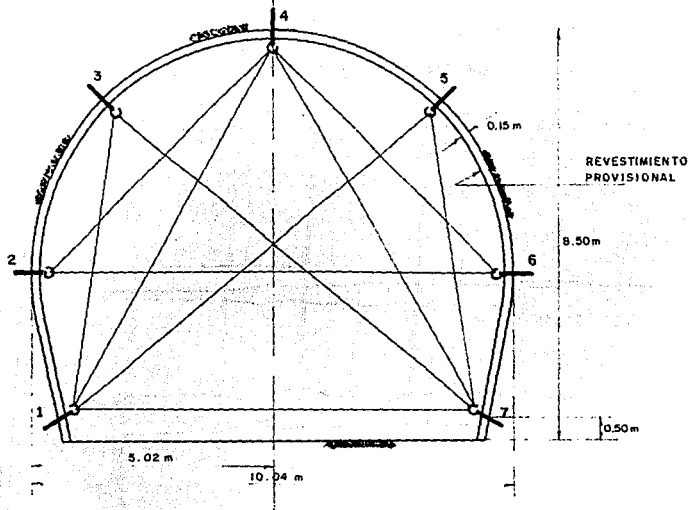


### b.- INSTALACION SOBRE REVESTIMIENTO PROVISIONAL O DEFINITIVO



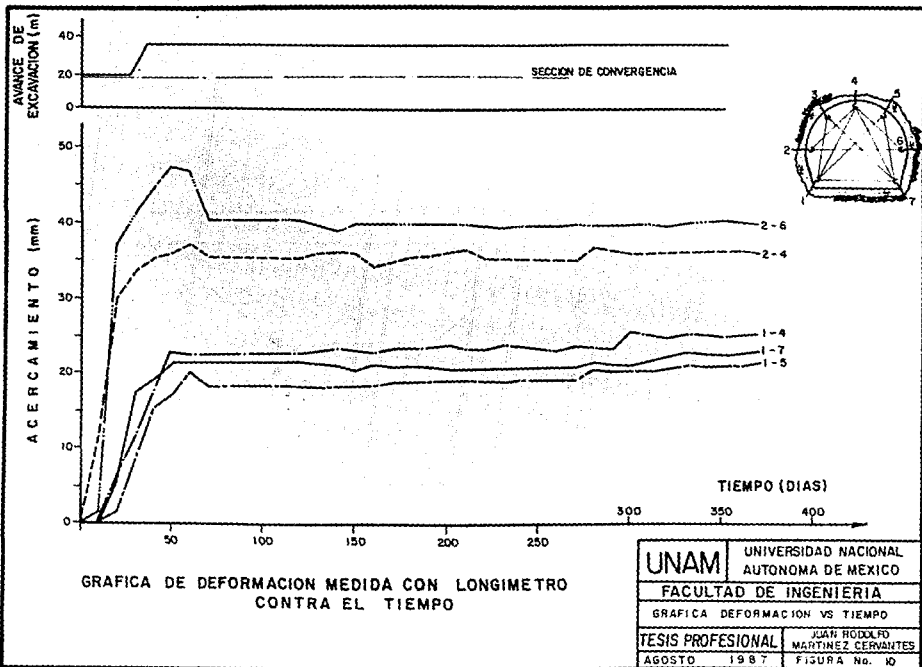
### c.- INSTALACION SOBRE REVESTIMIENTO A BASE DE MARCOS DE ACERO

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CROQUIS DE INSTALACION DE PUNTOS DE REFERENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 8



DISTRIBUCION DE LOS PUNTOS SOBRE LAS PAREDES DE UN TUNEL

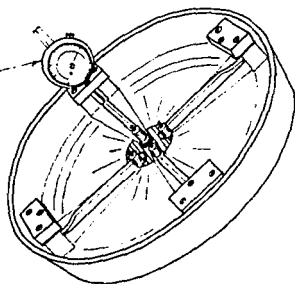
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
	FACULTAD DE INGENIERIA	
DISTRIBUCION DE PUNTOS DE CONVERGENCIA		
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVAANTES	
AGOSTO 19 87	FIGURA No. 9	



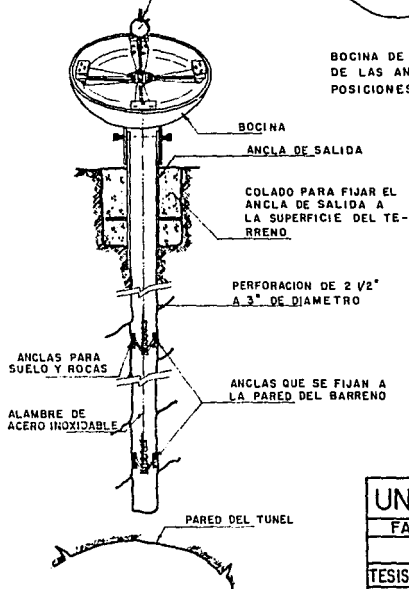
GRAFICA DE DEFORMACION MEDIDA CON LONGIMETRO  
CONTRA EL TIEMPO

## EXTENSOMETRO MECANICO DE BOCINA

MICROMETRO DE CARATULA  
(0.01mm)



BOCINA DE SUJECION DE LOS ALAMBRES  
DE LAS ANCLAS, CON CUATRO POSIBLES  
POSICIONES.



BOCINA

ANCLA DE SALIDA

COLADO PARA FIJAR EL  
ANCLA DE SALIDA A  
LA SUPERFICIE DEL TE-  
RRENO

PERFORACION DE 2 1/2"  
A 3" DE DIAMETRO

ANCLAS PARA  
SUELO Y ROCAS

ANCLAS QUE SE FIJAN A  
LA PARED DEL BARRENO

ALAMBRE DE  
ACERO INOXIDABLE

PARED DEL TUNEL

UNAM

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

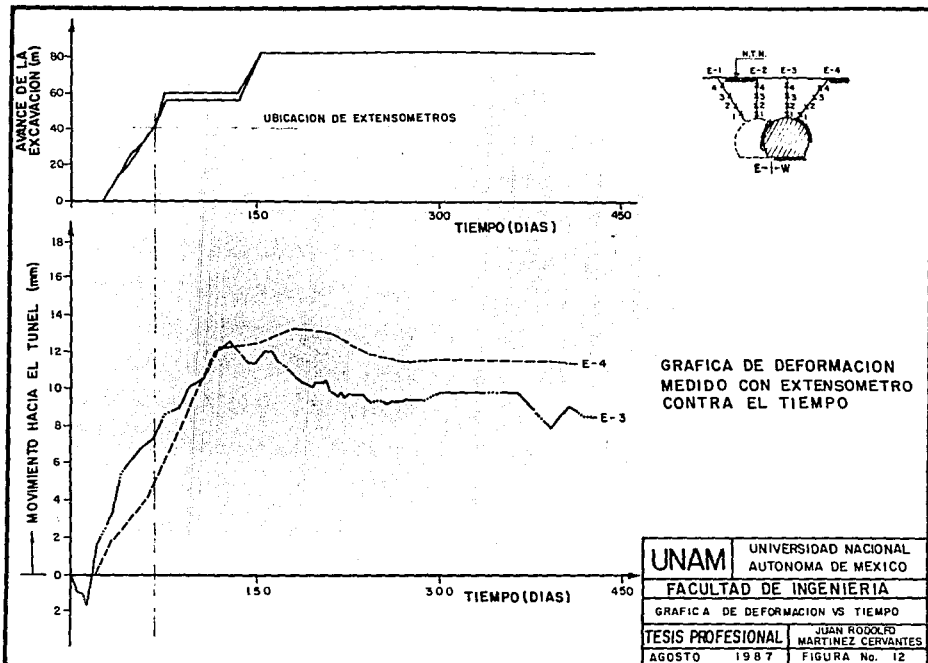
EXTENSOMETRO MECANICO

TESIS PROFESIONAL

JUAN RODOLFO  
MARTINEZ CERVANTES

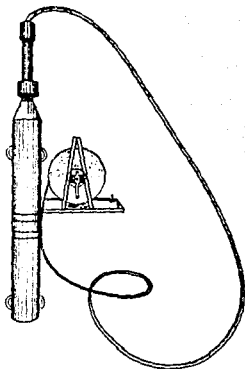
AGOSTO 1987

FIGURA No. 11

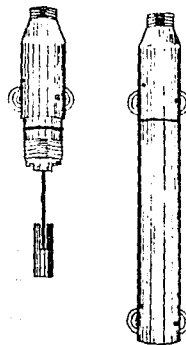




INCLINOMETRO

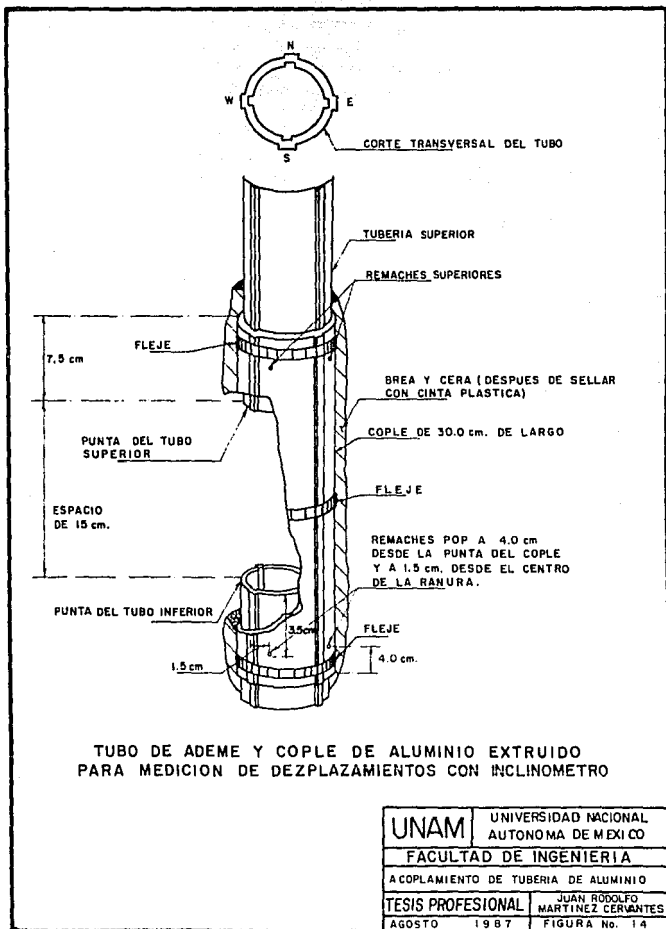


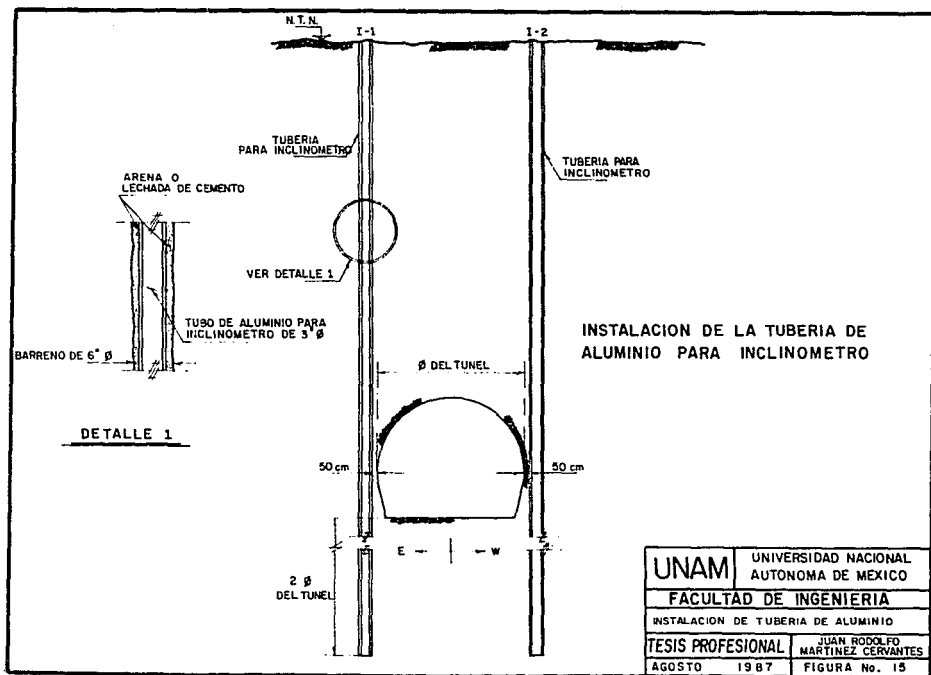
CARRETE E INCLINOMETRO



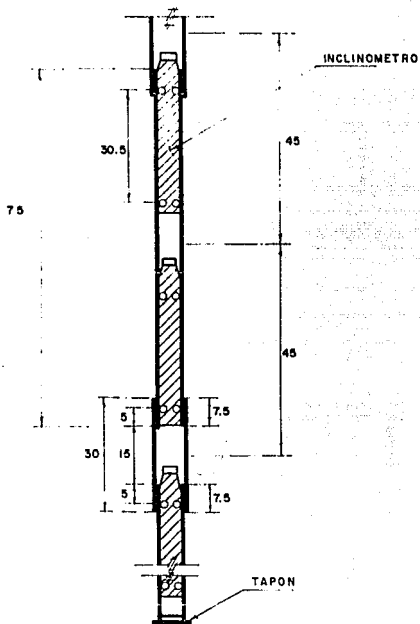
PENDULO

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
INCLINOMETRO	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO	1987
FIGURA No. 13	



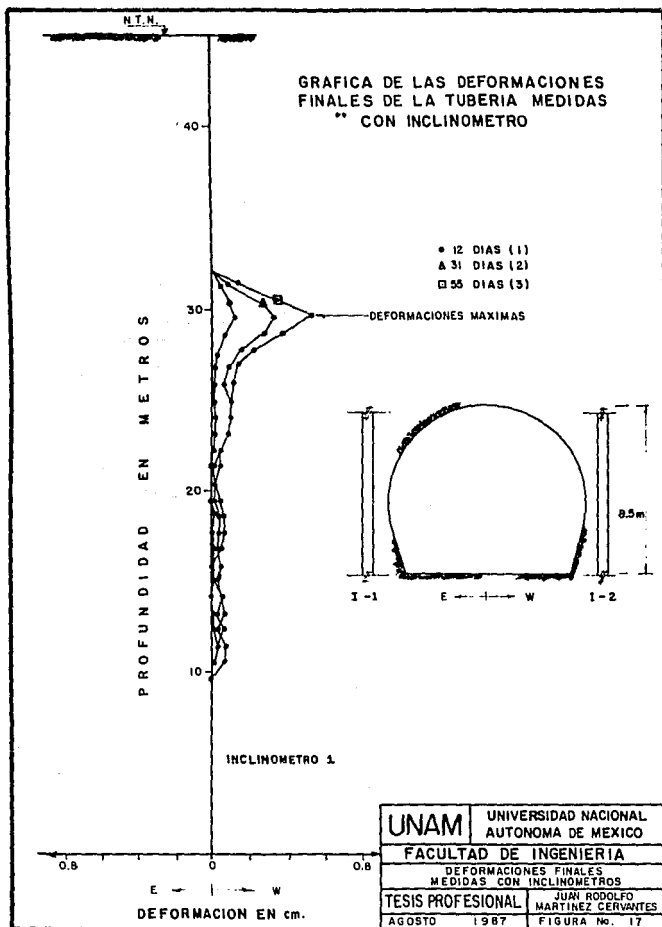


POSICION DEL INCLINOMETRO DURANTE EL PROCESO  
DE TOMA DE LECTURAS

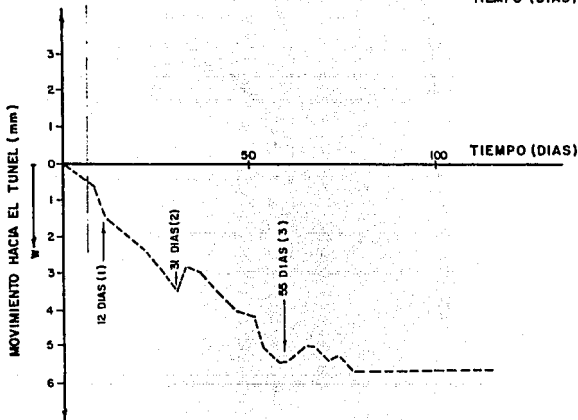
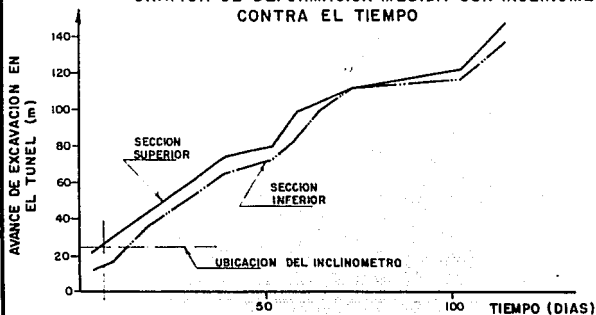


ACOTACIONES EN cm.

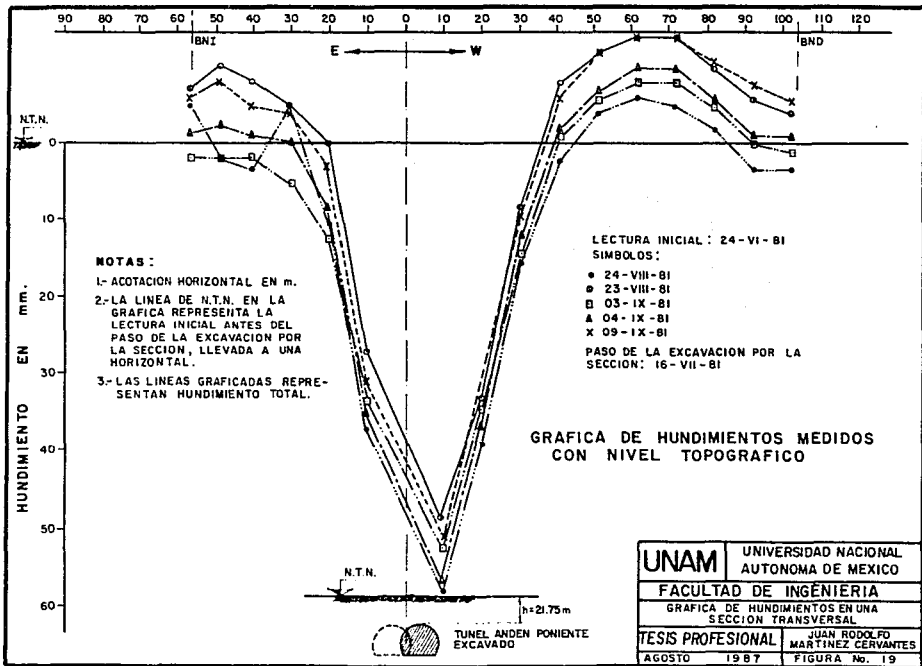
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
MEDICION CON INCLINOMETRO	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 10

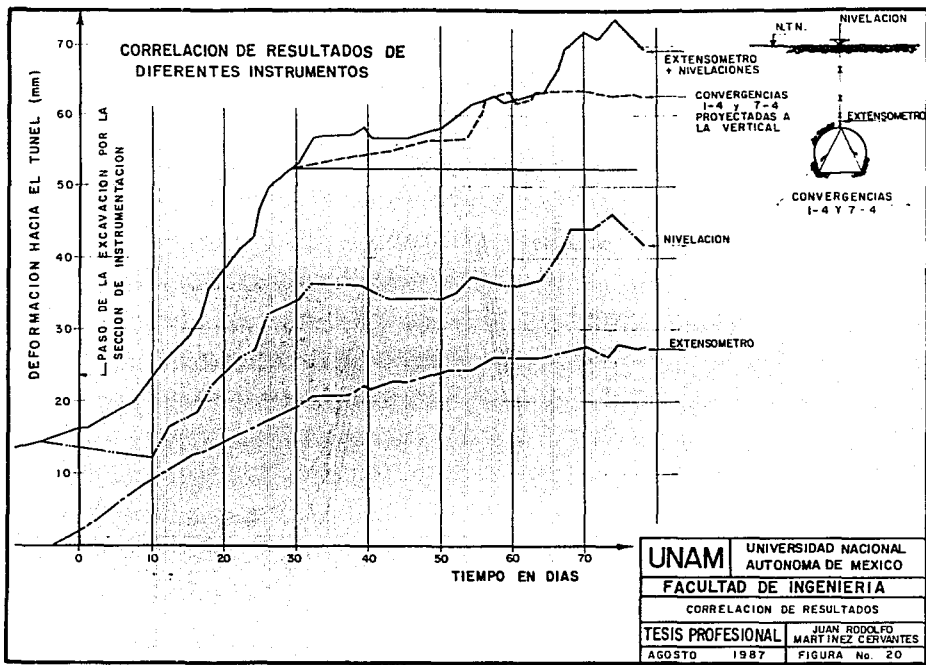


GRAFICA DE DEFORMACION MEDIDA CON INCLINOMETRO  
CONTRA EL TIEMPO

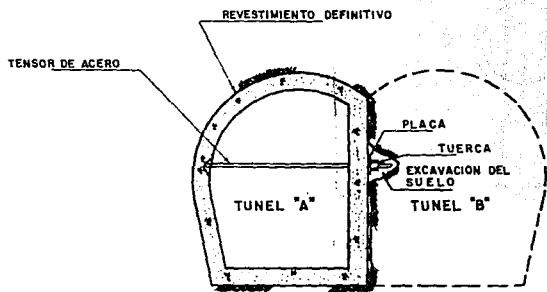


UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
GRAFICA DEFORMACION VS TIEMPO	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 18







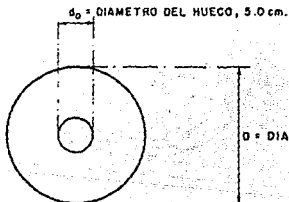
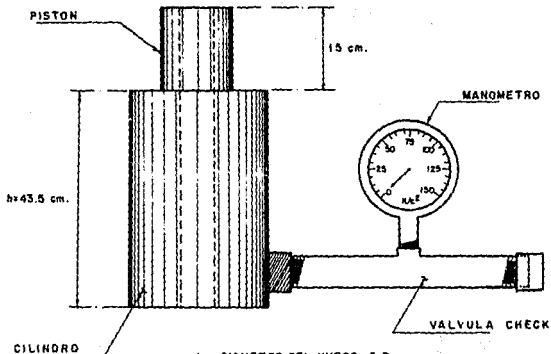


SECCION DE TUNEL PARA ESTACION

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CROQUIS DE INSTALACION DE UN TENSOR	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 21



$d =$  DIAMETRO DEL PISTON, 8.5 cm.

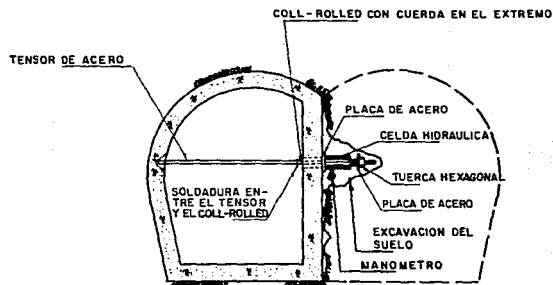


$d_0 =$  DIAMETRO DEL HUECO, 5.0 cm.

$D =$  DIAMETRO DEL CILINDRO, 16.0 cm.

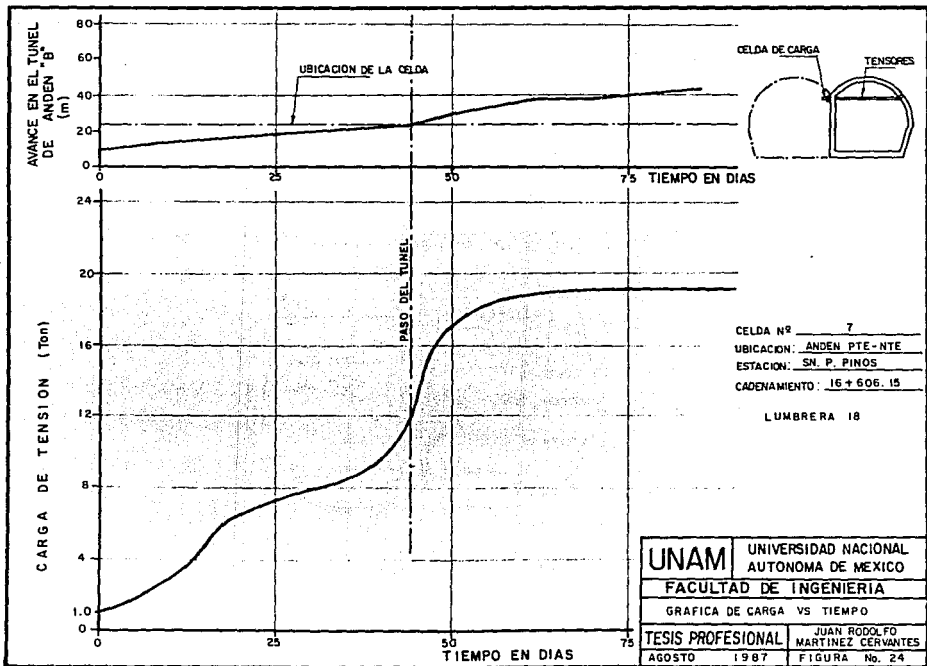
**CELDA HIDRAULICA DE 60 Ton. DE CAPACIDAD**

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CELDA HIDRAULICA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERWANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No 22



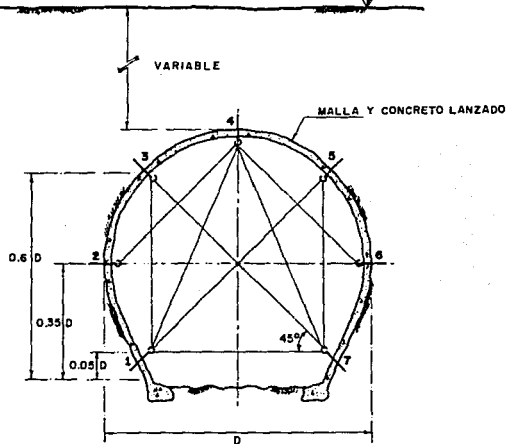
CROQUIS DE INSTALACION DE UNA CELDA HIDRAULICA

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
CROQUIS DE INSTALACION DE UNA CELDA HIDRAULICA	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 23



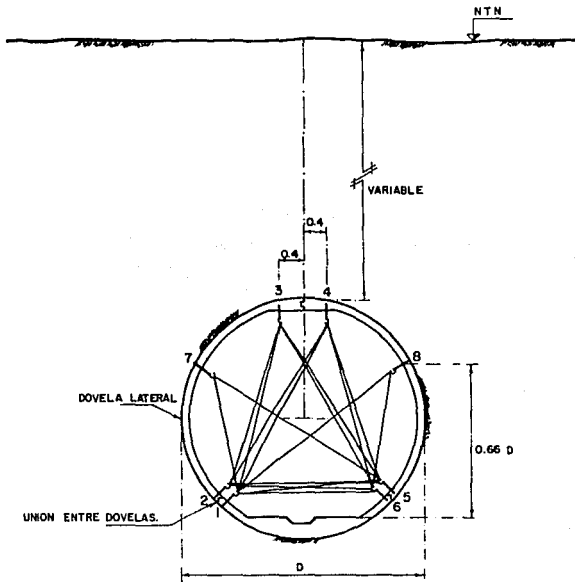
**SECCION DE CONVERGENCIAS EN TUNEL DE TRAMO CON  
REVESTIMIENTO PROVISIONAL A BASE DE CONCRETO LANZADO**

N.T.N.



