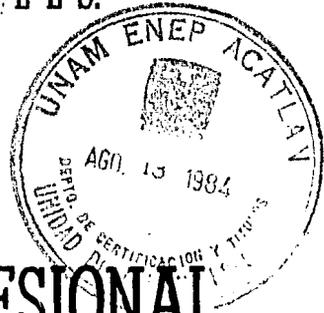




# Universidad Nacional Autónoma de México

Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán

## INSTRUMENTACION EN TUNELES.



## TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
P r e s e n t a

**FERNANDO GARCIA VALTIERRA**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

# I N D I C E

## INSTRUMENTACION EN TUNELES

### INTRODUCCION

### CAPITULO I

GENERALIDADES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE TUNELES		PAG.
I.1	Influencia de la excavación en las formaciones interesadas	2
I.2	Interacción formación - estructura	4
I.3	Planteamientos teóricos para la valuación de presiones sobre los sistemas de soporte en túneles	6

### CAPITULO II

#### OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACION

II.1	Generalidades	22
II.2	Objetivos específicos de la instrumentación en túneles	23
II.2.1	Determinación de las propiedades del macizo rocoso	23
II.2.2	Medidas de control de seguridad	24
II.2.3	Eficiencia de sistemas específicos de soporte	25
II.2.4	Comparación del comportamiento real con predicciones teóricas	25
II.3	Funciones de tipo legal	26

### CAPITULO III

PLANEACION DE LA INSTRUMENTACION		PAG.
III.1	Generalidades	28
III.2	Proceso de planeación	30
III.2.1	Definición del proyecto	30
III.2.2	Beneficios del programa de instrumentación	31
III.2.3	Costo del programa de instrumentación	32
III.2.4	Selección de parámetros a medir	34
III.2.5	Localización de estaciones de instrumentación	35
III.2.6	Tiempo y frecuencia de las mediciones	36

### CAPITULO IV

SISTEMAS DE INSTRUMENTACION, INSTRUMENTOS E INSTALACION		
IV.1	Generalidades	39
IV.2	Sistemas de instrumentación	39
IV.3	Características de los instrumentos	41
IV.4	Calibración de los instrumentos	42
IV.5	Selección de instrumentos	43
IV.6	Instalación de instrumentos	45
IV.7	Sistemas de instrumentación más comúnmente usados en túneles	47
IV.7.1	Medición del estado de esfuerzos inherentes en la roca	47
IV.7.2	Determinación del módulo de deformación "in situ"	52
IV.7.3	Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante "in situ"	60
IV.7.4	Medición de desplazamientos	64

IV.7.5	Medición de presiones hidráulicas	80
IV.7.6	Medición de presiones sobre los sistemas de soporte	84
IV.8	Estaciones de medición tipo	89

## CAPITULO V

### PROCESAMIENTO DE DATOS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

V.1	Generalidades	96
V.2	Resultados de la medición del estado de esfuerzos inherentes en la roca	98
V.3	Resultados de la medición del módulo de deformación	105
V.4	Resultados de la medición de la resistencia al esfuerzo cortante	110
V.5	Resultados de la nivelación topográfica superficial	111
V.6	Resultados de la medición de desplazamientos con extensómetros	111
V.7	Resultados de la medición de desplazamientos con inclinómetros	114
V.8	Resultados de la medición de desplazamientos con extensómetros de cinta invar	119
V.9	Resultados de la medición de presiones hidráulicas	120
V.10	Resultados de la medición de presiones sobre los sistemas de soporte	123
V.11	Presentación del informe del programa de instrumentación	125

CONCLUSIONES	128
--------------	-----

BIBLIOGRAFIA	132
--------------	-----

## INTRODUCCION

El diseño de cavidades subterráneas, como lo son los túneles, en suelos o en roca, hasta hace poco estaba basado únicamente en la experiencia adquirida por los proyectistas y constructores de este tipo de obras. Sin embargo el aumento en la demanda de la construcción de túneles y su frecuente uso en grandes proyectos en condiciones geotécnicas difíciles, hacen necesario que los métodos de análisis y diseño de este tipo de obras, estén basados en fuentes de información más realistas.

En las últimas dos décadas, han aparecido métodos de investigación de campo y técnicas de medición sistematizadas, así como nuevos métodos de cálculo que proporcionan poderosos elementos de diseño y conducen a estructuras subterráneas más seguras y económicas.

El diseño eficiente de un túnel requiere de diferentes fuentes de información. Entre las más importantes se encuentran las exploraciones geológicas los estudios de mecánica de suelos y de rocas, los métodos de cálculo y las mediciones de campo.

Mediante las exploraciones geológicas, se pretende tener una idea de las condiciones del subsuelo en que se va a excavar el túnel. En ellas se realizan también pruebas de campo y se colectan muestras del subsuelo con el objeto de determinar sus propiedades índice, hidráulicas y mecánicas, necesarias para el diseño del túnel y para la selección del método de construcción más adecuado. Mediante la aplicación de los métodos de cálculo se pre

tende conocer la posible redistribución de esfuerzos y deformaciones alrededor del túnel y la valuación del flujo de agua hacia su interior, con el propósito de predecir su comportamiento y así proceder al diseño de los -- sistemas de soporte. Sin embargo toda esta información esta sujeta a grandes incertidumbres y por lo tanto requiere de observaciones y mediciones - realizados directamente en el campo.

La aplicación de un programa de instrumentación en túneles, permite no solamente verificar y retroalimentar los métodos de diseño, sino que también permite controlar la seguridad y la economía durante su construcción y operación, por medio de mediciones directas de campo que nos proporcionen un panorama más realista de su comportamiento.

En este trabajo se describe la necesidad y la importancia que tiene la aplicación de un programa de instrumentación en túneles, así como, su planeación, ejecución y los sistemas de instrumentación más comúnmente empleados en este tipo de obras de la ingeniería civil.

## C A P I T U L O I

### GENERALIDADES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE TUNELES

- I.1 Influencia de la excavación en las formaciones interesadas
- I.2 Interacción formación - estructura
- I.3 Planteamientos teóricos para la valuación de presiones sobre los sistemas de soporte en túneles

### 1.1 Influencia de la excavación en las formaciones interesadas.

En la naturaleza las formaciones geológicas están sujetas a fuerzas gravitacionales (a su propio peso y al peso de las masas sobreyacentes) y a influencias tectónicas; como consecuencia en su interior se desarrollan esfuerzos y deformaciones que se producen entre las partículas individuales constituyentes. Sin embargo, mientras la roca o un suelo duro estén confinados, no podrán producirse los desplazamientos intergranulares necesarios para que se desarrollen los estados de deformación correspondientes a los esfuerzos actuantes, por lo que estos se acumulan o almacenan en el material pudiendo llegar a valores muy por encima de los límites de fluencia.

La excavación de un túnel cambia las condiciones de esfuerzo en el medio original y crea un espacio vacío hacia el que se posibilitan los desplazamientos. Estos desplazamientos pueden ocurrir en forma de flujos plásticos, o inclusive de explosiones en los que fragmentos de roca o de suelo duro pueden salir proyectados violentamente; sólo si los esfuerzos residuales no han sobrepasado el límite elástico del material ocurrirán desplazamientos en el rango elástico. Los cambios que tengan lugar pueden ocurrir en forma continua o por etapas, hasta que llegue a alcanzarse una condición final en la masa, ya relativamente invariable, que puede considerarse como de equilibrio definitivo. En el frente de excavación los estados de esfuerzo son tridimensionales, pero suelen considerarse bidimensionales para propósitos de análisis

y diseño. Los cambios de estados de esfuerzos que produce la excavación no pueden ocurrir sin deformación en el medio; cuando hay revestimientos, éstos se deforman también. Los procesos de deformación resultantes se estabilizan con el tiempo, de manera que este último viene a representar una variable en el proceso.

Por otra parte, la excavación de un túnel a través de formaciones geológicas que almacenan agua, induce un cambio de presiones hidráulicas que genera un flujo de agua hacia la excavación. Esto es debido a que el túnel representa siempre una zona a la presión atmosférica y por lo tanto el agua tenderá a fluir hacia su interior. La adaptación de las presiones de agua en suelos de permeabilidad relativamente baja, a los nuevos estados de esfuerzos, de ninguna manera es instantánea, por lo que el tiempo influye otra vez a través de los mecanismos de evolución de las presiones de poro.

La excavación del túnel produce cambios radicales en las condiciones hidráulicas del subsuelo; estos pueden ser temporales o definitivos, según sea la permeabilidad de la estructura. Un túnel generalmente produce abatimiento del nivel freático vecino a él y ello hace aumentar los esfuerzos efectivos en la masa de suelo y los pesos de esa masa, de donde resultan asentamientos no reversibles. Si el revestimiento del túnel es impermeable o se toman precauciones para restaurar el contenido de agua y la condición de la misma en el suelo, el nivel freático se recuperará al cabo de un tiempo; en caso contrario el túnel será un dren permanente.

Por último la excavación del túnel no solo cambia los estados de esfuerzos en el interior del medio, sino que muchas veces cambia al propio medio; por ejemplo el empleo de explosivos suele reducir la resistencia de rocas y suelos duros en torno a la excavación y otros métodos de excavación, tales como escudos, producen remoldeos en los suelos vecinos.

## I.2 Interacción formación - estructura.

El sistema de soporte de un túnel y la roca circundante forman una unidad que constituye la verdadera estructura en túneles. En la práctica, el comportamiento de esta estructura a menudo se asocia a las variaciones de la presión interna en la masa de roca. La magnitud, la distribución y la variación con el tiempo de la presión de roca son indicadores importantes de los problemas que se pueden presentar durante la construcción de túneles. Sin embargo, las deformaciones de la sección del túnel y los desplazamientos de la masa de roca, así como sus variaciones en función del tiempo, son también útiles y en muchos casos prácticamente constituyen los únicos índices del comportamiento de la estructura.

La presión del suelo sobre el revestimiento de un túnel de una geometría dada, depende no solo de las propiedades de la masa rocosa y del estado original de esfuerzos efectivos y presiones del agua subterránea, sino también, del tipo de revestimiento, de su rigidez y del momento de su instalación. Dependiendo de la rigidez general del reves-

timiento y de su real o aparente movimiento relativo al de la masa rocosa, pueden ocurrir los siguientes tipos de presión del suelo:

- a) Resistencia pasiva del suelo, que puede exceder varias veces el campo original de esfuerzos efectivos, es desarrollada sólo si el túnel es forzado a expandirse, ya sea debido al revestimiento y a la presión de las inyecciones, como en el caso de conductos a presión, o bien a la presión generada sobre un revestimiento rígido por una masa expansiva.
- b) Presión total de estabilización, que es del orden de magnitud de los esfuerzos efectivos, ocurre si no se permite movimiento alguno de la roca durante la construcción o después. En la práctica esta condición se presenta rara vez, aunque el método constructivo mediante aire comprimido usado algunas veces en suelos arcillosos, asemeja dicho estado de presión.
- c) Presión de estabilidad parcial o verdadera presión de suelo, que es menor que el campo de esfuerzos efectivos, y ocurre si, bajo un campo de esfuerzos relativamente alto, se permite de manera limitada el desplazamiento del macizo rocoso hacia el túnel. Esta presión corresponde al estado de empujes activos de la mecánica de suelos.
- d) Carga de roca sobre los soportes del techo, es una presión local sobre el techo del túnel debido a la estabilización de la masa rocosa aflojada que tiende a deslizarse por gravedad hacia el túnel.

La magnitud de la presión resulta casi proporcional al área de la cuña desprendida.

Debe notarse que los dos últimos tipos de presión del suelo son aditivos; su importancia relativa depende de la relación entre la magnitud del campo de esfuerzos y la resistencia del macizo rocoso. Si tal relación es alta, lo cual sucede en el caso de túneles profundo en una roca relativamente débil la verdadera presión del suelo será determinante en el diseño del revestimiento. En el caso contrario, por ejemplo para un túnel poco profundo en una roca competente, solo la carga de roca sobre el soporte del techo puede ser importante.

### I.3 Planteamientos teóricos para la valuación de presiones sobre los sistemas de soporte en túneles.

Como ya se expuso anteriormente con la excavación de un túnel, cualquiera que sea su sección geométrica, se altera el estado de esfuerzo del subsuelo, por lo que en la mayoría de los casos será necesario colocar un revestimiento que impida que en dicha excavación se tengan desplazamientos no deseables.

De acuerdo con el tipo de suelo, este revestimiento generalmente se coloca en dos etapas; en la primera, el revestimiento será provisional y estará actuando en forma temporal y usualmente corresponde al período de construcción; en la segunda, el revestimiento definitivo se coloca sobre el primero, reforzándolo. Se considera que ambos re-

vestimientos estarán prácticamente sujetos a la carga que a largo plazo se presentará sobre dicha cavidad. Al revestimiento de la primera etapa se le conoce como "revestimiento primario" y al de la segunda etapa se le conoce como "revestimiento definitivo". En suelos de mayor resistencia o muy compactos, es posible instalar un solo revestimiento que soporte tanto las cargas durante el período de construcción como las cargas a largo plazo.

La carga con la que se diseña la estructura primaria o provisional de un túnel y la estructura secundaria o definitiva, depende principalmente de las propiedades mecánicas del suelo donde se hace la excavación, de su relación esfuerzo-deformación-tiempo y de la geometría del túnel.

No es sencillo definir la magnitud y distribución de las cargas con las que se diseña el revestimiento de túneles excavados en suelos firmes o duros, principalmente debido a que existen varios criterios, basados la mayoría de ellos en el fenómeno de arqueo, el cual es considerado en forma diferente para cada criterio de análisis y conduce a resultados diversos. Por otra parte, el comportamiento del sistema suelo-revestimiento no está completamente resuelto.

Esta situación hace que el ingeniero que se enfrenta a este problema tienda a sobrestimar la presión sobre el revestimiento, por lo que siempre es importante llevar a cabo un programa de instrumentación como una herramienta útil para confirmar o revisar los valores conside-

rados en el proyecto.

A continuación se hace una breve referencia sobre algunos de los métodos más comunes para la determinación de la carga que actúa sobre el revestimiento de túneles.

1. Método basado en la aplicación de las teorías de la mecánica del medio continuo.

Dichas teorías son de la elasticidad o de la plasticidad, la primera permite plantear con relativa sencillez los estados de esfuerzos en torno a una galería circular perforada en un medio continuo elástico. Para su aplicación se establece un módulo de deformación ( $E$ ) y un módulo de Poisson ( $\nu$ ). Con esta teoría se determina la distribución de esfuerzos radiales y tangenciales, así como las deformaciones producidas por dichos esfuerzos a cualquier distancia del centro del túnel. Sin embargo, las soluciones elásticas pueden usarse muy rara vez en la práctica, debido a que ni los suelos ni las rocas son materiales homogéneos, isotrópicos y linealmente elásticos.

La teoría de la plasticidad resulta más aplicable debido a que existen muchos casos en que la presión del subsuelo alrededor del túnel es tal que se produce la falla en una serie de zonas localizadas, de manera que puede llegar a formarse en torno a la galería una zona plástica limitada en estado de deformación contenida.

Sin embargo, las soluciones matemáticas basadas en la teoría de la plasticidad son más complicadas que las que se manejan en la teoría de la elasticidad y por esta razón es aún mayor el número de hipótesis simplificadoras que han de hacerse. En los análisis plásticos suele establecerse  $\sigma_z = \sigma_x (K_0 = 1)$ ; se desprecia el peso de los materiales extraídos de la galería y se acepta que el esfuerzo normal en la dirección del eje del túnel es principal. Como condiciones de fluencia se utiliza la de Tresca para materiales puramente cohesivos ( $\phi = 0$ ) o la de Coulomb para materiales cohesivos friccionantes, ( $C \neq 0$  y  $\phi \neq 0$ ). Con la aplicación de esta teoría se determina también el estado de esfuerzos radiales y tangenciales producidas alrededor del túnel y a una distancia cualquiera de su centro.

## 2. Método de Bierbaumer.

Este método fue desarrollado para túneles en roca y considera una carga parabólica sobre éstos como se muestra en la Fig. 1.1. El desarrollo matemático de la teoría tiene por objeto establecer el valor de  $\alpha$  a utilizar en cada caso.

La altura de la parábola se define considerando el equilibrio de una cuña que desliza hacia la cavidad como se indica en la Fig.

I.2. De esta manera la presión vertical queda definida por la siguiente expresión:

$$P = \alpha \rho H$$

Donde  $\alpha$  es un factor que depende del ángulo de fricción interna - del material, de la geometría del túnel y de la profundidad a la que se encuentra la clave del mismo.

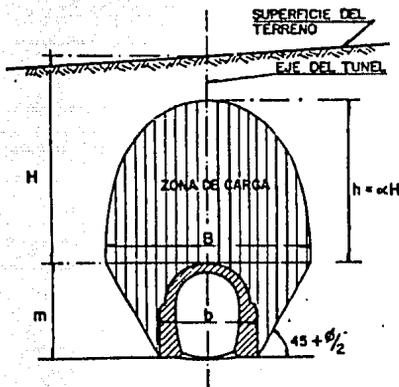


Fig. I.1 Criterio de Bierbäumer

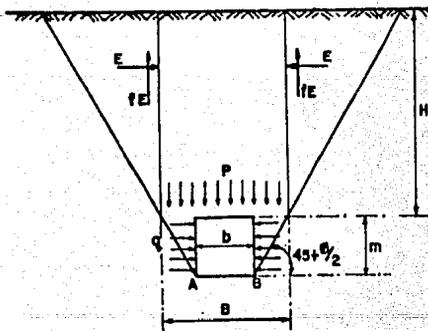


Fig. I.2 Diagrama operacional de fuerzas del criterio de Bierbäumer

### 3. Método de Protodyakonov.

Este método fue desarrollado también para suelos granulares y está basado en que el fenómeno de arqueado por encima del túnel tiene la forma de una bóveda parabólica como se indica en la Fig. 1.3, cuyo equilibrio se logra cuando los esfuerzos a lo largo de la -- frontera son exclusivamente de compresión. Las expresiones para -- el cálculo de las cargas verticales que actúan sobre el túnel tam -- bién se muestra en la Fig. 1.3. Para este caso la presión verti -- cal es independiente de la profundidad del túnel y depende única -- mente de la geometría del mismo y de las propiedades mecánicas -- del material. Es importante señalar que este criterio no toma en -- cuenta el nivel de esfuerzos a la profundidad del túnel.

### 4. Método de Terzaghi.

Este método se realiza analizando el equilibrio de una cuña de ar -- queo como la que se indica en la Fig. 1.4 y encuentra que para -- suelos cohesivos-friccionantes, la presión sobre la clave del tú -- nel es:

$$P_V = \frac{B}{2} \left( \frac{\gamma - \frac{2c}{B}}{K \operatorname{Tg} \phi} \right) \left( 1 - e^{-K \operatorname{Tg} \phi \frac{2H}{B}} \right)$$

La presión en este caso, es función de la geometría del túnel de las propiedades mecánicas del material en la zona de arqueado y de la profundidad a la cual se encuentra el túnel.



## 5. Método de Roguinsky.

Este método, de bases mecanicistas, considera la generación de un arco en la masa de roca, que trabajando a compresión, es el que soporta las presiones que se inducen alrededor de la excavación. El material que se encuentra por debajo de este arco se afloja y deberá ser soportado mediante anclas o por cualquier otro elemento exterior que se coloque en la excavación con ese propósito. Fig. 1.5. La posición del arco de carga depende fundamentalmente de la geometría de la excavación y, en cierto grado, de las características de resistencia al esfuerzo cortante de la roca en que se forma, ya que en general, la fuerza de reacción en los apoyos no debe ser más inclinada que el ángulo de fricción de la roca. Una vez definida la posición de la parte inferior del arco de carga, su espesor puede definirse mediante la siguiente ecuación de equilibrio entre las presiones actuantes y la resistencia a compresión en el material que forma el arco:

$$\frac{P_v \cdot L_0^2}{8 \cdot f_0} = \frac{q_u}{FS} \cdot h$$

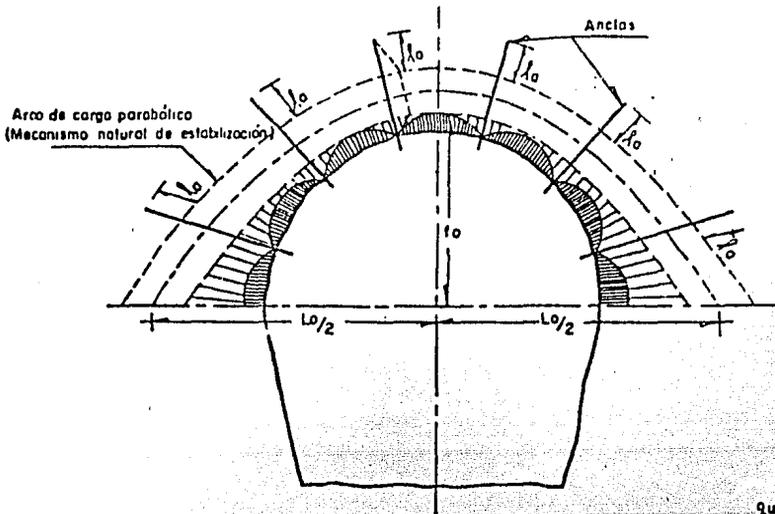
$P_v$ : Presión vertical actuante en el arco

$L_0$ : Abertura del arco

$f_0$ : Flecha del arco

$q_u$ : Resistencia a compresión de la roca.

