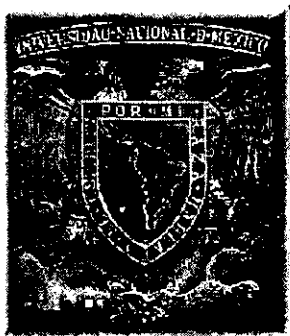


47



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON

297116

"ALGUNOS ASPECTOS ACERCA DE LOS HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES
EN EL PALACIO NACIONAL"

TESIS

Que para obtener el titulo de :

INGENIERO CIVIL

Presenta:

JUAN CARLOS TERRONES MARES.



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.

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

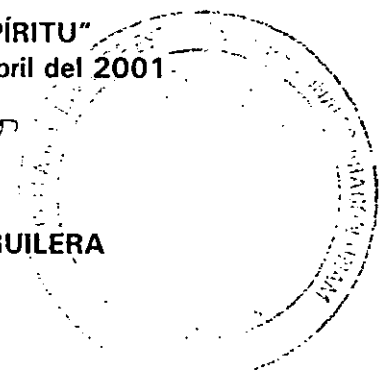
**JUAN CARLOS TERRONES MARES
P R E S E N T E.**

En contestación a la solicitud de fecha 6 de abril del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. ABRAHAM ROBERTO SÁNCHEZ RAMÍREZ pueda dirigirle el trabajo de tesis denominado "ALGUNOS ASPECTOS ACERCA DE LOS HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES EN EL PALACIO NACIONAL", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

**Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México, 23 de abril del 2001
DIRECTOR INTERINO**

ARQ. y D.I. CARLOS CHÁVEZ AGUILERA



- C p Secretaría Académica.
- C p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Civil.
- C p Asesor de Tesis.

CCHA/AIR/vr

A Mauro Terrones y Julia Mares.

*Gracias por haber unido sus pasos con los míos en este camino
de experiencias, sueños y anhelos llamado vida.*

*Nadie fue ayer
ni va hoy,
ni irá mañana
hacia Dios
por este mismo camino
que yo voy.
Para cada hombre guarda
un rayo nuevo de luz el sol....
y un camino virgen
Dios.*

LEON FELIPE.

INDICE.

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos.....	2
1.2	Antecedentes.....	3
1.3	Descripción de la estructura.....	5
1.4	Subsuelo	6
2	HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES	7
2.1	Deformaciones en las bases de los muros de las fachadas.....	8
2.2	Velocidades de hundimiento en las distintas zonas del conjunto.....	9
2.3	Velocidad de hundimiento del banco de la Emperatriz.....	9
3	OBRAS DE REHABILITACIÓN	10
3.1	Juntas constructivas.....	11
3.2	Inyección de agua al subsuelo.....	12
3.3	Recimentación mediante el uso de pilotes.....	13
4	SEGUIMIENTO DEL HUNDIMIENTO	15
4.1	Descripción del sistema de monitoreo continuo.....	15
4.2	Principio de funcionamiento de los nivelómetros.....	17
4.3	Modelo experimental.....	19
4.4	Resultados.....	22
4.5	Procedimiento de corrección.....	24
4.6	Efectos de la temperatura en la dilatación del aceite.....	28

5	ASPECTOS ESTRUCTURALES.....	30
5.1	Desplomo del torreón norte.....	31
5.2	Rotación del torreón.....	31
5.3	Agrietamientos en la estructura.....	33
6	CONCLUSIONES.....	34
	RECONOCIMIENTOS.....	36
	REFERENCIAS.....	37
	TABLAS.	
	FIGURAS.	
	ANEXO.	

1 INTRODUCCION.

El Palacio Nacional es una de las construcciones más importantes de nuestro país. La alta deformabilidad del terreno sobre el que se encuentra apoyado, los diferentes grados de preconsolidación del mismo, y la extracción de agua del subsuelo para abastecer a la población han provocado hundimientos diferenciales, lo cual a su vez han generado desplomes de sus muros y columnas, así como agrietamientos importantes en diversas partes de la estructura.