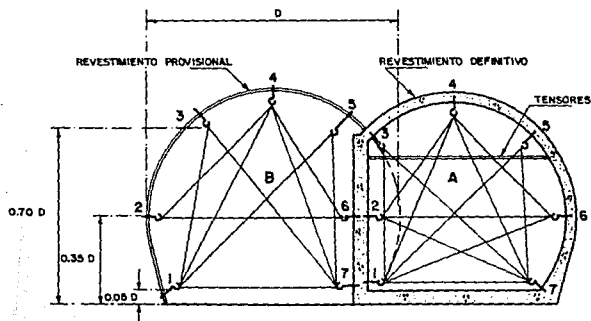
<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
DISTRIBUCION DE LOS PUNTOS DE CONVERGENCIA	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 25

SECCION DE CONVERGENCIAS EN TUNELES DE TRAMO  
CON REVESTIMIENTO A BASE DE DOVELAS



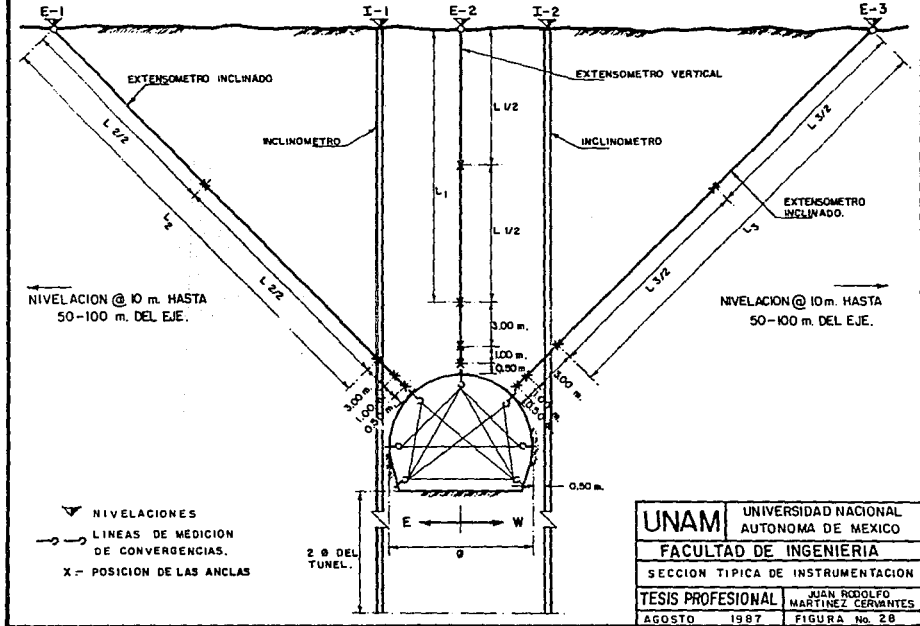
<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
DISTRIBUCION DE LOS PUNTOS DE CONVERGENCIA	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 19 87	FIGURA No. 26

SECCIONES DE CONVERGENCIA SOBRE REVESTIMIENTO PROVISIONAL Y DEFINITIVO  
EN LOS TUNELES DE ANDEN "A" Y "B"



UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA DISTRIBUCION DE LOS PUNTOS DE CONVERGENCIA
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERMANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 27

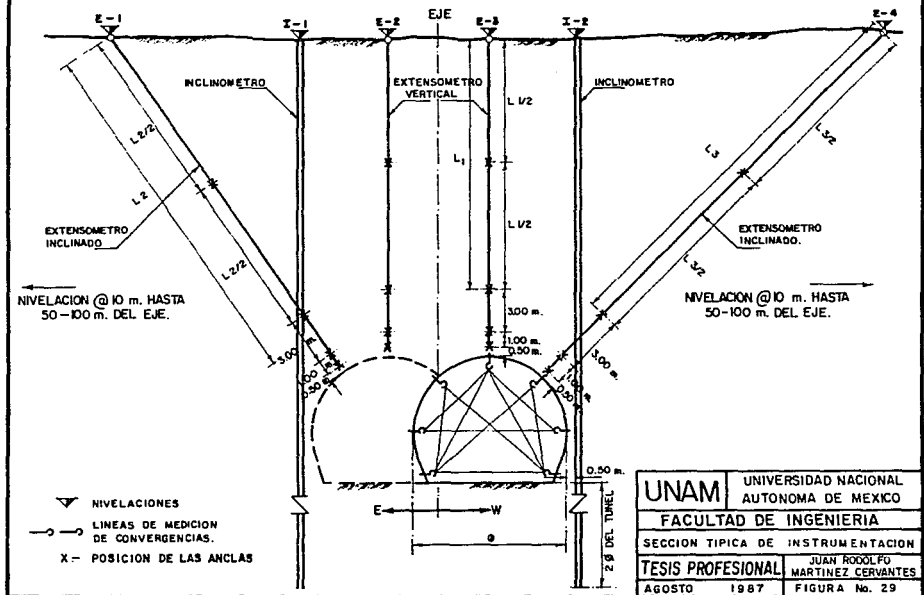
## SECCION TIPICA DE LA INSTRUMENTACION DE UN TUNEL SENCILLO



<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
SECCION TIPICA DE INSTRUMENTACION	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 28

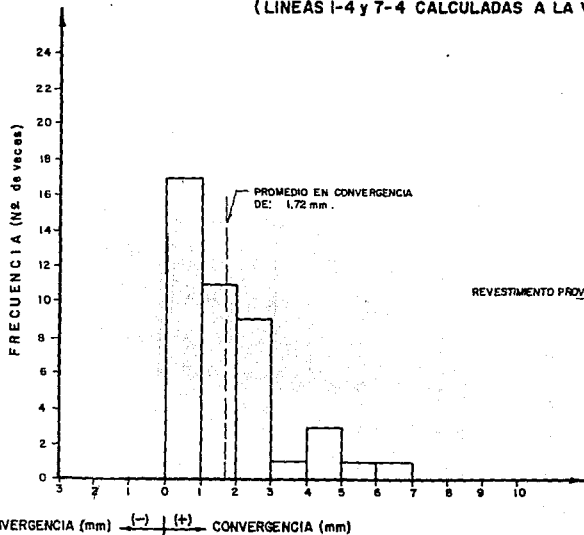


# SECCION TIPICA DE LA INSTRUMENTACION PARA DOBLE TUNEL



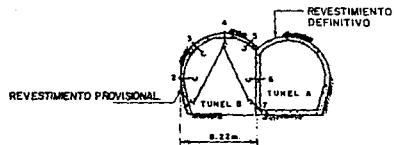
<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
SECCION TIPICA DE INSTRUMENTACION	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN ROOOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 29

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEAS 1-4 y 7-4 CALCULADAS A LA VERTICAL).



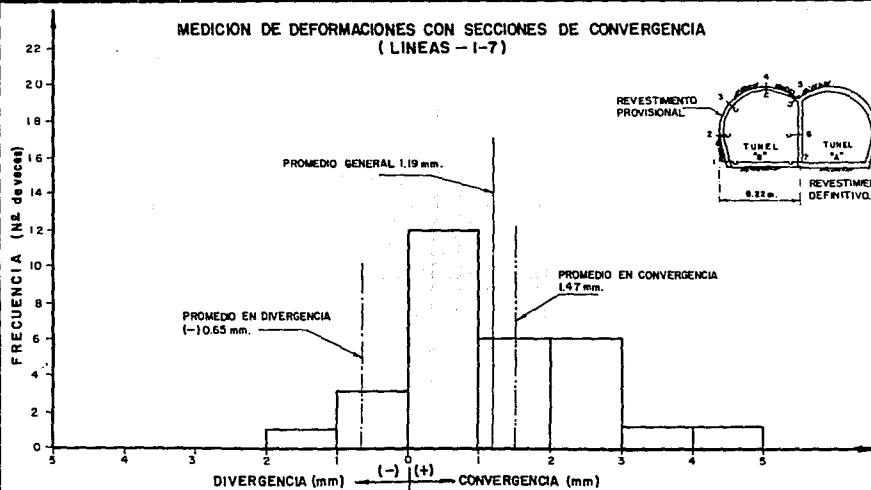
NOTAS:

- TUNELES DEL LADO "B" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DEL TUNEL: 8.22 m
- No. DE SECCIONES: 43 Secc



UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No 30

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEAS - I-7)

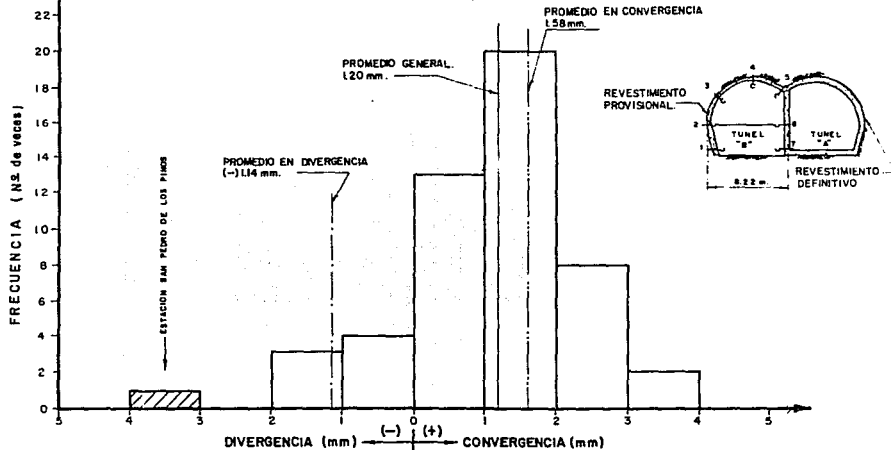


NOTAS :

- TUNELES "B" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DEL TUNEL : 8.22 m.
- Nº DE SECCIONES: 30 Secc.

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 31

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEA 6-2)



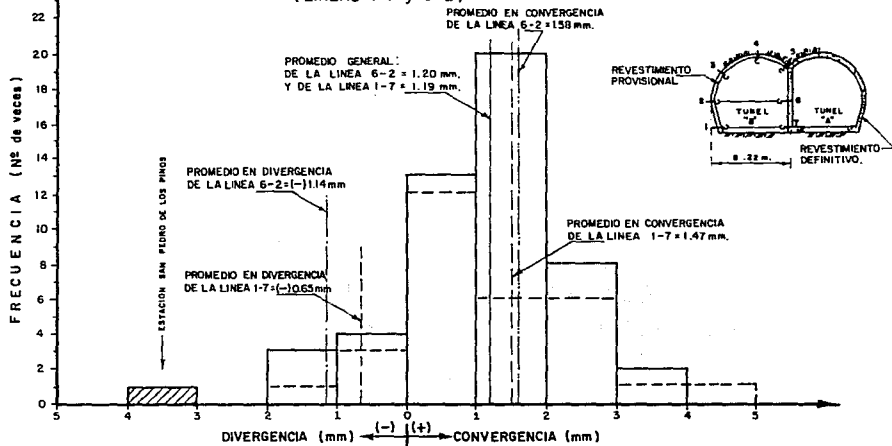
NOTAS:

- TUNELES "B" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DEL TUNEL : 8.22 m.
- N.R. DE SECCIONES: 51 Secc.

▨ VALORES SINGULARES NO TOMADOS EN CONSIDERACION PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO.

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 32

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEAS 1-7 y 6-2)



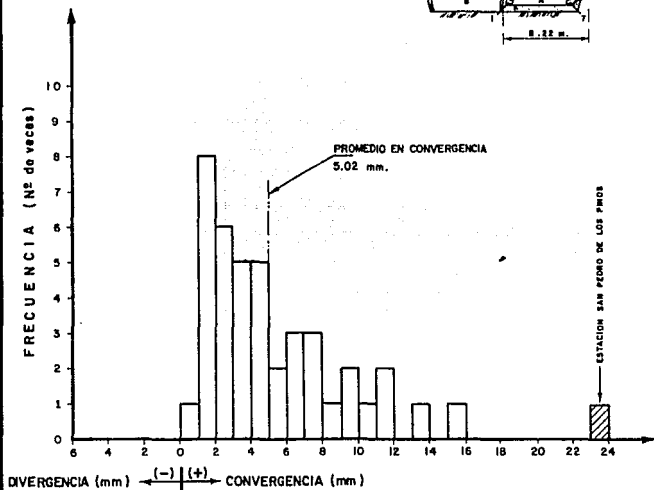
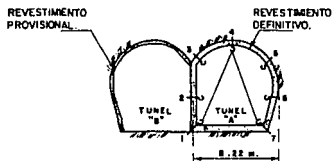
NOTAS :

- TUNELES "B" DE LAS ESTACIONES CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DEL TUNEL : 8.22 m.
- Nº DE SECCIONES :  
1-7 : 30 Secc  
6-2 : 51 Secc

- VALORES SINGULARES NO TOMADOS EN CONSIDERACION PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO.
- HISTOGRAMA PARA LA LINEA 6-2
- HISTOGRAMA PARA LA LINEA 1-7

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
	FACULTAD DE INGENIERIA	
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA		
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES	
AGOSTO	1987	FIGURA No. 33

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEAS 1-4 y 7-4 CALCULADAS A LA VERTICAL)

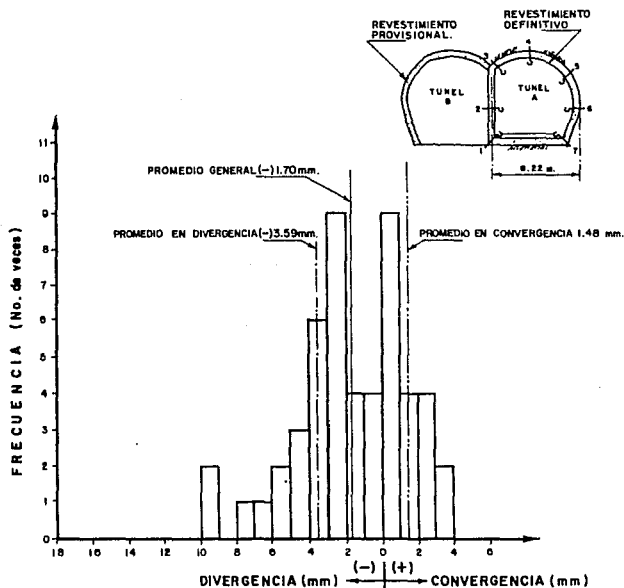


NOTAS :

- TUNELES DEL LADO "A" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO DEFINITIVO
- DIAMETRO DEL TUNEL : 8.22 m.
- Nº DE SECCIONES : 42 Secc
- ▨ VALORES SINGULARES NO TOMADOS EN CONSIDERACION PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO.

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 34

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEA 1-7)



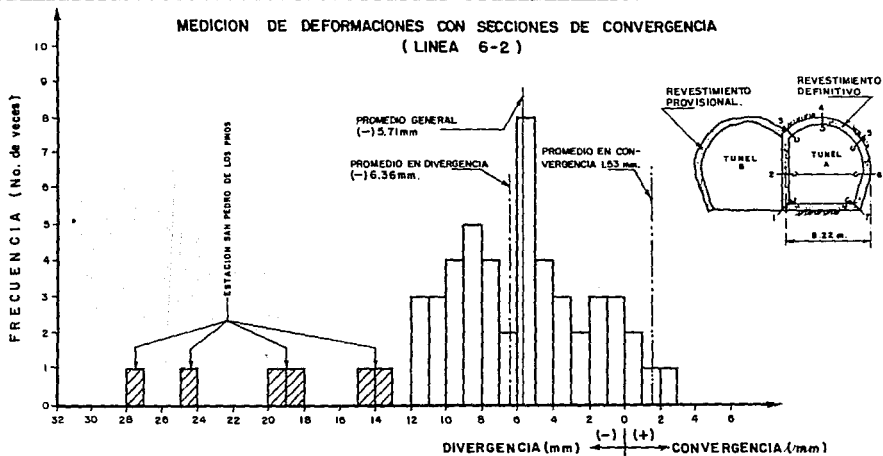
NOTAS:

- TUNELES DEL LADO "A" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO DEFINITIVO
- DIAMETRO DEL TUNEL : 6.22 m.
- N° DE SECCIONES : 51 Secc.

▨ VALORES SINGULARES NO TOMADOS EN CONSIDERACION PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO.

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 35

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEA 6-2)



NOTAS :

- TUNELES DEL LAO "A" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO DEFINITIVO
- DIAMETRO DEL TUNEL : 8.22 m.
- N° DE SECCIONES : 54 Secc.

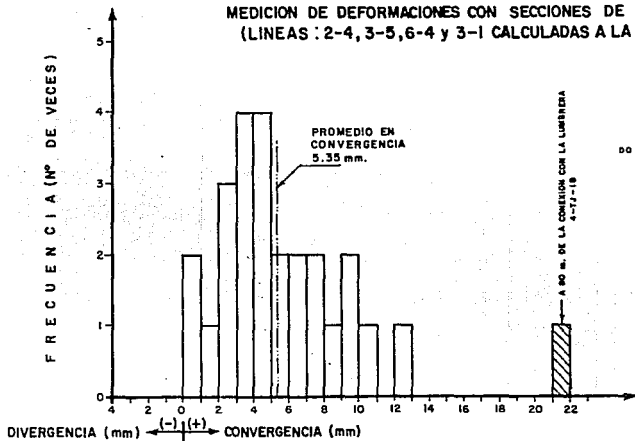
▨ VALORES SINGULARES NO TOMADOS EN CONSIDERACION PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO.

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 36





MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEAS : 2-4, 3-5, 6-4 y 3-1 CALCULADAS A LA VERTICAL)



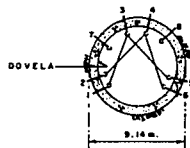
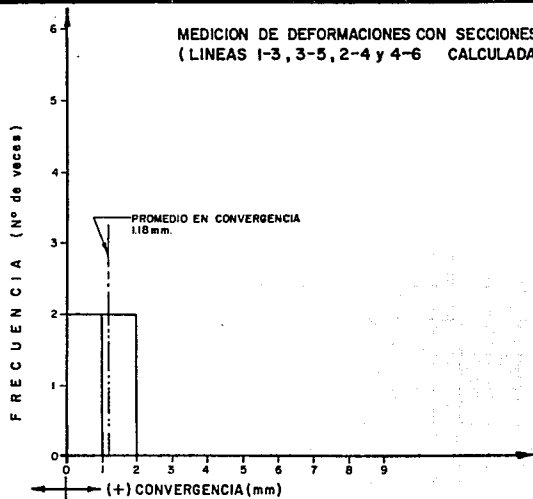
NOTAS :

- TUNEL EN EL TRAMO TACUBA - SAN JOAQUIN
- CON REVESTIMIENTO DEFINITIVO
- DIAMETRO DEL TUNEL : 9.14 m.
- Nº DE SECCIONES : 26 Secc.

VALORES SINGULARES NO CONSIDERADOS PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 38

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEAS 1-3, 3-5, 2-4 y 4-6 CALCULADAS A LA VERTICAL)

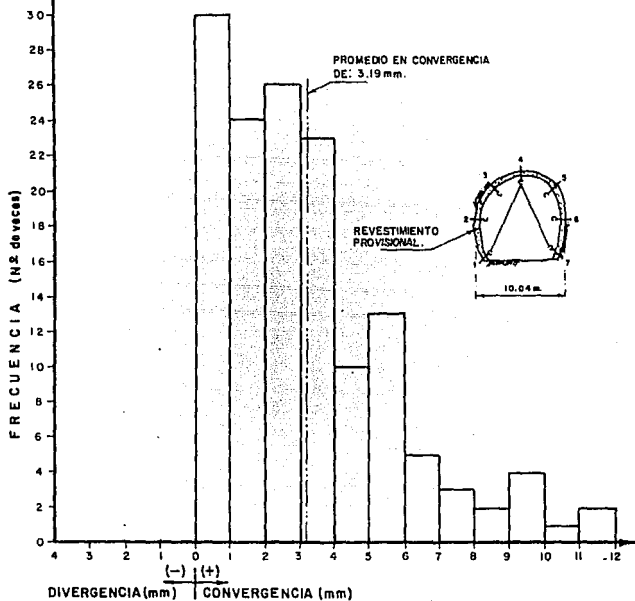


NOTAS

- TUNEL EN EL TRAMO CONSTITUYENTES-TACUBAYA
- CON REVESTIMIENTO DEFINITIVO
- DIAMETRO DEL TUNEL : 9.14 m.
- NR DE SECCIONES: 4 Secc.

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No 39

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEAS 1-4 y 7-4 CALCULADAS A LA VERTICAL)

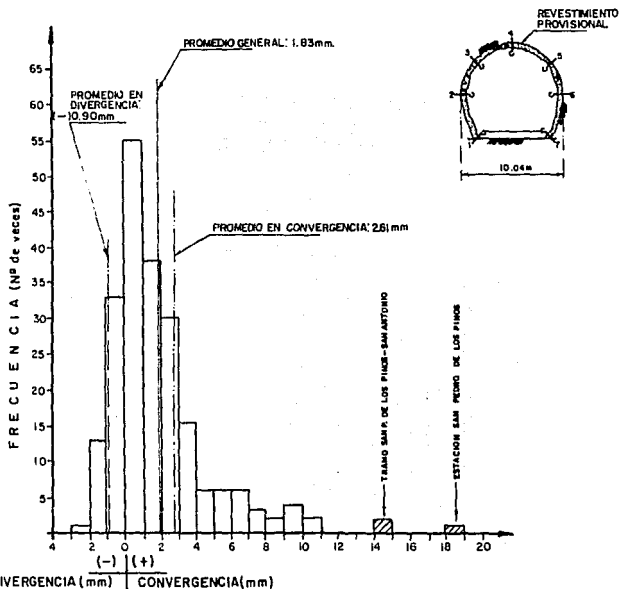


NOTAS:

- TUNELES DE TRAMO Y DEL LADO "A" DE LAS EST.
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DEL TUNEL : 10.04 m.
- N<sup>o</sup> DE SECCIONES : 143 Secc

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 40

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA  
(LINEA I-7)



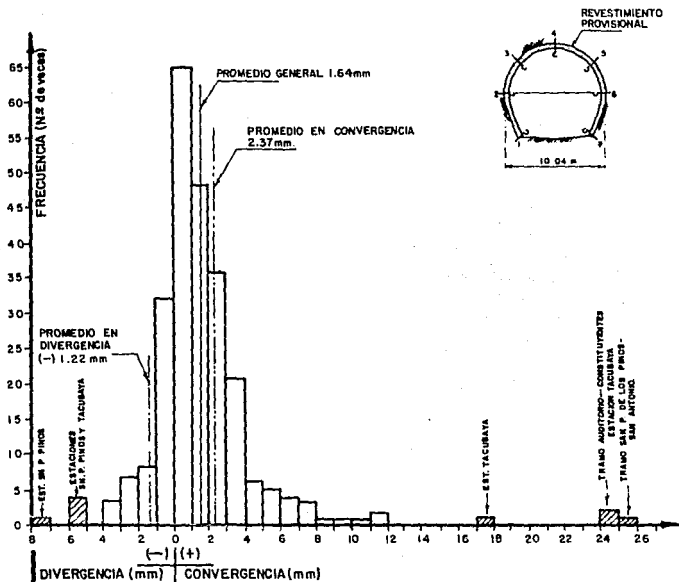
**NOTAS**

- TUNELES DE TRAMO Y LADO "A" DE LAS ESTACIONES.
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL.
- DIAMETRO DEL TUNEL: 10.04 m.
- Nº DE SECCIONES: 217 Secc.

▨ VALORES SINGULARES NO TOMADOS EN CONSIDERACION PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO.