$FS$ : Factor de seguridad



$q_u$ : Resistencia a la compresión simple  
F.S. Factor de seguridad

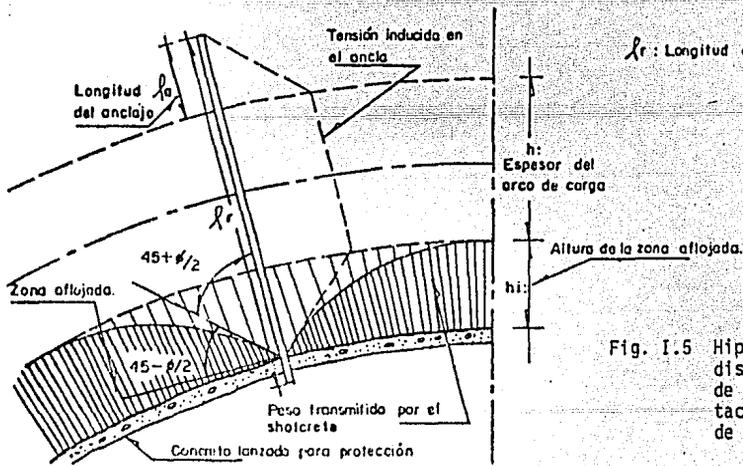
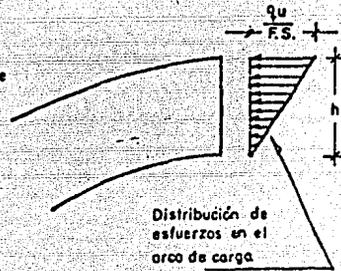
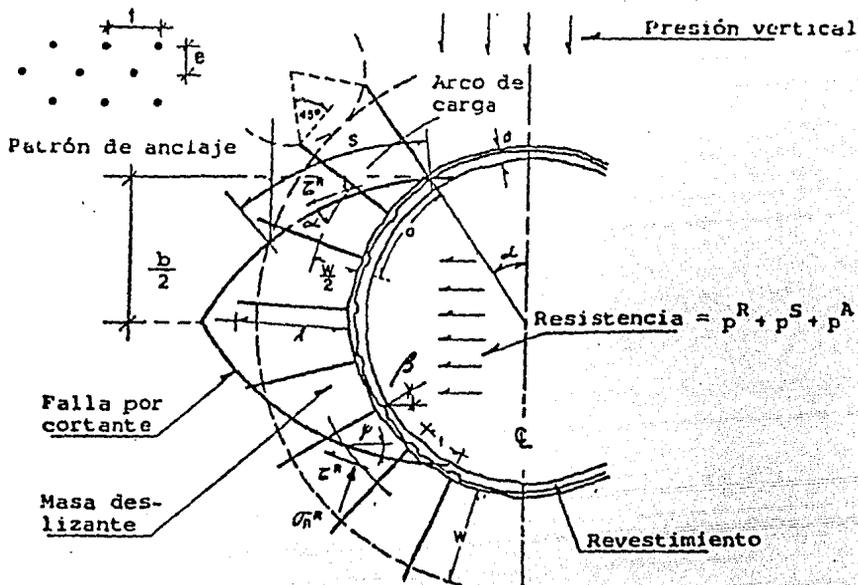


Fig. I.5 Hipótesis para el diseño de patrones de anclaje. (Adaptación del método de Roguinsky)

En la ecuación anterior esta implícito que la distribución de esfuerzos de compresión en el arco es lineal, variando de cero en la parte inferior a un máximo en la parte superior, el cual no debe exceder la resistencia a la compresión de la roca y debe incluir un factor de seguridad adecuado. El peso de la roca aflojada bajo el arco, puede entonces valorizarse para determinar la capacidad de los elementos que habrán de soportarlo y que normalmente pueden ser anclas, aunque su función primordial es facilitar el trabajo de conjunto de la roca en que se genera el arco de carga como mecanismo natural de soporte.

#### 6. Método de Rabcewicz.

Este método, de bases semiempíricas, ha sido establecido con bases en los modos de falla observados en túneles donde el sistema de soporte fue constituido por anclas inyectadas y una capa de concreto lanzado en el perímetro de la excavación. El método considera la ocurrencia de fallas por esfuerzos cortantes en la masa rocosa a lo largo de superficies simétricas que obligan a participar en la falla a cualquier otro elemento colocado para el soporte de la excavación, como se muestra en la Fig. 1.6. La resistencia total del sistema se traduce en una presión resistente horizontal, definida por la capacidad de la roca y de los elementos colocados en el ademe, esta resistencia se relaciona con una presión vertical de acuerdo con los resultados establecidos en mode-



$$p^S = \frac{d \cdot Z_c}{\text{sen} \alpha (b/2)}$$

$$p^A = \frac{A_s \cdot f_s}{e \cdot t} \cdot \frac{a \cos \beta}{(b/2)}$$

$$p^R = \frac{S \cdot c^R \cos \psi}{b/2} - \frac{S \sigma_n^R \text{sen} \psi}{b/2}$$

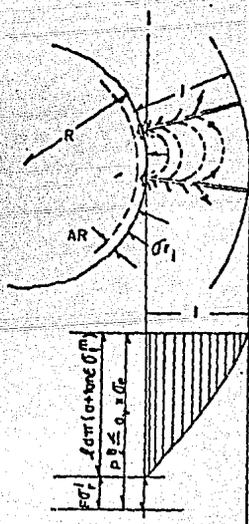


Fig. 1.6 Esquema del funcionamiento de interacción entre la roca, las anclas y el revestimiento, propuesto por Rabcewicz.

los a escala reducida, en función de la relación entre el espesor del ademe y las dimensiones de la excavación y del radio de curvatura de ésta. La determinación de las presiones resistentes, generadas por la roca y cada elemento colocado para el soporte de la excavación, se indica en la Fig. I.6; en la misma figura se muestra la distribución considerada de los esfuerzos inducidos en el ancla, que de acuerdo con este procedimiento, son tales que inducen una tensión creciente desde la pared de la excavación hacia la masa de roca, es decir, los esfuerzos de fricción actuantes en el perimetro del ancla tienen la misma dirección a todo lo largo de ella.

#### 7. Método de Arturo Bello.

Este método intenta explicar analíticamente el mecanismo natural de estabilidad, que permite realizar una excavación subterránea en cualquier masa de suelo o roca sin ningún sistema de soporte.

El método está basado también en el concepto de arqueado de la masa del subsuelo alrededor de una excavación subterránea y haciendo uso del principio de trabajo de deformación mínimo. Como resultado del desarrollo del modelo matemático para este método, se concluye que el mecanismo natural de estabilidad, es un arco parabólico cuyas dimensiones dependen de las propiedades mecánicas del subsuelo y de las dimensiones y geometría general de la excavación proyectada.

Este método ha sido aplicado y comprobado con buena aproximación mediante la aplicación de programas de instrumentación.

#### 8. Métodos Empíricos.

Estos métodos están basados en la experiencia que se ha obtenido en túneles construidos en muchos lugares del mundo, en diferentes tipos de suelos y rocas, con diferentes geometrías y profundidades, y de acuerdo con la experiencia que se ha tenido a lo largo de los años, recomiendan el valor de la presión vertical de diseño, o el tipo de revestimiento requerido.

#### 9. Carga Total

Cuando la zona de arqueo intersecta la superficie del terreno el valor de la carga que actúa sobre el revestimiento es igual a la carga total del material que quede sobre la clave de la excavación.

#### 10. Modelo Reológico.

Un procedimiento más refinado consiste en idealizar al suelo que rodea al revestimiento en un conjunto de resortes o barras que representan la rigidez del suelo con objeto de considerar la interacción suelo-estructura. La aplicación de este modelo permite co-

nocer los elementos mecánicos en la estructura, definidos a partir de la aplicación de las cargas verticales y horizontales actuantes.

#### 11. Elemento Finito.

Un procedimiento que toma en cuenta con mayor precisión la variación de las propiedades mecánicas del suelo que rodea al túnel y la deformabilidad del conjunto suelo-revestimiento, es el de aplicar la teoría del elemento finito para obtener los esfuerzos y deformaciones del revestimiento y lograr un diseño más preciso del mismo.

#### 12. Presiones Horizontales.

La presión horizontal de diseño generalmente se considera como una fracción de la carga vertical, dicha fracción corresponde al valor del coeficiente de empuje en reposo.

#### 13. Nivel Freático.

Los efectos de la presencia del nivel freático en el túnel deben considerarse como una carga adicional a las presiones mencionadas.

#### 14. Cargas Dinámicas.

Los efectos producidos desde la superficie por las cargas dinámicas, afectan la zona de arqueo, por lo que su presencia en caso de túneles cuya zona de arqueo esta próxima a la superficie, debe considerarse como un incremento a las cargas obtenidas con los -- criterios mencionados.

## C A P I T U L O I I

### OBJETIVOS DE LA INSTRUMENTACION

#### II.1 Generalidades

#### II.2 Objetivos específicos de la instrumentación en túneles

II.2.1 Determinación de las propiedades del macizo rocoso

II.2.2 Medidas de control de seguridad

II.2.3 Eficiencia de sistemas específicos de soporte

II.2.4 Comparación del comportamiento real con predicciones teóricas

#### II.3 Funciones de tipo legal

## II.1 GENERALIDADES

Los objetivos generales para llevar a cabo un programa de instrumentación en túneles, pueden resumirse en los dos puntos siguientes:

1. Registrar el comportamiento que se acusa en el espacio afectado por la excavación, donde ésta induce variaciones en el estado físico del medio que lo rodea, es decir, variaciones en esfuerzo y en presiones hidráulicas e introducción de deformaciones y desplazamientos en la masa del subsuelo en que se excava el túnel y en los elementos estructurales que se utilicen para estabilizar la roquedad creada.
2. Mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de este tipo de obras de manera que se puedan mejorar o refinar, e incluso establecer procedimientos de análisis y diseño para este tipo de obras de la ingeniería.

Estos dos objetivos generales tienen su origen en el cumplimiento de los tres preceptos básicos de la ingeniería y que son: seguridad, economía y confiabilidad. Seguridad en el sentido de que no se pongan en peligro las inversiones aplicadas a la obra, la integridad de los equipos utilizados para su ejecución y, mucho menos, la vida del personal que labora en ellos. Economía, en el sentido de costos y beneficios, correspondiendo a la ingeniería estable-

cer los conceptos básicos a que deben aplicarse las erogaciones - para ejecutar la obra, con el monto requerido para realizarla, pero no más. Confiabilidad en el sentido de que la obra ejecutada - cumpla satisfactoriamente con la necesidad que le dio origen, es decir, que su función sea eficiente.

## II.2 Objetivos específicos de la instrumentación en túneles.

Resumiendo lo expuesto en el inciso anterior, el objetivo real de un programa de instrumentación en túneles consiste en la optimización - del diseño y empleo de recursos para la ejecución de la obra. En otras palabras el propósito es realizar la obra en condiciones adecuadas de seguridad y con un mínimo de costo. Sin embargo, la decisión de llevar a cabo un programa de instrumentación no garantiza que la ejecución de la obra sea segura, no obstante si es un elemento de - previsión que permite detectar situaciones de comportamientos anómalo.

Dado que el problema de optimización es muy variado, se puede considerar para fines prácticos que los objetivos específicos e inmediatos de un programa de instrumentación en túneles son los que se describen a continuación:

### II.2.1 Determinación de las propiedades del macizo rocoso.

Las propiedades mecánicas del macizo rocoso se determinan haciendo ensayos "in situ" de preferencia previos a la construc

ción del túnel.

Dependiendo de lo que se quiera medir, dichos ensayos se pueden llevar a cabo con aparatos controlados desde la superficie del terreno o dentro de galerías de inspección o túneles piloto.

Los ensayos "in situ" se pueden realizar a pequeña escala o a escala real. Los primeros son los que se realizan en perforaciones desde la superficie del terreno o en las paredes de galerías o túneles piloto. Los segundos se realizan a sección completa en galerías.

La determinación de las propiedades mecánicas del macizo rocoso son importantes para poder predecir el comportamiento del túnel y diseñar los sistemas de soporte y el revestimiento definitivo del mismo. Esta información también es útil para planear las etapas siguientes de instrumentación.

#### II.2.2 Medidas de control de seguridad.

Como se expuso en el capítulo anterior, con la excavación de un túnel, se altera el estado original de esfuerzos en las formaciones geológicas que lo circundan y se posibilitan los desplazamientos hacia la excavación.

Mediante un programa de instrumentación, se puede llevar un control del desarrollo de los nuevos estados de esfuerzo en la formación geológica y de los desplazamientos hacia la excavación, con el propósito de asegurar la estabilidad de la obra, o en caso contrario, de tomar las medidas preventivas de seguridad necesarias durante la construcción y operación del túnel.

### II.2.3 Eficiencia de sistemas específicos de soporte.

Una vez que se ha instalado un sistema específico de soporte, será necesario comprobar si está trabajando eficientemente, si necesita ser reforzado o si resulta demasiado sobrado.

Mediante un programa de instrumentación se puede determinar la magnitud y distribución de presiones sobre los sistemas de soporte, con el propósito de saber por un lado el momento en que dichas presiones han igualado a las presiones de diseño y así proceder a reforzar los sistemas de soporte ya instalados y por otro aumentar la información y conocimiento del problema para futuras soluciones.

### II.2.4 Comparación del comportamiento real con predicciones teóricas

Como se expuso en el capítulo anterior, existen una gran cantidad de teorías destinadas a predecir el comportamiento de

los túneles bajo ciertas condiciones. Sin embargo, todas ellas están basadas a su vez en teorías e idealizaciones que no son aplicables a la formación geológica en que se excava un túnel. Por consiguiente los resultados que se obtienen por medio de predicciones teóricas son muy diferentes a los que se obtienen en la realidad.

Mediante un programa de instrumentación se puede hacer un análisis comparativo entre el comportamiento esperado y el comportamiento real del túnel, con el propósito de retroalimentar las teorías desarrolladas y en su caso mejorar o refinar los procedimientos de análisis y diseño para este tipo de obras.

### II.3 Funciones de tipo legal.

Sin ser el interés de su aplicación, la instrumentación también puede ser utilizada en procedimientos legales. Esto se hace por medio de documentos en donde se muestren los resultados de asentamientos actuales, deformaciones y desplazamientos de calles, edificios y otras construcciones, los cuales son material de referencia, de valor aclaratorio durante los procedimientos de tipo legal. Debe hacerse notar que las funciones de tipo legal implica únicamente la obtención de material de referencia de valor aclaratorio y no debe ser recurso para "acusar" a alguien de sus posibles errores o anomalías.

## C A P I T U L O   I I I

### PLANEACION DE LA INSTRUMENTACION

#### III.1 Generalidades

#### III.2 Proceso de planeación

III.2.1 Definición del proyecto

III.2.2 Beneficios del programa de instrumentación

III.2.3 Costo del programa de instrumentación

III.2.4 Selección de parámetros a medir

III.2.5 Localización de estaciones de instrumentación

III.2.6 Tiempo y frecuencia de las mediciones

### III.1 Generalidades.

Como en todo proyecto de ingeniería, el programa de instrumentación aplicado a la construcción de túneles debe ser cuidadosamente planeado con el propósito de obtener el máximo beneficio y condiciones adecuadas de prevención y seguridad a un costo razonable.

El programa de instrumentación por sí solo no mejorará la economía, seguridad o la influencia que el túnel tenga en el medio, pero si es adecuadamente planeado, en conjunción con las etapas de investigación geológica previa y de diseño, los beneficios exceden por mucho los costos.

Dentro de la planeación del programa de instrumentación, se distinguen las siguientes etapas:

#### 1. Instrumentación previa a la construcción del túnel.

Esta etapa del programa de instrumentación se lleva a cabo simultáneamente con el estudio geológico previo a la construcción. El propósito de esta etapa es el de obtener por medio de ensayos "in situ" el orden de magnitud de los esfuerzos preexistentes en la formación geológica y las características de deformabilidad y resistencia al esfuerzo cortante de los materiales de la misma. Con esta información y la obtenida en el estudio geológico previo, se tendrán los datos necesarios para el diseño y construcción del tú

nel. Esta información también será útil para la planeación del programa de instrumentación durante la construcción del túnel.

## 2. Instrumentación durante la construcción y operación del túnel.

El propósito de esta etapa del programa de instrumentación es el de obtener información de los parámetros que nos definen el comportamiento del túnel durante y después de la excavación. Con esta información es posible mantener un nivel de seguridad durante esta etapa de construcción del túnel.

Los aparatos de medición, la medición misma de un parámetro, o algún paso en el proceso de medición, no puede ser utilizado en forma individual. Para que la instalación de aparatos de medición resulte provechosa en la construcción de un túnel, deberá ser coherente y con un propósito y realizarse durante un período adecuado. Para obtener el máximo beneficio de la instrumentación, los aparatos deben ser leídos y procesadas las lecturas según un plan, en otras palabras, debe diseñarse previamente el sistema completo de medición comenzando con la decisión inicial de considerar a la instrumentación como una herramienta de la construcción y de la investigación, para posteriormente incluir los resultados de la interpretación de los datos de medición a las adaptaciones necesarias en los procesos y diseños originales.

### III.2 Proceso de planeación.

La planeación de un programa de instrumentación es un proceso sistemático y por lo tanto una falla en cualquiera de sus etapas ocasionará que no se logren los objetivos para el cual fue planeado. A continuación se describirán las etapas de planeación que en general recomiendan diversos especialistas en instrumentación en túneles.

#### III.2.1 Definición del proyecto.

En esta etapa de planeación se procederá a coleccionar, revisar y sintetizar datos sobre el proyecto. Algunos de estos datos son los siguientes: tipo de proyecto y geometría de la excavación; condiciones de las formaciones geológicas y del agua subterránea, estratigrafía y propiedades de los materiales; condiciones ambientales y métodos de construcción.

En esta etapa también se debe hacer, sobre las bases de la experiencia un avalúo general de la forma de comportamiento del medio y mecanismos probables y potenciales de fallas. En el proyecto de túneles los problemas pueden ser: estabilidad temporal en el frente de trabajo; estabilidad de las paredes del túnel y sus sistemas de soporte; influencia del túnel en estructuras vecinas; estabilidad de los taludes en los portales.

Otro aspecto importante en esta etapa de planeación consiste en valorar las condiciones normales y aceptables del comportamiento del medio. Lo anterior se hace con los siguientes propósitos; (1) determinar los niveles de advertencia de peligro; (2) determinar un rango de medición para la selección de instrumentos.

### III.2.2 Beneficios del programa de instrumentación.

En esta etapa de planeación se deberán analizar y evaluar los beneficios directos o indirectos que se obtendrán de la realización del programa de instrumentación.

En la construcción de túneles, los beneficios pueden ser los siguientes:

1. Reducción de los costos de construcción, por medio de la eliminación o reducción de riesgos de varias clases, por ejemplo, demoras en la construcción debido a flujos de agua imprevistos, o eliminación de ciertas medidas de protección tales como sobre-reforzamiento, etc.
2. Reducción de los efectos ambientales, por ejemplo, para diagnosticar las causas de asentamientos excesivos y de esta forma instituir medidas de remedio.

3. Incremento de las condiciones de seguridad de los trabajadores del túnel, permitiendo por ejemplo, la predicción de la inestabilidad del frente de excavación debido al in flujo de agua.
4. Verificación de las idealizaciones en el diseño estructural, por medio de la medición de esfuerzos y deformaciones de la estructura temporal o definitiva para propósitos de seguridad y durabilidad.
5. Obtención de documentos que nos proporcionen datos apropiados sobre grandes movimientos y movimientos de construcciones adyacentes para propósitos legales.
6. Control en la ejecución del contratista para asegurar un producto final aceptable y para verificar que cumpla con las especificaciones.
7. Desarrollo en el "estado del arte" del diseño de túneles y para que los procedimientos de tuneleo solo puedan ser desarrollados sobre las bases de la observación del comportamiento.

### III.2.3 Costo del programa de instrumentación.

La instrumentación por sí misma no es fácil de justificar --

desde el punto de vista económico. Sin embargo, cuando el costo de mediciones de campo queda justificado por las necesidades específicas en un proyecto, el avance que se logra en los conocimientos ingenieriles es a menudo una ganancia no prevista, lo cual no debe perderse nunca de vista.

El costo de la instrumentación en túneles, generalmente involucra tres aspectos:

- a) El costo de los aparatos.
- b) El costo de la calibración e instalación de los instrumentos.
- c) El costo de operación, mantenimiento y procesamiento de los datos.

A veces se puede economizar al usar una instalación para más de una finalidad, sin embargo, al planear una instalación no hay que pretender demasiado: un programa elaborado no es necesariamente el más recomendable. Por otra parte, resulta absolutamente necesario evaluar cuál puede ser el efecto que acarrea la pérdida de instrumentos clave que son irremplazables, en el éxito global del proyecto.

Generalmente el costo de los aparatos es mínimo mientras que

el costo de tomar lecturas y evaluar los datos sobre todo a largo plazo es con mucho el más alto, por lo que cualquier cosa que se haga para proteger y garantizar la confiabilidad de la información captada por los instrumentos se justifica plenamente, ya que a veces no pueden repararse ni reemplazarse una vez instalados. También vale la pena cualquier simplificación en los procedimientos de lectura e interpretación de resultados.