La situación anterior ha hecho necesario realizar una serie de intervenciones en el edificio para reparar los daños que los hundimientos diferenciales han causado en su estructura, especialmente en la zona de la esquina noroeste. En 1992 esta zona fue recimentada mediante pilotes de control con funda antifriccionante con el objetivo de ajustar el descenso del edificio al hundimiento regional de la zona, el control de estos pilotes esta sustentado sobre la base de los resultados que se obtienen de las nivelaciones topográficas que son efectuadas para conocer, los hundimientos que se producen en la base del edificio.

En 1994 el gobierno de la República de Italia donó un sistema de monitoreo continuo, para complementar el seguimiento del comportamiento estructural de las zonas más afectadas del Palacio Nacional. Este equipo fue desarrollado por el Instituto de Modelos Estructurales de Bergamo, Italia (ISMES).

1.1 Objetivos.

Los objetivos de este trabajo son:

- Realizar una descripción de la problemática que enfrenta el Palacio Nacional, resultado de los hundimientos diferenciales que han afectado su cimentación casi desde el inicio de la construcción.
- Describir las principales intervenciones estructurales y geotécnicas realizadas para contrarrestar los efectos causado por los hundimientos diferenciales.
- Describir las características principales del sistema de monitoreo continuo instalado en la estructura del edificio para estudiar su comportamiento estructural ante los hundimientos de su cimentación, así como ante las acciones que se realizan para corregir esta situación. y en especial el funcionamiento de la red de nivelómetros que forma parte del mismo sistema.
- Comentar los principios en los cuales está basado el funcionamiento del sistema de nivelómetros.
- Efectuar una intervención correctiva en el sistema de monitoreo continuo a fin de eliminar ciertas anomalías que se detectaron en el funcionamiento del mismo.
- Presentar los resultados que muestran la manera en la que ha ocurrido la deformación de la esquina norponiente de la estructura en los últimos cuatro años.
- Comparar los resultados provenientes del sistema de monitoreo continuo con los que se obtienen mediante el uso de equipo topográfico.
- Efectuar un levantamiento de los daños en elementos estructurales ubicados en la zona noroeste del edificio.

1.2 Antecedentes

Historia del Palacio Nacional. El Palacio Nacional ocupa el terreno en el cual estuvieron situadas durante el imperio mexica, las casas nuevas de Moctezuma Xocoyotzin, dichas edificaciones estaban ubicadas en la parte surponiente y norponiente del terreno, y también parte de las estructuras pertenecientes al templo de Tezcatlipoca(ref.7) (Fig.1). De este último edificio se encuentran algunos vestigios en el edificio del antiguo Palacio del Arzobispado, situado enfrente del Palacio Nacional, sobre la calle de Moneda.

En el sitio donde actualmente se localiza el patio de honor, es decir la zona surponiente fue el lugar donde se construyeron las primeras casas de Hernán Cortes y en la esquina surponiente del segundo patio mariano fue descubierta una estructura que posiblemente formó parte de las llamadas casas nuevas de Moctezuma, actualmente dicha estructura puede observarse a través de una ventana arqueológica existente en el lugar (Fig.2).

El terreno que ocupa el Palacio Nacional, después de la caída de imperio mexica fue tomado por Cortes, quien construye ahí unas casas por el año de 1540, las cuales en estilo arquitectónico eran muy rudimentarias, a la muerte de éste el inmueble es vendido por su hijo Martín Cortes a la corona española, quien desde hacia tiempo pagaba un alquiler por las casas a Cortes para poder alojar en ellas a la junta de gobierno, después de la transacción, el espacio es destinado para construir el Palacio de los Virreyes, el primer Palacio Virreinal fue incendiado por la muchedumbre durante un motín acaecido en el año de 1692.

Fue especialmente durante el siglo XVIII cuando el Palacio Nacional adquirió gran parte del aspecto que tuvo hasta el fin de la colonia y en los primeros años del México independiente, tanto exterior, como interiormente. Muy frecuentemente le fueron haciendo ampliaciones y modificaciones a sus espacios, esto con el fin de albergar gran parte de la compleja burocracia que administraba la colonia, cada una de estas remodelaciones que en su momento llevaron a cabo los virreyes, reflejaban el estilo arquitectónico que más agradaba a la casa reinante de España en ese momento, principalmente la dinastía de los Habsburgo y posteriormente la de los Borbones(ref.7)

En los primeros años de vida del México independiente, el Palacio Nacional sufrió las consecuencias de la inestabilidad política, social y económica que caracterizaron la primera mitad del siglo XIX, lo anterior queda de manifiesto, en los daños que sufrió el torreón sur del edificio, el cual fue casi destruido, durante la revuelta federalista de 1840. (ver Fig. 3).