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 41

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA.  
(LINEA 6-2)



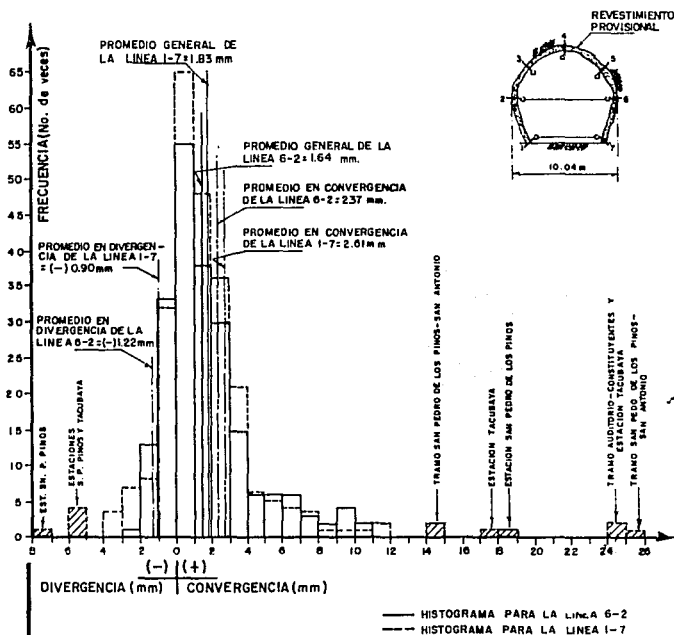
NOTAS

- TUNELES DE TRAMO Y LADO "A" DE LAS ESTACIONES.
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL.
- DIAMETRO DEL TUNEL: 10.04 m
- No. DE SECCIONES: 252 Secc.

▨ VALORES SINGULARES NO TOMADOS EN CONSIDERACION PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO.

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 42

MEDICION DE DEFORMACIONES CON SECCIONES DE CONVERGENCIA.  
(LINEAS 1-7 y 6-2)



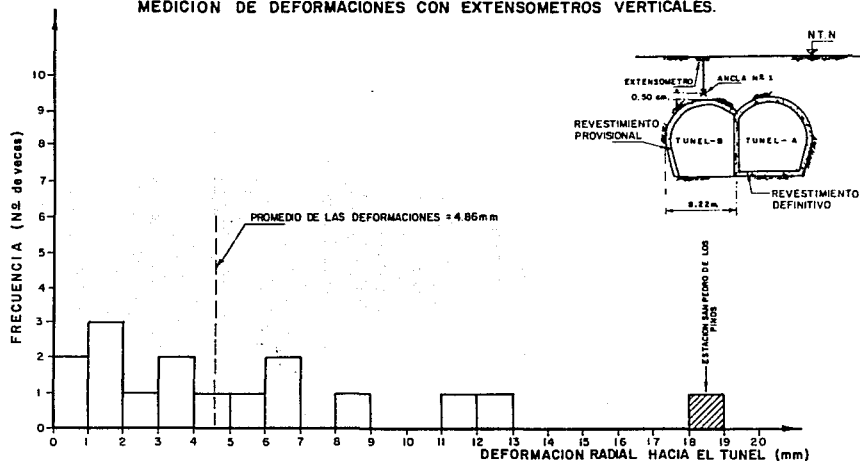
NOTAS

- TUNELES DE TRAMO Y LADO "A" DE LAS ESTACIONES.
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DEL TUNEL: 10.04 m
- No. DE SECCIONES: 1-7: 217 Secc., 6-2: 252 Secc.

▨ VALORES SINGULARES NO TOMADOS EN CONSIDERACION PARA LA EVALUACION PROMEDIO.

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
HISTOGRAMA DE CONVERGENCIA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
A 80 STO 1987	FIGURA No. 43

## MEDICION DE DEFORMACIONES CON EXTENSOMETROS VERTICALES.



### NOTAS :

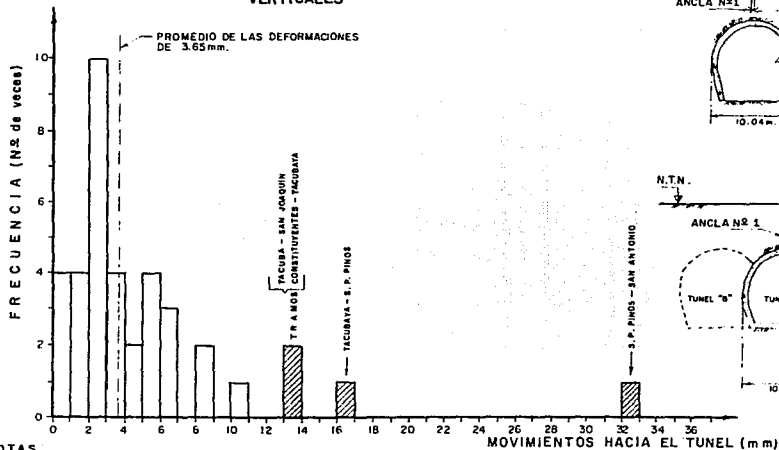
- TUNELES DEL LADO "B" DE ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DEL TUNEL: 8.22m
- N° DE EXTENSOMETROS: 16 Ext.

VALORES SINGULARES NO CONSIDERADOS PARA EVALUACION DEL PROMEDIO.

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE DEFORMACIONES RADIALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN ROOOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 44



## MEDICION DE DEFORMACIONES CON EXTENSOMETROS VERTICALES

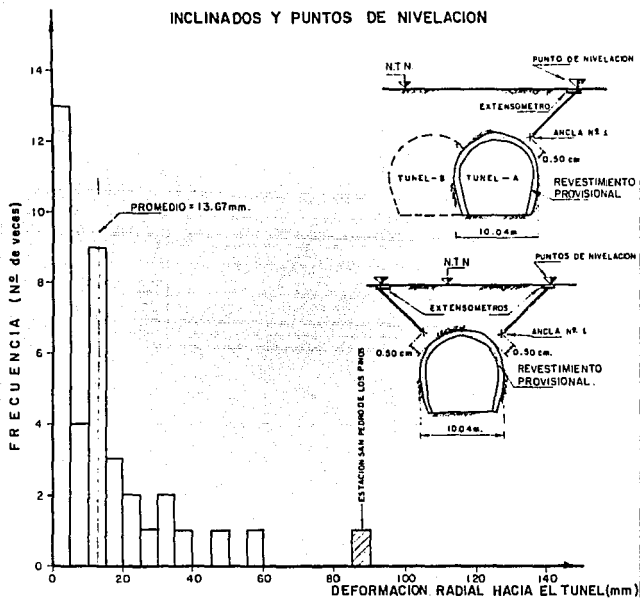


**NOTAS:**

- TUNELES DE TRAMO Y LADO "A" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DEL TUNEL : 10.04 m.
- Nº DE EXTENSOMETROS CONSIDERADOS: 38 E+1.
- ▨ VALORES SINGULARES NO CONSIDERADOS PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO.

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
HISTOGRAMA DE DEFORMACIONES RADIALES	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1967	FIGURA No. 45

MEDICION DE DEFORMACIONES RADIALES CON EXTENSOMETROS INCLINADOS Y PUNTOS DE NIVELACION



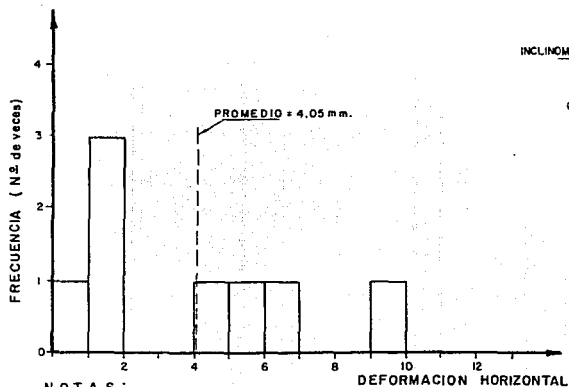
NOTAS:

- TUNELES DE TRAMO Y LADO "A" DE ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DEL TUNEL: 10.04 m.
- Nº DE EXTENSOMETROS: 3 B Ext.

▨ VALORES SINGULARES NO CONSIDERADOS PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO

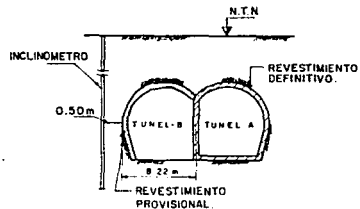
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
HISTOGRAMA DE DEFORMACIONES RADIALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 46

## MEDICION DE DEFORMACIONES CON INCLINOMETRO



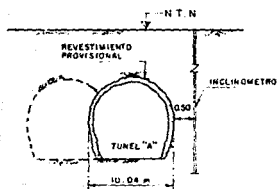
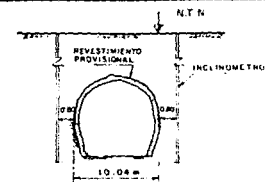
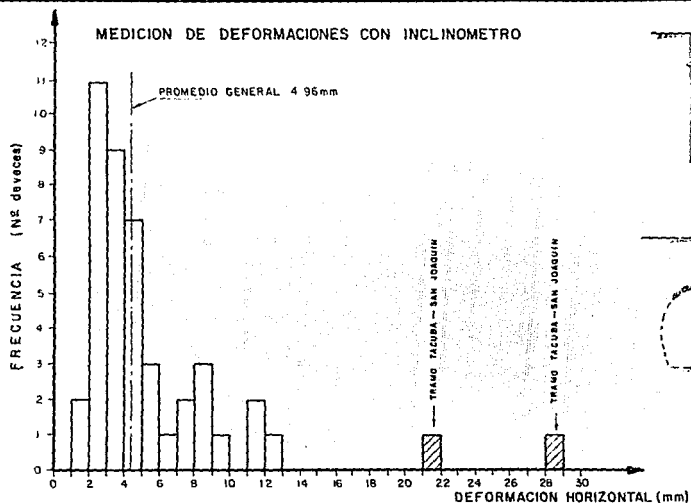
### NOTAS :

- TUNELES DEL LADO "B" DE ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DE LOS TUNELES: 8.22 m.
- NUMERO DE INCLINOMETROS : 8 Incl.



UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
HISTOGRAMA DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 47

### MEDICION DE DEFORMACIONES CON INCLINOMETRO



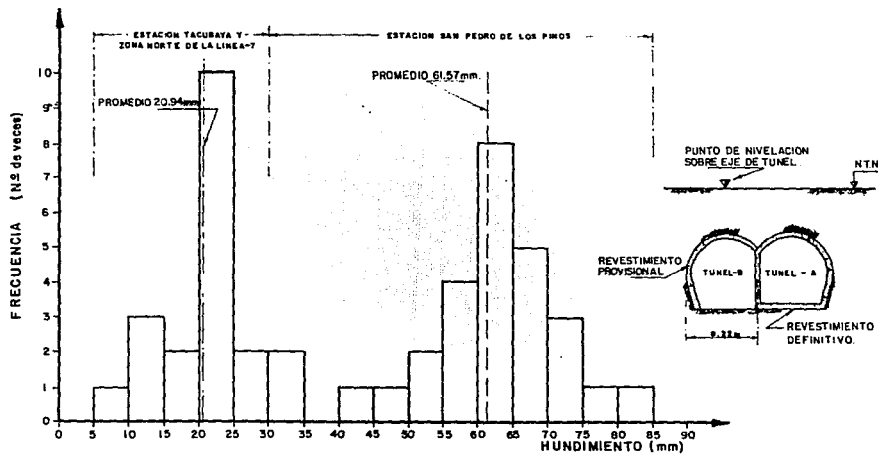
#### NOTAS:

- TUNELES DEL TRAMO Y LADO "A" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DE LOS TUNELES: 10.04 m
- No. DE INCLINOMETROS: 44 INCL.

VALORES SINGULARES NO CONSIDERADOS PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO.

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RONOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGUSTO 15 1977	FIGURA No. 48

## MEDICION DE HUNDIMIENTOS CON PUNTOS DE NIVELACION.

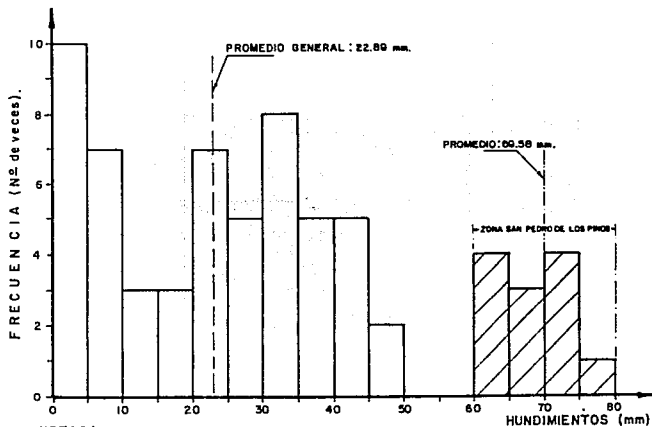


### NOTAS :

- TUNELES DEL LADO "B" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL
- DIAMETRO DEL TUNEL: 8.22m.
- N° DE PUNTOS CONSIDERADOS:  
TACUBAYA: 18 PUNTOS  
SAN PEDRO DE LOS PINOS: 28 PUNTOS.

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE HUNDIMIENTOS	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 49

## MEDICION DE HUNDIMIENTOS CON PUNTOS DE NIVELACION

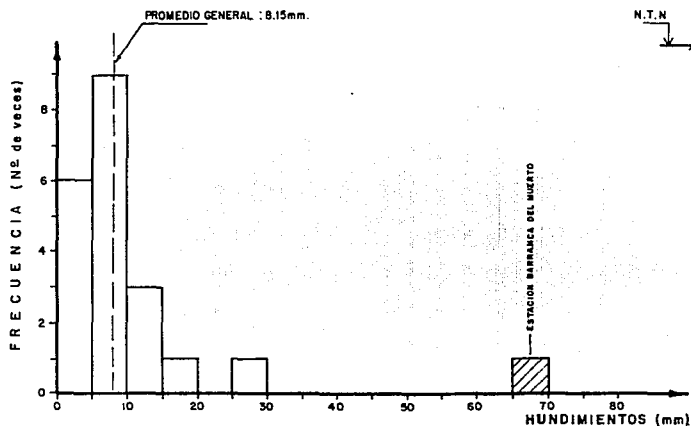


### NOTAS:

- TUNELES DE TRAMO Y LADO "A" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO PROVISIONAL.
- DIAMETRO DEL TUNEL: 10.04 m.
- Nº DE PUNTOS CONSIDERADOS: 67 PUNTOS
- ▨ VALORES SINGULARES NO CONSIDERADOS PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO GENERAL

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE HUNDIMIENTOS	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 50

### MEDICION DE HUNDIMIENTOS CON PUNTOS DE NIVELACION

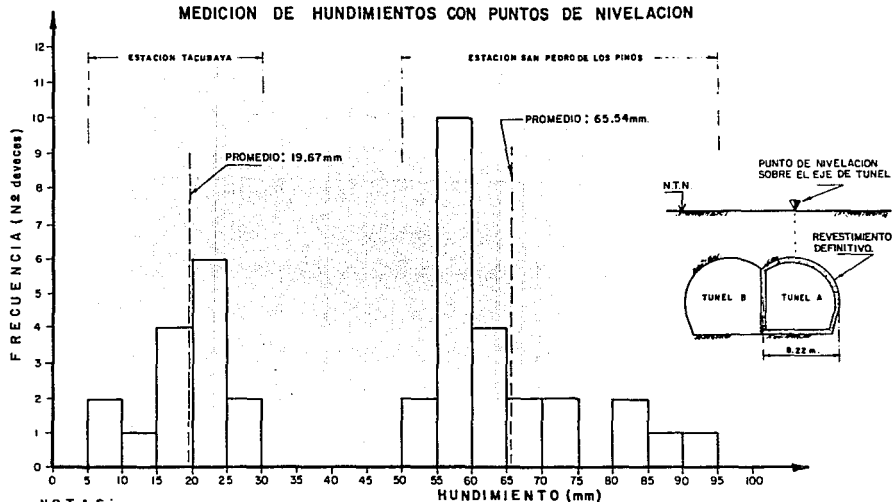


**NOTAS :**

- TUNEL DE ESTACION (MIXCOAC Y BARRANCA DEL MUERTO)
- DIAMETRO DEL TUNEL: 14.68m.
- NR DE SECCIONES CONSIDERADAS : 21 Puntos
- ▨ VALORES SINGULARES NO CONSIDERADOS PARA LA EVALUACION DEL PROMEDIO GENERAL

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE HUNDIMIENTOS	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ GERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 51

## MEDICION DE HUNDIMIENTOS CON PUNTOS DE NIVELACION



**NOTAS:**

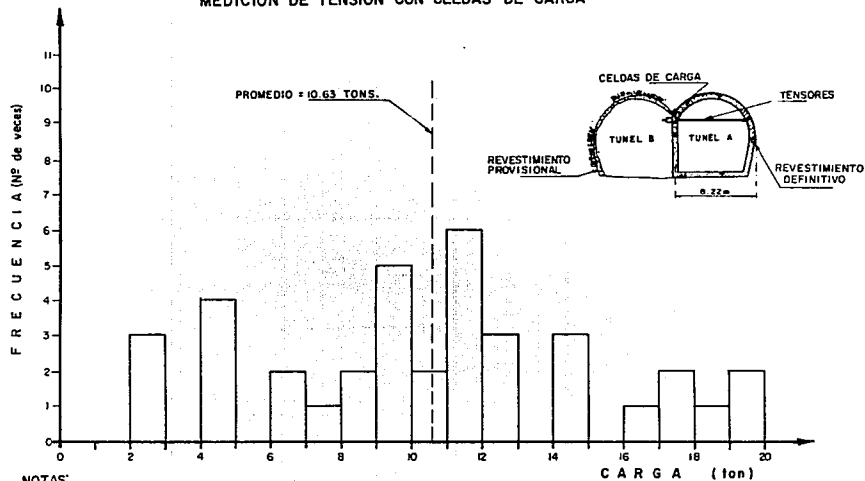
- TUNELES DEL LADO "A" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO DEFINITIVO
- DIAMETRO DEL TUNEL : 8.22 m.
- Nº DE PUNTOS CONSIDERADOS:  
TACUBAYA : 15 PUNTOS  
SAN P.DE LOS PINOS : 24 PUNTOS

- HUNDIMIENTOS PRESENTADOS EN EL TUNEL "A" PROVOCADOS POR LA EXCAVACION DEL TUNEL "B"

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE HUNDIMIENTOS	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 19 87	FIGURA No. 52



### MEDICION DE TENSION CON CELDAS DE CARGA

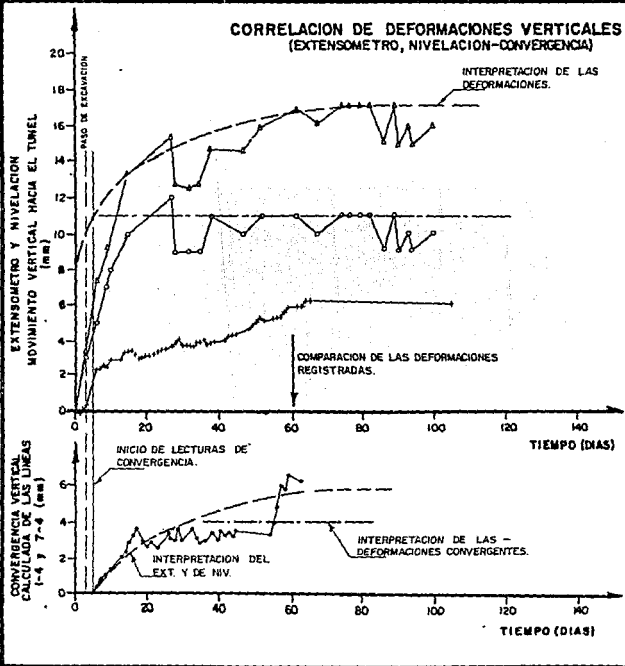


**NOTAS:**

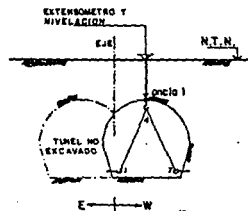
- TUNELES DEL LADO "A" DE LAS ESTACIONES
- CON REVESTIMIENTO DEFINITIVO
- DIAMETRO DE LOS TUNELES: 8.22m
- Nº DE CELDAS DE CARGA: 37 CELDAS

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
HISTOGRAMA DE CARGAS	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 53

**CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES  
(EXTENSOMETRO, NIVELACION-CONVERGENCIA)**

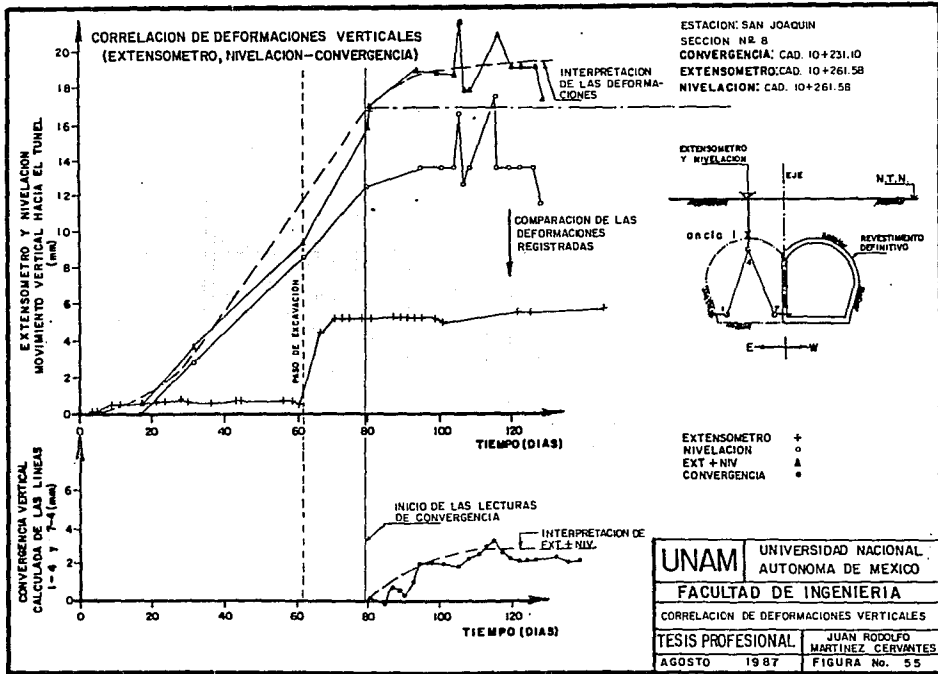


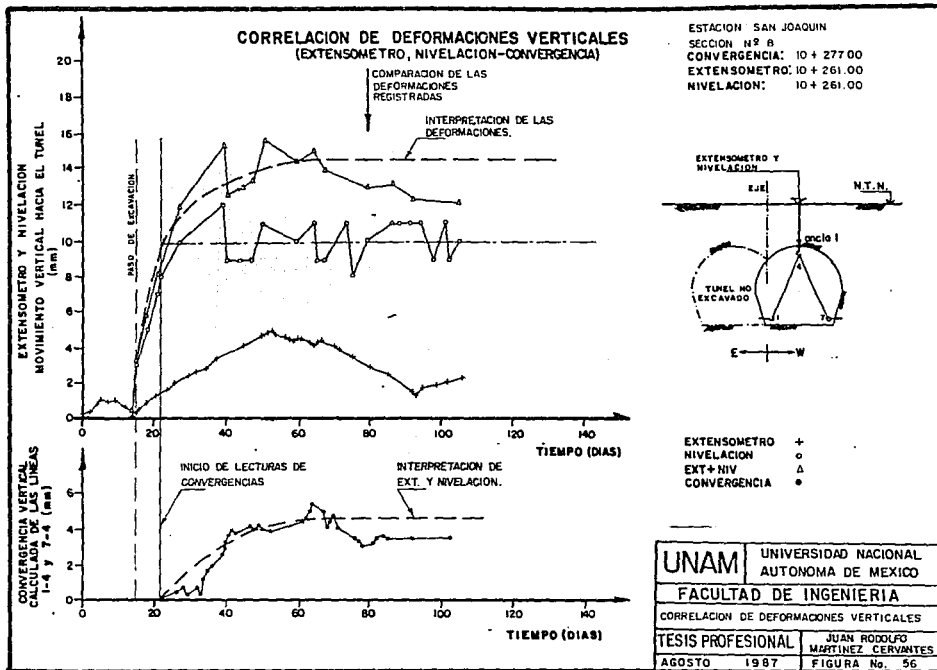
ESTACION: SN. JOAQUIN  
SECCION Nº 7  
CONVERGENCIA: 10 + 178.00  
EXTENSOMETRO: 10 + 211.00  
NIVELACION: 10 + 261.00



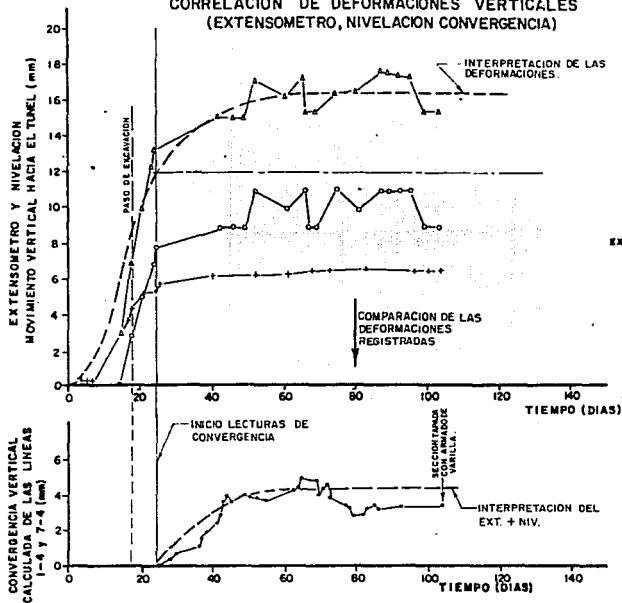
EXTENSOMETRO +  
NIVELACION o  
EXT + NIV Δ  
CONVERGENCIA #