#### III.2.4 Selección de parámetros a medir.

La selección de parámetros a medir, depende del proyecto del túnel, de las propiedades del subsuelo, de los problemas que se anticipan en su comportamiento y de los objetivos particulares del programa de instrumentación. En general, los parámetros que pueden ser medidos son los siguientes:

##### 1. Previos a la construcción del túnel.

- Esfuerzos inherentes en la roca
- Módulo de deformación
- Resistencia al esfuerzo cortante
- Presión de poro y nivel del agua subterránea

##### 2. Durante la construcción y vida útil del túnel.

- Asentamientos o expansiones (superficiales o subsuperficiales).
- Desplazamientos horizontales (superficiales o subsuperficiales).
- Desplazamientos relativos (deformaciones, convergencias, asentamientos diferenciales, distorsión lineal).
- Presión, flujo y cambios del agua en la zona del túnel.
- Presión de suelo o de roca sobre el revestimiento (temporal o definitivo).
- Fuerzas en sistemas de anclaje.

### III.2.5 Localización de estaciones de instrumentación.

En general, el criterio que se sigue para decidir donde se debe de instalar una estación de instrumentación, depende -- del túnel y de las propiedades del subsuelo. Es decir, los -- parámetros son la variación notable de las propiedades del -- subsuelo, la geometría y la longitud del túnel y donde se -- tengan restricciones en la afectación de estructuras vecinas.

Por otra parte y dependiendo de lo que se quiera medir, los instrumentos pueden ser instalados en o desde la superficie del terreno o dentro del túnel mismo. En cuanto a la determinación de la extensión horizontal de la estación de instrumentación, se debe tomar en cuenta la zona de influencia que el túnel pueda tener en el medio.

En resumen, en esta etapa de planeación se deberán elaborar los planos de la localización exacta de cada uno de los instrumentos de que conste la estación de medición.

### III.2.6 Tiempo y frecuencia de las mediciones.

La toma de lecturas de los instrumentos instalados, debe ser sistemática y oportuna. Estas deben estar en función del avance de la obra, de las tendencias observadas en las mediciones y de la capacidad de interpretación de datos. Será necesario definir si las lecturas se harán en forma continua o si con registros periódicos será suficiente. También habrá que decidir si se necesita una respuesta instantánea o si el tiempo de respuesta no afecta a las lecturas.

De la experiencia obtenida en la observación de túneles instrumentados, se recomienda que la iniciación de toma de lecturas se programe en función de la influencia que tenga el túnel adelante del frente de excavación. Es decir, la toma de lecturas se deberá iniciar a una cierta distancia mínima antes de que el frente de excavación cruce la estación de instrumentación.

La frecuencia de las mediciones, deberá ser mayor cuando el frente de excavación se encuentre dentro de un cierto rango anterior y posterior a la estación de instrumentación y dis-

minuirá conforme se aleja de este rango.

Por último, las lecturas se deberán seguir tomando hasta que se garantice que el túnel ha alcanzado su estabilización. Es decir, hasta que ya no se tenga variación en los resultados de los parámetros medidos.

En la mayoría de los túneles instrumentados, se ha observado que su estabilidad se logra en el momento en que se colocan los sistemas de soporte. Sin embargo, existen casos de túneles que no logran su estabilización sino hasta cierto tiempo después de entrar en operación. Por lo tanto en la determinación del costo de la instrumentación, se deberá de tomar muy en cuenta el efecto que tiene el tiempo de las mediciones.

## C A P I T U L O I V

### SISTEMAS DE INSTRUMENTACION, INSTRUMENTOS E INSTALACION

- IV.1 Generalidades
- IV.2 Sistemas de instrumentación
- IV.3 Características de los instrumentos
- IV.4 Calibración de los instrumentos
- IV.5 Selección de instrumentos
- IV.6 Instalación de instrumentos
- IV.7 Sistemas de instrumentación más comúnmente usados en túneles
  - IV.7.1 Medición del estado de esfuerzos inherentes en la roca
  - IV.7.2 Determinación del módulo de deformación
  - IV.7.3 Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante
  - IV.7.4 Medición de desplazamientos
  - IV.7.5 Medición de presiones hidráulicas
  - IV.7.6 Medición de presiones sobre los sistemas de soporte
- IV.8 Estaciones de medición tipo

#### IV.1 Generalidades

Una vez que se ha analizado y evaluado la conveniencia de llevar a cabo un programa de instrumentación que nos proporcione información tanto para la etapa de diseño, como para la etapa de construcción y operación del túnel, se procederá a diseñar los sistemas de instrumentación más adecuados para dichos propósitos.

La selección de los sistemas de instrumentación, dependerá del tipo de información deseada, de los instrumentos existentes en el mercado, de la posibilidad de fabricación de nuevos instrumentos, de la facilidad de instalación y desde luego del presupuesto de que se disponga. Por otra parte la eficiencia del programa de instrumentación, dependerá fundamentalmente del personal que diseña e instala los instrumentos, independientemente del personal que procesa e interpreta los resultados.

#### IV.2 Sistemas de instrumentación.

Cualquier sistema de instrumentación no importa cuan simple o complejo sea, esta formado por tres componentes básicos conectados en serie:

##### a) Captor o sensor.

Es el que esta en contacto directo con los efectos que se desean medir y su mecanismo básico los transforma en cambios de una propiedad física.

b) Transmisor.

Es el que recibe la información proporcionada por el captor o sensor y la transmite, sin inducirle ningún cambio, hasta la parte -- que nos proporcione directamente dicha información.

c) Indicador o registro.

Es la parte que nos proporciona directamente la información obtenida por el captor. Dicha información puede ser amplificada para facilidad de lectura.

Dependiendo de la forma de funcionamiento del captor, se define el tipo de instrumento el cual puede ser:

- Mecánico
- Hidráulico
- Neumático
- Eléctrico
- Electrónico
- Combinaciones

Los elementos de conducción o transmisores de la señal pueden ser:

Cable, manguera, barra o alambre, sonido, señal de radio, etc.

El registrador de la señal puede ser:

Mecánico, hidráulico, neumático o eléctrico y las lecturas se pueden tomar por medio de escala, flotador, medidor de carátula, señal acústica, señal digital, etc.

#### IV.3 Características de los instrumentos.

Las características de un instrumento de medición, son las siguientes:

##### 1. Precisión.

Es el grado de aproximación que se obtiene de una medición respecto al valor verdadero. Es decir, aunque no se conozca el valor real de una variable, el valor medio no debe desviarse más de una cierta cantidad especificada de dicho valor real. La precisión se expresa normalmente en porcentaje.

##### 2. Sensibilidad.

Es el valor mínimo que es capaz de medir un instrumento. Generalmente se expresa en las mismas unidades que la variable medida.

##### 3. Rango o intervalo de medición.

Es el intervalo de valores entre los cuales un aparato puede efectuar mediciones confiables.

##### 4. Resolución.

Es el cambio más pequeño en la lectura de un instrumento que puede detectarse al hacer la medición. Depende de la graduación de las -

divisiones en la escala de medición.

#### 5. Repetibilidad.

Es la diferencia entre una medición y el valor medio de varias mediciones semejantes.

#### IV.4 Calibración de los instrumentos.

La calibración implica el empleo del instrumento para medir una magnitud estándar conocida y la comparación del valor con el dato conocido. Generalmente se debe hacer la verificación de un intervalo de valores estándar para asegurarse de que es preciso en todo el intervalo. La calibración "in situ" es más recomendable ya que se puede detectar los efectos nocivos causados por el procedimiento de instalación. Desafortunadamente la mayor parte de los instrumentos no pueden calibrarse en el lugar de uso.

La calibración en el laboratorio es por tanto de especial importancia para garantizar que el instrumento esta funcionando correctamente antes de enviarse al campo para su instalación.

La calibración de un instrumento tiene entre otras ventajas las siguientes:

- Definir la precisión del instrumento y la relación verdadera entre los valores medidos por el aparato y los valores reales de la varia

ble que se va a medir, es decir establecer una relación lineal o no lineal y el factor de calibración.

- Verificar que el instrumento este trabajando correctamente.
- Determinar correcciones por temperatura y otros factores que afecten la medición.
- Establecer correcciones por el corrimiento del cero a largo plazo en el instrumento.

Dadas las variaciones y alteraciones que sufren los instrumentos durante su traslado, es necesario que periódicamente se verifique la calibración, es decir se recalibre. El período depende del tipo de instrumento y de la intensidad de su uso.

#### IV.5 Selección de instrumentos.

Esta actividad la deberá desarrollar el ingeniero proyectista de la instrumentación una vez definidas las características del proyecto, las condiciones prevalecientes en el sitio de la obra, la finalidad específica de la instrumentación y después de haber seleccionado los parámetros a medir y de haber hecho una predicción del comportamiento del túnel.

Las consideraciones que se deben tomar en cuenta para la selección de

los instrumentos son las siguientes:

1. Simplicidad en su diseño y operación, con el mínimo de partes móviles y de preferencia no eléctricas.
2. Debe ser robusto, resistente y confiable a largo plazo.
3. Durabilidad en el medio ambiente del túnel para minimizar las posibilidades de daños.
4. Que alteren lo menos posible las condiciones "in situ" del material en que quedan alojados.
5. Se debe reparar y darle mantenimiento fácilmente si se tiene acceso a él.
6. Precisión y buena resolución en las mediciones a corto y largo plazo.
7. Fácil de calibrarse y recalibrarse y que mantenga inalterada la calibración a largo plazo.
8. Una historia previa de comportamiento satisfactorio.
9. Interferencias mínimas al instalarse en el sitio.

10. Procedimientos de instalación simples y congruentes con la experiencia del personal encargado.
11. Costo promedio mínimo (suministro, instalación, adquisición y procesamiento de datos e interpretación).
12. Los datos se deben obtener fácilmente con un mínimo de intervención humana.

#### IV.6 Instalación de instrumentos.

La instalación de instrumentos, constituye una de las partes más delicadas del programa de instrumentación. Se requiere de personal capacitado, con objeto de tener la seguridad de una buena instalación, que cumpla con las especificaciones de diseño y de la instalación misma. Por otra parte, la probabilidad de daños o fallas en los instrumentos, es mucho mayor en esta etapa que en cualquier otra fase de su operación.

Dependiendo del cuidado y dedicación que se tenga en la colocación de los instrumentos, así serán los resultados que se obtengan cuando se realicen las lecturas. Por tal motivo es conveniente ir verificando el funcionamiento de los instrumentos conforme avanza la instalación, para garantizar así su funcionamiento adecuado una vez instalados.

Para decidir los sitios en que finalmente se localizarán los instru-

mentos, se deberán tener los siguientes cuidados:

1. Que el instrumento no se dañe al ser colocado.
2. Que las condiciones del material en que queda alojado, sean representativas de lo que se desea medir, es decir que la inclusión del instrumento de medición en la masa de suelo o roca no altere las condiciones "in situ".
3. Que presente el mínimo de interferencias con la construcción, para evitar atrasos en la obra.
4. Que se tenga un plan adecuado de protección en todos los aparatos instalados, así como de todas las líneas de salida que van desde el instrumento hasta el tablero de medición.
5. Que se puedan instalar accesos a los instrumentos que ofrezcan obstáculos a las operaciones de construcción.

Además el plan de instalación detallado incluirá un programa donde se muestre la secuencia y tiempos de las operaciones junto con una lista de materiales y requerimiento de equipo.

También se debe especificar en detalle la asistencia y servicios requeridos por otros, como por ejemplo: acceso al sitio, perforación, excavación, proviciones de agua, aire y electricidad.

#### IV.7 Sistemas de instrumentación más comúnmente usados en túneles.

Hasta la fecha, se han desarrollado infinidad de sistemas de instrumentación que pueden ser aplicables a la construcción de túneles. En este inciso, se describen los sistemas de instrumentación más usuales en los proyectos de túneles en México y que han proporcionado resultados satisfactorios.

Se describen tanto los sistemas de instrumentación necesarios para determinar las propiedades mecánicas del subsuelo previamente a la construcción, como los sistemas de instrumentación que nos definen el comportamiento del túnel durante su construcción y operación.

##### IV.7.1 Medición del estado de esfuerzos inherentes en la roca.

Estas mediciones se llevan a cabo con el objeto de determinar la magnitud, distribución y sentido de los esfuerzos que existen en el interior de una masa rocosa como consecuencia de su historia geológica. A continuación se describen los métodos e instrumentos más usuales para su determinación:

###### Método de relajación de esfuerzos.

En este método se miden los esfuerzos inherentes por medio de deformaciones que se producen en el macizo rocoso. A continuación se describen dos de las pruebas más usuales:

- Prueba de Roseta (Over Coring)

Este método consiste en pulir una superficie del macizo rocoso dejándola plana. En una circunferencia imaginaria sobre la superficie se instalan seis puntos fijos de medición colocados en pares igualmente espaciados como se muestra en la Fig. IV.1. Los puntos de medición se localizan sobre las cabezas de seis anclas que se hincan en la masa rocosa. La distancia entre los puntos diametralmente opuestos se mide con un instrumento de precisión con suficiente sensibilidad como un extensómetro de precisión o un deformímetro eléctrico de resistencia (Strain-gage). Con un radio mayor al de la circunferencia imaginaria, se hace una ranura anular aislando un cilindro donde se liberan los esfuerzos internos; después de pasado cierto tiempo, se miden los desplazamientos entre las marcas simétricas, obteniéndose tres valores de las deformaciones en el contorno del punto. Con los valores de estas deformaciones y con la aplicación de la teoría de la elasticidad se puede determinar la magnitud y dirección de los esfuerzos.

- Prueba de gato plano.

Para realizar mediciones directas de esfuerzos en la roca actuando en un plano determinado se emplea uno de los dispositivos de uso más común para este propósito y que tiene un --

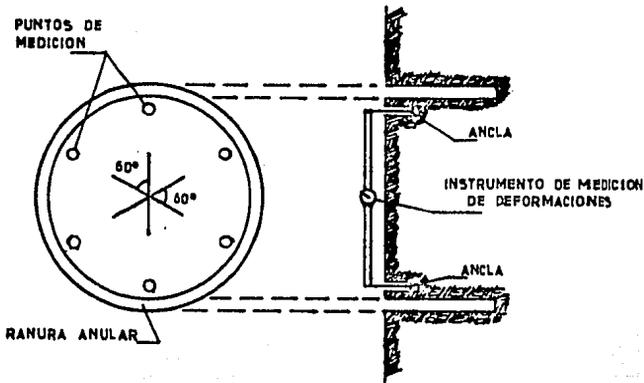


Fig. IV.1. Prueba de Roseta (Over Coring)

principio de operación hidromecánico es el Gato Hidráulico Plano. Este dispositivo está constituido por una celda metálica hueca y de forma plana, o sea, con una de sus dimensiones considerablemente menor a las otras dos y muy flexible - en el sentido de su menor dimensión, esta celda se llena con aceite a través de un conducto hermético al que se adapta una válvula de alta presión y por el cual por medio de una bomba hidráulica es posible inyectar o extraer aceite para aumentar o disminuir la presión interna, misma que se transmite a los cuerpos en contacto, siempre y cuando ofrezca un apoyo efectivo; en otro conducto se acopla un manómetro para medir la presión existente en el gato. En la Fig. IV.2 se muestra las características generales de un Gato Plano y de

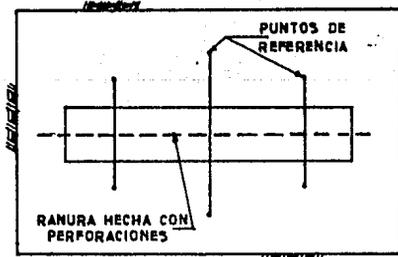
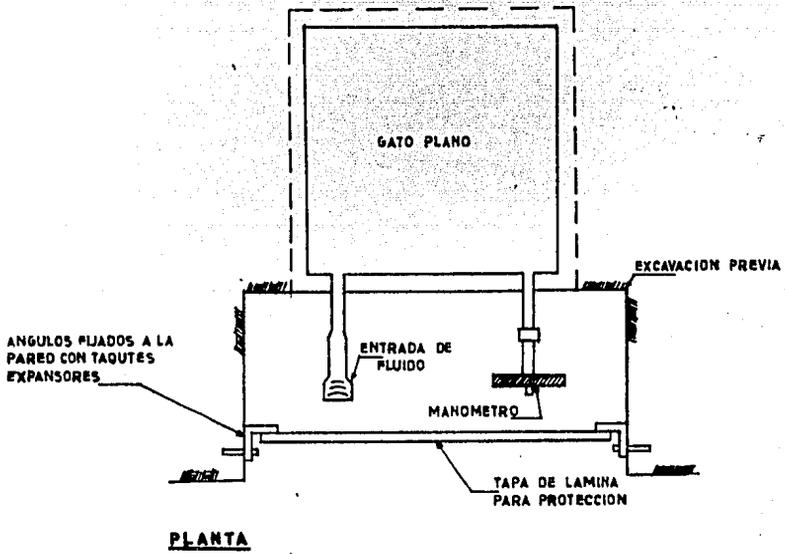


Fig. IV.2 Prueba de Gato Plano

las preparaciones que requiere su instalación y utilización.

En términos generales, la medición de la presión actuante en la masa del subsuelo por medio de gatos planos, se efectúa - obligando a que las deformaciones provocadas al efectuar una ranura de dimensiones suficientes para instalar el gato sean recuperadas al aplicar presión después de que el gato se ha colocado y empacado en un relleno de alta resistencia en la ranura formada.

Previamente a la ejecución de la ranura mencionada, se fijan en la roca puntos de referencia a cada lado del área por ranurar, para poder medir los movimientos que se originan tanto por la liberación de esfuerzos como en las subsecuentes etapas de prueba.

Una vez instalados y fijos los puntos de referencia y tomadas las lecturas iniciales, se procede a la excavación de la ranura, mediante una línea de barrenos traslapados para lograr la adecuada formación de la ranura requerida. Al terminar la ranura se miden las distancias entre los puntos de referencia, las cuales, restadas a las iniciales proporcionarán las deformaciones "inmediatas" debidas al ranurado; para conocer las deformaciones diferidas (viscoplásticas) y poder tomar en cuenta este efecto en la interpretación de la prue-

ba se toman lecturas posteriormente por un lapso de tiempo. Después el Gato Plano se instala dentro de la ranura, rellenando el espacio libre entre el Gato y la roca con un mortero expansivo.

Transcurrido el fraguado del mortero, se puede iniciar la prueba, aplicando incrementos de presión en el gato plano y registrando las deformaciones provocadas entre puntos de referencia, hasta llegar al valor de las lecturas iniciales o de cancelación.

Los movimientos en cada etapa se obtienen por medio de la diferencia de medidas de distancia entre los puntos de referencia, en los lapsos requeridos; las distancias se miden con un extensómetro del tipo "Whitemore" con una graduación y rango adecuado para medir la magnitud de este tipo de movimientos.

#### IV.7.2 Determinación del módulo de deformación.

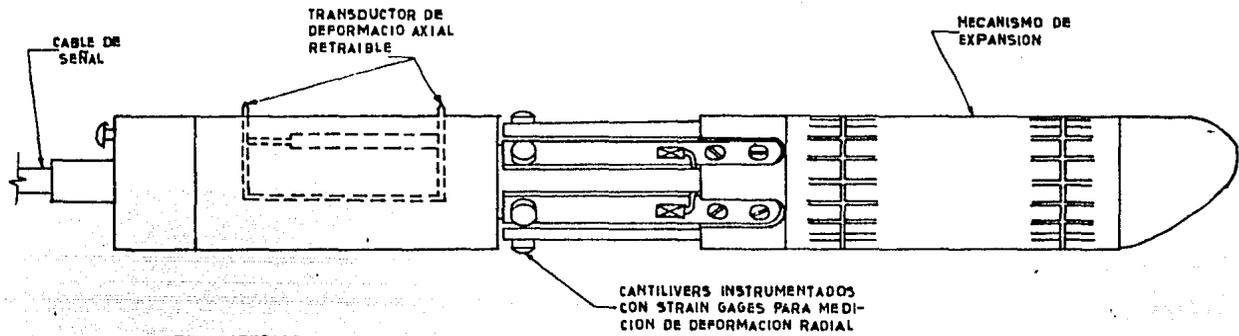
La medición del módulo de deformación en el campo es valiosa para el diseño de túneles ya que al permitir probar un gran volumen de roca, se puede inferir el comportamiento de la masa en sí, más que el de la roca misma, como es el caso de los ensayos de laboratorio.

Ello también permite determinar el módulo de rocas frágiles en los que resulta difícil coleccionar muestras para efectuar pruebas de laboratorio. A continuación se describen algunos de los métodos más usuales para este propósito.

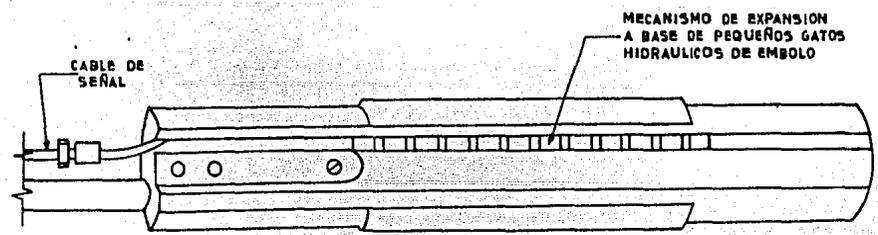
- Dilatómetros.