El Palacio Nacional durante la primera mitad del siglo XIX, parecía condenado a desaparecer debido a todos los atropellos a los que estuvo expuesto, no importando que en el se encontrara alojada la sede de los poderes ejecutivo y legislativo, y que ahí fuera elaborada la constitución de 1857, en el recinto parlamentario que se encontraba dentro de sus instalaciones, y que dejó de funcionar en 1870 después, de ser destruido por un incendio

El imperio de Maximiliano de Habsburgo no realiza cambios significativos en la estructura del Palacio Nacional, aunque sí pensaba hacerlos, así lo muestran ciertos bosquejos atribuidos a un arquitecto austriaco, quien los presentó como parte de un proyecto de remodelación del monumento(ref.7), en dichos bosquejos es evidente que Maximiliano quería que el edificio adquiriera el aspecto de Palacio de gran metrópoli europea, sin embargo debido a lo efímero que fue su reinado, estas ideas no llegaron a concretarse.

Tras la restauración de la República en 1867, el gobierno del presidente Juárez volvió a instalarse en Palacio Nacional, y por disposición del mandatario, fue elaborado un reloj para la fachada principal del edificio, con metal obtenido de la fundición de unas de las campanas del antiguo convento de San Agustín que por decisión también de Juárez, dicho convento fue elegido como sede de la Biblioteca Nacional. Esta fue la única obra realizada en el inmueble por aquellos años ya que la condición de la economía nacional no permitía hacer gastos en obras suntuosas(ref.7).

El gobierno de su sucesor Sebastián Lerdo de Tejada, ordena algunas modificaciones en el aspecto material del inmueble, para ello importó de Italia mármol para renovar los pisos de algunas secciones del edificio, contempló otras mejoras, como la de instalar el alumbrado artificial en forma parcial.

El arribo de Porfirio Díaz al poder, marco una era, en la que se dio un impulso significativo al progreso económico y material de la nación, y el Palacio Nacional no escapa a esa obsesión de la casta gobernante por la modernización, fueron realizadas importantes mejoras en el edificio, como la introducción del alumbrado artificial, por mencionar la más importante. En la Fig.4 se muestra el aspecto del Palacio durante la época porfirista.

En el presente siglo en el Palacio Nacional han ocurrido hechos relevantes de la historia contemporánea de México, y en lo que a su infraestructura toca, en 1928 el entonces presidente Plutarco Elías Calles, ordena la construcción del cuarto y último nivel.(Fig. 5).

Debido a los problemas de hundimientos diferenciales que presentan gran parte de las construcciones coloniales asentadas en la zona centro de la ciudad de México, han tenido que realizarse diversas intervenciones en la cimentación y subsuelo sobre el que se asienta el edificio, con el objetivo de evitar que la estructura sufra un colapso en ciertas zonas críticas.

1.3 Descripción de la estructura

Estructura. El Palacio Nacional ocupa un área de 200 m por 200 m, originalmente con tres niveles que fueron construidos en la época colonial, y en 1928 le fue añadido un cuarto y último nivel, con lo que alcanza una altura media respecto al nivel de piso de 22 m, es considerada como una estructura rígida pero frágil, su estructura compuesta básicamente de muros constituidos por la roca ígnea llamada tezontle, aglutinada con un mortero fabricado con cal y arena y revestidos de una chapa de cantera, cuenta además como elementos de soporte con una serie de columnas de sección rectangular elaboradas con roca sólida de cantera(ref.6).

Cimentación. Aunque son desconocidas cuales fueron las características estructurales del Palacio Nacional en el momento en que dio inicio la construcción del mismo, es probable que para la construcción de la cimentación haya sido formada una retícula de pilotes cortos de madera con un diámetro de 25 cm por unos 3 a 4 metros de longitud, según ha podido deducirse a partir de exploraciones realizadas en cimentaciones de edificios vecinos y contemporáneos al Palacio Nacional, este tipo de cimentaciones era una práctica constructiva muy común entre los aztecas y que fue retomada por los colonizadores, además sobre esta retícula fue colocado un pedraplén formado por fragmentos de tezontle, una roca ligera ($\gamma=1.1 \text{ Ton/m}^3$), aglutinados con un mortero elaborado con cal y arena, esto con la idea de lograr una distribución uniforme de las cargas que transmite la estructura al suelo(ref.6).