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 54



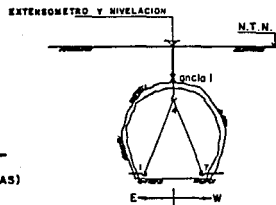


CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES  
(EXTENSOMETRO, NIVELACION CONVERGENCIA)



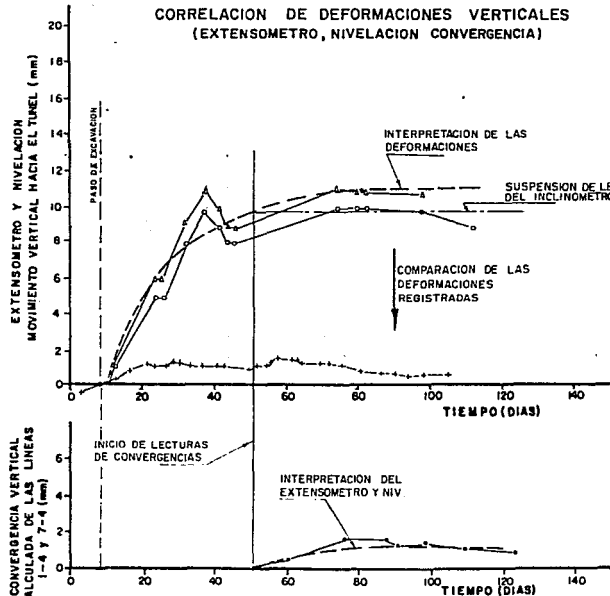
TRAMO: SAN JOAQUIN-POLANCO  
SECCION No: 9  
CONVERGENCIA: 10+277.00  
EXTENSOMETRO: 10+331.00  
NIVELACIONES: 10+261.00

EXTENSOMETRO +  
NIVELACION o  
EXT + NIV Δ  
CONVERGENCIA •



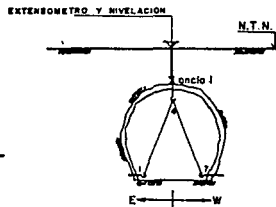
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
	FACULTAD DE INGENIERIA	
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES		
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES	
AGOSTO 1987	FIGURA No. 57	

### CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES (EXTENSOMETRO, NIVELACION CONVERGENCIA)



TRAMO: SAN JOAQUIN - POLANCO  
 SECCION No: 10  
 CONVERGENCIA: CAD. 10+836.50  
 EXTENSOMETRO: CAD. 10+873.83  
 NIVELACIONES: CAD. 10+701.00

EXTENSOMETRO +  
 NIVELACION o  
 EXT + NIV L  
 CONVERGENCIA •

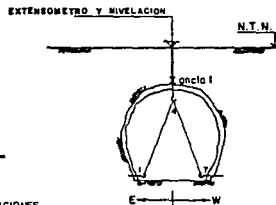
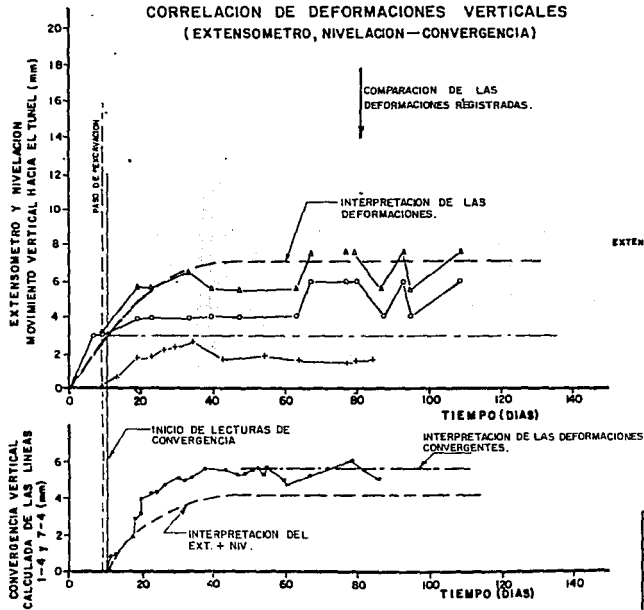


<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 58

**CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES  
(EXTENSOMETRO, NIVELACION—CONVERGENCIA)**

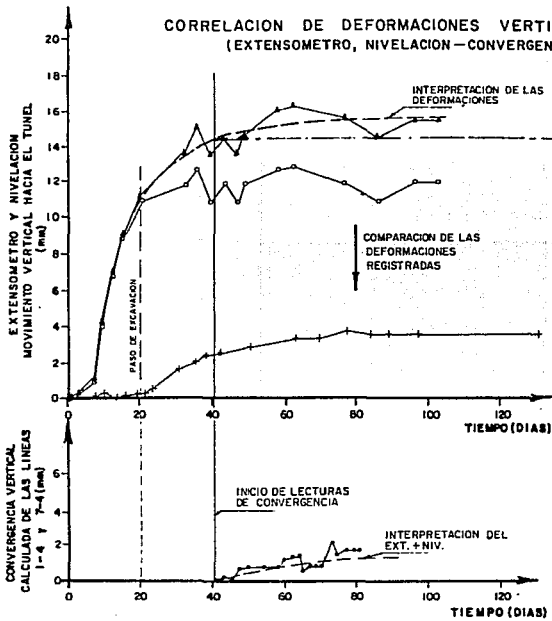
TRAMO: SAN JOAQUIN—POLANCO  
SECCION No: 11  
CONVERGENCIA: CAD. II+270 03  
EXTENSOMETRO: CAD II+421.15  
NIVELACIONES: CAD. III+490 00

EXTENSOMETRO +  
NIVELACION o  
EXT + NIV Δ  
CONVERGENCIA \*

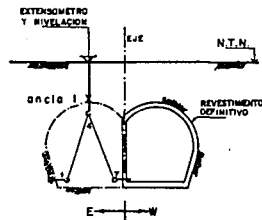


UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
	FACULTAD DE INGENIERIA	
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES		
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES	
AGOSTO 1987	FIGURA No. 59	

### CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES (EXTENSOMETRO, NIVELACION-CONVERGENCIA)



ESTACION : POLANCO  
 SECCION : N.º 12  
 CONVERGENCIA: II + 483.43  
 EXTENSOMETRO: II + 489.30  
 NIVELACION: II + 490.00



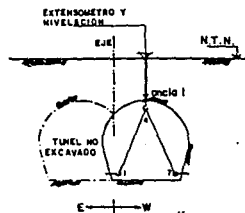
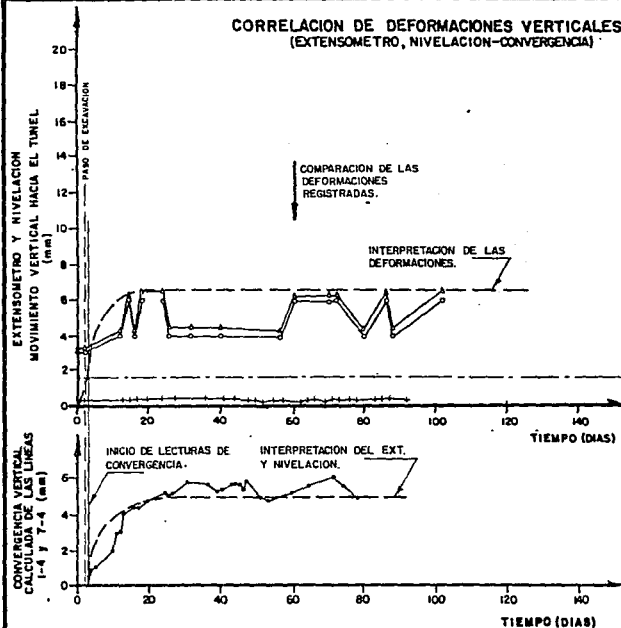
EXTENSOMETRO +  
 NIVELACION -  
 EXT + NIV A  
 CONVERGENCIA •

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 60



### CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES (EXTENSOMETRO, NIVELACION-CONVERGENCIA)

ESTACION: POLANCO  
 SECCION: N.º 12  
 CONVERGENCIA: 11 + 490.30  
 EXTENSOMETRO: 11 + 490.00  
 NIVELACION: 11 + 490.00

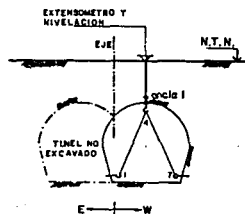
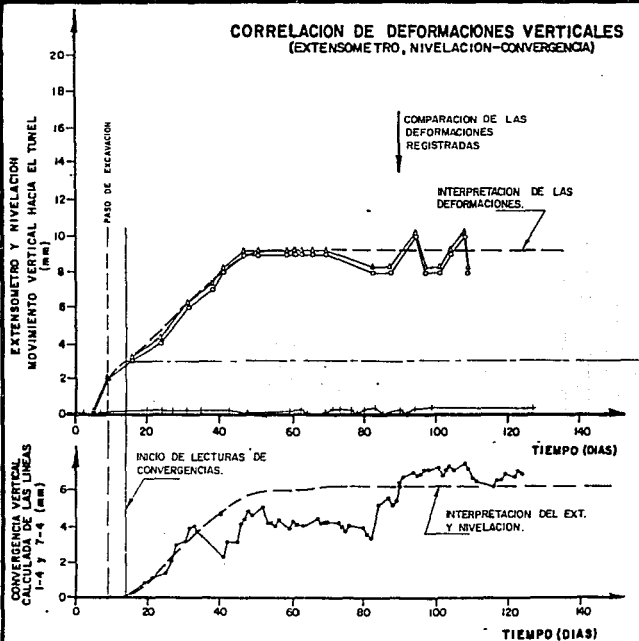


EXTENSOMETRO +  
 NIVELACION o  
 EXT+ NIV Δ  
 CONVERGENCIA •

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 61

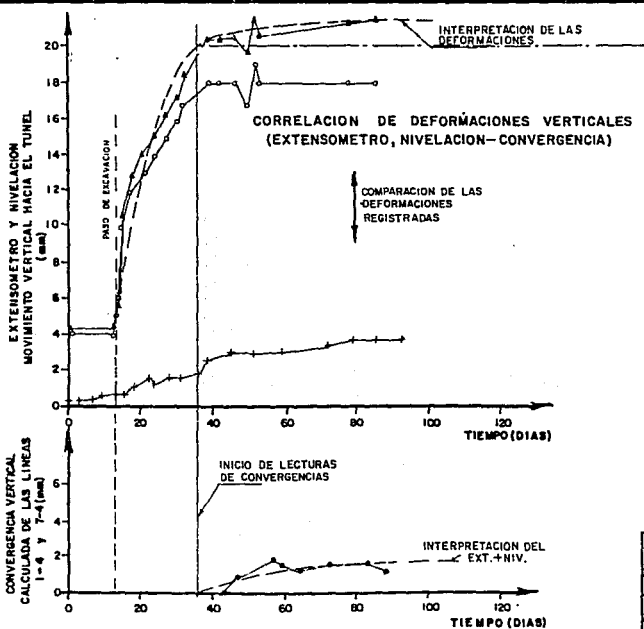
**CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES  
(EXTENSOMETRO, NIVELACION-CONVERGENCIA)**

ESTACION: POLANCO  
SECCION: N° 13  
CONVERGENCIA: II+391.04  
EXTENSOMETRO: II+526.01  
NIVELACION: II+522.00

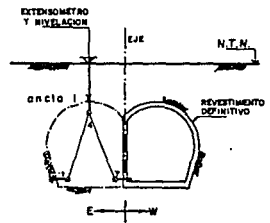


EXTENSOMETRO +  
NIVELACION o  
EXT + NIV Δ  
CONVERGENCIA •

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 62



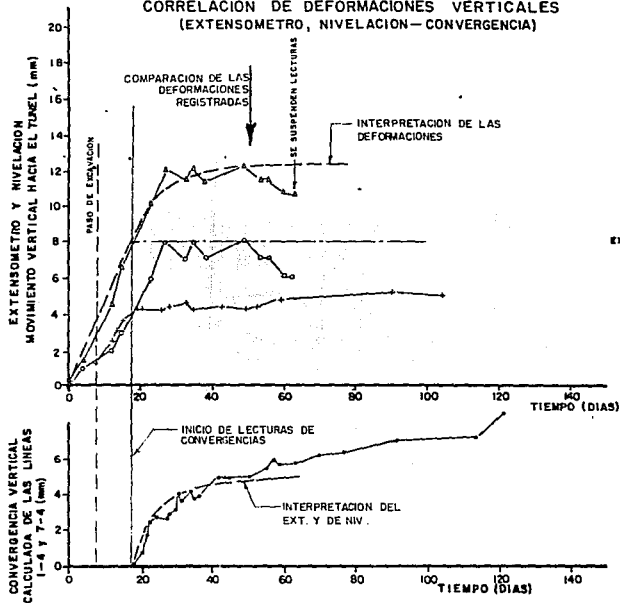
ESTACION : POLANCO  
 SECCION : N.º 13  
 CONVERGENCIA: II + 531.48  
 EXTENSOMETRO: II + 529.30  
 NIVELACION: II + 530.00



EXTENSOMETRO +  
 NIVELACION o  
 EXT + NV ▲  
 CONVERGENCIA •

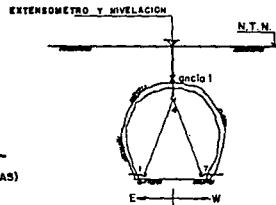
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 63

**CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES  
(EXTENSOMETRO, NIVELACION - CONVERGENCIA)**



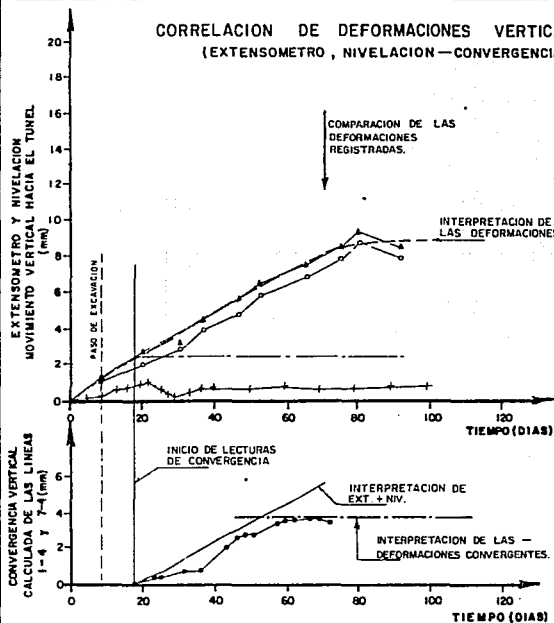
TRAMO: POLANCO-AUDITORIO  
 SECCION No: 14  
 CONVERGENCIA: CAD 12+096.00  
 EXTENSOMETRO: CAD 11+620.00  
 NIVELACIONES: CAD 12+380.00

EXTENSOMETRO +  
 NIVELACION o  
 EXT + NIV Δ  
 CONVERGENCIA ■

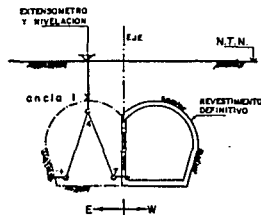


UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
	FACULTAD DE INGENIERIA	
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES		
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES	
AGOSTO 1987	FIGURA No. 64	

**CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES  
(EXTENSOMETRO, NIVELACION—CONVERGENCIA)**



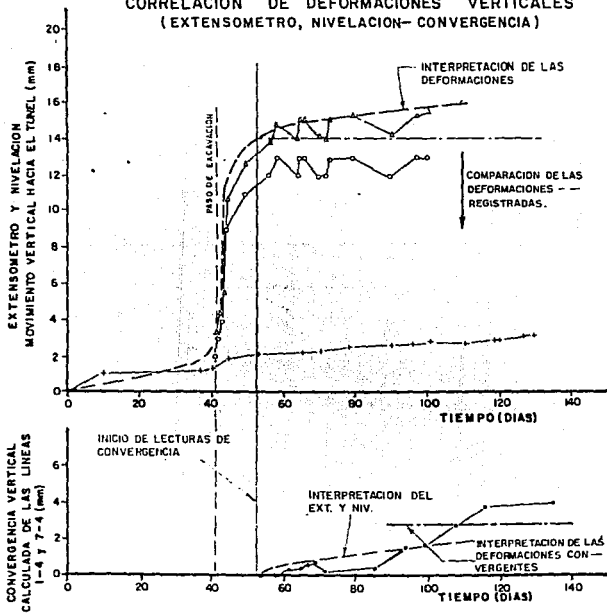
ESTACION: AUDITORIO  
SECCION: N° 17  
CONVERGENCIA: CAD 12+430.00  
EXTENSOMETRO: CAD 12+429.00  
NIVELACION: CAD 12+480.00



EXTENSOMETRO +  
NIVELACION o  
EXT + NIV Δ  
CONVERGENCIA •

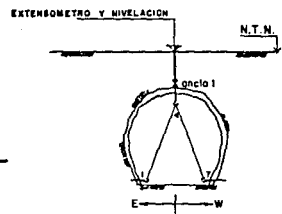
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 65

**CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES  
(EXTENSOMETRO, NIVELACION- CONVERGENCIA)**



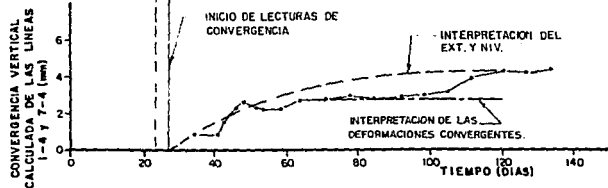
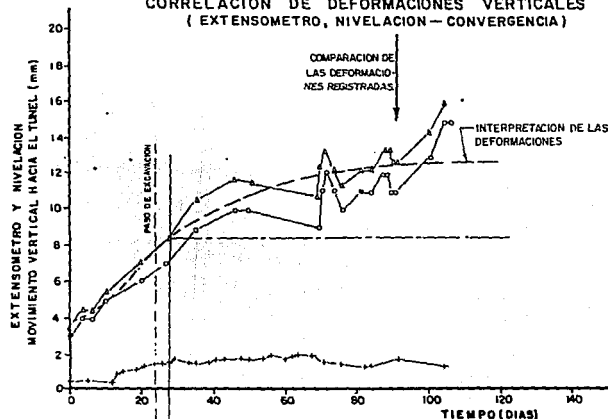
TRAMO: AUDITORIO- CONSTITUYENTES  
 SECCION No: 19  
 CONVERGENCIA: CAD. 12+574.00  
 EXTENSOMETRO: CAD. 12+573.00  
 NIVELACIONES: CAD. 12+576.00

- EXTENSOMETRO +
- NIVELACION o
- EXT + NIV x
- CONVERGENCIA •



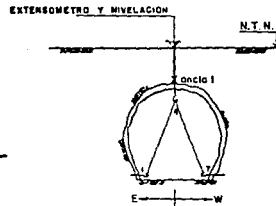
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
	FACULTAD DE INGENIERIA	
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES		
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES	
AGOSTO 1987	FIGURA No. 66	

### CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES (EXTENSOMETRO, NIVELACION - CONVERGENCIA)



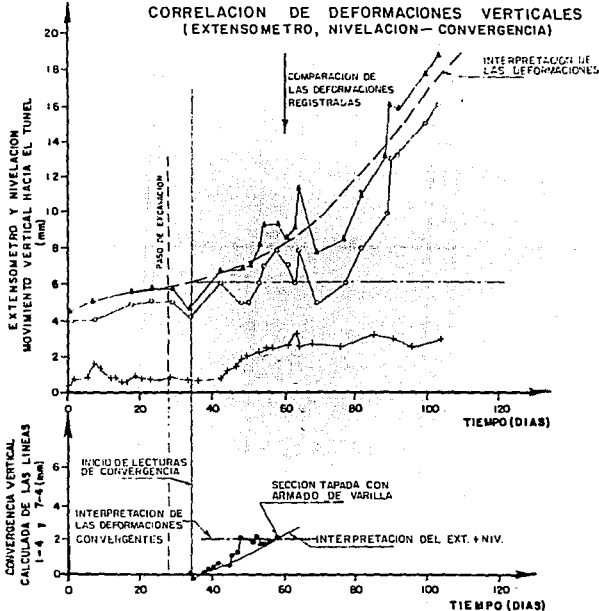
TRAMO: AUDITORIO - CONSTITUYENTES  
SECCION No: 20  
CONVERGENCIA: CAD. 13+051.63  
EXTENSOMETRO: CAD. 13+044.00  
NIVELACIONES: CAD. 13+045.00

EXTENSOMETRO +  
NIVELACION o  
EXT + NIV Δ  
CONVERGENCIA •

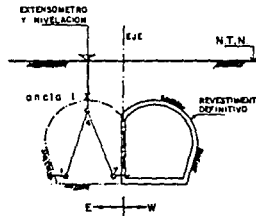


<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVAJITAS
AGOSTO 1987	FIGURA No. 67

**CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES  
(EXTENSOMETRO, NIVELACION—CONVERGENCIA)**



ESTACION TACUBAYA  
SECCION N° 30  
CONVERGENCIA: 15-338'00  
EXTENSOMETRO: 15-060'00  
NIVELACION: 15-460'00

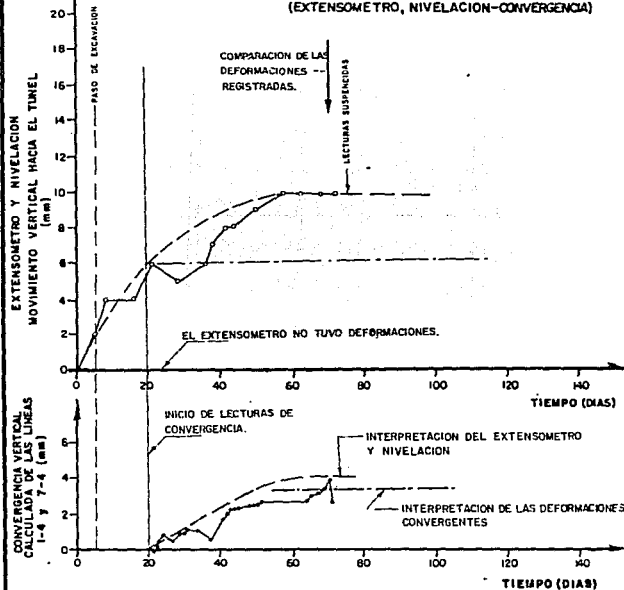


EXTENSOMETRO +  
NIVELACION o  
EXT + NIV A  
CONVERGENCIA •

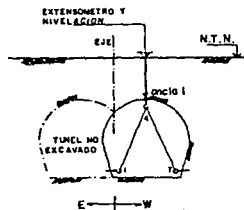
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 6B



### CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES (EXTENSOMETRO, NIVELACION-CONVERGENCIA)



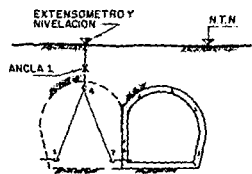
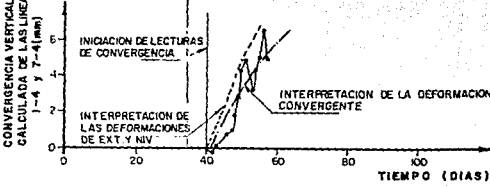
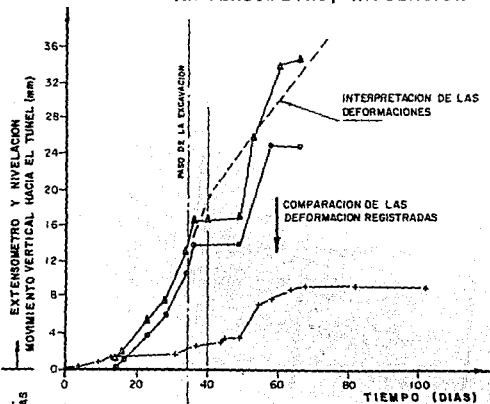
ESTACION: TACUBAYA  
SECCION Nº 30  
CONVERGENCIA: 15+436.00  
EXTENSOMETRO: 15+460.00  
NIVELACION: 16+149.00



EXTENSOMETRO +  
NIVELACION ~  
EXT+NIV L  
CONVERGENCIA •

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 69

## CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES (EXTENSOMETRO, NIVELACION - CONVERGENCIA)

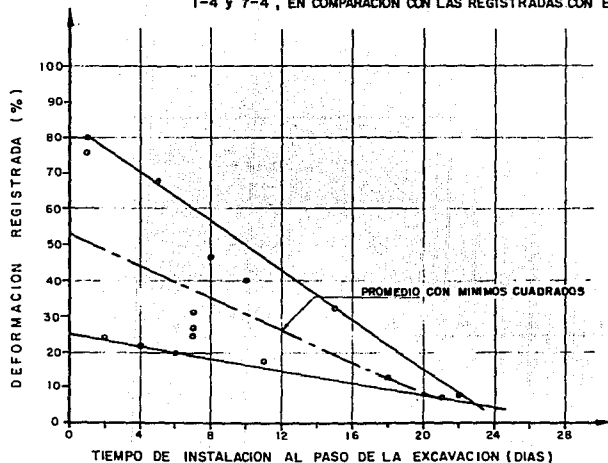


— ESTACION SAN PEDRO DE LOS PINOS  
 - SECCION N° 35  
 - CADENAMIENTOS EXTENSOMETRO : (16+710.00)  
 NIVELACION : (16+709.00)  
 CONVERGENCIA : (16+639.40)

EXTENSOMETRO +  
 NIVELACION °  
 EXT + NIVELACION Δ  
 CONVERGENCIA \*

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
CORRELACION DE DEFORMACIONES VERTICALES	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 70

PORCENTAJE DE DEFORMACION REGISTRADA EN CONVERGENCIAS EN LAS LINEAS  
1-4 y 7-4, EN COMPARACION CON LAS REGISTRADAS CON EXTENSOMETROS + NIVELACIONES.