El método que da los resultados más expeditos y puede realizarse con facilidad a diversas profundidades aprovechando las perforaciones que se realizan en la etapa de exploración, es el que utiliza los dilatómetros. En la Fig. IV.3 se muestran dos tipos de dilatómetros de los cuales el más conocido en América y de mayor confiabilidad es el conocido como Gato Goodman.

El instrumento originalmente se desarrolló basado en el principio del gato plano, y con una forma de operación semejante a la prueba de gato radial pero en una escala mucho menor; de hecho, las presiones radiales son ejercidas en las paredes del barreno. Comprende un cilindro de acero sólido dividido por un corte axial en dos "medias cañas". En algunas versiones las dos mitades alojan unas bolsas de hule, que se llenan de aceite y actúan como gatos planos y en las conversiones del Gato Goodman se alojan una serie de pequeños gatos hidráulicos de émbolo. En el interior de las mitades se alojan los extensómetros, que miden la deformación. Estos --



**TERRAMETRICS**



**GATO GOODMAN**

Fig. IV.3. Dilatómetros

instrumentos reúnen una serie de ventajas, por ejemplo:

- 1) Puede ser utilizado en las perforaciones usuales en la exploración geológica.
- 2) Opera en perforaciones llenas de agua.
- 3) Puede usarse a grandes profundidades.
- 4) Mide deformaciones radiales en 4 diámetros (a 45° entre sí).
- 5) Puede utilizarse en cualquier posición, aún en la horizontal.

- Pruebas de Placa.

Estas pruebas son indispensables para medir la deformabilidad de los muros causada por la presión del material circundante al túnel, con objeto de tener una idea de la magnitud de las deformaciones y así poder diseñar el ademe permanente de estos. Esta información también es útil para la selección de instrumentos que se utilizaran en la etapa de construcción del túnel.

Estas pruebas se llevan a cabo en las paredes de galerías me

dian te aplicación de carga con gatos hidráulicos y placas de distribución.

Las pruebas radiales de gato son las que dan los mejores resultados para este propósito. En ellos se pueden probar grandes volúmenes donde existan discontinuidades.

Básicamente, la prueba de gato radial actúa como una cámara de presión. Todo el equipo es recuperable y el líquido con el que se aplica la presión radial no está en contacto con la roca, a diferencia del caso de las pruebas de galería. Esto permite probar materiales que de otra manera no podrían ensayarse debido a las fugas de agua por las juntas.

El equipo de gato radial consiste en un conjunto de anillos de acero estructural con gatos planos sujetos en el perímetro de los anillos e instalados en una excavación cuidadosamente hecha de 2.6 m de diámetro. El equipo diseñado por el U.S. Bureau of Reclamation utiliza dieciséis gatos planos unidos al conjunto de anillos. Cada anillo se compone de cuatro segmentos atornillados entre sí, y el anillo resultante se ensambla en una mitad de 2 m de diámetro y 2.4 m de longitud. Los anillos y los gatos planos se centran en la galería suspendidos mediante una estructura y el espacio entre los gatos y la roca es rellenada de concreto.

La presión es suministrada a los gatos mediante una bomba y un conector de tubos. La presión se transmite de los gatos - a la placa y esta distribuye la carga al concreto y a la superficie de la roca. El control de la presión se hace manualmente por los grandes volúmenes de aceite requeridos por los gatos y para facilitar la supervisión del complejo sistema.

Un sistema menos sofisticado es por medio de pruebas de gato uniaxial y placa de distribución. En la Fig. IV.4 se muestra una postura típica. Aquí, las cargas aplicadas son concentradas en una zona más pequeña de la roca y se requieren varias pruebas con varias orientaciones.

La placa de distribución es casi siempre circular y de diámetro tal que distribuye la carga en aproximadamente  $1 \text{ m}^2$  de superficie. Esta placa puede ser rígida o flexible; en cualquier caso, el cálculo de los módulos de deformación se efectúa suponiendo que el macizo rocoso es un sólido infinito, elástico, homogéneo e isotrópico.

Los desplazamientos de las paredes normalmente se miden en el centro de aplicación de la carga, para lo cual la placa de apoyo tiene un agujero central, aunque en ocasiones también se miden desplazamientos en otros puntos a lo largo de un diámetro y aún fuera del área de aplicación de los esfuerzos.

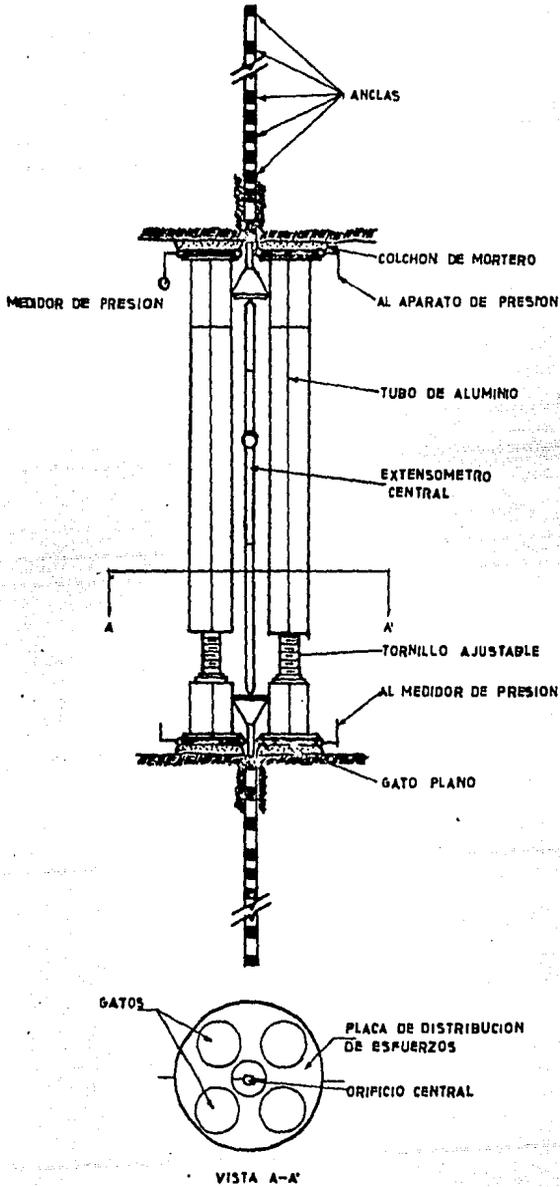


Fig. IV.4. Prueba de Gato Uniaxial y Placa de Distribución

En todas las pruebas de gato las deformaciones de la roca -- son medidas en varios puntos mediante el uso de extensómetros de posición múltiple.

- Pruebas de Galería.

La prueba a más grande escala que se efectúa para la obtención del módulo de deformación es la de las galerías de carga. La galería debe ser circular, el tramo de prueba debe tener una longitud igual o mayor a cinco veces el diámetro. La prueba consiste en cerrar herméticamente la galería en un tramo después de haberla impermeabilizado y de haber colocado deformímetros unidos a puntos diametralmente opuestos; -- después de cerrar se llena con agua y se suministra presión a las paredes. Los deformímetros son cuerdas o extensómetros electroacústicos de cuerda vibrante cuya frecuencia de vibración es función de la tensión de la cuerda, variable de acuerdo con los desplazamientos de sus extremos anclados en la roca.

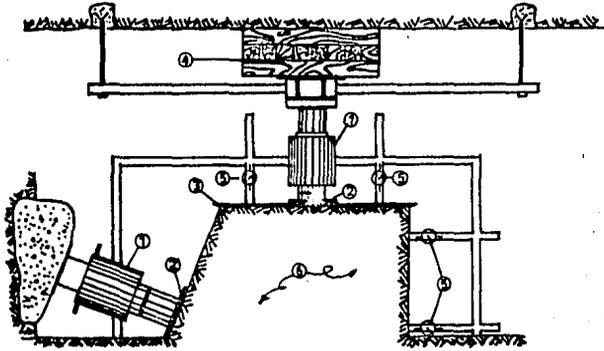
La impermeabilización de las paredes puede hacerse con algún producto flexible (por ejemplo el latex). Con este tipo de impermeabilizante se corre el riesgo de fallas durante la prueba que ocasiona fugas de agua y su suspensión obligada. Para evitar esto se han utilizado recubrimientos de concreto pero en la interpretación de resultados de la prueba se debe

entonces tomar en cuenta el módulo de elasticidad del concreto.

#### IV.7.3 Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante.

Las fallas de las rocas alrededor de los túneles, son normalmente debidas a fuerzas de tensión o de cortante. Ya que los planos de debilidad estan usualmente presentes dentro de la roca, los esfuerzos de tensión en la masa de roca son casi nulos. Las fallas por esfuerzo cortante en las masas de roca, usualmente ocurren a lo largo de planos de debilidad, tales como juntas, fracturas, estratificaciones, etc., siendo los parámetros más importantes de resistencia de la roca, la cohesión y la fricción a lo largo de las superficies de deslizamientos.

El método tradicional para determinar la resistencia al esfuerzo cortante se realiza en bloques labrados, en los que una de sus caras se deja unido al macizo rocoso. Sobre la cara superior de la muestra, se ejerce una fuerza constante normal al plano potencial de falla, mientras simultáneamente se aplica, en incrementos, un esfuerzo tangencial, que induce la falla del bloque. El esquema de montaje, se muestra en la Fig. IV.5 donde se observa que la aplicación de la fuerza lateral no es horizontal. Este dispositivo, elimina la formación de grietas de tensión en la cercanía de la zona de aplicación de la carga lateral.



- 1.- GATOS HIDRAULICOS
- 2.- PLACAS DE ASIENTO
- 3.- COLCHON METALICO
- 4.- BLOQUE DE MADERA
- 5.- DEFORMOMETROS DE CARATULA
- 6.- ESPECIMEN

Fig. IV.5. Prueba "in situ" de Resistencia al Esfuerzo Cortante

La Fig. IV.6, ilustra una máquina de corte portátil, para ensayar discontinuidades en campo en pequeñas muestras. Los pasos a seguir, cuando se prueba una muestra con este equipo son:

- Una muestra que contenga la discontinuidad por ensayar, se corta a un tamaño adecuado para ser colocada en el molde. -- Las dos mitades se ligan con un alambre, para evitar movimientos a lo largo de la discontinuidad; la muestra se cuela en concreto o en cemento, cuidando que la posición de la discontinuidad coincida con el plano de corte de la máquina.
- Una vez que el concreto o el cemento ha fraguado, se retira el molde y el espécimen se transporta a la máquina de corte, la caja superior de corte, se coloca en su posición y se aplica una carga normal baja, para evitar cualquier movimiento del espécimen. Los alambres de liga se cortan y el cable de carga cortante se coloca en su posición.
- El espécimen esta listo para la prueba y la carga normal se incrementa, hasta el valor seleccionado para la prueba, dicho valor se mantiene constante, mientras la carga cortante se incrementa. Durante la aplicación de la fuerza cortante, se mide el desplazamiento relativo de las dos mitades.
- Una vez que el esfuerzo "pico" ha sido rebasado, usualmente el desplazamiento continua y se observará que una carga cor-

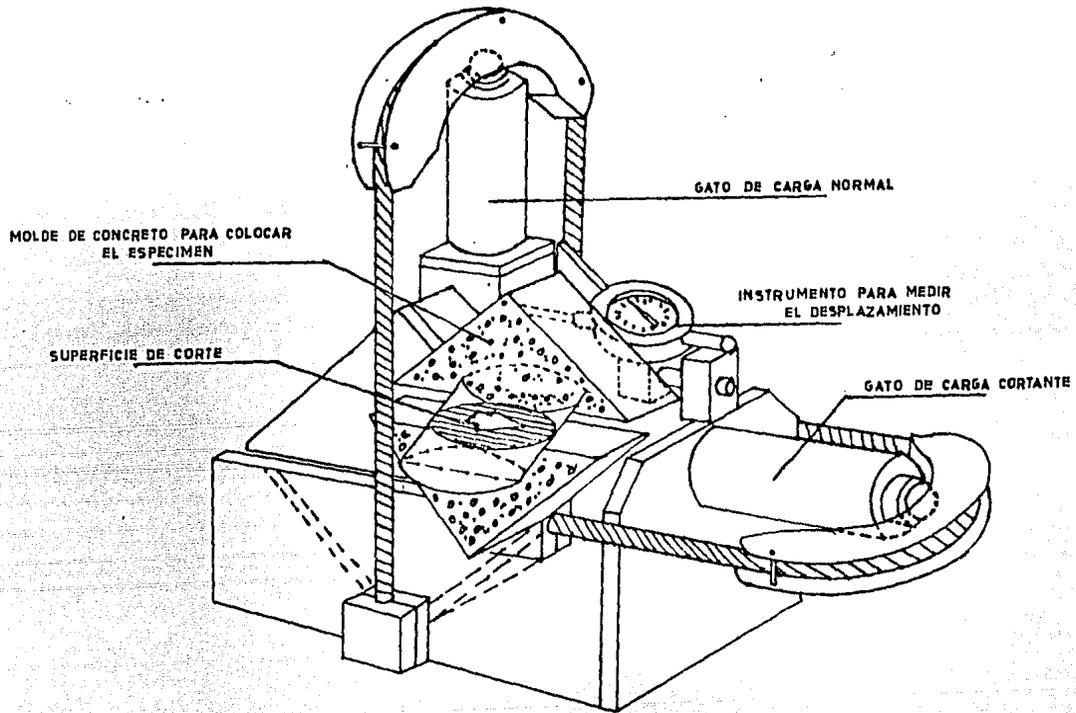


Fig. IV.6. Máquina Portátil de Corte

tante baja, es necesaria para mantener el movimiento.

- Esta máquina esta limitada para un desplazamiento de aproximadamente 2.5 cm.
- Las cargas aplicadas al espécimen, deberán dividirse entre el área de la superficie de la discontinuidad, para obtener los esfuerzos normal y cortante.

#### IV.7.4 Medición de desplazamientos.

Con el objetivo de determinar la forma de los desplazamientos que se producen con la excavación del túnel, la instalación de un sistema de instrumentación puede proporcionar información sobre desplazamientos absolutos o relativos de alguno o varios puntos de ésta o en las inmediaciones de la misma; los datos que se pueden obtener son la magnitud y dirección del desplazamiento.

A continuación se describen los sistemas más usados:

##### a) Nivelación topográfica superficial.

Con el objetivo de determinar los movimientos verticales en la superficie del terreno provocados por la excavación del túnel y tomar en cuenta su posible influencia en los aparatos de instrumentación, se llevan a cabo nivelaciones de --

puntos de control superficiales en secciones transversales a lo largo de eje del túnel.

Dichos puntos de control superficial son en su forma más sencilla, monumentos de concreto instalados en superficie a poca profundidad; su instalación se hace realizando una perforación de 15 a 30 cm de diámetro y 50 cm de profundidad con barreta y pala o pala posteadora. Una vez hecha la perforación, ésta se rellena de concreto simple de baja resistencia y se coloca al centro de la perforación una varilla corrugada de 1/2" ó 5/8" de diámetro a 1 m de profundidad, la cual se hinca a golpes dejando 1 cm libre del concreto, Fig. IV.7.

La toma de lecturas se hace con un nivel convencional de  $\pm$  1 mm de error y a partir de un punto de referencia alejado de la última referencia de nivel superficial de la sección entre 100 y 150 m.

Se puede instalar también referencias de nivel semiprofundas las cuales se instalan entre la superficie y la clave del túnel; consisten de una boya de tubo de 3" de diámetro por 30 cm de longitud, a la cual se le acopla tubería galvanizada de 1" de diámetro hasta tener la longitud especificada.

La instalación de las referencias de nivel semiprofundo se hace dentro de una perforación, la cual se ha ejecutado previamente con máquina rotaria y broca tricónica de 6" de diámetro. La perforación se suspende 50 cm antes de la profundidad programada con el objeto de poder hincar la boya de la referencia de nivel profundo en terreno natural. Este hincado puede hacerse a mano o mediante el auxilio de los gatos hidráulicos de la perforadora. Una vez instalada la referencia de nivel profunda en la perforación se coloca un ademe de 2" de diámetro a partir de 2 m por arriba de la boya, Fig. IV.8.; lo anterior es con el objeto de evitar la influencia al rozamiento del material de relleno colocado entre la perforación y la tubería de 1" de diámetro de la referencia de nivel profunda.

En la construcción de túneles en zonas urbanas también se pueden instalar puntos o niveletas en las construcciones vecinas.

- b) Extensómetros longitudinales instalados desde la superficie del terreno.

Estos instrumentos se utilizan para realizar mediciones del movimiento del subsuelo, antes, durante y después de realizar la excavación del túnel, entre la superficie del terreno y la clave del túnel. Con ellos se puede determinar los

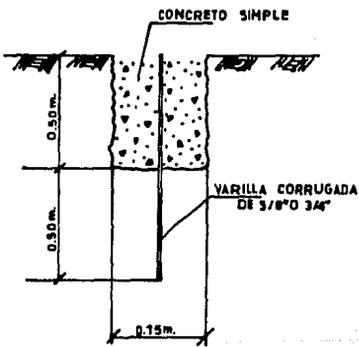


Fig. IV.7 Punto de control superficial

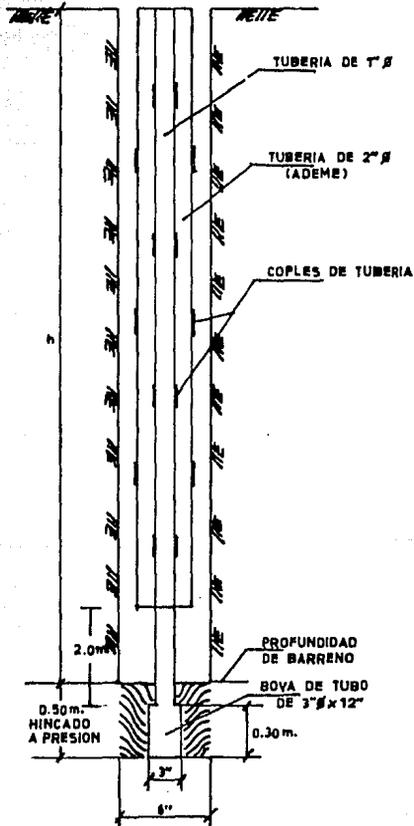


Fig. IV.8 Punto de control semiprofundo

desplazamientos de varios puntos instalados en un mismo barreno a diferentes profundidades.

Existen varios tipos de extensómetros de los cuales los más utilizados por su sencillez y toma de lectura directa son - los extensómetros mecánicos a base de anclas colocadas en - barreno a diferentes profundidades. En este instrumento la parte captora de los posibles movimientos del subsuelo es - un dispositivo que se ancla a la profundidad deseada dentro de una perforación de 7.6 cm de diámetro, la parte transmisora es un alambre acerado que, por un lado se fija al ancla y en su otro extremo se fija a un cantiliver que se localiza en el brocal de la perforación. Finalmente la parte registradora es un micrómetro con graduación y rango adecuados para registrar este tipo de movimientos, Fig. IV.9.

El principio de funcionamiento de este aparato consiste en que el ancla fijada al subsuelo dentro del barreno seguirá los movimientos de éste; al producirse un movimiento del ancla, ésta jala al alambre acerado, el cual a su vez jala al cantiliver y sobre este se registran los movimientos por medio del micrómetro.

Otro instrumento muy utilizado es el extensómetro de contrapesos, cuyo principio de funcionamiento es el mismo que el ya descrito; su captor es también a base de anclas fijadas

en la perforación realizada en el subsuelo; su transmisor - es igualmente alambre acerado, este alambre se fija por un lado al ancla y por el otro extremo se fija a un contrapeso localizado en la superficie del terreno, el cual, al tener un movimiento producido por un desplazamiento del ancla, ha ce variar las lecturas del micrómetro, que es el registrador. Adicionalmente, a este extensómetro se puede adaptar - un dispositivo que accione una alarma en el momento en que el contrapeso haya sufrido un movimiento que con anterioridad se establezca como peligroso para la estabilidad de la excavación, Fig. IV.10.

Existe otro tipo de extensómetro, cuyo principio de funcionamiento es igual a los anteriores con la única variante de que la transmisión del desplazamiento se realiza mediante - una polea al eje de un potenciómetro eléctrico circular. En este caso la medición del desplazamiento, se hace a través de las variaciones que éste hace sobre la resistencia de di cho potenciómetro.

c) Inclinómetros.