1.4 Subsuelo.

El Palacio Nacional fue desplantado sobre la zona geotécnica conocida como "zona de lago"; La arcilla que constituye esta zona del subsuelo de la ciudad es claramente identificable por su alta plasticidad, así como por los grandes contenidos de agua que llega a tener, en la Fig. 6 puede observarse un perfil estratigráfico del área en la que se asienta el Palacio Nacional.

Puede observarse que los primeros 4 metros están constituidos por material de relleno, limo y arcilla con lentes de arena, así como de fragmentos de rocas ígneas; después, aparece una segunda capa constituida por limos y arenas principalmente, esta segunda capa abarca hasta unos 15 metros de profundidad, para después dar paso a la formación arcillosa superior (FAS), la cual comprende de los 15 a los 35 m de profundidad aproximadamente, por debajo de este estrato se encuentra la primer capa dura de unos 4 a 5 metros de espesor, constituida por limos y arcillas de consistencia dura y arenas con una alta compacidad o densidad relativa, y finalmente bajo esta primer capa dura subyace la llamada formación arcillosa inferior (FAI), en la tabla 1 se muestran algunos índices y propiedades mecánicas, que presentan los materiales contenidos en el terreno sobre el cual se apoya el Palacio Nacional(ref.6).

2. HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES.

Como fue comentado en el capítulo anterior, el Palacio Nacional está ubicado sobre un terreno en el que estuvieron situadas algunas construcciones prehispánicas(Fig.1), esto ocasiono que el terreno adquiriera diversos grados de preconsolidación debido a los esfuerzos que las construcciones en cuestión transmitían a la masa de suelo, otras zonas del terreno eran muy poco propicias para el asentamiento de cualquier tipo de estructura, así lo relatan ciertas referencias de la época(ref.7), una de estas zonas críticas es donde esta ubicado el torreón norte del edificio y las construcciones pertenecientes a la Secretaría de Hacienda.

Las construcciones correspondientes al primitivo Palacio Virreinal estuvieron asentadas en la parte surponiente del terreno, y a partir de ahí fue expandiéndose la construcción llegándose a ocupar zonas tan desfavorables desde el punto de vista geotécnico, como lo es la zona norponiente del terreno, debido a las necesidades del gobierno virreinal de albergar en el edificio todo un complejo aparato burocrático.

Lo más probable es que desde el inicio mismo de la construcción del edificio se hayan presentado problemas debidos a los efectos de los hundimientos

diferenciales, a causa de la consolidación de las zonas más compresibles del terreno y también dados los diversos grados de preconsolidación que presentaba el área, debido a la presencia de las estructuras prehispánicas, que generaron la aparición de zonas llamadas "duras" que descienden a diferente velocidad con respecto a la velocidad de hundimiento regional (ref.12). Sin embargo, fue en el siglo XX cuando la problemática se tornó crítica, ya que la explotación desmedida de los mantos acuíferos, tomando en cuenta las características de las arcillas que conforman el subsuelo del valle de México, ha ocasionado un proceso de transferencia de esfuerzos por parte de la fase líquida hacia la fase sólida de la masa del suelo y por consecuencia una reducción del espesor de los estratos del suelo, lo que es comúnmente conocido como hundimientos, y al carecer de uniformidad de compresibilidad el subsuelo, estos son de carácter diferencial (ref.3).

2.1 Deformaciones en las bases de los muros de las fachadas.

La fig.7 muestra las magnitudes de las deformaciones que han ocurrido desde el inicio de la construcción del edificio, en las bases de los muros de la fachada poniente que da hacia la Plaza de la Constitución y de la fachada norte ubicada sobre la calle de la Moneda, además de la situación de las fachadas sur y oriente, correspondientes a las calles de Corregidora y Correo Mayor respectivamente; en los cuatro casos puede observarse que la deformación es convexa y que en la fachada norte el hundimiento diferencial excede 1.80 m.