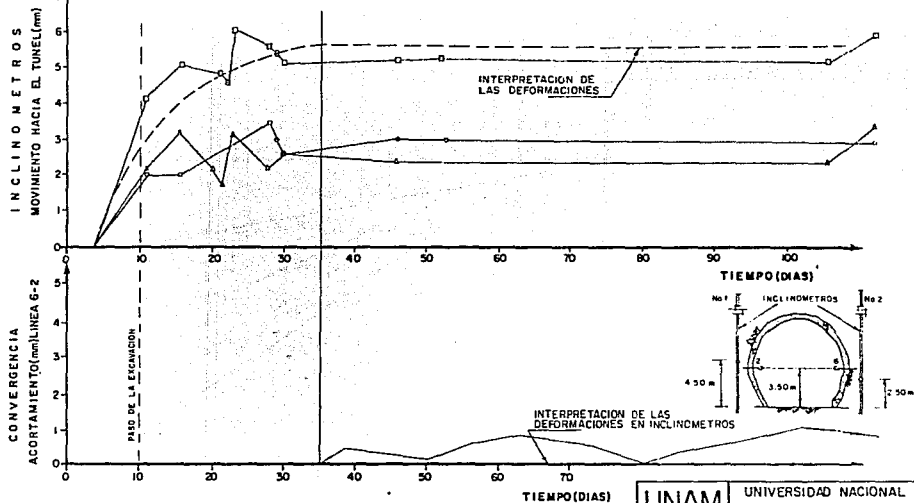
NOTAS :

DEF. REGISTRADA (\*/%) =  $\frac{\text{DEF. EN CONV.}}{\text{DEF. EN EXT. + NV.}} \times 100$

TIEMPO DE INSTALACION DE LA SECCION DE CONVERGENCIA DESPUES DEL PASO DE LA EXCAVACION EN LA MISMA SECCION EN -- QUE SE ENCUENTRAN INSTALADOS EL EX-- TENSOMETRO Y EL PUNTO DE NIVELACION

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
% DE DEFORMACION REGISTRADA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 71

CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES  
(INCLINOMETRO — CONVERGENCIA)

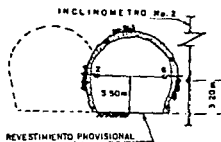
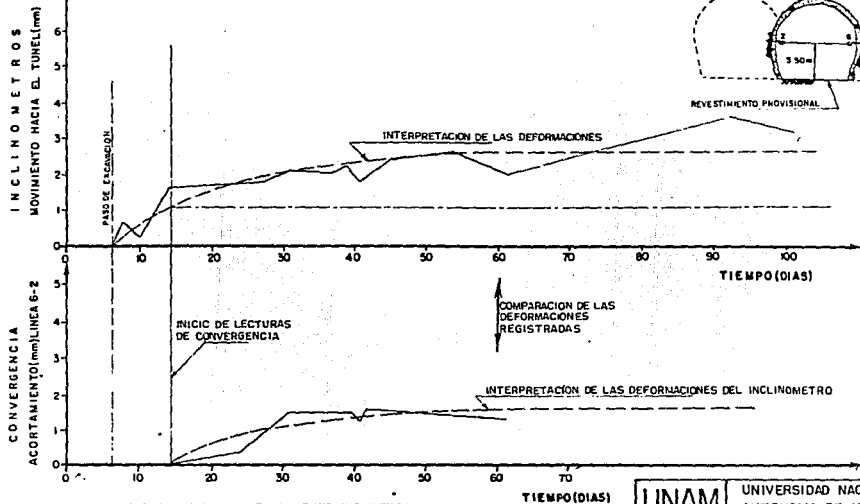


TRAMO: TACUBA-SAN JOAQUIN  
SECCION: N°6  
INCLINOMETRO No. 1: 10+060.00  
INCLINOMETRO No. 2: 10+060.00  
CONVERGENCIA: 10+068.95

- INCLINOMETRO N°1
- ▲ INCLINOMETRO N°2
- SUMA DE DEFORMACIONES

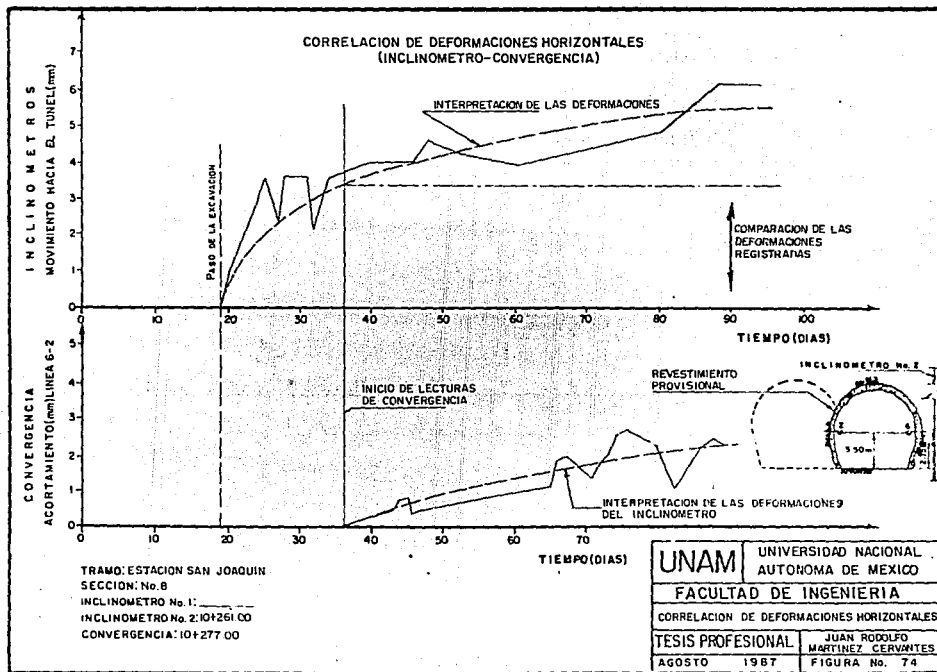
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVALES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 72

CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES  
(INCLINOMETRO-CONVERGENCIA)

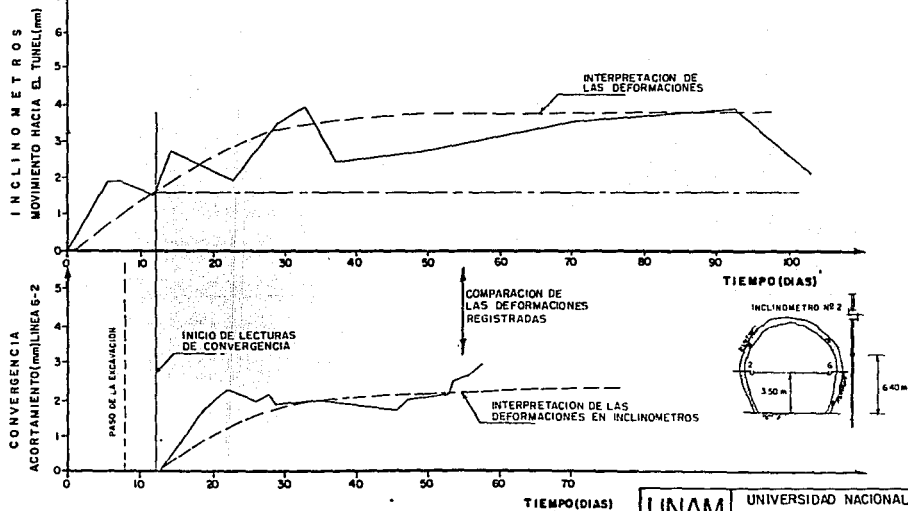


TRAMO: ESTACION SAN JOAQUIN (TUNEL DE ANDEN PONIENTE)  
 SECCION: No. 7  
 INCLINOMETRO No. 1: \_\_\_\_\_  
 INCLINOMETRO No. 2: 10+211.00  
 CONVERGENCIA: 10+206.00

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 73

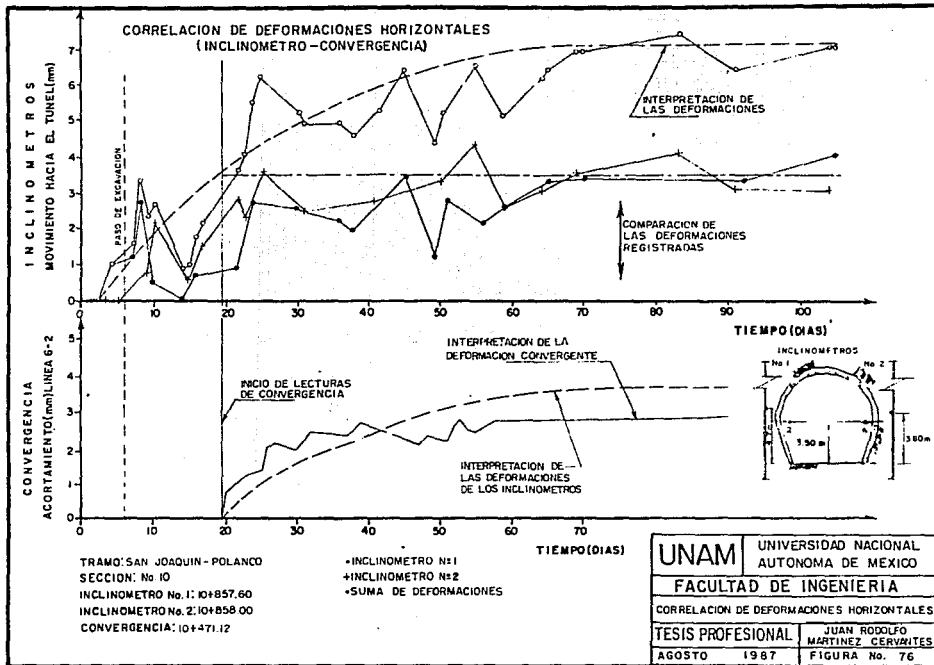


**CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES  
(INCLINOMETRO-CONVERGENCIA)**



TRAMO: SAN JOAQUIN-POLANCO  
 SECCION: NPS  
 INCLINOMETRO No. 1:  
 INCLINOMETRO No. 2: 10+339.40  
 CONVERGENCIA: 10+337.00

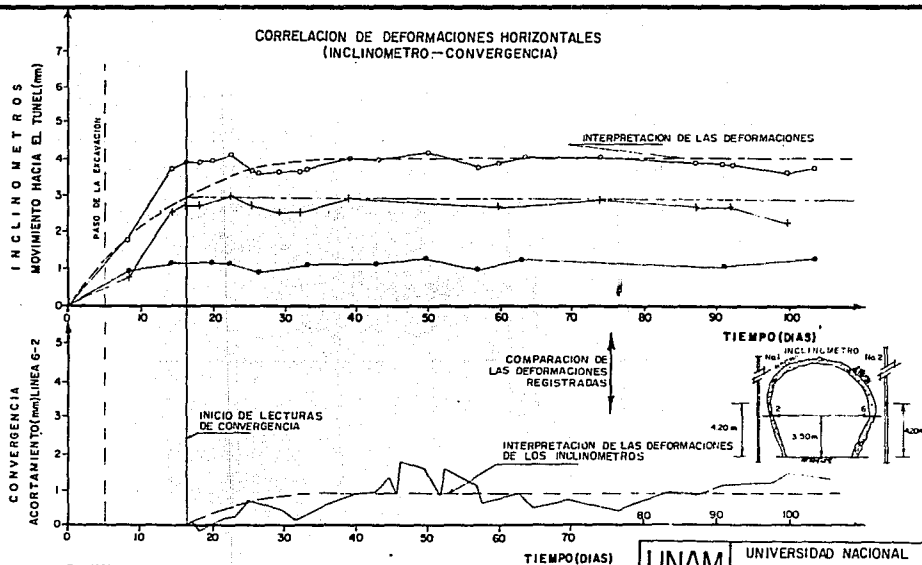
<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 75







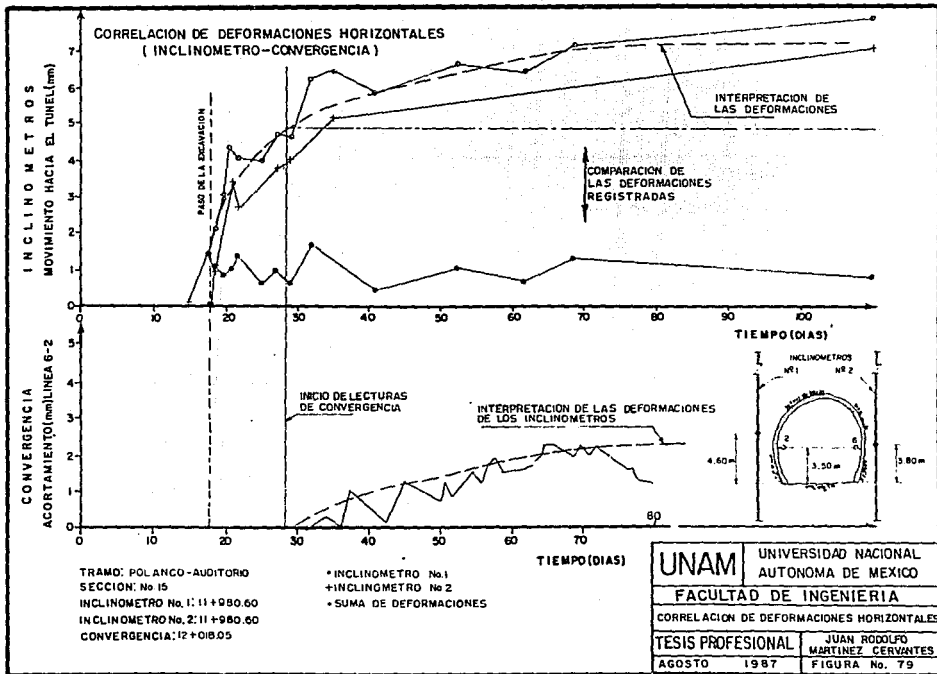
**CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES  
(INCLINOMETRO—CONVERGENCIA)**

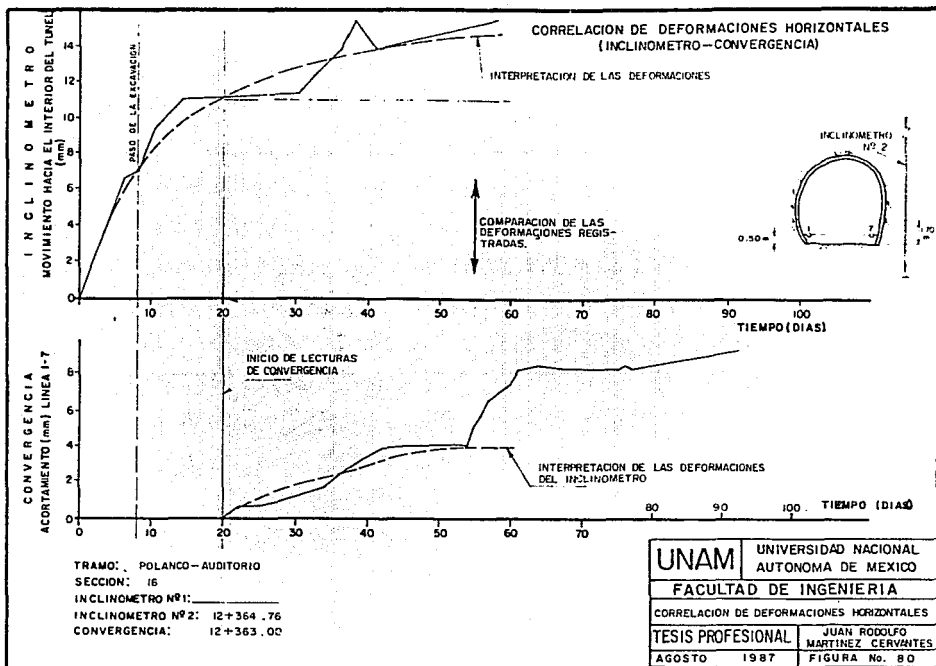


TRAMO: POLANCO-AUDITORIO  
 SECCION: No 14  
 INCLINOMETRO No. 1: 11+611.10  
 INCLINOMETRO No. 2: 11+619.85  
 CONVERGENCIA: 11+678.83

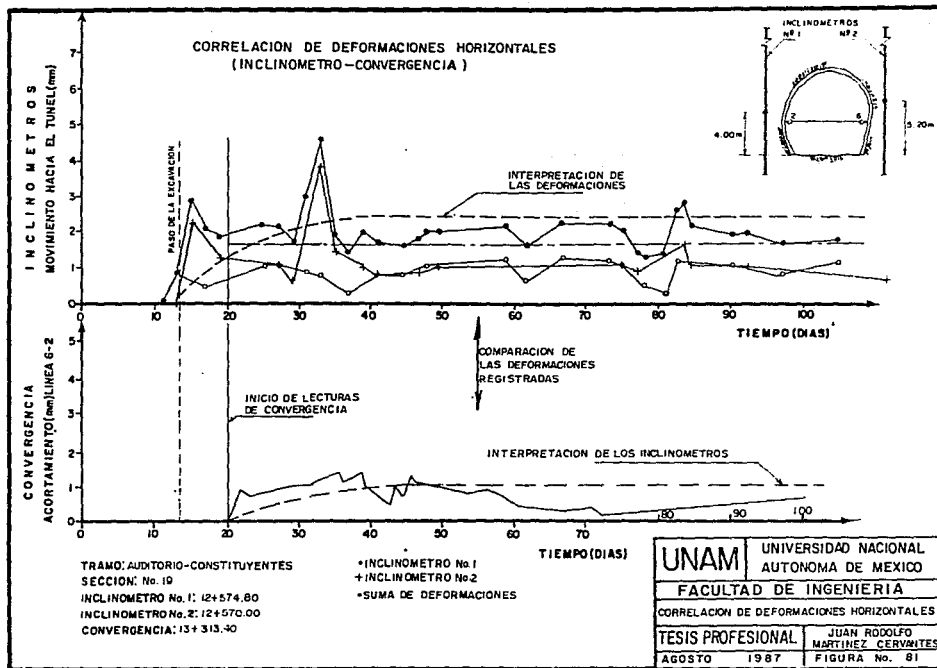
- INCLINOMETRO No 1
- + INCLINOMETRO No 2
- SUMA DE DEFORMACIONES

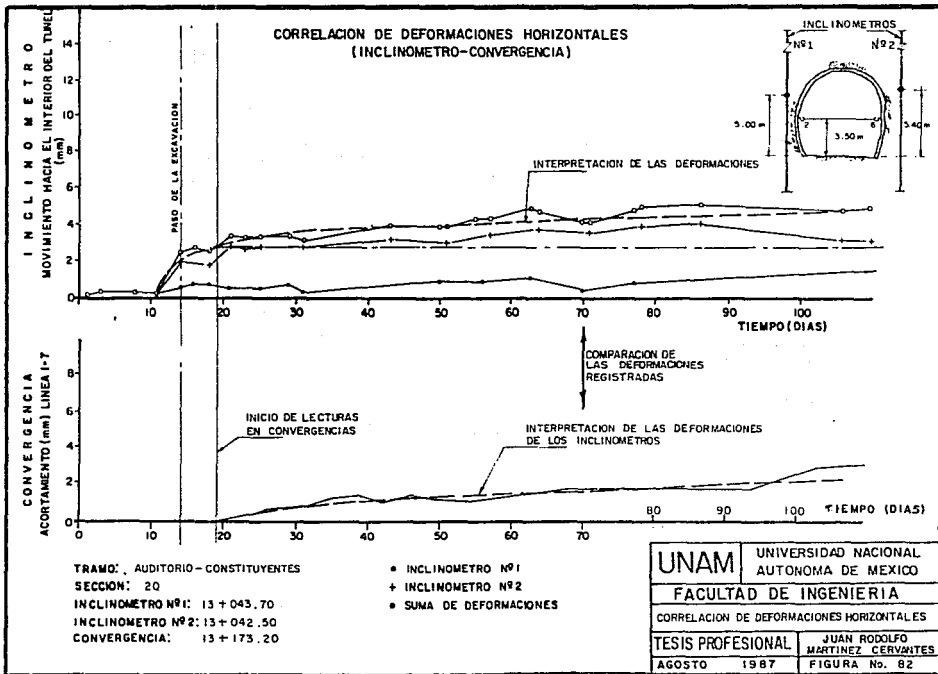
<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 78