Este instrumento se instala desde la superficie del terreno con el propósito de determinar las deformaciones horizontales del subsuelo provocadas por la excavación del túnel. -- Esencialmente consiste en instalar en la masa del suelo un tubo segmentado de aluminio o de plástico con cuatro ranu-

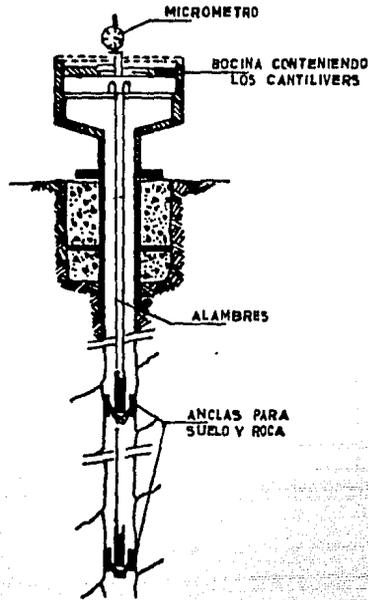


Fig. IV.9 Extensómetro de Bocina

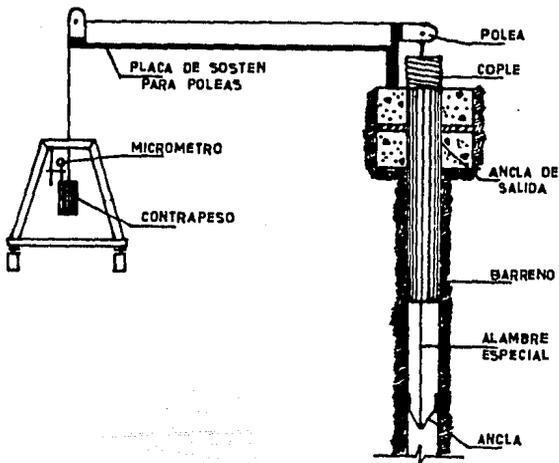


Fig. IV.10 Extensómetro de Contrapesos

ras longitudinales distribuidas a  $90^\circ$  el cual se deforma para seguir los movimientos horizontales del subsuelo. En la instalación de la tubería se debe procurar que dos de las ranuras queden en dirección perpendicular al eje del túnel. La geometría del tubo deformado se obtiene midiendo los ángulos de inclinación de cada uno de los segmentos del tubo respecto a la vertical. El inclinómetro, llamado también -- "torpedo" se introduce en la tubería y el dispositivo medidor define el ángulo de inclinación, con respecto a la vertical de ella. Los dispositivos medidores o transductores -- más usados son: el potenciómetro, el strain gage, el LVDT -- (transformador diferencial variable de respuesta lineal), -- etc.

La tubería para inclinómetro más usual consta de tramos de tubo circulares de 3" de diámetro (7.62 cm). La preparación de la tubería se realiza uniendo los tramos de tubería de -- 1.50 m mediante coples de 30 cm. Estos coples van remachados o flejados y sellados con cinta plástica y recubiertos finalmente con parafina o brea, En el extremo final de la -- tubería, se coloca un tapón de aluminio que evita la introducción dentro de la tubería del material de relleno. Fig. IV. 11.

La instalación de la tubería se hace dentro de una perforación de 6" de diámetro (aprox. 15 cm.) realizada con máqui-

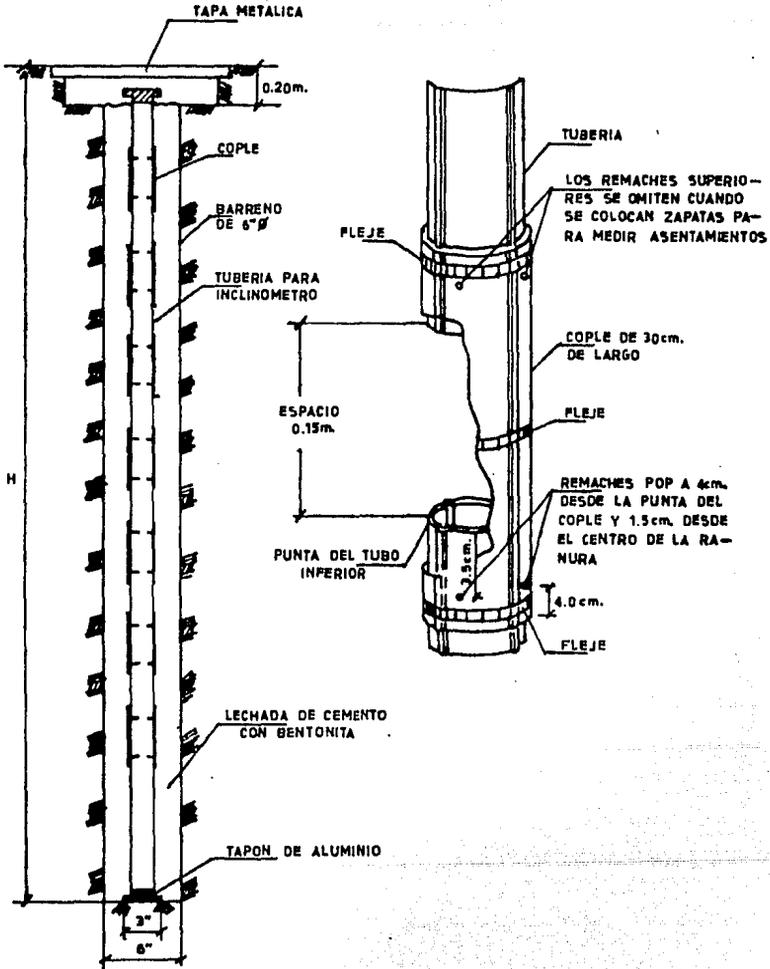


Fig. IV. 11 Instalación y detalle de la tubería para inclinómetro

na rotaria, broca tricónica y lodo bentonítico. La secuencia es como sigue:

Se baja la tubería dentro de la perforación en secciones de 3 ó 4 tramos (4.50 - 6.00 m). Conforme va bajando la tubería, se van acoplando las diferentes secciones hasta completar toda la longitud. Si durante la introducción de la tubería, ésta tiende a flotar por efecto de las fuerzas de presión de lodo bentonítico, se agrega agua dentro de la misma hasta equilibrar las fuerzas de flotación. Una vez que la tubería llega al fondo de la perforación, se procede a rellenar la oquedad entre esta y la tubería con una mezcla, que una vez fraguada tenga una rigidez semejante a la del subsuelo que transmite los posibles desplazamientos horizontales.

Recientemente se ha modificado la técnica de unión entre los tubos para permitir el deslizamiento entre cople y tubo con la intención de medir también los asentamientos de cada cople.

d) Extensómetro de cinta invar.

Para realizar mediciones de movimientos convergentes del subsuelo en la excavación de un túnel, desde el interior del mismo, se pueden hacer mediciones de distancia entre puntos de referencia, tipo ancla, instalados inmediatamente

después de ejecutada la excavación en la sección del túnel que se desea vigilar desde el punto de vista de movimientos convergentes. En este tipo de mediciones el captor de movimientos del subsuelo, es el punto de referencia tipo ancla instalado en la pared del túnel, el registrador es el dispositivo llamado Extensómetro de Cinta Invar, que como su nombre lo indica es una cinta que se fija en sus dos extremos a dos anclas y cuenta con un dispositivo medidor de distancias a base de un micrómetro con graduación de 0.01 mm y -- rango de 0 a 2.5 cm. La cinta de acero Invar esta graduada a intervalos de 5 mm y tiene un dispositivo en el que se fija la cinta en una de sus marcas de 5 mm. También contiene un dinamómetro para que las mediciones se realicen siempre a la misma tensión, como se muestra en la Fig. IV. 12. La instalación de los puntos de referencia también se muestra en la misma figura.

El principio de su funcionamiento, consiste en que los movimientos que tengan las paredes del túnel lo captan las anclas instaladas cambiando la separación entre estos dos puntos de referencia; esta variación la registra el extensómetro de cinta invar. Después de fijar en un punto de referencia un extremo de la cinta y en otro punto el extremo del dispositivo de fijación, se tensa el conjunto a 15 kg y se lee en el micrómetro la distancia que debe restarse a la -- marca en que se fijó la cinta, adicionada de una constante

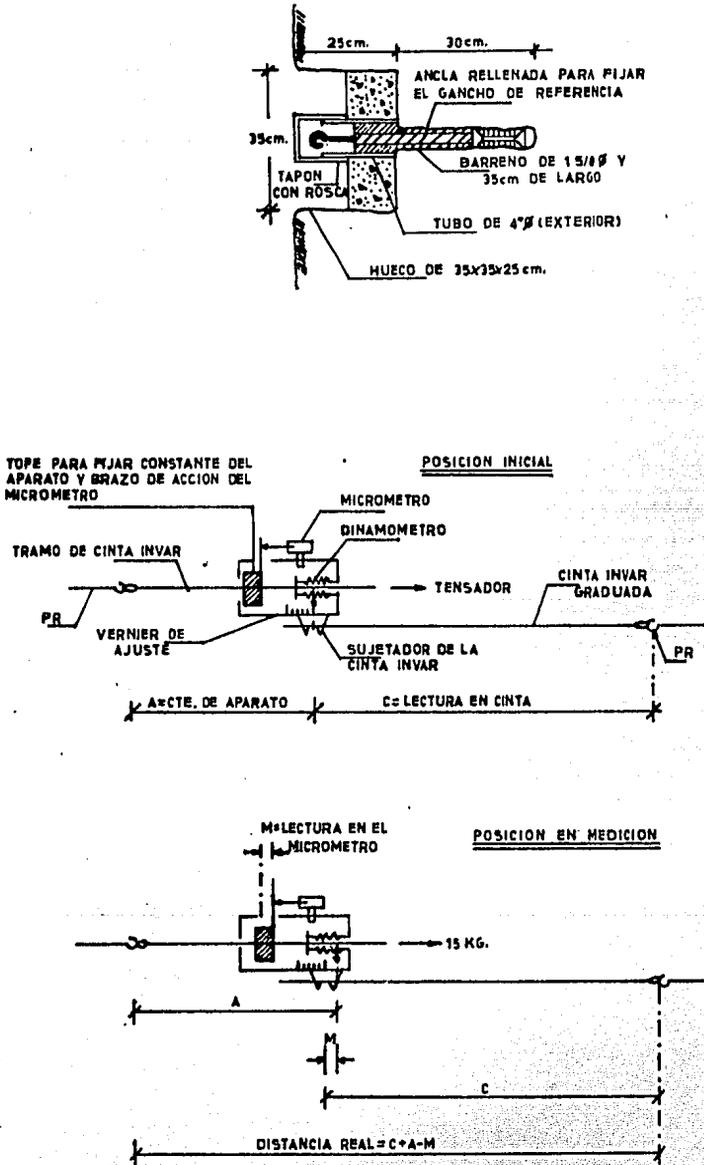


Fig. IV. 12 Instalación de Puntos de Referencia y Esquema de Funcionamiento del Extensómetro de Cinta Invar

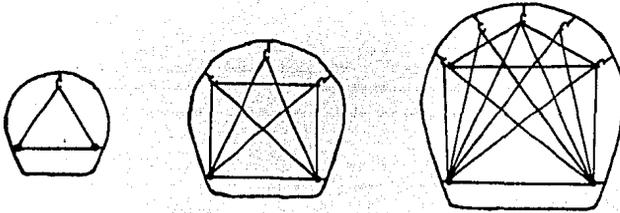
del aparato para obtener la distancia real entre los puntos de referencia, con una sensibilidad de 0.025 mm.

Con este sistema de medición se pueden realizar varias mediciones de cuerdas en una misma sección, para definir con mayor certidumbre los movimientos de las secciones de un túnel. Para ello se elige un arreglo de mediciones adecuando a las dimensiones del túnel. Los arreglos pueden ser como los mostrados en la Fig. IV. 13.

e) Extensómetros instalados en el interior del túnel.

Estos tipos de instrumentos se instalan dentro del túnel -- con el objeto de medir las deformaciones del terreno que -- circunda a la excavación del túnel y determinar la zona de influencia de la excavación. La información que se obtiene es la siguiente:

- a) Dimensiones de la zona de la "cuña" de aflojamiento en la clave del túnel.
- b) Deformaciones de suelos y rocas por efecto de expansibilidad.
- c) Espesor del "anillo" de roca decomprimido que se deforma junto con la excavación.



• PUNTO FIJO  
C ANCLA DE REFERENCIA

Fig. IV. 13 Arreglos de Extensómetros de Cinta Invar

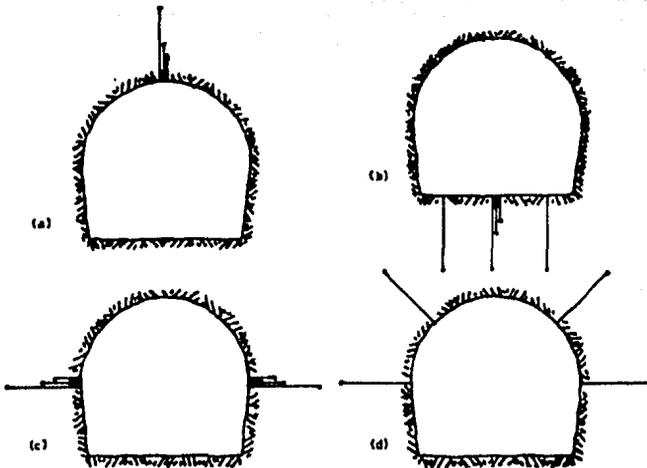


Fig. IV. 14 Arreglos de Extensómetros longitudinales instalados dentro del túnel

d) Módulo de deformación de la roca.

De acuerdo con el objetivo, el arreglo de extensómetros puede ser alguno de los que se ilustran en la Fig. IV. 14.

El instrumento consiste, al igual que los extensómetros instalados en la superficie, de puntos de referencia, formados con piezas metálicas que se anclan en el interior de un barreno hecho especialmente para este tipo de instrumentos, - de manera que puedan seguir los movimientos del terreno. El movimiento de cada punto de referencia se transmite hasta la caja de medición mediante alambres o barras, según el tipo de extensómetro que se utilice.

El instrumento más sencillo es el extensómetro de barra de un solo punto de anclaje situado en el fondo de la perforación. En la superficie del barreno se coloca un banco de acero que sirve de apoyo para efectuar las medidas, Fig. IV. 15.

Las lecturas del desplazamiento pueden realizarse mediante un micrómetro, o mediante piezas metálicas a las que se unen los alambres o las barras, que se anclan en el terreno y que transmiten los desplazamientos a un transductor eléctrico que puede ser, un potenciómetro, un strain gage, una cuerda vibrante, etc.

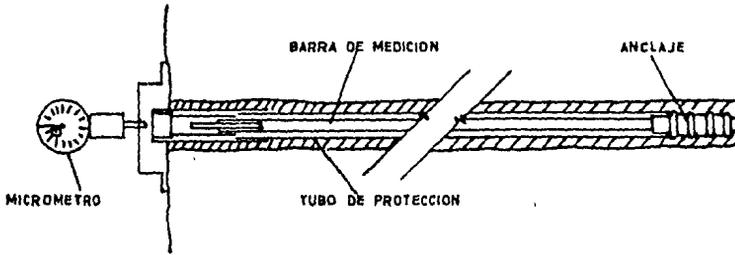


Fig. IV. 15 Extensómetro de un solo punto de medición

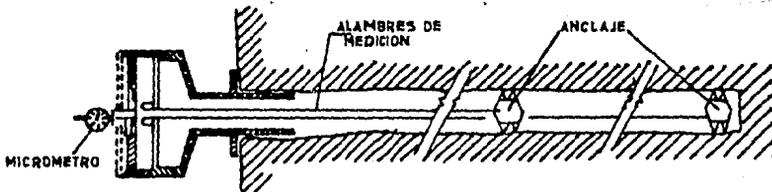
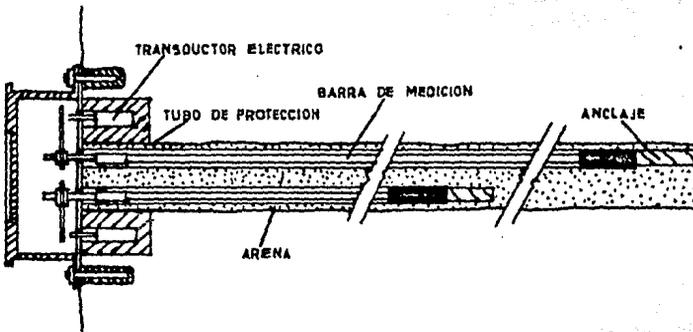


Fig. IV. 16 Extensómetros de barras y alambres con varios puntos de medición

La profundidad de la barra se escoje de modo que quede fuera de la influencia de los esfuerzos generados por la excavación y constituya su extremo interior un punto de referencia para determinar la deformación de la superficie del barreno.

Los extensómetros con varios puntos de medición, requieren de una instalación más delicada. Estos permiten realizar mediciones a diferentes profundidades en una sola perforación. Las lecturas de los movimientos se realizan de la misma forma que para los extensómetros de un solo punto de medición. En la Fig. IV. 16, se ilustran diferentes tipos de extensómetros.

#### IV.7.5 Medición de Presiones Hidráulicas.

En capítulos anteriores se expuso la importancia que tiene la presencia de agua en la zona del túnel, en relación a la valoración del gasto que se infiltra hacia la excavación y de las cargas piezométricas para el diseño del revestimiento.

Por consiguiente es importante tener un control sistemático de las condiciones del agua subterránea. Este control se lleva a cabo mediante la instalación de piezómetros. La información que se obtiene es: presencia, niveles, flujo y variación del agua en la zona del túnel.

En general los piezómetros trabajan con el principio de equilibrar con alguna clase de contrapresión, la presión que el agua subterránea ejerza al actuar sobre un elemento sensor, según sea la clase de contrapresión: columna de agua o presión exterior.

Dependiendo del tipo de elemento sensor que se utilice, se pueden clasificar en: piezómetros abiertos o Casagrande y piezómetros neumáticos.

a) Piezómetros abiertos o Casagrande.

Generalmente este instrumento se utiliza en materiales en donde la permeabilidad es entre media y alta ( $K = 10^{-3}$  cm/seg. o más).

Para su instalación se efectúa una perforación en el subsuelo, dentro de la cual, y al nivel en el cual se desea medir la presión del agua, se instala un filtro de grava y arena y un tubo ranurado (elemento sensor) conectado por tubería hasta el exterior. Arriba y abajo del estrato que se desea medir se sella con bentonita para evitar el paso directo de la agua de otros estratos. El nivel piezométrico se mide directamente con una sonda eléctrica definiendo la posición del nivel de agua libre. Fig. IV. 17.

b) Piezómetro Neumático.

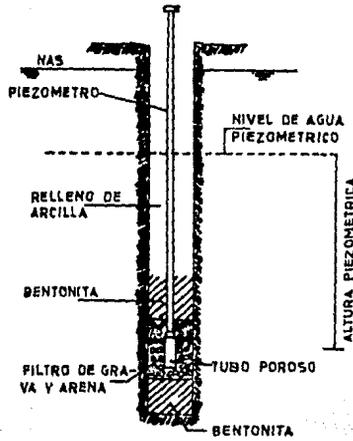


Fig. IV. 17 Piezómetro Abierto o Casagrande

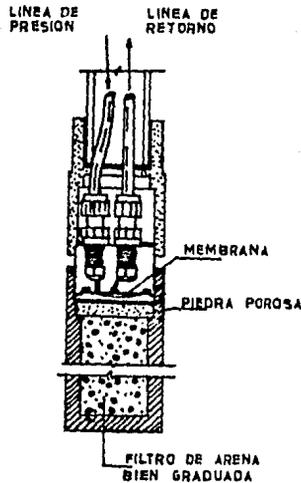


Fig. IV. 18 Piezómetro Neumático

Este instrumento puede utilizarse en materiales poco permeables. Su instalación es igual a la del piezómetro abierto o Casagrande.

El instrumento consiste de un bulbo plástico perforado relleno de arena. A través de este bulbo la presión del agua se transmite a un diafragma de acero. Este diafragma sella el otro extremo del piezómetro, en la parte de atrás se encuentran dos tubos plásticos los cuales son conducidos a la superficie protegidos por un tubo plástico telescópico. Los extremos del forro de plástico de las líneas de salida se conectan a una unidad de lectura a base de manómetros de precisión. Fig. IV. 18.

Para determinar la presión del agua se emplea el siguiente procedimiento:

1. Se inyecta aire comprimido en la línea de abastecimiento -- hasta que la presión de poro aplicada a la superficie exterior del diafragma sea vencida. El diafragma se deforma permitiendo el paso del aire hacia la línea de salida conectada a un juego de manómetros de la unidad de lectura la cual registra una presión mayor que la medida por el piezómetro.
2. Se cierra la línea de abastecimiento y el aire comprimido se deja salir lentamente por medio de una válvula micromé-

trica hasta que la presión registrada por el manómetro iguale la presión del agua, esto se logra cuando el diafragma - regresa a su posición original impidiendo la salida del aire.

3. Una vez que no sale aire, se mide la presión en la línea de regreso.

La instalación de los piezómetros debe efectuarse antes de que la excavación del túnel afecte las condiciones iniciales del agua en el subsuelo.

#### IV.7.6 Medición de presiones sobre los sistemas de soporte.

Este tipo de mediciones se llevan a cabo con el propósito de determinar la magnitud y la distribución de presiones del terreno sobre los sistemas de soporte del túnel ya sea provisional o definitivo. Los instrumentos más comúnmente usados para estos propósitos son las celdas de presión y las anclas instrumentadas.

##### a) Celdas de presión.

El instrumento más comúnmente utilizado para este tipo de mediciones es la Celda de Presión tipo Gloetzl. Dicho instrumento está formado por dos láminas circulares de acero - con una relación diámetro espesor lo más grande posible. --

Estas láminas están soldadas en su periferia a un anillo de acero. El interior de la celda se rellena con aceite hidráulico previamente deaireado. El objeto del anillo rígido es el de reducir la sensibilidad de la celda contra cambios de presión normales al plano de aplicación de la carga, además impide la deformación de la celda en dicha dirección. Fig. IV. 19.