La esquina norponiente presenta un desnivel con respecto a la esquina surponiente, lugar en el que está localizado el torreón sur de casi 1.50 m. Para obtener estas gráficas se tomó como referencia uno de los elementos arquitectónicos presente en todas las fachadas y la elevación que tienen los puntos de control vertical instalados en cada una de las fachadas.

La fig.8 muestra el aspecto que presentan las fachadas norte y poniente en ella pueden apreciarse la curvatura convexa de la deformación.

2.2 Velocidades de hundimiento en las distintas zonas del conjunto.

La fig.9 muestra las velocidades de hundimiento de las distintas zonas del conjunto arquitectónico, con respecto al banco de nivel de la Emperatriz, ubicado en el jardín botánico del Palacio, el periodo comprendido para obtener las curvas de igual asentamiento, abarca del 15 de junio 1995 al 24 de marzo de 1998, puede observarse que debido a las intervenciones de que ha sido objeto la cimentación del edificio en la zona norponiente, ésta ha descendido a una velocidad menor que el resto del conjunto. Con respecto a la velocidad de hundimiento histórica que esta parte de la estructura presentaba, la velocidad ha disminuido considerablemente. Por su parte la esquina suroriente donde convergen las calles las calles de Corregidora y Correo Mayor, es la que presenta mayor velocidad de hundimiento. Una de las zonas altamente preconsolidadas, ubicada dentro del segundo patio mariano, presenta un hundimiento diferencial con respecto a la esquina donde esta desplantado el torreón norte del orden de los 30 mm y con respecto al resto de las estructuras colindantes del orden de 20 mm(ref.12).

2.3 Velocidad de hundimiento del banco de la Emperatriz.

En la Fig.10 aparece la evolución del hundimiento del banco de nivel de la Emperatriz, con respecto al banco de nivel profundo colocado en la Catedral metropolitana, a partir de los datos contenidos en la ref.12 fue estimada la magnitud de la velocidad de hundimiento en un periodo que abarca 1128 días, la cual resultó del orden de los 20 mm/ año, este dato es significativo, ya que la velocidad de hundimiento regional en el centro histórico de la ciudad de México es del orden de los 70 mm/año, el banco de nivel de la Emperatriz esta apoyado a una profundidad de 40 metros sobre la primer capa dura, lo cual nos indica que a menor profundidad es mayor la tasa de hundimiento regional.

3. OBRAS DE REHABILITACIÓN.

La estructura del Palacio Nacional ha sido afectada severamente por los hundimientos diferenciales que se han venido produciendo en su cimentación desde el inicio de su construcción y que se agravaron durante el siglo XX, como consecuencia del proceso de explotación de los mantos acuíferos subterráneos para satisfacer la demanda de la población, resultando la zona norponiente del edificio la más afectada, hay otros factores que incrementan la magnitud de los hundimientos diferenciales; uno de ellos es la presencia de un colector de aguas semiprofundo, el diámetro del tubo es de tres metros y la profundidad a la que se asienta es del orden de 15 metros y está localizado cerca de donde se asienta el torreón norte, con una trayectoria a lo largo de la calle de la Moneda y en el entronque con Plaza de la Constitución se cruza con la estructura perteneciente a la línea dos del metro que tiene una profundidad de 10 metros aproximadamente, esta situación según un estudio reciente de las condiciones hidráulicas del subsuelo en esa zona(ref.13), revela que ambas estructuras (el drenaje y el túnel del metro) están funcionando como drenes, lo que ocasiona una depresión del nivel de aguas freáticas en esa zona en particular. Además, en la década de los años setenta, durante la construcción de la citada línea del metro, se provocaron

movimientos en la estructura del Palacio Nacional sobre todo en la zona que ocupa la fachada poniente.