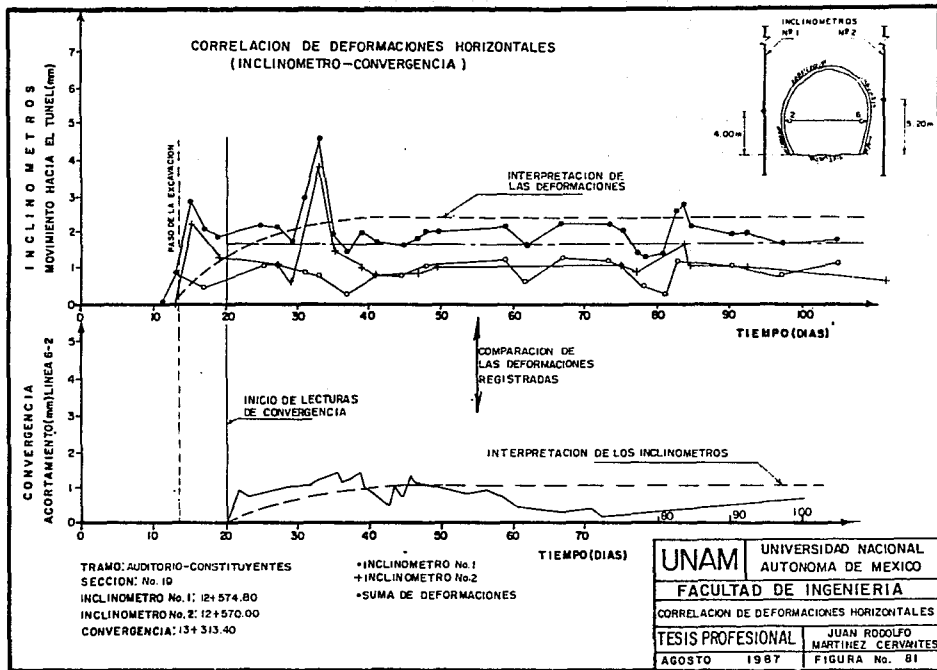


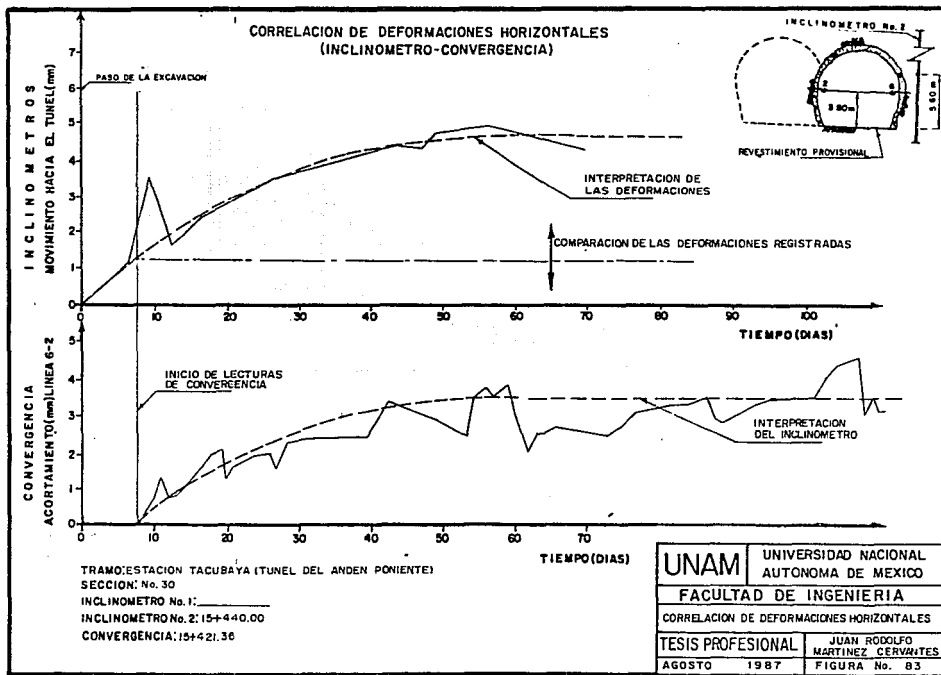


<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 80

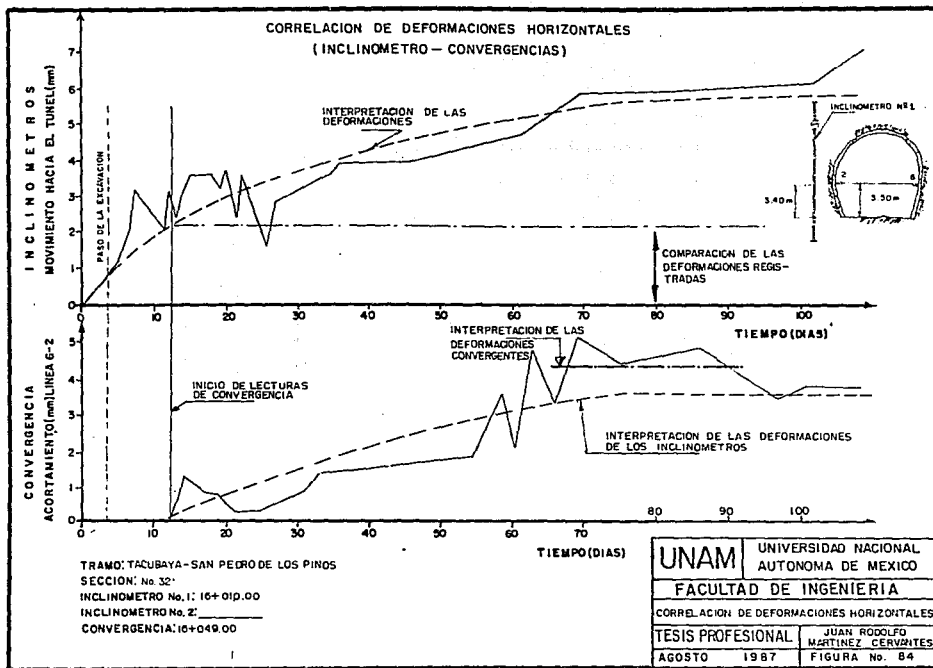


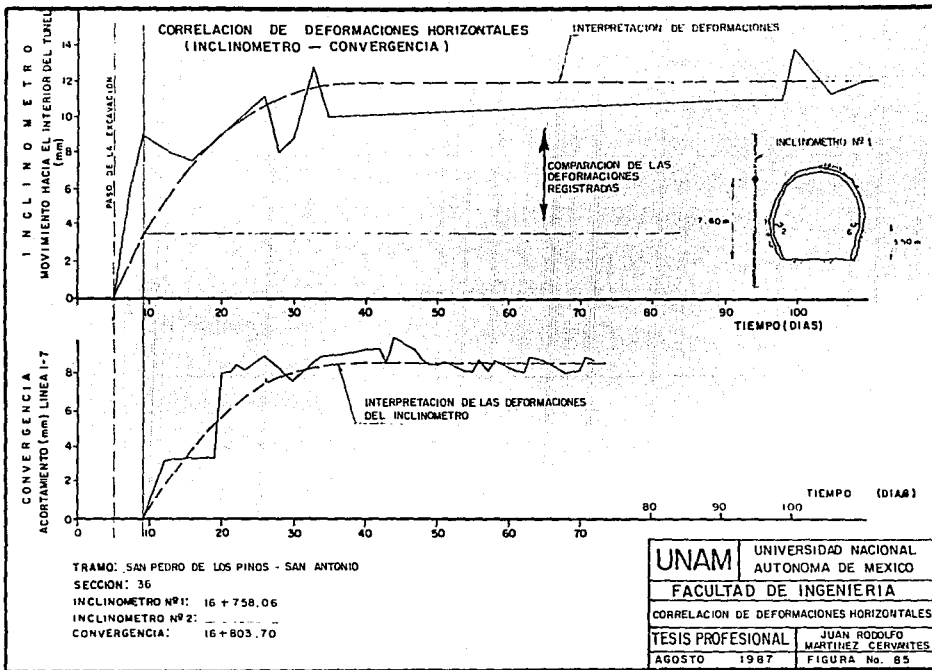




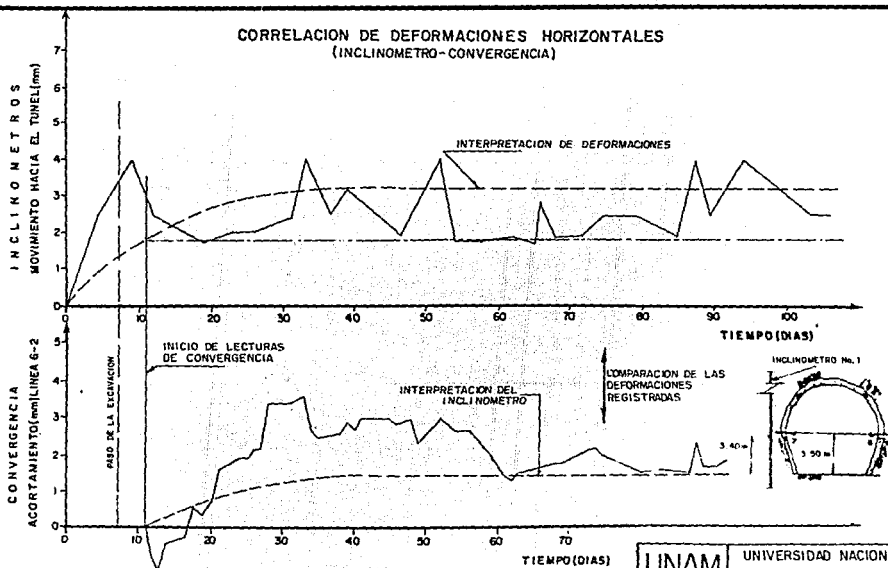






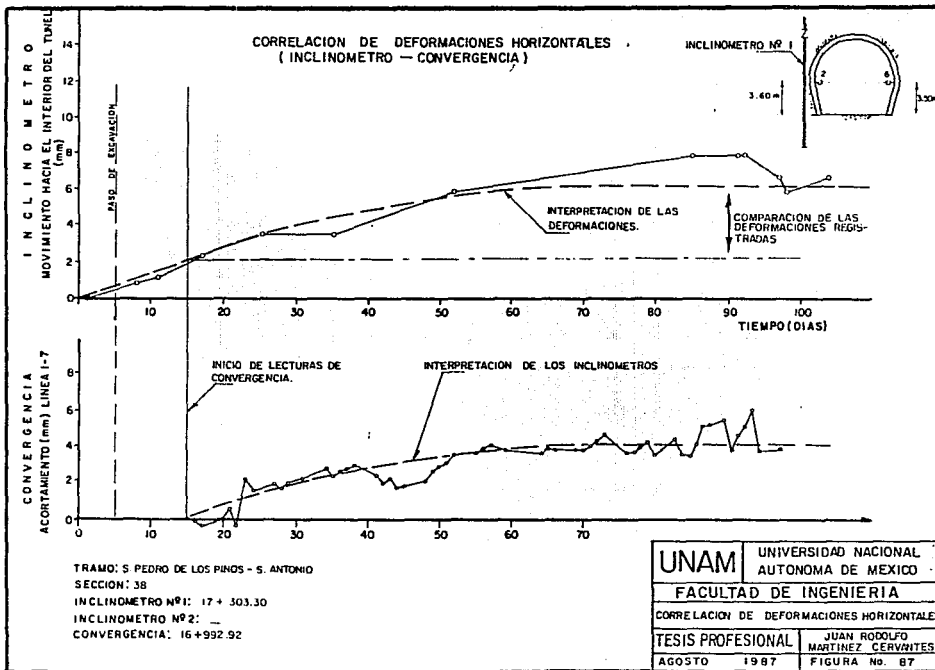


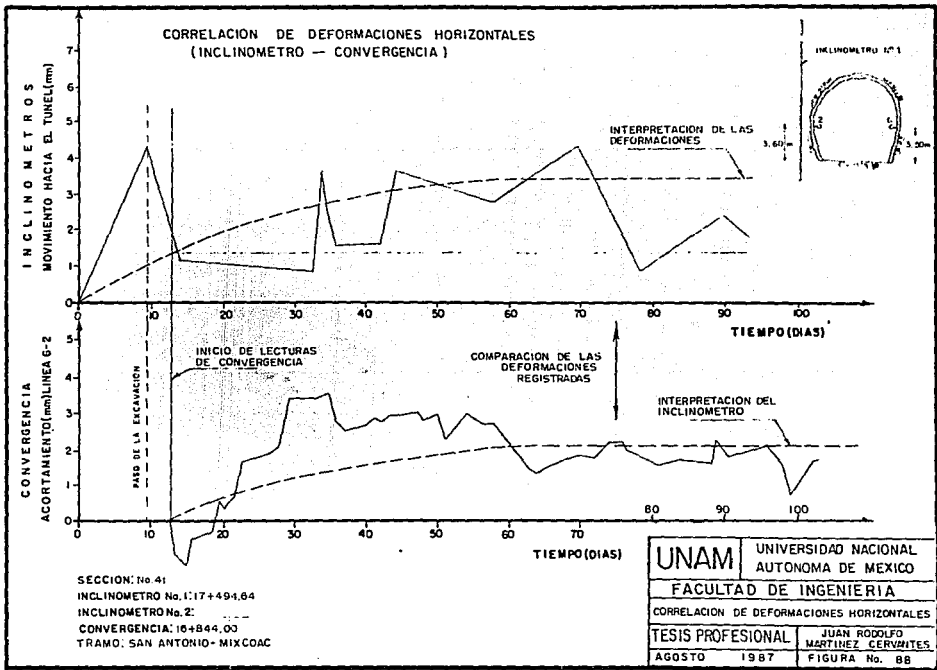
**CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES  
(INCLINOMETRO-CONVERGENCIA)**



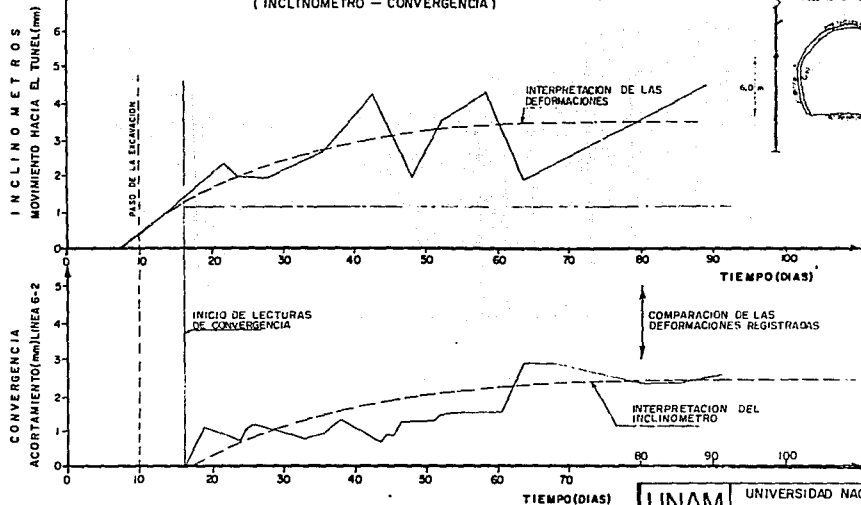
SECCION: No. 37  
 INCLINOMETRO No. 1: 16 + 976.27  
 INCLINOMETRO No. 2: \_\_\_\_\_  
 CONVERGENCIA: 10 + 844.00  
 TRAMO: 5m PEDRO DE LOS PINOS-SAN ANTONIO

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 86



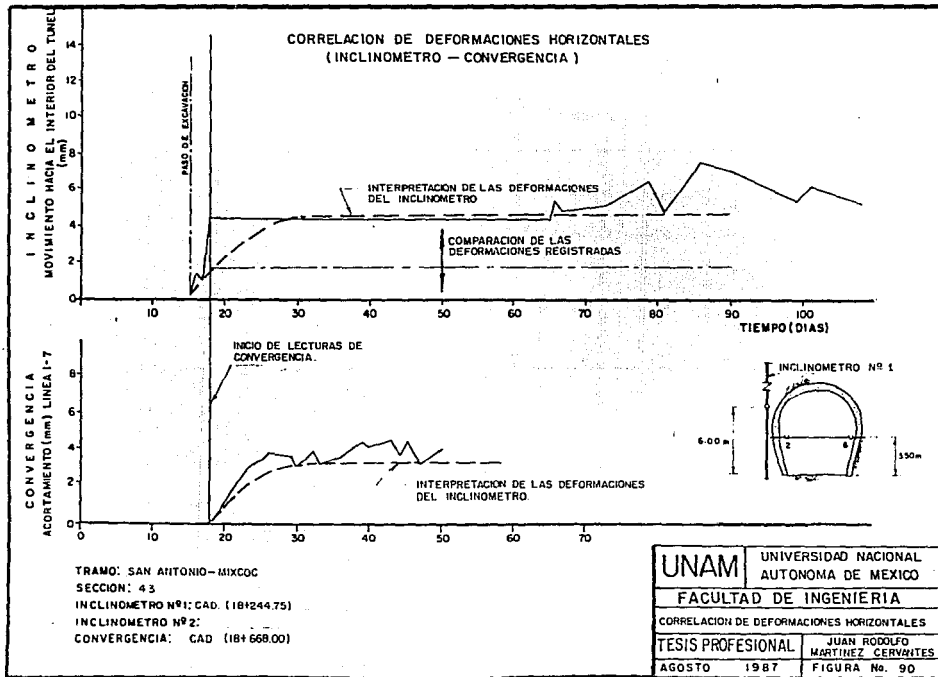


CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES  
(INCLINOMETRO - CONVERGENCIA)

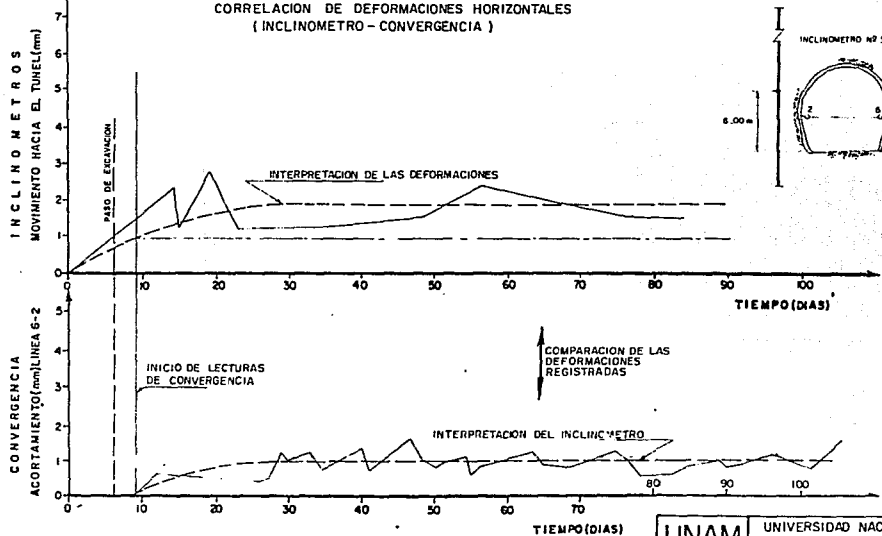


TRAMO: SAN ANTONIO-MIXCOAC  
 SECCION: No. 42  
 INCLINOMETRO No. 1: 17+934.37  
 INCLINOMETRO No. 2: \_\_\_\_\_  
 CONVERGENCIA: 18+572.23

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVAJES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 89



CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES  
( INCLINOMETRO - CONVERGENCIA )

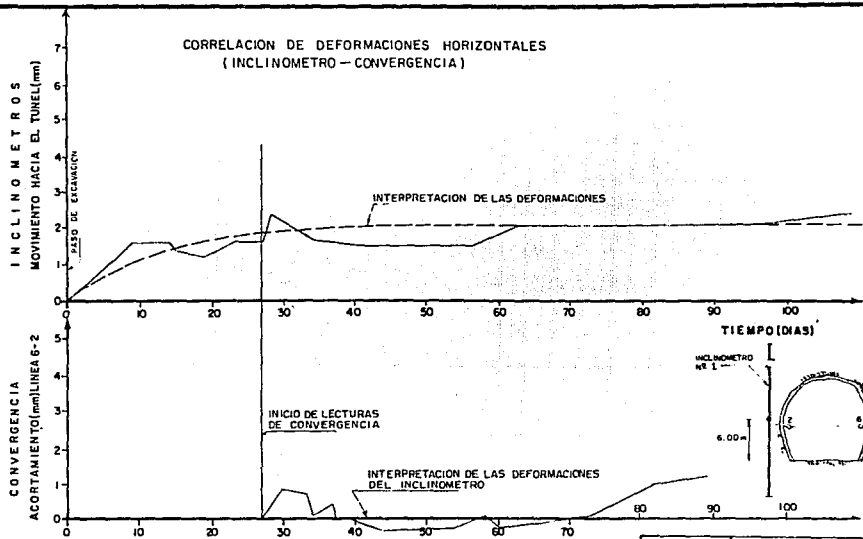


TRAMO: ESTACION MIXCOAC  
SECCION: No 44  
INCLINOMETRO No. 1: 18 + 323.0  
INCLINOMETRO No. 2: ..  
CONVERGENCIA: 18 + 320.05

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 91



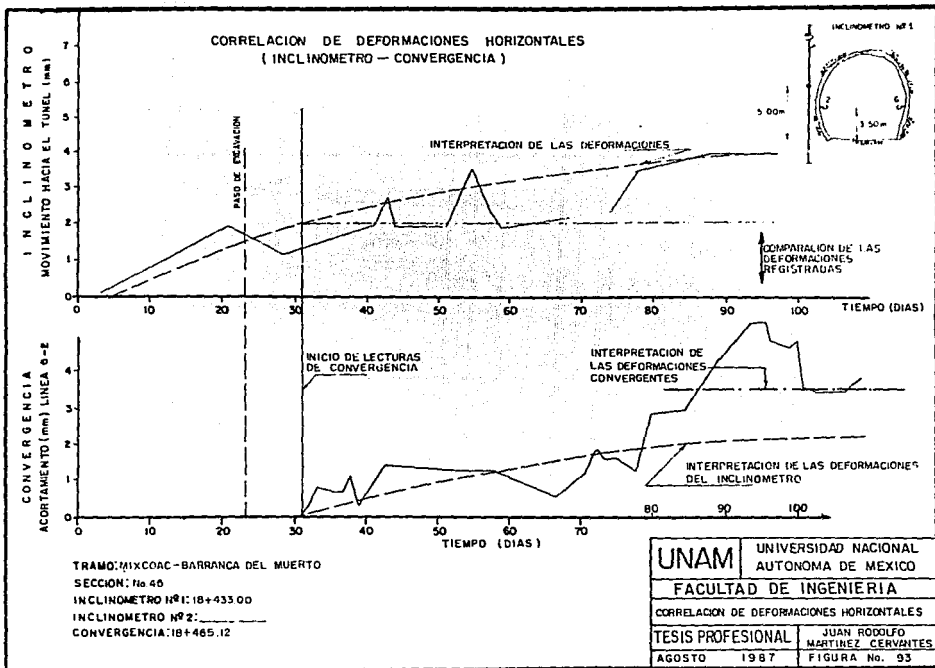
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES  
( INCLINOMETRO - CONVERGENCIA )



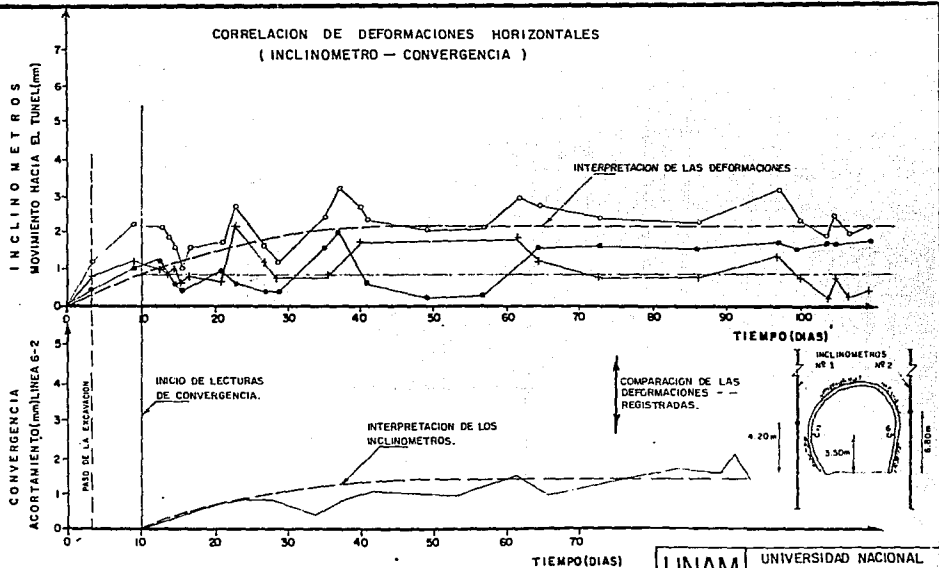
ESTACION : MIXCOAC  
SECCION: No. 45  
INCLINOMETRO No. 1: 18+353.64  
INCLINOMETRO No. 2: \_\_\_\_\_  
CONVERGENCIA: 18+400.10

TIEMPO (DIAS)

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 92



**CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES  
( INCLINOMETRO - CONVERGENCIA )**



TRAMO: MIXCOAC - BARRANCA DEL MUERTO

SECCION: 48

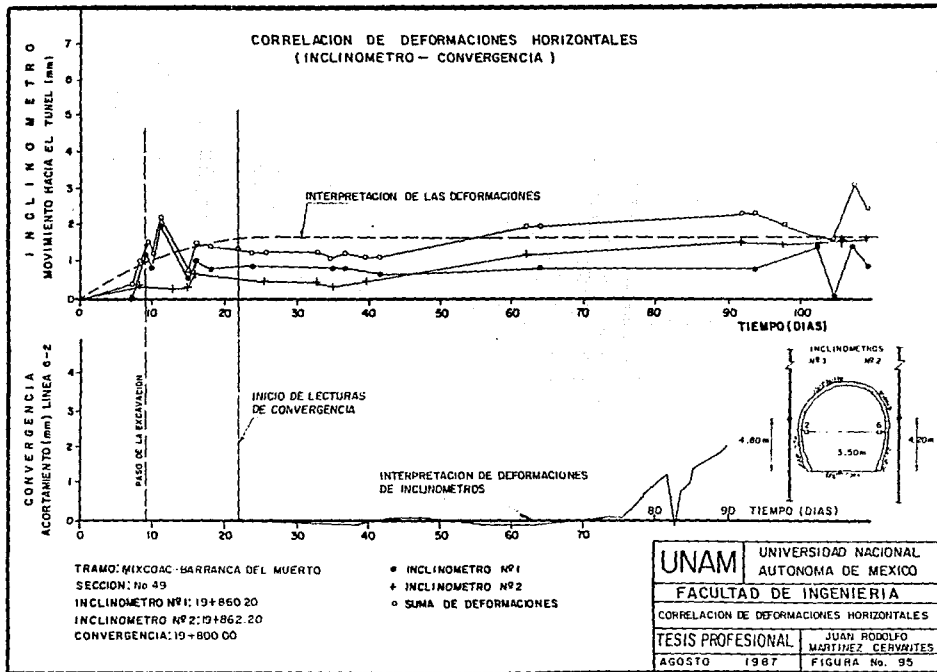
INCLINOMETRO No. 1: 19+717.30

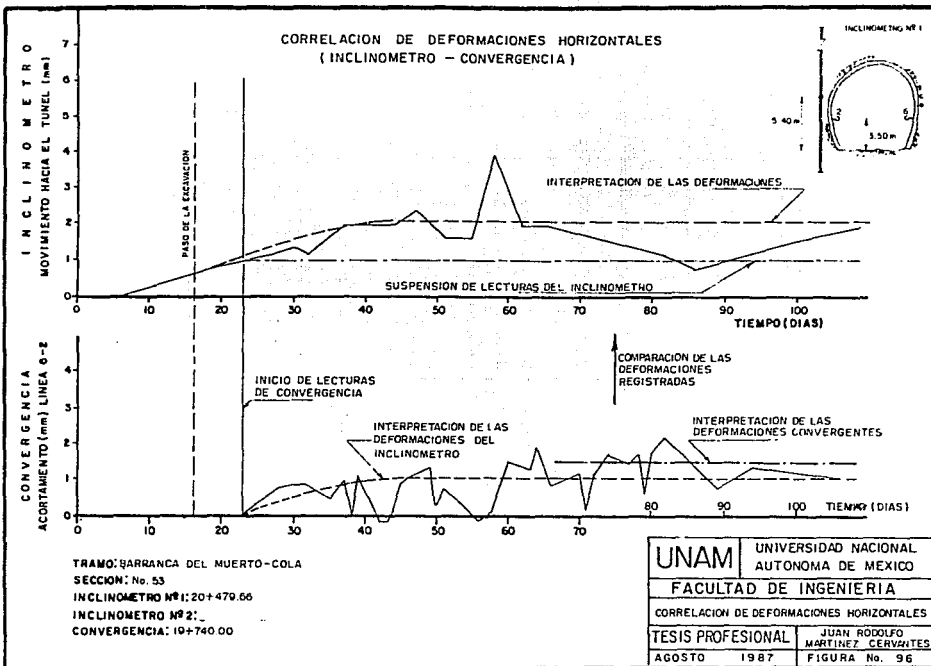
INCLINOMETRO No. 2: 19+716.47

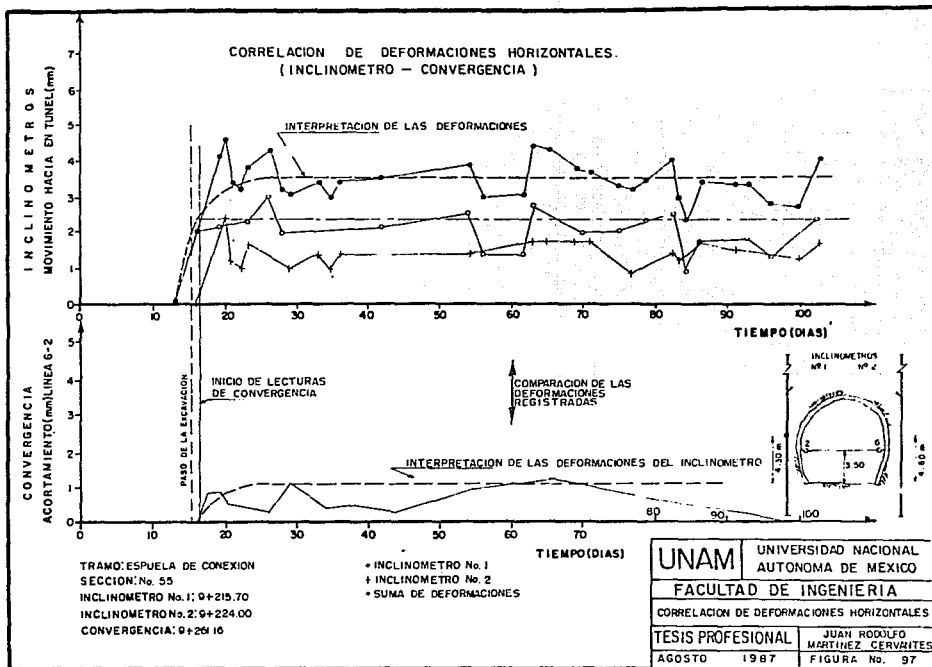
CONVERGENCIA: 19+740.00

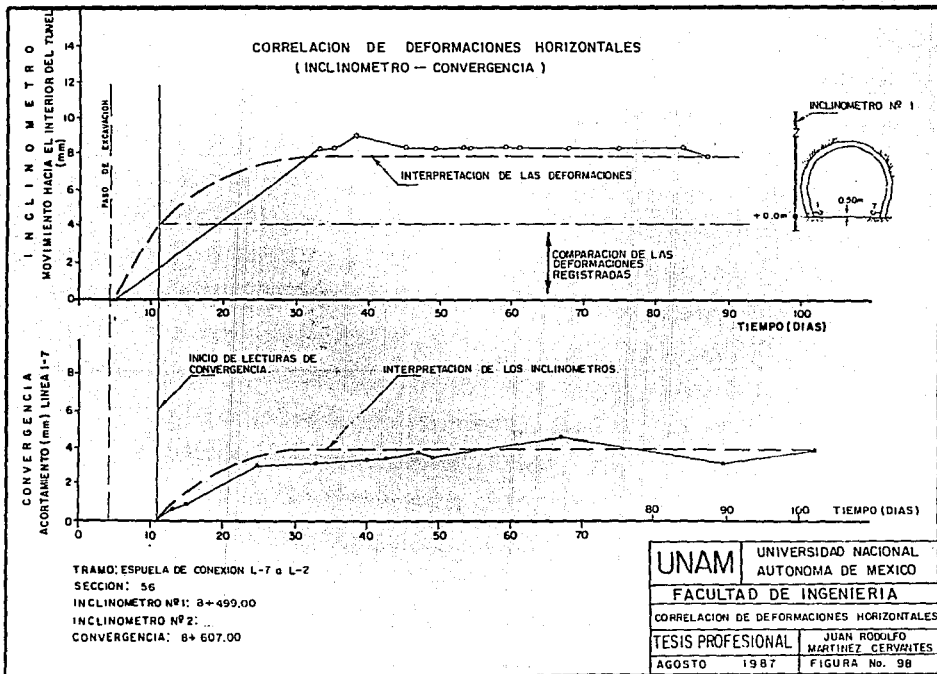
- INCLINOMETRO No. 1
- + INCLINOMETRO No. 2
- o SUMA DE DEFORMACIONES