La presión ejercida en la celda se mide por medio de un transductor cuyo principio de funcionamiento es igual que el del piezómetro neumático descrito anteriormente. Existen también celdas de presión, instrumentadas con transductores eléctricos como cuerdas vibrantes o sistemas de medidores eléctricos de deformación. El arreglo de celdas de presión más comúnmente usado se muestra en la Fig. IV. 20.

b) Anclas Instrumentadas.

Cuando se decide estabilizar la excavación mediante la instalación de anclas, deberán colocarse anclas de prueba, con el propósito de obtener los cambios en la carga efectiva del ancla.

En el caso de anclas trabajando a fricción, la medición de la tensión inducida puede realizarse mediante la colocación de extensómetros eléctricos (Strain gages) soldados en las anclas que son colocadas formando parte del sistema de an-

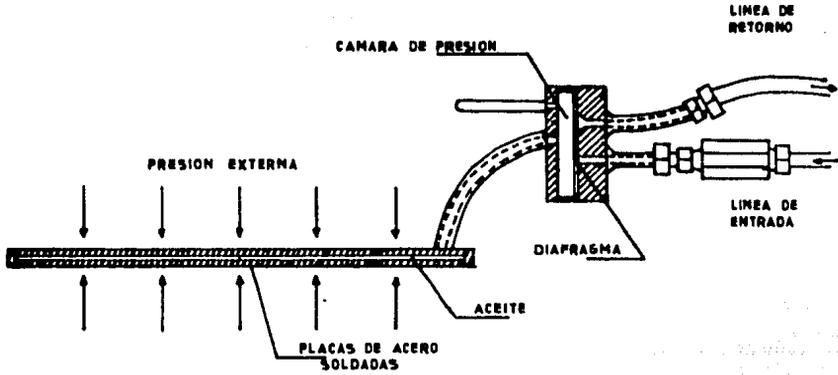


Fig. IV. 19 Celda de Presión tipo Gloetzl

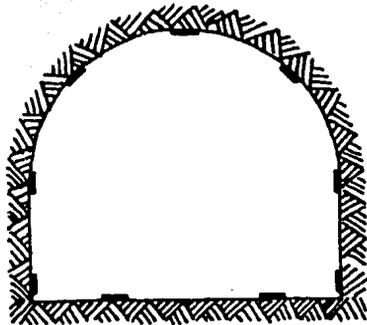


Fig. IV. 20 Arreglo de celdas de presión

claje normalmente empleado.

En el caso de anclas trabajando a tensión, las mediciones se llevan a cabo mediante celdas de carga, las cuales pueden ser las siguientes:

- Celdas Hidráulicas.

Estos dispositivos son gatos hidráulicos con 5 cm de carrera, cuyo cuerpo y pistón son de acero con las superficies de contacto maquinados a espejo para reducir la fricción. El pistón tiene un agujero central y su base está roscada para poder atornillarse, empleando una pieza especial al vástago del ancla. Fig. IV. 21.

En la parte superior del cuerpo del gato, está una pequeña base con un tornillo micrométrico, que en un extremo tiene un micro-interruptor eléctrico, que permite establecer un desplazamiento relativo entre el pistón y el cuerpo de valor conocido Fig. IV. 22.

La presión de aceite se aplica por medio de bomba manual y entra a través de un orificio lateral. La presión aplicada se mide por medio de un manómetro de carátula.

- Celdas con deformímetros eléctricos.

Existen dos tipos de celdas que emplean deformímetros --

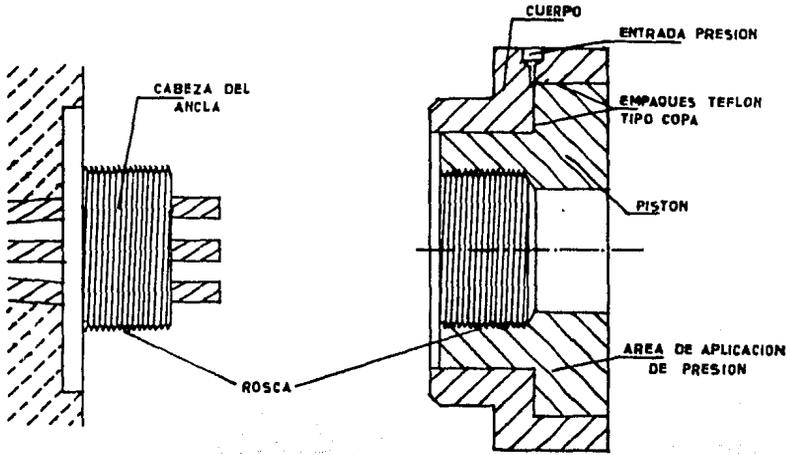


Fig. IV. 21 Celda Hidráulica

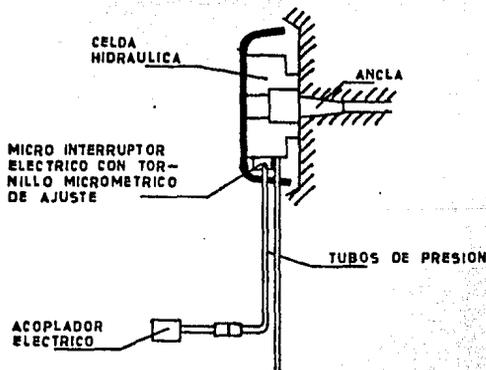


Fig. IV. 22 Componentes de la Celda Hidráulica

eléctricos. Los primeros consisten en un cilindro hueco - que permite el paso del vástago del ancla. Fig. IV. 23. El exterior del cuerpo esta instrumentado con deformímetros del tipo strain gages formando un puente completo -- que se compensa por temperatura; esta instalación esta -- protegida por medio de un cilindro metálico delgado. Este tipo de celdas cuenta con un sistema de cuñas en su base que facilita la instalación.

Los segundos estan constituidos por un cilindro metálico hueco, con extremos roscados al vástago y que esta instrumentado interiormente con deformímetros eléctricos del tipo strain gages formando un puente completo compensado - por temperatura Fig. IV. 24, o con deformímetros tipo --- cuerda vibrante Fig. IV. 25. Las celdas de este tipo forman parte del vástago del ancla y no son desmontables.

Los deformímetros eléctricos requieren para su lectura de un amplificador exterior portátil o de un sistema de lectura remota. Las celdas de carga también pueden ser instaladas entre los tramos de los marcos de acero, con el propósito de medir las cargas soportados por estos.

#### IV.8 Estaciones de medición tipo.

De lo expuesto anteriormente se concluye que para medir cualquiera de

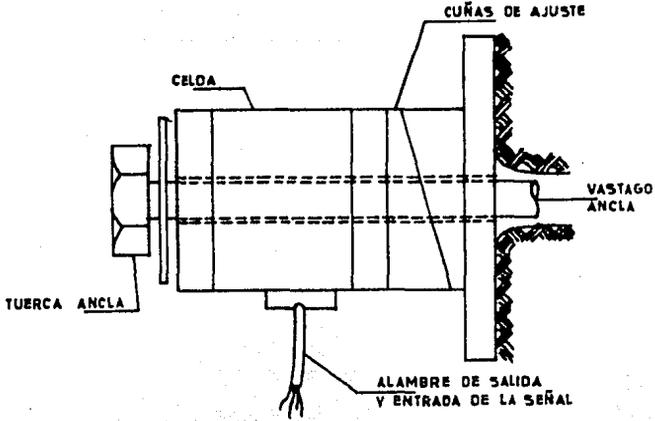


Fig. IV. 23 Celda con deformímetros eléctricos

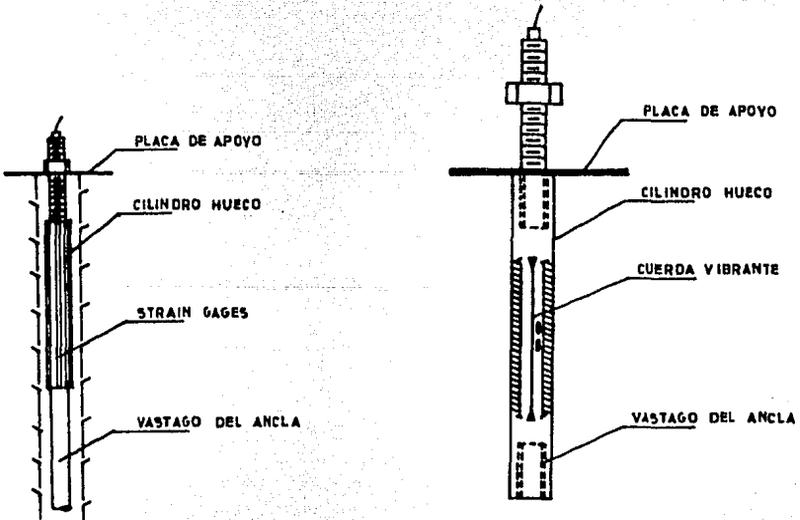


Fig. IV. 24 Celda con deformímetros eléctricos tipo Strain-gage

Fig. IV. 25 Celda con deformímetros eléctricos tipo cuerda vibrante

los diferentes parámetros que nos definen el comportamiento del espacio afectado por la construcción del túnel, se cuenta con una variedad de sistemas de instrumentación.

Sin embargo los programas de instrumentación se deben planear de modo tal que las magnitudes que se desean medir sean derivadas no de un solo instrumento o de una sola ubicación, sino plantear muy cuidadosamente que las magnitudes sean derivadas de ubicaciones múltiples de un mismo tipo de instrumento, para que sirvan de comprobación, o bien, de instrumentos de diferente naturaleza, que de manera directa o indirecta, permitan deducir de las magnitudes medidas con un instrumento una forma de comprobar los resultados derivados de otro tipo de ellos.

Con este propósito se instalan a lo largo del eje del túnel estaciones de medición tipo, en las cuales mediante una serie de sistemas de instrumentación de diferente naturaleza se pretende obtener la información necesaria que nos defina el comportamiento del túnel y del espacio afectado.

Las mediciones que pueden realizarse en una estación de medición tipo pueden ser las siguientes:

- Medición del estado de esfuerzos inherentes en la roca por medio del método de relajación de esfuerzos.
  
- Determinación del módulo de deformación por medio de dilatómetros,

pruebas de placa, pruebas de galería, etc.

- Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante por medio de ensayos "in situ" con gatos hidráulicos, placas de asiento y medidores de deformación o por medio de máquinas de corte portátil.
- Mediciones del movimiento de la superficie del terreno por medio de nivelaciones topográficas de puntos de referencia superficiales o semiprofundos.
- Medición del movimiento del subsuelo entre la superficie del terreno y la clave del túnel por medio de extensómetros longitudinales instalados desde la superficie del terreno.
- Medición del movimiento horizontal del subsuelo por medio de inclinómetros.
- Medición del movimiento del subsuelo que circunda a la excavación del túnel por medio de extensómetros instalados dentro del túnel mismo.
- Mediciones del movimiento convergente de las paredes del túnel por medio de extensómetros de cinta invar.
- Medición de las presiones hidráulicas en la zona del túnel por medio de piezómetros abiertos o cerrados.

- Medición de las presiones sobre los sistemas de soporte del túnel -  
por medio de celdas de presión o anclas instrumentadas.

La información que se obtiene con cada uno de los instrumentos se pro  
cesa, se interpreta y se comparan los resultados. En la Fig. IV. 26,  
se muestra en forma ilustrativa una estación de medición tipo.

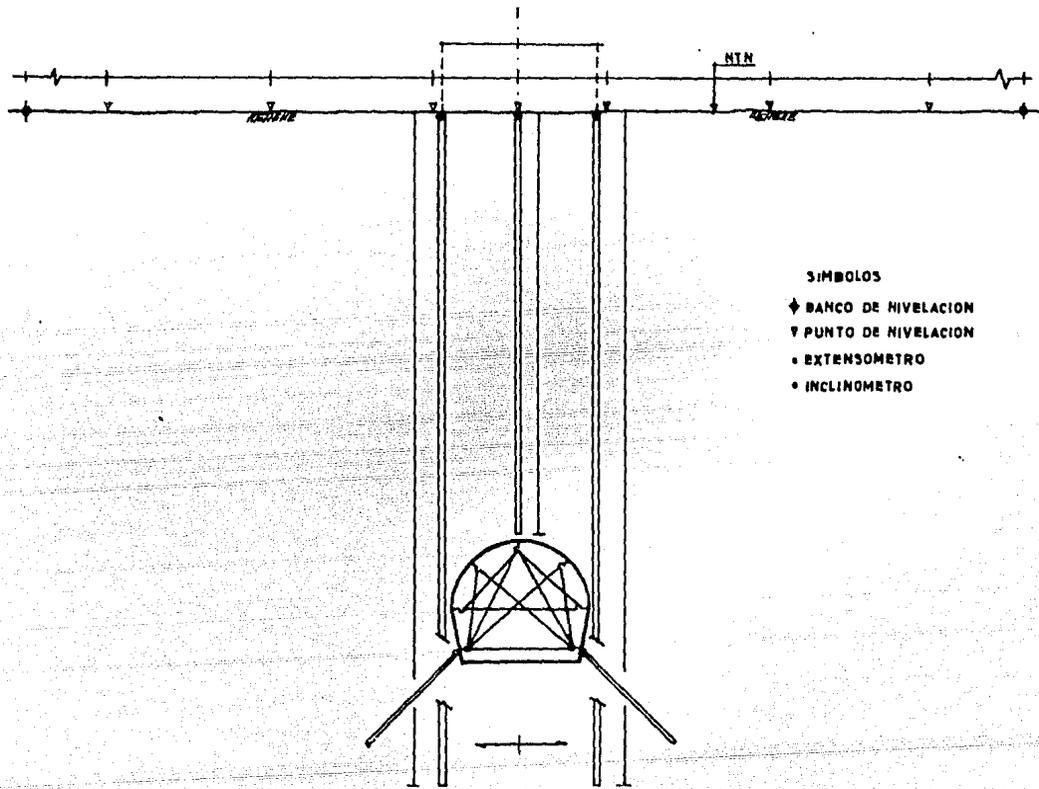


Fig. IV. 26 Sección de Instrumentación Tipo

## C A P I T U L O V

### PROCESAMIENTO DE DATOS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

- V.1 Generalidades
- V.2 Resultados de la medición del estado de esfuerzos inherentes en la roca
- V.3 Resultados de la medición del módulo de deformación
- V.4 Resultados de la medición de la resistencia al esfuerzo cortante
- V.5 Resultados de la nivelación topográfica superficial
- V.6 Resultados de la medición de desplazamientos con extensómetros
- V.7 Resultados de la medición de desplazamientos con inclinómetros
- V.8 Resultados de la medición de desplazamientos con extensómetro de cinta invar
- V.9 Resultados de la medición de presiones hidráulicas
- V.10 Resultados de la medición de presiones sobre los sistemas de soporte
- V.11 Presentación del informe del programa de instrumentación

## V.1 Generalidades

La valuación de los datos recabados en los diferentes instrumentos, - debe realizarse de inmediato en forma metódica y procesarse de preferencia gráficamente para facilitar su interpretación; esto además permite detectar los posibles errores.

El procesamiento e interpretación oportuna de los datos, tiene tres - finalidades principales:

1. Verificar inmediatamente si el instrumento esta funcionando correctamente.
2. Realizar los ajustes necesarios en los métodos de diseño o de construcción.
3. Verificar si ha surgido alguna situación peligrosa que requiera acción inmediata.

El procesamiento e interpretación de los datos comienza con el registro de lecturas en una libreta de campo. El registro de todas las lecturas de un cierto grupo de instrumentos es preferible hacerlo en una libreta de campo en vez de anotarlo por separado en hojas especiales de registro de campo. La libreta de campo contiene toda la información sobre la instalación del instrumento, la elevación de los sensores, los factores de calibración, etc., además de las lecturas previas del instrumento o de instrumentos semejantes. Esto permite la in

interpretación inmediata para saber si las lecturas se ajustan a la tendencia de las anteriores y al patrón general de comportamiento del instrumento o si existe un error o se está presentando una tendencia desfavorable. Además de contener las lecturas, en la libreta de campo se puede anotar el comportamiento previsto para tenerlo como referencia inmediata. También se deben registrar todos los detalles relacionados con la lectura como la fecha y hora de lectura, el operador, el registrador usado, las condiciones del tiempo y temperatura y el avance de la construcción en el sitio del instrumento.

Existen dos puntos clave para el buen funcionamiento del proceso de evaluación: (1) la designación de un ingeniero con experiencia y motivación como responsable de la seguridad de la obra, y (2) la asignación de prioridades en las lecturas de acuerdo a su importancia dentro de la seguridad de la obra.

Es frecuente encontrar dos grupos básicos que trabajan para el ingeniero encargado: la brigada de instrumentación de campo que recaba, examina y transmite las lecturas y el personal de análisis de datos, cuya función es recibir, organizar y procesar la información.

Por lo que toca a la captación de información, lo ideal sería poder contar con un sistema de captación continua de la misma. Para ello la automatización ofrece una solución al problema, así como, al creado por la rápida acumulación de datos. Sin embargo, aunque los procesos automáticos pueden proporcionar observaciones eficientes, confiables

y completas, no pueden sustituir el criterio de un observador humano con experiencia.

De acuerdo con lo anterior, lo ideal es habilitar un sistema combinado de recabación automática con la supervisión continua de la información captada, a fin de detectar oportunamente las irregularidades o situaciones aparentes de peligro.

A continuación se expone la forma más usual para la presentación de los resultados de la instrumentación y los factores que se deben tomar en consideración para su interpretación.

## V.2 Resultados de la medición del estado de esfuerzos inherentes en la roca.

A diferencia de los suelos donde el esfuerzo principal mayor es el vertical y su relación con el esfuerzo horizontal esta dada por un coeficiente de presión de reposo ( $K_0$ ), en las rocas la dirección de los esfuerzos principales depende de su historia geológica.

La primera hipótesis desarrollada sobre la distribución de esfuerzos dentro de una masa rocosa propone que los estados de esfuerzos en las rocas tienen un comportamiento similar al hidrostático. Sin embargo, en la práctica no se confirma esta teoría ya que aunque bien es cierto que los esfuerzos verticales aumentan con la profundidad en este caso lo hacen en función de los pesos volumétricos de los diferentes

estratos que constituyen la estratigrafía o litología del lugar y la relación con el esfuerzo horizontal esta dada por  $K_0 = \sigma_h/\sigma_v$

Posteriormente se desarrolló otra hipótesis, la cual consiste en valorar los estados de esfuerzo de acuerdo con la teoría de la elasticidad, donde la relación entre los esfuerzos horizontal y vertical esta en función del módulo de Poisson, de donde:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v$$

Sin embargo, los materiales rocosos no son elásticos y sus características de deformación dependen considerablemente del estado de esfuerzos tectónicos.

En general se puede suponer que los esfuerzos horizontales son:

$$\sigma_h = N \sigma_v$$

Donde N es un coeficiente cuyo valor puede variar en un amplio intervalo debido a las condiciones geológicas y la profundidad. Esta hipótesis considera las dos anteriores.

La determinación del estado de esfuerzos inherentes en la roca que circunda al túnel por medio de la prueba de roseta (Over-coring) nos permite conocer la magnitud y dirección en que actúa el esfuerzo principal. En la Fig. V.1 se muestra una gráfica deformación-tiempo, obte

nida con este tipo de prueba. En ella se puede determinar el tiempo para el cual se considera que se ha presentado la relajación total de esfuerzos y la magnitud de las deformaciones.

Al introducir los valores de dichas deformaciones en las tres direcciones en el círculo de Mohr de las deformaciones y operando con la geometría de dicho círculo Fig. V. 2, se obtienen las expresiones que nos definen el centro y el radio del mismo. Esto es:

$$\frac{e_1 + e_2 + e_3}{3} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} = \overline{OD}$$

$$g_3 = \frac{e_2 - e_1}{3}$$

Donde:

$\overline{OD}$  = Posición del centro del círculo

$g_3$  = Radio del círculo

La segunda de las expresiones anteriores nos permite conocer el radio del círculo, pues los valores de las deformaciones ( $e_3, g_3$ ) definen un punto del círculo.

Como se conoce la dirección de la deformación (C, F) es posible encontrar el polo y la magnitud y dirección de las deformaciones principales.