Por ello, el edificio ha tenido que ser objeto de un proceso continuo de mantenimiento y de múltiples reparaciones a fin de subsanar los daños que lo afectan, las principales intervenciones hechas en el subsuelo, la cimentación y la estructura del Palacio Nacional en el siglo XX se presentan a continuación en orden cronológico:

3.1 Juntas constructivas.

Existen tres juntas constructivas en la estructura del Palacio Nacional, dos de ellas están situadas sobre la fachada norte que da hacia la calle de la Moneda, aproximadamente a unos 95 y 110 metros a partir de la esquina norponiente de donde se ubica el torreón norte, la tercer junta constructiva está ubicada sobre la fachada sur que da hacia la calle de la Corregidora aproximadamente a unos 90 metros de la esquina surponiente, la Fig.11 indica en planta, la localización de las tres juntas constructivas la Fig. 12 y la Fig. 13 muestran en alzado la ubicación de las mismas juntas. La trayectoria de la primera junta no es totalmente recta, en la Fig.14 puede apreciarse la trayectoria que sigue a través de la construcción, así como algunos otros aspectos relacionados con la misma junta constructiva.

El objetivo de las juntas constructivas es el de interrumpir la continuidad de la estructura, en las zonas donde los hundimientos la han afectado de manera más severa, por ello la primer junta sobre la fachada norte está localizada cerca de la zona que ha originado una configuración convexa de la deformación de las bases de los muros de la fachada norte.

Existe la presencia de grietas notables cerca de la primer junta sobre la fachada norte y de la junta sobre la fachada sur (ver Fig. 12 y 13)

La presencia de las juntas constructivas en la estructura del Palacio Nacional ha ayudado a contrarrestar los efectos que provocan los hundimientos diferenciales, sin embargo esta medida no ha sido suficiente, ya que existen grietas notables cerca de las juntas. Por lo que han tenido que realizarse otro tipo de intervenciones, tanto en el subsuelo donde esta asentado el edificio, como en la cimentación y superestructura del mismo.

3.2 Inyección de agua al subsuelo.

A finales de la década de los setentas, el ingeniero Gabriel Moreno Pecero, profesor de la facultad de Ingeniería de la UNAM y funcionario técnico de la entonces Secretaría de Asentamientos y Obras públicas, propuso un método de tratamiento del subsuelo que pretendía reducir la velocidad de hundimiento que presentaban algunas zonas específicas del terreno donde se ubica la estructura del Palacio Nacional, y que cada vez más incrementaban su magnitud, lo cual amenazaba la seguridad estructural del monumento histórico.

La intensiva explotación de los mantos acuíferos subterráneos de la ciudad de México, que a principios del siglo XX era realizada mediante el uso de pozos artesianos y posteriormente, cuando la presión de la columna de agua decreció por medio del bombeo, ha provocado un incremento en la presión vertical efectiva sobre el subsuelo, lo que le produce una reducción del espesor de sus estratos, lo cual provoca el hundimiento, y debido a las características de las arcillas que componen el subsuelo de la ciudad de México, las cuales poseen altos contenidos de agua, el problema se agudiza.

De acuerdo con la ref.6 el Ing. Moreno Pecero proponía un método que paulatinamente restituyera el contenido de agua a la masa de suelo, y que con esto disminuyeran las presiones efectivas que el suelo soporta, Esto conseguiría reducir la velocidad de hundimiento del terreno sobre el que está asentado el Palacio Nacional.

Según las lecturas tomadas en 9 estaciones piezométricas instaladas en Palacio Nacional(ref.6), entre una profundidad de 10 a 25 metros, la presión del agua tendía a decrecer con respecto a la presión hidrostática, tomando en cuenta esto, la propuesta para remediar la situación, era la de efectuar inyecciones de volúmenes de agua en la masa de suelo que ayudaran a recuperar la presión del agua subterránea, para llevar acabo esto, fueron colocados dispositivos de inyección como el que se muestra en la Fig.15. La Fig.16 por su parte muestra en detalle el dispositivo de inyección empleado en la realización de las pruebas, la inyección era realizada a una profundidad de 7 a 25 metros, las zonas de inyección estaban localizada en las esquinas norponiente, donde confluyen las calles de Moneda y Plaza de la Constitución, y suroriente delimitada por las calles de Correo mayor y Corregidora.

Después de realizar una primer etapa de prueba que consistió en la inyección de agua durante 30 días, los resultados parecían indicar que el método estaba funcionando: sin embargo después de analizarlo detenidamente y de la realización de posteriores etapas de inyección, fue suspendida la aplicación del método, ya que los volúmenes de agua que requerían las etapas de inyección fueron haciéndose cada vez más difíciles de satisfacer.