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
CORRELACION DE DEFORMACIONES HORIZONTALES	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 94

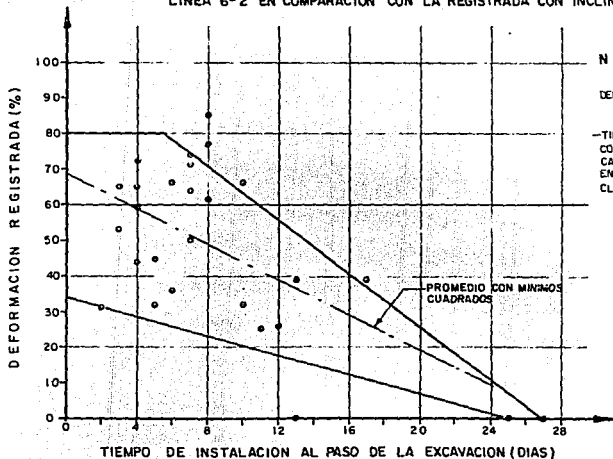








PORCENTAJE DE DEFORMACION REGISTRADA EN CONVERGENCIA EN LA LINEA 6-2 EN COMPARACION CON LA REGISTRADA CON INCLINOMETROS



NOTAS :

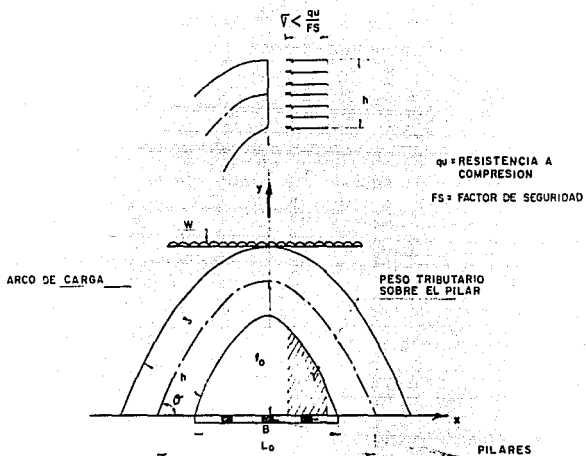
$$\text{DEF. REGISTRADA (\%)} = \frac{\text{DEF. EN CONV.}}{\text{DEF. EN INCL.}} \times 100$$

-TIEMPO DE INSTALACION DE LA SECCION DE CONVERGENCIA DESPUES DEL PASO DE LA EXCAVACION EN LA MISMA SECCION EN QUE SE ENCUENTRA INSTALADA LA TUBERIA DE INCLINOMETRO.

PROMEDIO CON MINIMOS CUADRADOS

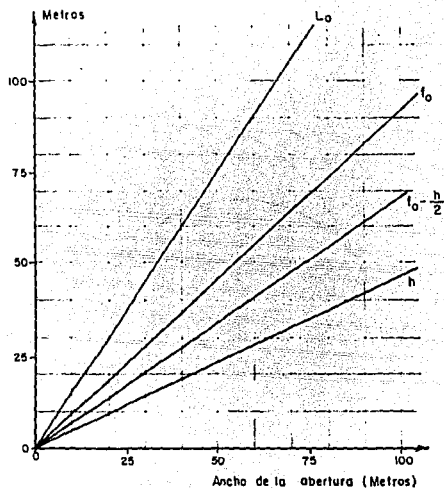
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
% DE DEFORMACION REGISTRADA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 99





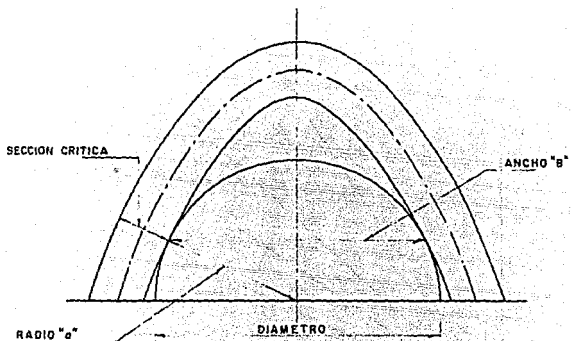
CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL METODO SIMPLIFICADO PROPUESTO

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
FORMA DE GENERACION DEL ARCO DE CARGA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 100



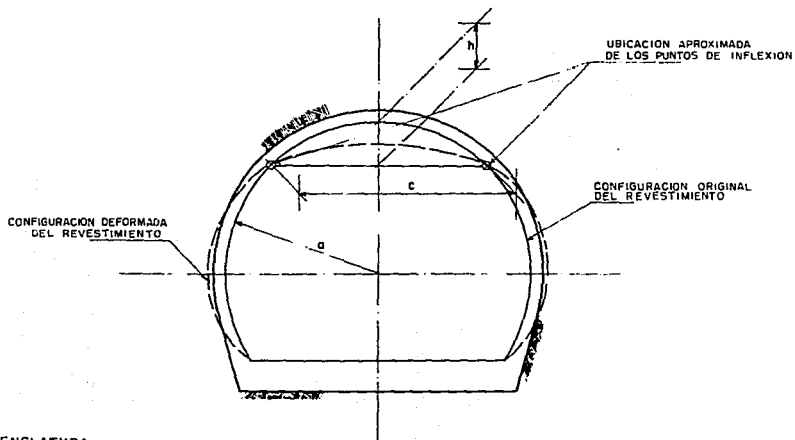
CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DEL ARCO DE CARGA DE GENERACION NATURAL

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
CARACTERISTICAS GEOMETRICAS	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 101



SECCION CRITICA PARA UN TUNEL SEMI-CIRCULAR

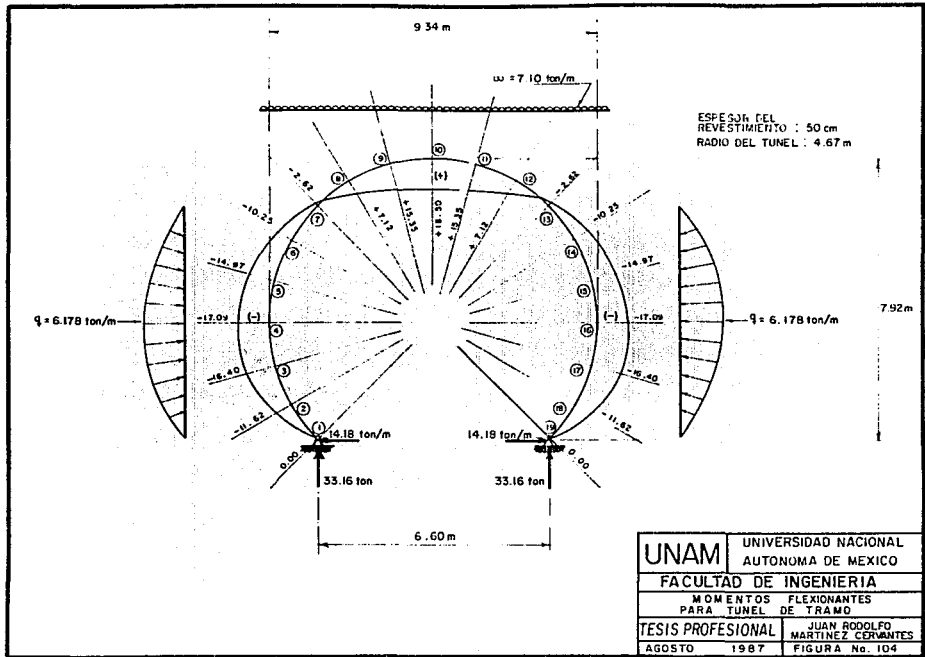
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
SECCION CRITICA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVENTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 102

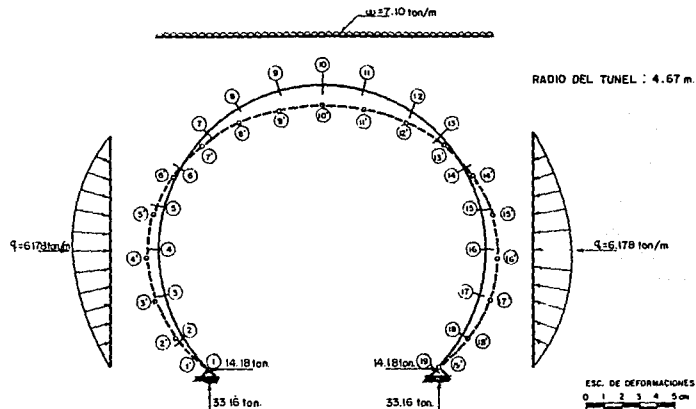


NOMENCLATURA

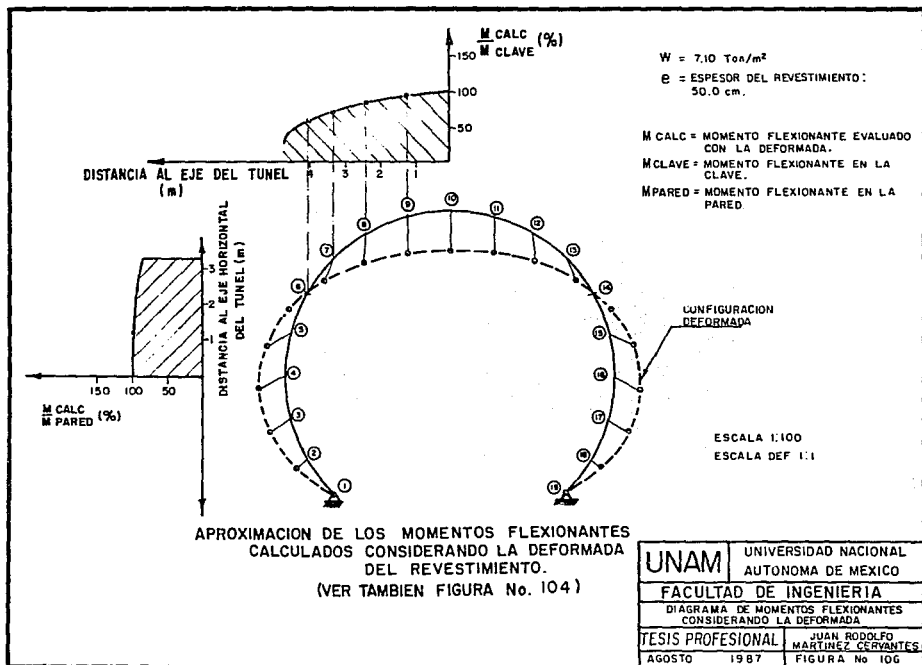
- c : CUERDA ORIGINAL  
 h : FLECHA ORIGINAL  
 a : RADIO DEL ARCO CIRCULAR ORIGINAL

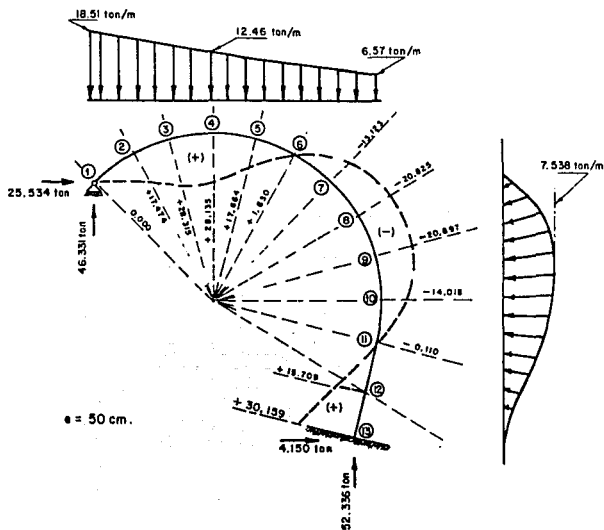
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
NOMENCLATURA DEL ARCO ORIGINAL	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 103





UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
	FACULTAD DE INGENIERIA	
DEFORMADA PARA TUNEL DE TRAMO		
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERANTES	
AGOSTO 19 8 7	FIGURA No. 105	





**DIAGRAMA DE MOMENTOS FLEXIONANTES**

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
DIAGRAMA DE MOMENTOS FLEXIONANTES TUNEL DE ESTACION	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 107



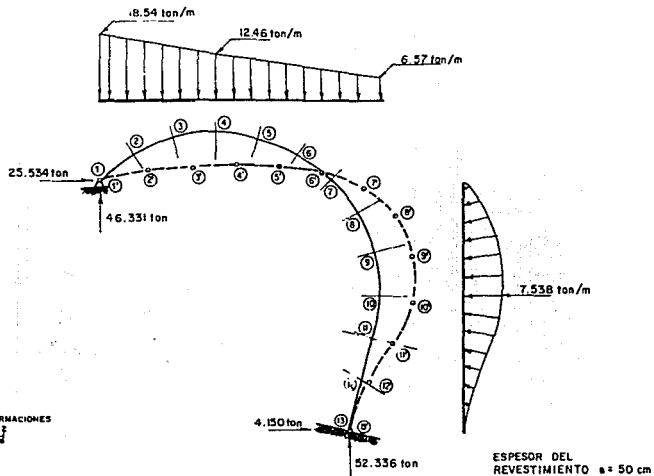
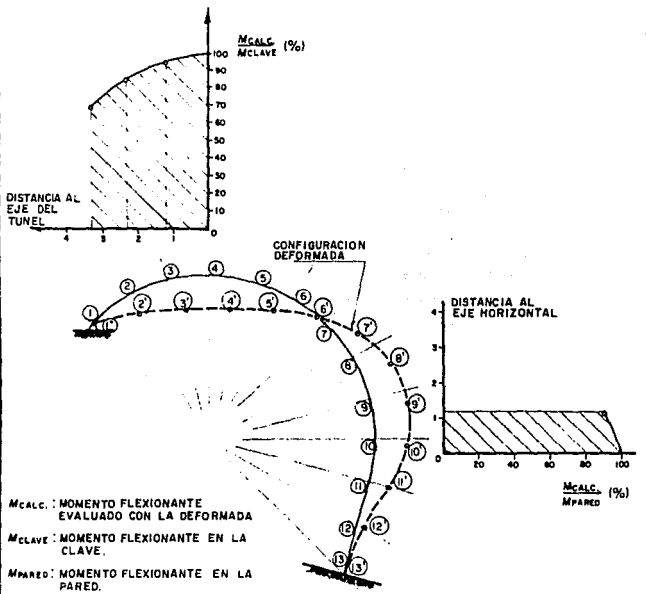


DIAGRAMA DE DEFORMACIONES

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
	FACULTAD DE INGENIERIA	
DIAGRAMA DE DEFORMACIONES		
TESIS PROFESIONAL		JUAN RODOLFO MARTINEZ CERMANTES
AGOSTO	1987	FIGURA No. 108



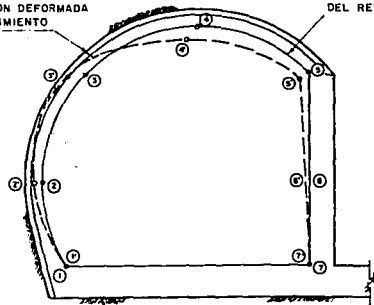
**APROXIMACION DE LOS MOMENTOS FLEXIONANTES  
CALCULADOS CONSIDERANDO LA DEFORMADA DEL REVESTIMIENTO**

ESCALA 1:100  
ESCALA DEF 1:1

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
DIAGRAMA DE MOMENTOS FLEXIONANTES CONSIDERANDO LA DEFORMADA	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERMENES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 109

CONFIGURACION DEFORMADA  
DEL REVESTIMIENTO

CONFIGURACION ORIGINAL  
DEL REVESTIMIENTO

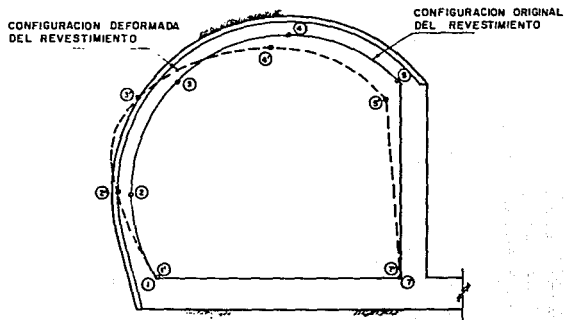


ESTACION AUDITORIO  
PTE. - NTE  
12+392.96

ESCALA 1:100

ESCALA DEF. 1:1

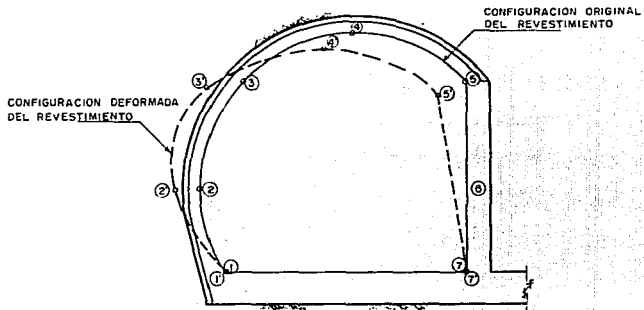
<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
CONFIGURACION DEFORMADA EN TUNEL DE ESTACION	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 110



ESTACION AUDITORIO  
PTE - NTE  
12+400.81

ESCALA 1:100  
ESCALA DEF. 1:1

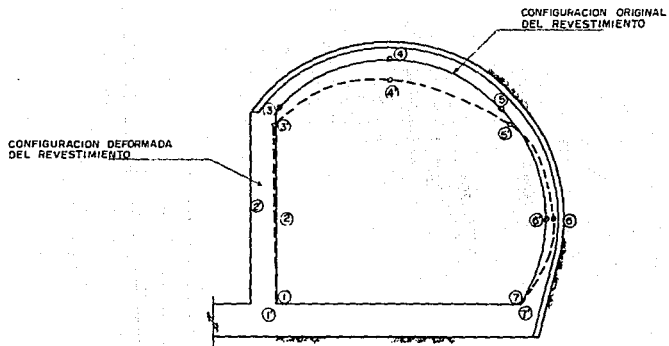
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CONFIGURACION DEFORMADA EN TUNEL DE ESTACION	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. III



ESTACION AUDITORIO  
PTE - NTE  
12 + 422.00

ESCALA 1 : 100  
ESCALA DEF. 1 : 1

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CONFIGURACION DEFORMADA EN TUNEL DE ESTACION	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 112



ESTACION TACUBAYA  
PTE. - SUR

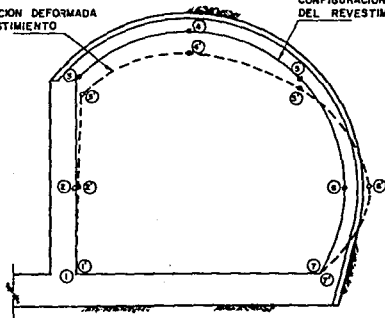
15 + 435. 00

ESCALA 1 100  
ESCALA DEF. 11

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CONFIGURACION DEFORMADA EN TUNEL DE ESTACION	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 113

CONFIGURACION DEFORMADA  
DEL REVESTIMIENTO

CONFIGURACION ORIGINAL  
DEL REVESTIMIENTO



ESTACION TACUBAYA

PTE - SUR

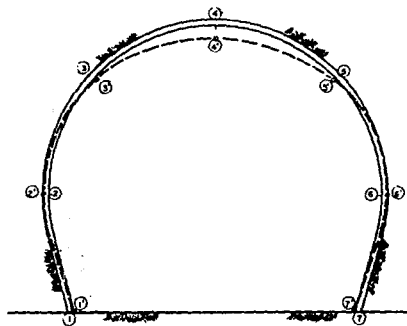
15+482.12

ESCALA 1:100  
ESCALA DEF. 1:1

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CONFIGURACION DEFORMADA EN TUNEL DE ESTACION	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERRANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 114



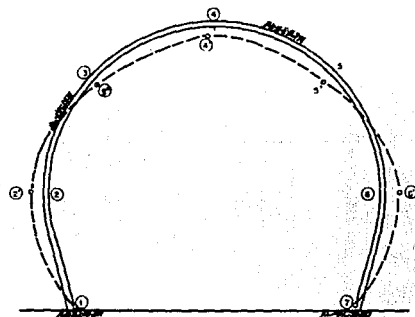




ESCALA 1:100  
ESCALA DEF. 1:1

AUDITORIO — CONSTITUYENTES  
Km 13+051.63

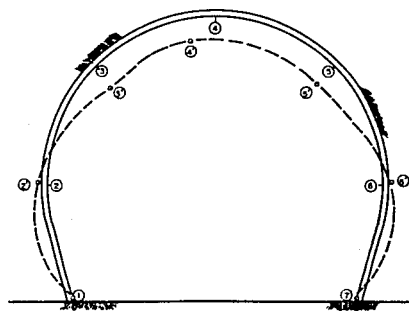
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA	
CONFIGURACION DEFORMADA EN TUNEL DE TRAMO	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 116



ESCALA 1:100  
ESCALA DEF 1:1

TACUBAYA — SAN PEDRO DE LOS PINOS  
Km. 16 + 618.70

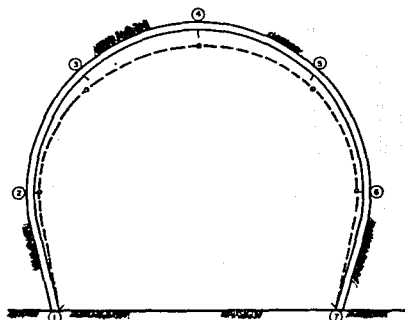
UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CONFIGURACION DEFORMADA EN TUNEL DE TRAMO	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 117



ESCALA 1:100  
 ESCALA DEF. 1:1

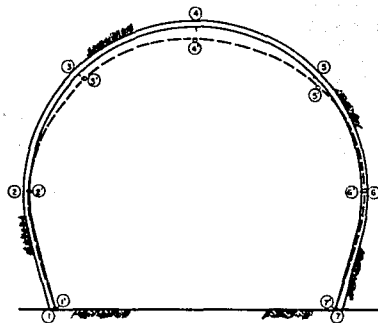
TACUBAYA — SAN PEDRO DE LOS PINOS  
 Km. 16+643.55

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CONFIGURACION DEFORMADA EN TUNEL DE TRAMO	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 118



TACUBAYA — SAN PEDRO DE LOS PINOS  
Km. 16 + 654.47

<b>UNAM</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
CONFIGURACION DEFORMADA EN TUNEL DE TRAMO	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 119



MIXCOAC — BARRANCA DEL MUERTO

Km 19 + 770.00

UNAM	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
	FACULTAD DE INGENIERIA
CONFIGURACION DEFORMADA EN TUNEL DE TRAMO	
TESIS PROFESIONAL	JUAN RODOLFO MARTINEZ CERVANTES
AGOSTO 1987	FIGURA No. 120

T A B L A N º 1

HOJA 1/5

PROPIEDADES MECANICAS DEL SUELO EN EL TUNEL, DE LA LINEA 7 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO.