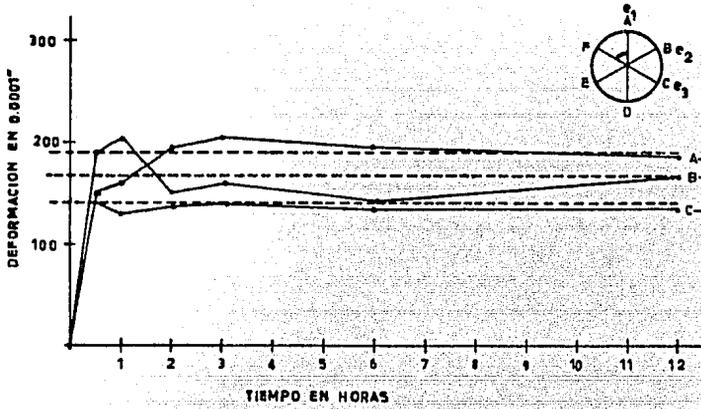


Fig. V.1 Gráfica Típica de la Prueba de Roseta (Over-coring)

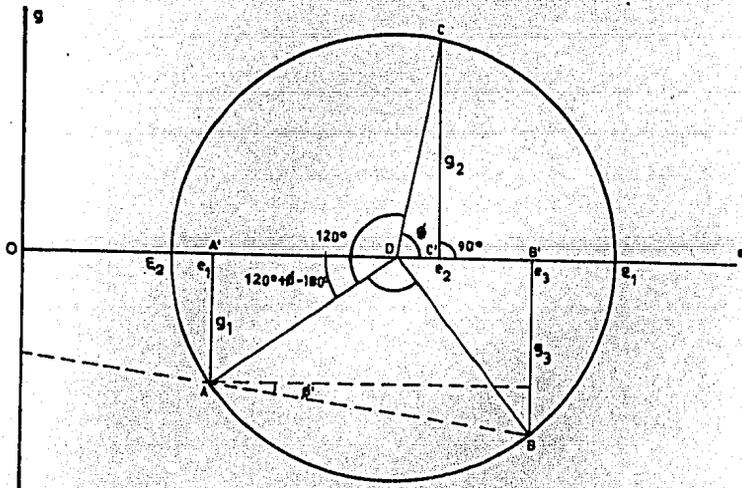


Fig. V.2 Círculo de Mohr de las Deformaciones para la Prueba de Roseta (Over-coring)

Por la teoría de la elasticidad se determina que las direcciones principales de deformación corresponden a las direcciones principales de esfuerzos y que para un estado plano de esfuerzos:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_1 + \nu\epsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_2 + \nu\epsilon_1)$$

Las constantes elásticas de la roca pueden ser determinadas en el laboratorio, para lo cual se saca una muestra del núcleo de la roca que ha sufrido la relajación de esfuerzos.

Los factores que se deben tomar en consideración para la interpretación de los resultados son los siguientes:

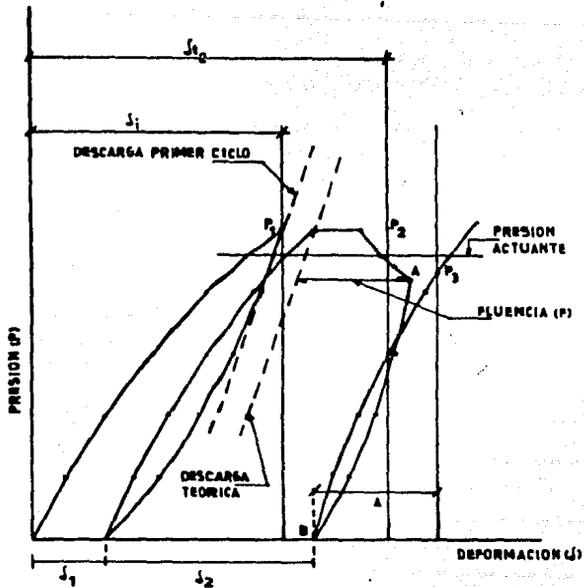
1. Se considera elástica la roca.
2. La medición de los esfuerzos se efectúa dentro del túnel o en una galería de reconocimiento en donde el estado inicial de esfuerzos ha sido alterado por efecto de la excavación.
3. Los resultados de los ensayos de laboratorio sobreestiman los valores de los constantes elásticas de la roca.
4. Los aparatos de medición de deformación disponibles son de operación delicada en las condiciones de trabajo del túnel.

5. El método de perforación produce alteraciones en la roca.

Para la determinación de los esfuerzos actuantes en la roca por el método del Gato Plano se elabora una gráfica presión-deformación con los resultados de las mediciones como se muestra en la Fig. V.3.

En ella se puede observar que la primera etapa de la prueba consiste en un ciclo de carga y descarga, incrementando paulatinamente la presión desde 0 hasta el valor de "cancelación", o sea, la presión que produce deformaciones que contrarrestan a las deformaciones inmediatas ocurridas al hacer la ranura. Al llegar a la presión de cancelación de deformaciones, el Gato se descarga, también en etapas, hasta 0, midiéndose las deformaciones producidas en cada decremento. Inmediatamente después se carga nuevamente por etapas hasta alcanzar la presión máxima de la etapa anterior permitiendo que actúe durante un tiempo suficiente para que se desarrollen las deformaciones diferidas en la roca obteniéndose el punto "A" en la gráfica. Con la información recabada, se realiza un primer cálculo de la presión actuante en el sitio de la excavación.

Posteriormente se efectúa un reciclaje para verificar la presión actuante, el cual constituye una segunda medición. En esta etapa se descarga por etapas hasta 0, llegando al punto "B". A continuación se incrementa la presión también por etapas hasta lograr que las deformaciones registradas a partir del punto "B", tengan un valor igual al indicado en la fórmula siguiente, en la cual los distintos térmi-



- $\delta_i$  Deformación producida al terminar la ranura para un tiempo  $t_1$ .
- $\delta_{t_2}$  Deformación para el tiempo  $t_2$ , antes de iniciar la carga en el gato.
- $\delta_1$  y  $\delta_2$ , Deformaciones permanentes producidas por el primero y el segundo ciclos de carga y descarga respectivamente.
- $P_1$  y  $P_2$ , Presiones de cancelación considerando fluencias a tiempos  $t_1$  y  $t_2$ , respectivamente.
- $\Delta$  Deformación a cancelar en la segunda prueba.
- $P_3$ , Presión de cancelación de  $\Delta$

Fig. V. 3 Esquema de secuencia de la prueba de Gato Plano

nos involucrados corresponden a los datos indicados en la Fig. V. 3.

$$\Delta = \delta_1 - \delta_1 - (\delta_2 - F)$$

Con la información obtenida en el reciclaje, se hace un segundo cálculo de la presión actuante, el cual se compara con el primer valor calculado y se determina finalmente la presión actuante en el sitio en estudio, así como, la valuación de la presión lograda.

Este método tiene la ventaja con respecto al anterior de que no es necesario conocer el valor del módulo de deformación. Los factores que se deben tomar en consideración para su interpretación son:

1. Solo se miden esfuerzos normales a un plano que no es necesariamente la dirección de los esfuerzos principales.
2. Al abrirse la ranura se alteran las propiedades mecánicas de la roca y para una misma deformación el esfuerzo determinado es menor que el real.

### V.3 Resultados de la medición del módulo de deformación.

Resulta difícil definir el módulo de deformación debido a que los cambios en el tipo de roca, las juntas y zonas de cortante características, las foliaciones y la estructura geológica contribuyen a cambiar su valor. Por otra parte debido a la forma de las curvas esfuerzo-de-

formación obtenidas de las mediciones, se requiere que se especifique el nivel de esfuerzos al que fueron obtenidos dichos módulos, así como, el criterio que se siguió para definirlos (tangente, secante). -- Asimismo, es necesario indicar si corresponde a la rama de carga ascendente o descendente.

A continuación se describe la forma de interpretar los datos obtenidos con los métodos descritos en el capítulo anterior para este propósito:

a) Con Dilatómetros o Gato Goodman.

Mediante la utilización de estos instrumentos es posible medir la presión aplicada a la deformación, en varias direcciones a una misma profundidad, de tal manera de conocer la elipse de deformaciones como se muestra en la Fig. V.4.

Para interpretar los resultados de esta prueba se aplica la solución de Lamé, basada en la teoría de la elasticidad. La expresión para el módulo de elasticidad es el siguiente:

$$E = 2a \frac{1 + \nu}{D} P$$

En donde:

$2a$  = Diámetro de la perforación

$D$  = Deformación de un diámetro al aplicarse la presión  $P$

$\nu$  = Relación de Poisson

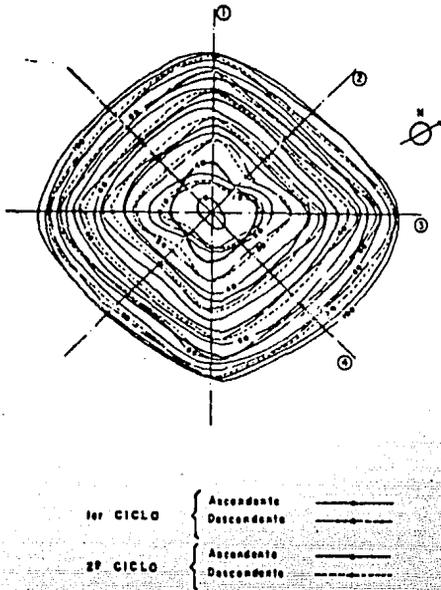


Fig. V.4 Elipse de deformaciones en un barrero, obtenida con dilatómetro

Debido a que el volúmen de roca involucrado en cada prueba es pequeño, a menudo el resultado no es representativo de toda la masa rocosa. Sin embargo, se pueden efectuar un gran número de pruebas en una masa rocosa y trabajar estos resultados estadísticamente para determinar un valor medio representativo de la masa.

b) Prueba de Placa.

En el caso de los resultados de la prueba de placa, éstos quedan representados también mediante curvas esfuerzo-deformación. En esta prueba se mantienen con el tiempo los incrementos de carga, con

objeto de observar la variación de la deformación con el tiempo.

Para la interpretación de los resultados se hace uso de la teoría de Boussinesq para un espacio elástico e infinito:

$$E = \frac{KP}{\delta} \frac{1 - \nu^2}{R}$$

En donde:

E = Módulo de elasticidad

P = Presión

$\delta$  = Desplazamiento

R = Radio de la placa

$\nu$  = Coeficiente de Poisson

K = Coeficiente que depende del punto de medición de --  
los desplazamientos y de la rigidez de la placa

Para  $r = 0$ ;  $K = 2$

Para  $r = R$ ;  $K = 4$

Los factores que se deben tomar en consideración para la interpretación de la prueba son los siguientes:

1. Tamaño de la zona de carga.
2. Magnitud de la carga.
3. Esfuerzos tectónicos actuantes.
4. Heterogeneidad, anisotropía y estratigrafía de las rocas.

5. La velocidad de aplicación del esfuerzo, debido a las propiedades viscoelásticas de la roca.

c) Prueba de Galería.

Para la interpretación de resultados mediante la prueba de Galería en el caso de que el recubrimiento sea perfectamente flexible se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta D}{D} = P \frac{(1 + \nu)}{E}$$

En donde:

D = Diámetro de la galería

P = Presión aplicada

$\nu$  = Relación de Poisson

E = Módulo de Young de la roca

En el caso de un recubrimiento de concreto se utiliza la siguiente expresión:

$$E = \frac{PD}{AD} - \frac{2e}{D} E_c$$

En donde:

e = Espesor del anillo de recubrimiento

$E_c$  = Módulo de deformabilidad del concreto

#### V.4 Resultados de la medición de la resistencia al esfuerzo cortante.

##### a) Prueba "in situ"

La información obtenida en esta prueba, se puede presentar en una gráfica mediante un sistema de ejes coordenados en donde las abscisas son los desplazamientos horizontales o verticales y las ordenadas son los esfuerzos tangenciales. Los resultados de estas gráficas son muy útiles para la interpretación de los resultados de medición de desplazamientos en la etapa de construcción del túnel ya que nos permite conocer los desplazamientos máximos para ciertas condiciones de esfuerzos normal y tangencial.

Por otra parte, mediante la utilización del Círculo de Mohr ( $\sigma, \tau$ ) se puede determinar los parámetros de cohesión y fricción.

Esta prueba muy sencilla en su concepto, presenta problemas en su realización debido a: orientación de las fuerzas aplicadas, velocidad de carga, condiciones de saturación de la muestra, etc.

##### b) Prueba Portátil.

En la prueba de resistencia al esfuerzo cortante mediante la utilización de la máquina de corte portátil, el tamaño de la muestra, que puede colocarse en la máquina es de 4" x 4" (10 x 10 cm) lo -- que implica que es muy difícil probar juntas con superficies discontinuas que representen las condiciones "in situ", por lo que se recomienda que el uso de esta máquina sea para la determinación --

del ángulo de fricción.

En general, a pesar de la poca precisión, los resultados de las pruebas dan una buena idea de la resistencia al esfuerzo cortante de la discontinuidad ensayada.

#### V.5 Resultados de la medición de desplazamientos mediante nivelación topográfica superficial.

En la Fig. V.5, se muestra una gráfica típica de la nivelación topográfica superficial. En ella se determina la magnitud de los asentamientos superficiales, su distribución a lo largo de la sección y su variación y estabilización con el tiempo. Como es de esperarse se podrá observar que los asentamientos máximos se presentan por encima del eje del túnel y se van disipando conforme se aleja de este. Los resultados también se pueden presentar por medio de curvas de asentamiento-tiempo.

#### V.6 Resultados de la medición de desplazamientos con extensómetros.

En las Figs. V.6 y V.7, se muestra dos gráficas típicas de los resultados de la medición de desplazamientos con extensómetros instalados desde la superficie del terreno. En ellos se pueden determinar el movimiento total de separación entre cada ancla de medición y el nivel de terreno natural.

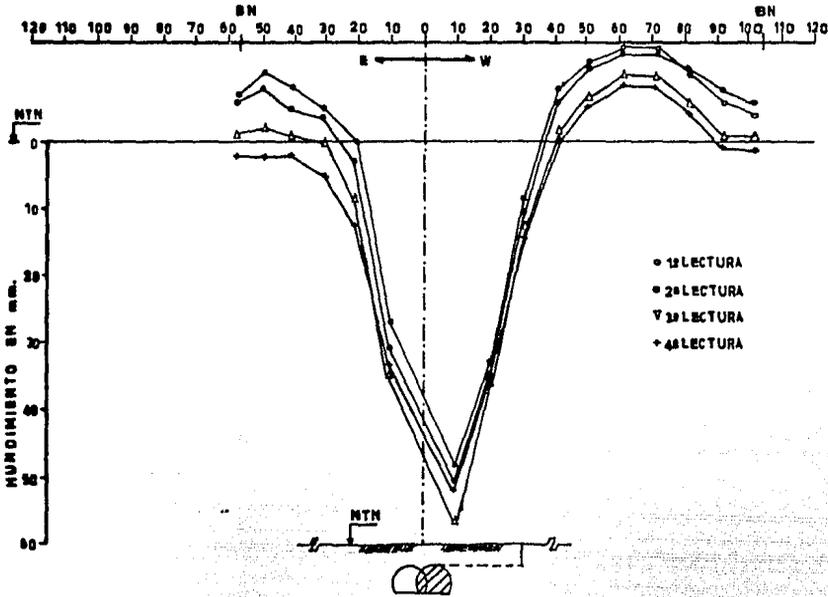


Fig. V.5 Resultados de la Nivelación Topográfica Superficial

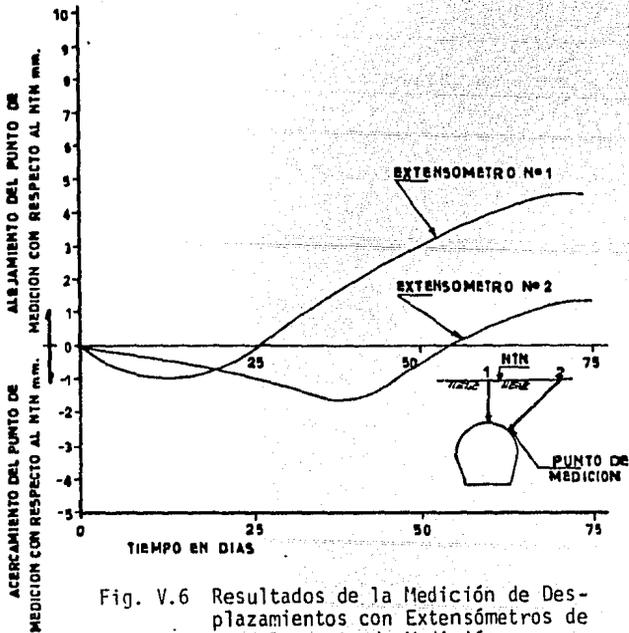


Fig. V.6 Resultados de la Medición de Desplazamientos con Extensómetros de un solo punto de Medición

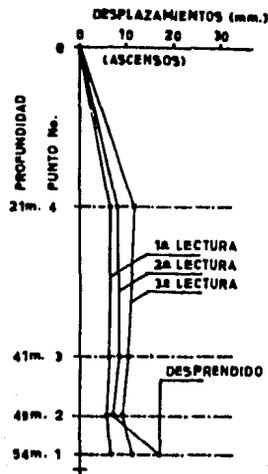


Fig. V.7 Resultados de la Medición de Desplazamientos con Extensómetro de varios puntos de medición

Mediante un simple cálculo de la pendiente de la curva de deformación se puede obtener también la velocidad de deformación.

Esto es:

$$v_d = \frac{dx}{dt}$$

En donde:

$v_d$  = Velocidad de desplazamiento

$dx$  = Diferencia de magnitud de desplazamiento para dos tiempos de medición

$dt$  = Diferencia de tiempos de medición

Mediante esta gráfica se observa todo el desarrollo de los desplazamientos con el tiempo y avance de la construcción y se puede determinar también el tiempo de estabilización de los movimientos.

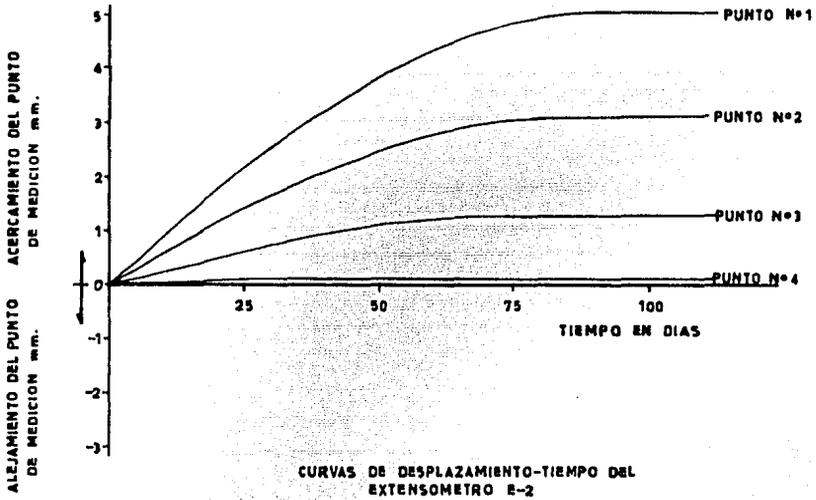
Para la interpretación de resultados se deben tener en consideración los siguientes parámetros:

1. Longitud del cable instalado.
2. Inclínación del cable de medición.
3. Tensión inicial dada al cable en el momento de su instalación.
4. La rigidez del cantiliver de medición.

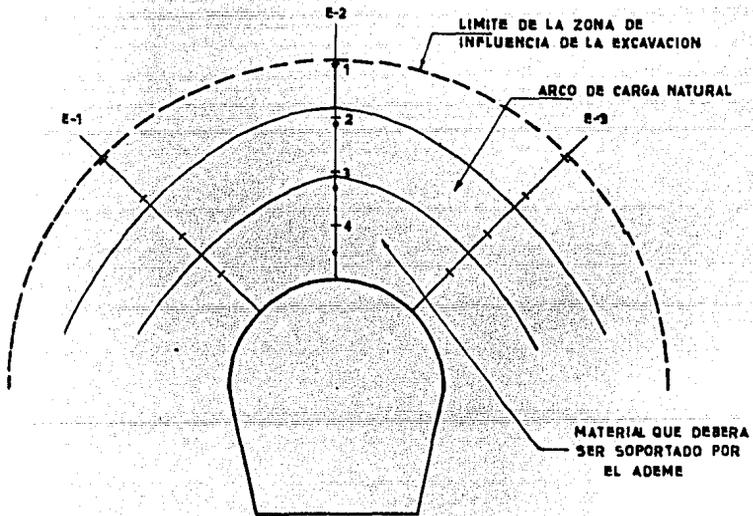
Con la interpretación adecuada de los datos obtenidos se puede conocer en los túneles, zonas que están perdiendo o adquiriendo tensión, zonas que son estables o libres de esfuerzos y cuando se miden asentamientos, zonas que están en proceso de consolidación como se muestra en la Fig. V.8, en donde se obtienen las curvas idealizadas de desplazamiento para un extensómetro instalado dentro del túnel y la interpretación que se le da a dichas curvas.

#### V.7 Resultados de la medición de desplazamientos con inclinómetros.

Como se expuso en páginas anteriores, los inclinómetros miden los ángulos de inclinación de cada uno de los segmentos de tubo deformado como consecuencia de los desplazamientos horizontales del subsuelo. Para procesar e interpretar los resultados de dichas mediciones se ob



CURVAS DE DESPLAZAMIENTO-TIEMPO DEL EXTENSOMETRO E-2



• DESPLAZAMIENTO DEL PUNTO DE MEDICION

Fig. V.8 Resultados de la medición de desplazamientos con extensómetros instalados dentro del túnel

tiene la geometría del tubo deformado con los ángulos de inclinación medidos de cada uno de los segmentos de tubo respecto a la vertical - como se muestra en la Fig. V.9.

De esta figura se deduce que el desplazamiento  $X_n$  relativo de un punto cualquiera se determina de la siguiente forma:

$$X_n = X_{n-1} + \Delta X_n$$

El incremento de desplazamiento  $\Delta X_i$  de un punto cualquiera con respecto al anterior será:

$$\Delta X_i = a \sin \theta_i$$

En donde:

$a$  = Longitud de los tramos de tubo

$\theta$  = Angulo de inclinación del tubo

Por lo tanto el desplazamiento total del punto  $X_n$  será:

$$X_n = X_f + X_0 + a \sum_{i=1}^n \sin \theta_i$$

Cuando el extremo inferior de la tubería es fijo  $X_f = 0$

Por último el desplazamiento vertical  $Z_n$  será:

$$Z_n = a \sum_{i=1}^n \cos \theta_i$$

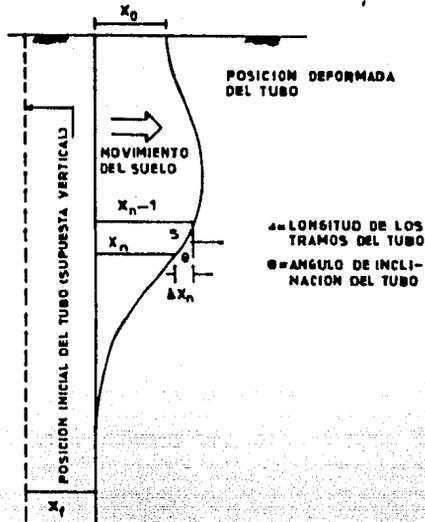


Fig. V.9 Diagrama Operacional del Inclínometro

En las Figs. V.10 y V.11, se presentan dos gráficas típicas de los resultados de mediciones hechas con inclinómetro.

En la primera de ellas se puede determinar la distribución de los desplazamientos horizontales con la profundidad y con el tiempo. Se observa que los desplazamientos máximos se registran a la profundidad del túnel.

En la segunda gráfica se determina la variación de los desplazamientos horizontales con el tiempo.

En esta gráfica se puede calcular también la velocidad de deformación

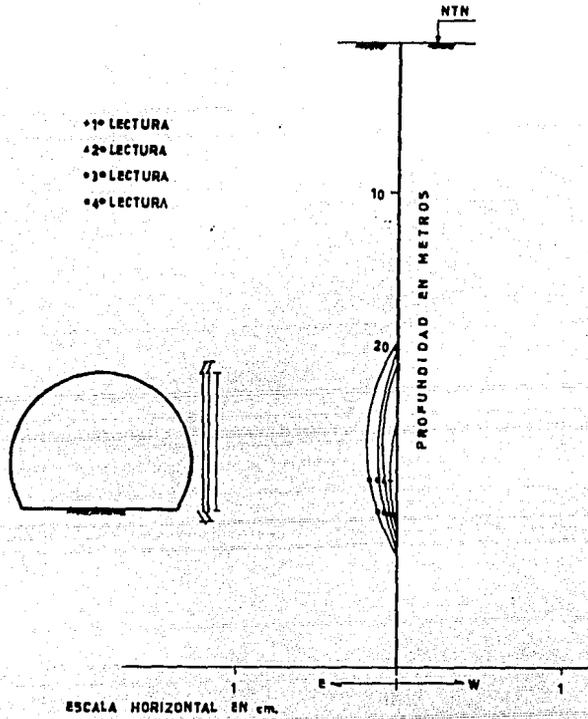


Fig. V.10 Resultados de la medición de desplazamientos con inclinómetro, en función de la profundidad

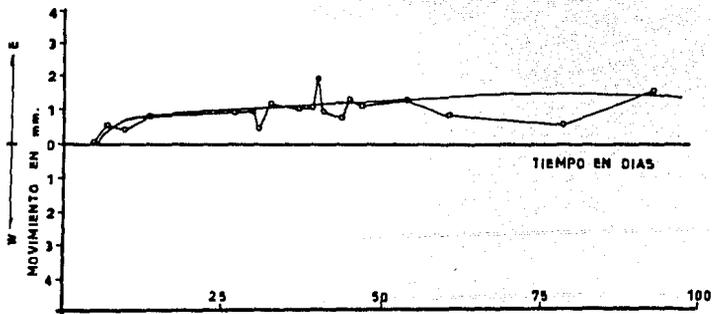


Fig. V.11 Resultados de la medición de desplazamientos con inclinómetro, en función del tiempo

de igual forma que como se expuso anteriormente para los extensómetros. También se puede determinar el tiempo de estabilización de los movimientos.

Los factores que se deben tomar en consideración para la interpretación de resultados son los siguientes:

1. Procedimiento de instalación de la tubería.
2. Deformabilidad lateral de la tubería.
3. Longitud de los tramos de tubería.
4. Longitud del inclinómetro.
5. Precisión de medición del inclinómetro.

#### V.8 Medición de desplazamientos con extensómetro de cinta invar.

En la Fig. V. 12, se muestra una gráfica típica para un arreglo en particular de mediciones de desplazamientos convergentes.

La información que se obtiene de ella es; 1) La magnitud de los desplazamientos entre los dos puntos de referencia que forman cada línea de medición, 2) La velocidad de deformación, 3) El tiempo de estabilización.

Un factor que se debe tomar en consideración en la interpretación de resultados de este tipo de mediciones es que el instrumento se instala en el interior de la excavación misma y por lo tanto las medicio-

nes se realizan cuando la excavación ya ha sido efectuada, lo que implica que parte de las deformaciones inducidas por la excavación ya se presentaron en el momento en que el instrumento está en posibilidad de empezar a registrar tales desplazamientos. Por lo tanto la magnitud de los desplazamientos medidos con este tipo de instrumentos -- son relativos.

En la Fig. V.13, se muestra otra forma de presentación de los resultados de las mediciones con este tipo de instrumento. En ella se observa de una manera más objetiva la configuración de la deformación radial de la sección del túnel instrumentada. Para la elaboración de esta sección se necesita que alguna de las magnitudes medidas sea absoluta, para lo cual se hacen combinaciones de convergencias con cálculo geométrico de triángulos.

En general las mediciones de deformaciones de convergencia en un túnel integra tanto los efectos elásticos, los plásticos y los viscosos del comportamiento, como las dimensiones y la forma del túnel y particularmente la influencia del avance de la excavación. Al mismo tiempo estas deformaciones reflejan los efectos de los cambios en el terreno por efectos de intemperismo, pérdidas de humedad y presencia de agua (alteración, degradación, pérdida de cohesión, disminución de la resistencia al esfuerzo cortante).

#### V.9 Resultados de la medición de presiones hidráulicas.

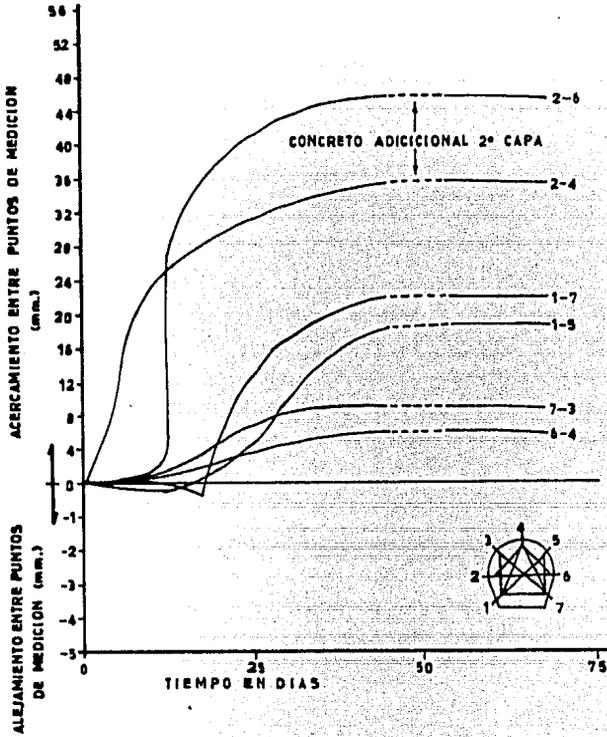


Fig. V.12 Resultados de la medición de convergencias con extensómetro de cinta invar

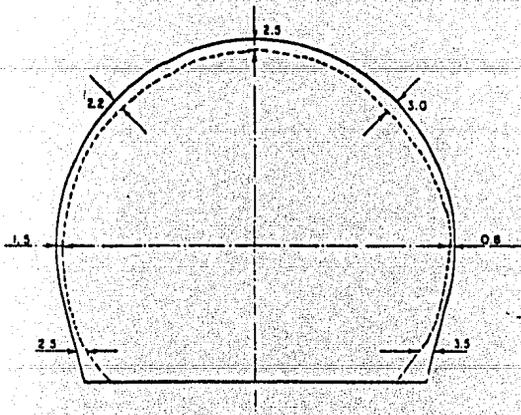


Fig. V.13 Deformación radial, obtenida con extensómetro de cinta invar

Los resultados de la medición de las presiones hidráulicas con piezómetros, se pueden presentar mediante diagramas en donde se muestre el nivel del agua superficial y la variación de las presiones piezométricas con la profundidad. Otra forma de presentar los resultados es por medio de una gráfica presión piezométrica-tiempo. En este tipo de gráfica se puede determinar la variación de la presión piezométrica con el tiempo y el tiempo de estabilización.

Mediante una distribución apropiada de los piezómetros en la zona del túnel se puede registrar el alcance del abatimiento del nivel original del agua.

Para la interpretación de resultados en el caso del piezómetro abierto se debe de tomar en consideración el tiempo que ha de transcurrir entre cualquier cambio en la presión del agua del subsuelo y la respuesta del aparato motivado por la necesidad de que un volumen relativamente alto de agua entre en la unidad sensible y establezca el equilibrio interior, con el correspondiente cambio en la altura de agua en la tubería de salida al exterior, lo que puede demandar nuevos volúmenes de agua o eliminación de sobrantes.

Para el caso de piezómetros neumáticos la presión del agua debe ser determinada a través de una curva de calibración previa hecha en el laboratorio, la cual toma en cuenta el área de aplicación de presiones por arriba y por abajo del diafragma, la rigidez de la membrana, la disipación de presión en la tubería, etc.

#### V.10 Resultados de la medición de presiones sobre los sistemas de soporte.

En la Fig. V.14, se presenta la forma de graficar los resultados de la medición de cargas sobre los sistemas de soporte. En ella se determina la magnitud, la distribución y la variación con el tiempo de las cargas.

Con los resultados de este tipo de mediciones se establece qué tipo de presión esta actuando con mayor intensidad. Si la carga máxima esta actuando en el techo del túnel se tendrá presión por aflojamiento, si actúa en las paredes del túnel se tendrá lo que se denomina presión de estabilidad parcial o presión de suelo o roca, o si actúa en el piso del túnel podrá ser presión por expansión.

El factor que se debe de tomar en consideración para la interpretación de resultados es la alteración que la celda de presión pueda causar en el medio en que se instala debido a la diferencia de rigideces de la celda misma, el suelo o roca y el sistema de soporte.

Esta misma presentación se le puede dar a los resultados de la medición mediante celdas de carga instaladas en anclas de tensión o entre los tramos de los marcos de acero. En el primer caso las cargas medidas serán iguales a la tensión en el ancla y en el segundo caso a la carga que estan soportando los tramos de marco de acero.

Para el caso de anclas de fricción instrumentadas con strain gages la

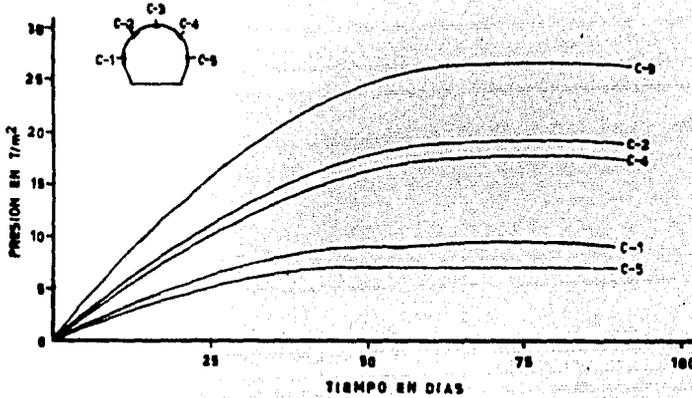


Fig. V.14 Resultados de la medición de presiones sobre los sistemas de soporte

distribución de tensiones inducidas se puede determinar conociendo -- las propiedades del acero del ancla y con las mediciones de la deformación inducida a lo largo de la misma. En la Fig. V.15, se muestra una forma de graficar los resultados de estas mediciones. En ella se observa que la tensión registrada en los strain gages es prácticamente constante a lo largo del ancla y es nula en el extremo situado dentro de la masa de roca y adquiere el valor correspondiente al peso - del material aflojado bajo el arco de carga en el extremo situado sobre la superficie excavada.

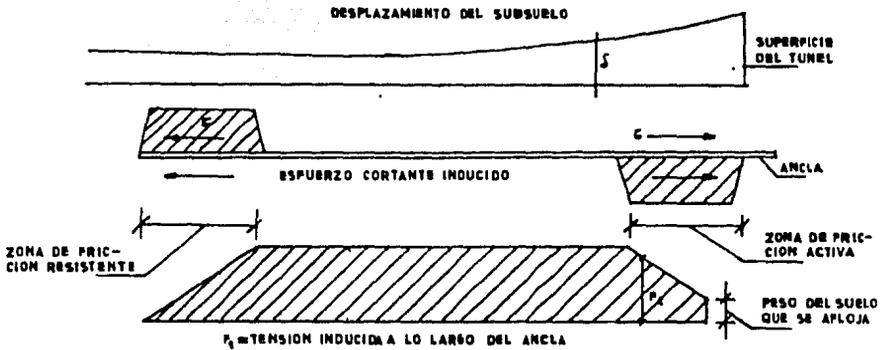


Fig. V.15 Condiciones de trabajo idealizadas de las anclas, obtenidas mediante instrumentación

#### V.11 Presentación del Informe del Programa de Instrumentación.

La presentación del informe del programa de instrumentación se realiza en dos partes, según el método recomendado por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas. Los puntos que se tratan en esas dos partes son los siguientes:

##### 1. Reporte de Instalación de Instrumentos

Esta parte del informe incluye:

- a) Una descripción y diagramas de todos los componentes de los instrumentos empleados.

- b) Un registro del tipo y detalles del equipo auxiliar utilizado para la instalación de los instrumentos.
  - c) Detalles y métodos de instalación, calibración, observación y toma de lecturas.
  - d) Planos de localización de instrumentos, incluyendo: estación o coordenadas y elevación de las cabezas de los instrumentos; profundidad, orientación y diámetro de las perforaciones; distancias entre instrumentos y posición relativa de los mismos a las estructuras presentes, futuras y otras construcciones.
  - e) Una vista de las estaciones de instrumentación tipo, donde se muestre la instalación de instrumentos, las estructuras presentes y futuras y la geología.
2. Reporte de resultados del programa de instrumentación.

Esta parte del informe incluye:

- a) Presentación de los resultados de la instrumentación por medio de tablas o formas especiales.
- b) Presentación de los resultados por medio de gráficas en las cuales los parámetros medidos se correlacionan con el tiempo, la profundidad, el avance de la construcción, etc.

- c) Discusión de los resultados presentados en forma gráfica, destacando los resultados más significativos.
  
- d) Interpretación de los resultados obtenidos, en donde se expone la forma del comportamiento que se está presentando en el túnel y en la formación geológica que lo rodea, los resultados que se establezcan como peligrosos para la estabilidad de la obra y medidas de remedio y la comparación de las teorías adoptadas para el análisis y diseño del túnel con los resultados obtenidos, - con el objeto de modificar o retroalimentar dichas teorías.

## CONCLUSIONES

1. El problema de predecir en forma teórica el comportamiento de un túnel para propósitos de elección del procedimiento de construcción a emplear y de diseño de los sistemas de soporte temporal y definitivo, aún no ha sido resuelto total y satisfactoriamente. Esto es debido principalmente a que falta mucho por investigar sobre las relaciones esfuerzo-deformación de la masa del subsuelo y su influencia en las estructuras colocadas como ademes.

Para este propósito la instrumentación aplicada al proyecto de túneles, se presenta como una herramienta básica de la investigación y permite, por medio de mediciones obtenidas de las excavaciones subterráneas, verificar, refinar e incluso establecer los métodos de análisis y diseño necesarios para lograr un aceptable margen de seguridad, economía y confiabilidad en la construcción y operación de los túneles. Para ello se debe intentar hallar de los resultados de las mediciones, una mejor comprensión del comportamiento de los túneles, fundamentalmente en lo que se refiere a la observación de los fenómenos que se producen y a la identificación de los parámetros que principalmente definen ese comportamiento para así buscar la expresión de un modelo matemático que lo refleje y aplicarlo a condiciones variables, hasta comprobar que dicho modelo predice con suficiente aproximación el comportamiento esperado.

Por otra parte los procedimientos de excavación se determinan en función del comportamiento esperado de la masa del subsuelo. La instrumentación utilizada como control del comportamiento del túnel durante las etapas de construcción y operación, permite comprobar si se obtiene el comportamiento esperado, si se debe cambiar el procedimiento de excavación o si se deben reforzar los sistemas de soporte empleados y extremar precauciones y consecuentemente si es necesario modificar el método de diseño.

2. De esta forma los beneficios directos o indirectos que se pueden obtener del programa de instrumentación aplicado a la construcción de túneles son muy importantes, tanto para la construcción misma del túnel, como para lograr un mejor entendimiento de este tipo de obras, dependiendo su buen éxito del grado de precisión y detalle a que se llega durante su planeación y habilitación. Para ello es necesario que se reúnan el proyectista, el especialista en instrumentación y el constructor de la obra con el propósito de planear conjuntamente, cada una de las etapas del programa de instrumentación, las cuales incluyen la elección de parámetros a medir, el tipo, número y localización de los sistemas y equipos de instrumentación y el tiempo y frecuencia de las mediciones.

Con esto se podrá lograr que cada uno de ellos obtenga el máximo provecho posible de la instrumentación, además de una plena coordinación en los trabajos a realizar por cada uno de ellos, con el propósito de obtener mediciones precisas y oportunas, evitar interferencias y retrasos en el proceso constructivo, daños a los aparatos, etc.

3. La necesidad de obtener resultados confiables y de aproximación suficiente de un programa de instrumentación en túneles, requiere que los fabricantes de los instrumentos tengan como objetivo primordial, el diseño de instrumentos de buena precisión, sencillos, de fácil y simple operación, robustos, resistentes, durables y que requieran de un grado mínimo de procesamiento de la información que de ellos se obtiene.

Para ello, también es necesario que los usuarios de los instrumentos hagan saber a los fabricantes de los mismos, de las mejoras que pueden o deben hacerse, con el propósito de aumentar el aprovechamiento de esta valiosa herramienta de la ingeniería civil.

Por otra parte, la tendencia actual en el desarrollo de nuevos instrumentos es la fabricación y perfeccionamiento de instrumentos de tipo eléctrico y electrónico. Esto es debido a que en condiciones ideales para el buen funcionamiento de este tipo de aparatos, se obtienen los resultados más precisos y confiables, además de que la información captada por ellos se puede procesar automáticamente. Sin embargo, en opinión de muchos especialistas, hasta el momento no se han logrado en la práctica resultados satisfactorios con este tipo de instrumentos, debido principalmente al efecto que las condiciones ambientales de los túneles tienen sobre éstos. Por lo tanto, todavía falta mucho por investigar para llegar a perfeccionar este tipo de instrumentos, y mientras tanto la utilización de instrumentos más sencillos, de preferencia de funcionamiento mecánico, siguen siendo los que proporcionan los mejores resultados.

4. La interpretación de la información captada por los instrumentos es la etapa más importante del programa de instrumentación y por lo tanto deberá de realizarla un ingeniero especialista en túneles con suficiente experiencia e interés en el problema.

Esta persona debe tener el suficiente criterio para valorar los resultados de las mediciones con el propósito de verificar o detectar anomalías en el comportamiento tanto del túnel, como de los aparatos de medición.

Por otra parte, la interpretación de los resultados de las mediciones -- también deben ser aprovechados para retroalimentar los esquemas teóricos de análisis y diseño, con el propósito de que queden debidamente comprobados y retroalimentados de acuerdo con las reglas de la investigación científica y así poder aplicarlos con mayor confianza.

5. Como conclusión final, se puede decir que la instrumentación aplicada a la construcción de túneles es de gran utilidad. Sin embargo, aún falta mucho por investigar tanto en lo concerniente al comportamiento de los túneles apoyado en las mediciones, como en las mediciones mismas, así como, en el diseño y fabricación de instrumentos más eficientes y seguros.

De esta forma, queda abierta la investigación en este campo de la ingeniería civil.

BIBLIOGRAFIA

- Basic Considerations on the Desing of Undergraund Openings. K. Kovari.
- Szechy, K. The art of Tunneling, Akademiai Kiadó Budapest. 1967.
- Simposio sobre Instrumentación y Mediciones en Túneles, Oaxtepec, Mor. 1981, S.M.M.S.
- Túneles en Suelos Blandos y Firmes, S.M.M.S.
- Field Measurements in Rock Mechanics. Proceedings of the International Symposium, Vol. I. A.A. Balkema Rotterdam, Zurich 1977.
- Construction Monitoring of Soft Ground Rapid Transit Tunnels. Vol. I y II, Prepared for: Transportation Systemas Center.
- Manual de Diseño de Obras Civiles, Geotecnia, B.2.5 y B.3.6 C.F.E.
- Apuntes de Mecánica de Rocas, Jesús Alberro Arámburo (Inéditos).
- Artículos y Catálogos diversos sobre Instrumentación.