TRAMO ó ESTACION	CADENAMIENTO	CLASIFICACION SUCS.	qu (kg/cm <sup>2</sup> )	c (kg/cm <sup>2</sup> )	φ (°)
TACUBA-SAN	9+276.00 (1)	CL	2.10	0.90	23.6
JOAQUIN	9+276.00 (2)	CL	0.90	1.00	37.5
	9+323.00	SC	2.80	1.00	37.5
	9+672.00	SL	8.90	2.40	34.0
	9+824.00 (1)	SC	11.50	3.40	43.2
	9+824.00 (2)	CL	8.10	5.24	26.5
		PROMEDIOS	5.71	2.32	33.7
SAN JOAQUIN-	10+311.00	SC	3.18	0.82	37.0
POLANCO	10+313.00	SC	12.00	0.30	51.5
	10+314.00	CL	12.00	0.30	51.6
	10+414.00	CL	22.90	2.20	57.3
	10+467.00	SC	11.10	2.00	50.4
	10+524.00	CL	10.30	0.60	58.4
	10+835.00	GC	10.10	0.15	38.0
	10+861.00	CL	8.90	2.30	28.0
	11+203.00	CL	9.30	0.90	48.2
	11+252.00	CL	8.50	1.70	47.7
	11+312.00	CH	3.30	1.40	33.5
	11+353.00	SC	14.20	2.10	40.5
	11+365.00	CL	14.80	3.00	45.5
	11+429.00	ML	10.00	1.10	45.0
	11+430.00	CL	16.40	2.80	52.0
		PROMEDIOS	11.13	1.44	45.6
ESTACION	11+494.00	CL	2.50	12.00	26.0
POLANCO	11+507.00	ML	2.90	0.70	38.6
	11+542.00	SC	12.30	1.90	27.5
		PROMEDIOS	5.90	4.87	30.7
POLANCO-	11+585.00	CL	3.00	1.10	40.5
AUDITORIO	11+587.00	SC	7.40	0.60	56.8
	11+644.00	CL	6.70	1.00	45.0
	11+685.00	CL	17.20	2.00	36.6
	11+812.00 (1)	SC	18.10	3.00	40.5
	11+812.00 (2)	SC	9.50	3.80	38.6
	11+920.00	ML	8.17	1.50	39.8

T A B L A N º 1

HOJA 2/5

PROPIEDADES MECANICAS DEL SUELO EN EL TUNEL, DE LA LINEA 7 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO.

TRAMO ó ESTACION	CADENAMIENTO	CLASIFICACION SUCS.	qu (kg/cm <sup>2</sup> )	c (kg/cm <sup>2</sup> )	φ (°)
	12+065.00	CL	5.80	1.30	43.3
	12+104.00	SC	5.50	0.90	57.8
	12+152.00	ML	2.40	1.30	36.0
	12+210.00	GN	1.10	0.30	32.1
	12+294.00	SC	0.50	0.30	33.2
	12+355.00	SC	2.60	1.10	35.1
	12+389.00	ML	7.40	2.90	26.5
		PROMEDIOS	6.81	1.51	40.1
ESTACION	12+416.00	CL	18.20	1.30	58.0
AUDITORIO	12+418.00	SP-SC	2.20	1.00	36.0
	12+525.00	CL	10.70	1.40	48.0
		PROMEDIOS	10.37	1.23	47.3
AUDITORIO-	12+545.00	CL	10.65	1.40	48.3
CONSTITUYENTES	12+549.00 (1)	ML	7.90	1.50	24.4
	12+549.00 (2)	ML	7.70	2.50	38.6
	12+595.00	MH	6.10	1.90	27.0
	12+778.00 (1)	SM	1.70	1.00	36.1
	12+778.00 (2)	SC	1.00	0.30	38.9
	12+778.00 (3)	ML-CL	0.70	0.30	31.3
	13+533.00 (1)	SM	1.40	0.70	30.4
	13+533.00 (2)	SC	1.30	0.30	41.0
	13+822.00	SM	3.30	1.90	30.2
		PROMEDIOS	4.17	1.38	34.6
ESTACION	13+970.00	SM	3.10	1.85	30.2
CONSTITUYENTES	14+026.00	SM-SC	5.37	1.60	34.0
	14+037.00	SM-SM	6.05	2.20	35.5
		PROMEDIOS	4.84	1.88	33.2
CONSTITUYENTES-	14+130.00	SC	1.50	0.41	34.7
TACUBAYA	14+169.00	SC	0.90	0.49	28.5
	14+513.00	SM-SC	7.20	1.60	40.8
	14+583.00	SC	7.70	1.18	47.2

T A B L A N º 1

HOJA 3/5

PROPIEDADES MECANICAS DEL SUELO EN EL TUNEL, DE LA LINEA 7 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO.

TRAMO ó ESTACION	CADENAMIENTO	CLASIFICACION SUCS.	qu (kg/cm <sup>2</sup> )	c (kg/cm <sup>2</sup> )	φ (°)
CONSTITUYENTES-TACUBAYA	14+669.00	SM-SC	7.90	1.64	43.7
	14+750.00	SM	3.60	0.83	42.8
	14+818.00	SC	1.50	0.75	31.5
	14+886.00	SM-SC	5.60	1.20	40.1
	14+948.00	SM-SC	0.70	0.63	30.5
	15+012.00	ML	1.40	0.55	28.3
	15+076.00	SM	1.30	0.73	30.0
	15+296.00	SC	1.00	0.25	33.5
		PROMEDIOS	3.36	0.85	35.9
ESTACION TACUBAYA	15+344.00	SC	1.10	0.40	34.2
	15+460.00	SC	6.90	2.00	30.3
	15+482.00	CL	4.90	1.78	33.6
		PROMEDIOS	4.30	1.39	32.7
TACUBAYA-SAN PEDRO DE LOS PINOS	15+590.00	SM	1.40	0.80	25.1
	15+905.00	SM	2.10	0.60	31.2
	16+165.00	SM-SC	1.60	1.20	38.0
	16+460.00	ML	0.60	0.70	26.1
		PROMEDIOS	1.43	0.83	30.2
ESTACION SAN PEDRO PINOS	16+568.00	ML	0.70	1.00	22.7
	16+723.00	ML	5.70	2.83	36.9
		PROMEDIOS	3.20	1.91	29.8
SAN PEDRO DE LOS PINOS-SAN ANTONIO	16+780.00	SC	0.70	0.63	33.0
	17+110.00	CL	0.90	0.40	32.9
	17+230.00	SM	1.70	0.48	32.6
	17+250.00	ML	1.50	0.43	34.1
	17+284.00	SC	5.70	2.15	28.8
		PROMEDIOS	2.10	0.82	32.2
ESTACION SAN ANTONIO	17+355.00	SM	0.70	0.72	27.7
	17+388.00	SM-SC	4.75	1.30	37.0



T A B L A N º 1

HOJA 4/5

PROPIEDADES MECANICAS DEL SUELO EN EL TUNEL, DE LA LINEA 7 DEL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO.

TRAMO ó ESTACION	CADENAMIENTO	CLASIFICACION SUCS.	$q_u$ ( $kg/cm^2$ )	$c$ ( $kg/cm^2$ )	$\phi$ ( $^{\circ}$ )
	17+395.00	SM-ML	0.70	0.70	27.7
		PROMEDIOS	2.05	0.91	30.8
SAN ANTONIO- MIXCOAC	17+500.00	SP-SC	8.80	1.80	46.1
	18+150.00	SC	4.40	1.00	43.9
	18+217.00	ML-CL	5.65	1.50	35.9
		PROMEDIOS	6.28	1.43	41.9
ESTACION MIXCOAC	18+261.00	SC	5.77	1.20	50.5
	18+370.00	ML-CL	1.20	0.76	23.0
	18+440.00	CL	2.10	1.10	28.2
		PROMEDIOS	3.02	1.02	33.9
MIXCOAC-BA- RANCA DEL MUERTO	18+635.00	ML	0.97	0.50	23.1
	18+657.00	SC	3.58	0.85	37.5
	18+710.00	SC	5.66	1.40	31.7
	18+817.00	SC-SM	22.83	1.95	47.5
	18+865.00	SP	6.84	1.22	45.6
	19+371.00	CL	1.53	0.22	22.8
	19+600.00	ML	15.16	3.00	32.8
	19+634.00	ML	19.47	4.55	33.7
	19+690.00	ML	9.07	1.60	40.6
	19+713.00	SC	7.93	1.74	45.3
	19+830.00	SM-SC	5.17	1.60	30.3
	19+862.00	ML	9.85	2.35	27.9
		PROMEDIOS	9.00	1.75	34.9
ESTACION BA- RANCA DEL MUERTO	19+885.00	SM-SC	0.68	0.26	34.4
	19+919.00 (1)	SM	0.33	0.30	40.0
	19+919.00 (2)	SC	1.15	1.80	34.0
	19+999.00	SM	1.49	0.60	30.3
	20+012.00	SM	1.50	0.60	30.3
		PROMEDIOS	1.03	0.71	33.8







TABLA N° 4

HOJA 1/2

DEFORMACIONES PROMEDIO DE EXTENSOMETROS , INCLINOMETROS Y NIVELACIONES DEDUCIDAS DE LOS HISTOGRAMAS

INSTRUMENTO	DIAMETRO DEL TUNEL (m)	TIPO DE REVESTIMIENTO	NUMERO DE INSTRUMENTOS CONSIDERADOS	DEFORMACION PROMEDIO (mm)	OBSERVACIONES
EXTENSOMETROS	8.22	PROVISIONAL	16	4.86	TUNELES DEL LADO "B" DE LAS ESTACIONES
EXTENSOMETROS	10.04	PROVISIONAL	38	3.65	TUNELES DE TRAMO Y LADO "A" DE LAS ESTACIONES
EXTENSOMETROS INCLINADOS	10.04	PROVISIONAL	38	13.67*	TUNELES DE TRAMO Y LADO "A" DE LAS ESTACIONES *DEFORMACIONES RADIALES TOTALES CALCULADAS USANDO LOS REGISTROS DE NIVELACIONES SOBRE EXTENSOMETROS INCLINADOS
INCLINOMETROS	8.22	PROVISIONAL	8	4.05	TUNELES DEL LADO "B" DE LAS ESTACIONES
INCLINOMETROS	10.04	PROVISIONAL	44	4.96	TUNELES DE TRAMO Y LADO "A" DE LAS ESTACIONES
NIVELACIONES	8.22	PROVISIONAL	18	20.94	PROMEDIO EN LOS TUNELES "B" Y ESTACION TACUBAYA
			28	61.57	PROMEDIO EN EL TUNEL "B" DE EST. S.P. PINOS
NIVELACIONES	10.04	PROVISIONAL	55	22.89	PROMEDIO EN TUNELES DE TRAMO Y LADO "A" DE ESTACION
			12	69.58	PROMEDIO EN EL TUNEL "A" DE EST. S.P. PINOS
NIVELACIONES	14.68	PROVISIONAL	21	8.15	PROMEDIO EN LA ESTACION MIXCOAC



T A B L A N º 5

HOJA 1/3

COMPARACION DE REGISTROS DE DEFORMACION VERTICAL REGISTRADA CON DIFERENTES TIPOS DE INSTRUMENTOS EN UNA MISMA SECCION DE INSTRUMENTACION , EN LOS TUNELES DEL METRO. CD. DE MEXICO.

U B I C A C I O N		EXTENSOMETRO + NIVELACION	C O N V E R G E N C I A		
T R A M O	CADENAMIENTO DE EXTENSOMETROS	DEFORMACION REGISTRADA $\int_{EXT} + \int_{NIV.} * \int_{T}$ ( mm )	DEFORMACION REGISTRADA, $\int_c$ (mm)	T (DIAS)	% DE $\int_T$ REGISTRADA
ESTACION SAN JOAQUIN	10+211.00	16.60	4.00	2	24.10
ESTACION SAN JOAQUIN	10+261.58	19.60	2.60	18	13.26
ESTACION SAN JOAQUIN	10+261.58	14.50	4.50	7	31.00
SAN JOAQUIN-POLANCO	10+331.00	16.40	4.40	7	26.80
SAN JOAQUIN-POLANCO	10+873.83	11.00	1.20	42	10.90
SAN JOAQUIN-POLANCO	11+321.15	7.00	5.60	1	80.00
ESTACION POLANCO	11+489.30	15.70	1.10	21	7.00
EST. POLANCO	11+490.30	6.50	4.90	1	75.40

## NOTAS

- 1)  $\int_T$  es la deformación registrada por los extensómetros y las nivelaciones considerada como la total que se presentó en el subsuelo.
- 2)  $\int_c$  es la deformación registrada por las convergencias considerada como una parte de la total que se presentó en el subsuelo, debido a que su instalación es posterior a la excavación del túnel.
- 3) El valor de % de  $\int_T$  registrado por las convergencias dependerá del tiempo que transcurra entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para la medición de las convergencias.
- 4) T es el tiempo transcurrido entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para medir las convergencias.

T A B L A N º 5

HOJA 2/3

COMPARACION DE REGISTROS DE DEFORMACION VERTICAL REGISTRADA CON DIFERENTES TIPOS DE INSTRUMENTOS EN UNA MISMA SECCION DE INSTRUMENTACION , EN LOS TUNELES DEL METRO.CD. DE MEXICO.

U B I C A C I O N		EXTENSOMETRO + NIVELACION		C O N V E R G E N C I A		
T R A M O	CADENAMIENTO DE EXTENSOMETROS	DEFORMACION REGISTRADA $\sum \delta_{EXT.} + \sum \delta_{NIV.} = \sum \delta_T$ (mm)		DEFORMACION REGISTRADA $\sum \delta_C$ (mm)	T (DIAS)	% DE $\sum \delta_T$ REGISTRADA
ESTACION						
POLANCO ESTACION	11+526.01	9.20		6.20	5	67.40
POLANCO ESTACION	11+529.30	21.60		1.70	22	7.90
POLANCO-AUDITORIO	11+620.00	12.40		5.00	10	40.30
ESTACION AUDITORIO	12+429.00	8.20		3.80	8	46.30
AUDITORIO-AUDITORIO						
CONSTITUYENTES AUDITORIO-	12+573.00	15.70		2.80	11	17.80
AUDITORIO-						
CONSTITUYENTES ESTACION	13+044.00	12.60		2.80	4	22.20
ESTACION						
TACUBAYA	15+460.00	10.00		3.20	15	32.00

## NOTAS

- 1)  $\delta_T$  es la deformación registrada por los extensómetros y las nivelaciones considerada como la total que se presentó en el subsuelo.
- 2)  $\delta_C$  es la deformación registrada por las convergencias considerada como una parte de la total que se presentó en el subsuelo, debido a que su instalación es posterior a la excavación del túnel.
- 3) El valor de % de  $\delta_T$  registrado por las convergencias dependerá del tiempo que transcurra entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para la medición de las convergencias.
- 4) T es el tiempo transcurrido entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para medir las convergencias.





T A B L A N º 6

H.O.I.A 1/4

COMPARACION DE REGISTROS DE DEFORMACION HORIZONTAL REGISTRADA CON DIFERENTES TIPOS DE INSTRUMENTOS EN UNA MISMA SECCION DE INSTRUMENTACION , EN LOS TUNELES DEL METRO.CD. DE MEXICO.

UBICACION		INCLINOMETRO	CONVERGENCIA		
TRAMO	CADENAMIENTO	DEFORMACION REGISTRADA $\delta_x$ (mm)	DEFORMACION REGISTRADA, $\int \delta_c$ (mm)	T (DIAS)	% DE $\int \delta_x$ REGISTRADA
TACUBA-SAN JOAQUIN	10+060.00	5.70	0.00	25	0.00
ESTACION					
SAN JOAQUIN ESTACION	10+211.00	2.60	1.60	8	61.54
SAN JOAQUIN	10+261.00	5.60	2.20	17	39.30
SAN JOAQUIN-POLANCO	10+339.40	3.80	2.20	4	57.90
SAN JOAQUIN-POLANCO	10+857.60	7.20	2.80	13	38.90
SAN JOAQUIN-POLANCO	11+422.05	4.00	1.80	5	45.00
POLANCO-AUDITORIO	11+611.10	4.00	1.00	11	25.00

## NOTAS

- 1)  $\int \delta_x$  es la deformación registrada por los inclinómetros considerada como la total que se presentó en el subsuelo.
- 2)  $\int \delta_c$  es la deformación registrada por las convergencias considerada como una parte de la total que se presentó en el subsuelo, debido a que su instalación es posterior a la excavación del túnel.
- 3) El valor de % de  $\int \delta_x$  registrado por las convergencias dependerá del tiempo que transcurra entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para la medición de las convergencias.
- 4) T es el tiempo transcurrido entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para medir las convergencias.

T A B L A N º 6

HOJA 2/4

COMPARACION DE REGISTROS DE DEFORMACION HORIZONTAL REGISTRADA CON DIFERENTES TIPOS DE INSTRUMENTOS EN UNA MISMA SECCION DE INSTRUMENTACION , EN LOS TUNELES DEL METRO.CO. DE MEXICO.

UBICACION		INCLINOMETRO	C O N V E R G E N C I A		
TRAMO	CADENAMIENTO	DEFORMACION REGISTRADA $\int x$ (mm)	DEFORMACION REGISTRADA $\int c$ (mm)	T (DIAS)	% DE $\int x$ REGISTRADA
POLANCO-AUDITORIO	11+980.60	7.20	2.30	10	31.90
POLANCO-AUDITORIO	12+364.76	14.80	3.80	12	25.67
AUDITORIO-CONSTITUYENTES	12+574.80	2.50	0.90	6	36.00
AUDITORIO-CONSTITUYENTES	13+043.70	4.40	1.40	5	31.80
ESTACION TACUBAYA	15+440.00	4.60	3.40	7	73.90
TACUBAYA-SAN PEDRO PINOS	16+010.00	5.70	4.40	8	77.20
SAN P. PINOS-SAN ANTONIO	16+758.06	12.00	8.60	4	71.70

## NOTAS

- $\int x$  es la deformación registrada por los inclinómetros considerada como la total que se presentó en el subsuelo.
- $\int c$  es la deformación registrada por las convergencias considerada como una parte de la total que se presentó en el subsuelo, debido a que su instalación es posterior a la excavación del túnel.
- El valor de  $\%$  de  $\int x$  registrado por las convergencias dependerá del tiempo que transcurra entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para la medición de las convergencias.
- T es el tiempo transcurrido entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para medir las convergencias.

T A B L A N º 6

HOJA 3/4

COMPARACION DE REGISTROS DE DEFORMACION HORIZONTAL REGISTRADA CON DIFERENTES TIPOS DE INSTRUMENTOS EN UNA MISMA SECCION DE INSTRUMENTACION , EN LOS TUNELES DEL METRO.CO. DE MEXICO.

UBICACION		INCLINOMETRO	C O N V E R G E N C I A		
TRAMO	CADENAMIENTO	DEFORMACION REGISTRADA $\int z$ (mm)	DEFORMACION REGISTRADA $\int c$ (mm)	T (DIAS)	% DE $\int z$ REGISTRADA
S.P. PINOS-SAN ANTONIO	16+976.27	3.20	1.40	4	43.75
S.P. PINOS-SAN ANTONIO	17+303.30	6.40	4.20	10	65.60
MIXCOAC-SAN ANTONIO	17+494.64	3.40	2.20	4	64.71
MIXCOAC-SAN ANTONIO	17+934.37	3.50	2.30	6	65.70
MIXCOAC-ESTACION	18+244.75	4.60	3.00	3	65.20
MIXCOAC-ESTACION	18+323.02	1.90	1.00	3	52.63
MIXCOAC-ESTACION	18+353.64	2.00	0.00	27	0.00

## NOTAS

- $\int z$  es la deformación registrada por los inclinómetros considerada como la total que se presentó en el subsuelo.
- $\int c$  es la deformación registrada por las convergencias considerada como una parte de la total que se presentó en el subsuelo, debido a que su instalación es posterior a la excavación del túnel.
- El valor de % de  $\int z$  registrado por las convergencias dependerá del tiempo que transcurra entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para la medición de las convergencias.
- T es el tiempo transcurrido entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para medir las convergencias.

T A B L A N º 6

HOJA 4/4

COMPARACION DE REGISTROS DE DEFORMACION HORIZONTAL REGISTRADA CON DIFERENTES TIPOS DE INSTRUMENTOS EN UNA MISMA SECCION DE INSTRUMENTACION , EN LOS TUNELES DEL METRO. CD. DE MEXICO.

UBICACION		INCLINOMETRO	C O N V E R G E N C I A		
TRAMO	CADENAMIENTO	DEFORMACION REGISTRADA $\sum x$ (mm)	DEFORMACION REGISTRADA, $\sum c$ (mm)	T (DIAS)	% DE $\sum x$ REGISTRADA
MIXCOAC-B.					
DEL MUERTO	18+433.00	4.00	3.40	8	85.00
MIXCOAC-B.					
DEL MUERTO	19+717.30	2.20	1.40	7	63.64
MIXCOAC-B.					
DEL MUERTO	19+860.20	1.80	0.00	13	0.00
BARRANCA DEL MUERTO-COLA	20+479.66	2.10	1.50	7	71.40
CONEXION LI NEA 7 CON					
LINEA 2	8+499.00	8.00	4.00	7	50.00
CONEXION LI NEA 7 CON					
LINEA 2	9+215.70	3.50	1.10	2	31.43

## NOTAS

- $\sum x$  es la deformación registrada por los inclinómetros considerada como la total que se presentó en el subsuelo.
- $\sum c$  es la deformación registrada por las convergencias considerada como una parte de la total que se presentó en el subsuelo, debido a que su instalación es posterior a la excavación del túnel.
- El valor de % de  $\sum x$  registrado por las convergencias dependerá del tiempo que transcurra entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para la medición de las convergencias.
- T es el tiempo transcurrido entre la excavación del túnel y la instalación de los dispositivos para medir las convergencias.

TABLA No. 7

MOMENTOS FLEXIONANTES DEDUCIDOS DE LAS DEFORMACIONES MEDIDAS  
EN SECCIONES DE CONVERGENCIA DE TUNELES DE ESTACION Y SU  
COMPARACION CON LOS ANTICIPADOS POR EL ANALISIS ESTRUCTURAL

UBICACION	MOMENTOS FLEXIONANTES (ton-m/m)						VALOR MAXIMO DE LA PRESION VERTICAL DEDUCIDO DE LAS DEFORMACIONES MEDIDAS (ton/m <sup>2</sup> /m)
	C L A V E			P A R R E D			
	M <sub>CE</sub>	M <sub>CD</sub>	MCD (%) MCE	M <sub>CE</sub>	M <sub>CD</sub>	MCD (%) MCE	
Estación Auditorio Túnel Pte-Nte Cad. 12+392.96	28.14	14.81	50.4	-14.02	- 6.11	43.6	8.70
Estación Auditorio Túnel Pte-Nte Cad. 12+400.61	28.14	16.81	59.8	-14.02	-10.00	71.3	12.13
Estación Auditorio Túnel Pte-Nte Cad. 12+422.00	28.14	17.64	62.7	-14.02	-15.46	110.2	16.00
Estación Tacubaya Túnel Pte-Sur Cad. 15+435.09	28.14	10.53	37.4	-14.02	-10.77	76.8	10.57
Estación Tacubaya Túnel Pte-Sur Cad. 15+452.12	28.14	10.76	38.2	-14.02	-22.70	161.9	-
Estación Tacubaya Túnel Pte-Nte Cad. 16+571.15	28.14	21.58	76.7	-14.02	-28.02	199.9	-

MCE = Momento flexionante calculado del análisis estructural del túnel.

MCD = Momento flexionante calculado con base en las deformaciones medidas.

T A B L A No. 8

ESTIMACION DE LA PRESION VERTICAL ACTUANTE EN LA CLAVE DE TUNELES DE TRAMO  
CON BASE EN LAS DEFORMACIONES REGISTRADAS CON EXTENSOMETROS Y NIVELACIONES

UBICACION	DEFORMACIONES VERTICALES EN LA CLAVE (cm)		$\frac{S_r}{S_t}$ (%)	VALOR ESTIMADO DE LA PRESION VERTICAL (ton/m <sup>2</sup> /m)
	DEFORMACION TEORICA $S_t$	DEFORMACION REGISTRADA $S_r$		
Estación San Joaquín Cad. 10+211	3.483	1.69	48.52	3.45
Estación San Joaquín Cad. 10+261	3.483	1.40	42.49	3.07
San Joaquín-Polanco Cad. 10+331	3.483	1.62	46.51	3.30
San Joaquín-Polanco Cad. 10+873.83	3.483	1.10	31.58	2.24
San Joaquín-Polanco Cad. 11+421.15	3.483	0.70	20.10	1.43
Polanco-Auditorio Cad. 11+620	3.483	1.23	35.31	2.51
Auditorio-Constituyentes Cad. 12+573	3.483	1.54	44.21	3.14
Auditorio-Constituyentes Cad. 13+044	3.483	1.24	35.60	2.53
Estación Tacubaya Cad. 15+460	3.483	0.99	28.42	2.02

## Referencias.

- 1.- Método simplificado para el análisis de estabilidad de grandes excavaciones subterráneas  
Ing. Arturo A. Bello Maldonado
- 2.- The Art of Tunnelling  
R. Schechy
- 3.- Informe preliminar sobre la construcción de la Línea 7 Norte y Centro.  
Constructora Metro, S. A. de C. V.
- 4.- Conclusiones sobre el comportamiento de deformación medido - en túneles semiprofundos, excavados en los suelos firmes de la Ciudad de México, para la Línea 7 del Metro de la Ciudad de México.  
GEOSISTEMAS, S. A. de C. V.