Aunque los principios teóricos en que estaba basado el método propuesto para tratar de dar solución a la problemática de los hundimientos diferenciales de la construcción eran correctos, en la realidad no fue posible conseguir que éste funcionara, ya que entre otros factores la inyección de agua trataba de solucionar la pérdida de presión del agua subterránea en el ámbito local de la zona en que está asentado el edificio, cuando en realidad se trata de un problema que debe ser solucionado regionalmente.

3.3 Recimentación mediante el uso de pilotes.

La más reciente de las intervenciones que se han realizado en el Palacio Nacional para contrarrestar el efecto de los hundimientos diferenciales fue de carácter geotécnico(ref.12), consistió en la recimentación de la zona norponiente, donde está ubicado el torreón norte y los edificios integrantes de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, mediante el empleo de 212 pilotes de control con funda antifriccionante formando parejas en un arreglo conocido como mancuerna(Fig.18a) apoyadas en la primer capa dura, a una profundidad media comprendida entre los 36.3 y 38.3 metros; con una longitud efectiva del orden de los 34 metros. Estos pilotes son de concreto están provistos de tubos de acero y mangas de neopropeno que evitan la transmisión de fricción negativa a la punta del pilote, por ello soportan por punta el peso total de la estructura, cuentan con un puente estructural para controlar el descenso del edificio de acuerdo al hundimiento regional que ocurre en la zona. En la fig.17 se muestra la disposición en planta de los 212 pilotes que fueron colocados en la cimentación de los edificios de la Secretaría de Hacienda. Y en la fig.18 puede observarse el esquema de un pilote tipo, donde pueden apreciarse los elementos componentes del mismo.

De acuerdo con la ref.10 para aprovechar la totalidad de la capacidad por punta en pilotes apoyados en la capa dura o depósitos profundos y evitar los efectos de la fricción negativa, se han diseñado estos pilotes que están provistos de una funda de acero en tramos de tres metros que están unidos por medio de camisas de neopreno, que toman las deformaciones provocadas por la consolidación regional; el espacio anular entre el fuste del pilote y el tubo se rellena con grasa. Estos pilotes fueron concebidos por el Ing. Enrique Santoyo para la recimentación de estructuras en sitios con fuerte hundimiento regional.

Uno de los factores que se tienen que tomar en cuenta en el control de los pilotes, es el referente a que dos de las tres zonas duras localizadas en Palacio Nacional, caen dentro del área en que fueron colocados los pilotes, estas zonas duras se hunden a menor velocidad que el resto del área que ocupa la construcción, por lo que los pilotes ubicados en esta zona prácticamente no toman carga.

La manipulación de los pilotes depende de los resultados obtenidos de las nivelaciones topográficas, las cuales indican la manera en que se hundan los cimientos.

4. SEGUIMIENTO DEL HUNDIMIENTO.

4.1 Descripción del sistema de monitoreo continuo.

En 1994 el gobierno de la República de Italia donó un sistema de monitoreo continuo, para complementar el seguimiento del comportamiento estructural de las zonas más afectadas del Palacio Nacional. El sistema cuenta con una red de nivelómetros, sensores de temperatura e inclinómetros biaxiales. Este equipo fue desarrollado por el Instituto de Modelos Estructurales de Bergamo, Italia (ISMES), su instalación en la estructura la realizó el mismo instituto en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM, éste último se ha hecho cargo de su mantenimiento y de la interpretación de los resultados.

Los sistemas de monitoreo continuo, en los últimos años han ganado ya cierta aceptación en los proyectos de rehabilitación de estructuras consideradas como monumentos históricos, especialmente por que las mediciones hechas en intervalos cortos de tiempo de las características y de los movimientos de la estructura durante un periodo amplio resulta necesaria para realizar un diagnóstico más objetivo del problema que se enfrenta, así como para determinar el efecto de intervenciones de refuerzo y, especialmente, para detectar algún síntoma desfavorable para la seguridad de la edificación.

También resulta una herramienta útil para calibrar los modelos matemáticos que se desarrollan con el propósito de estudiar el comportamiento estructural de la construcción.

Los sistemas de monitoreo pueden ser de dos tipos: estático o dinámico. Usualmente, tienen dos componentes principales: la unidad de adquisición y procesamiento de datos para manejar cierto número de canales y los sensores, los cuales operan eléctricamente y pueden registrar datos en intervalos predeterminados.

En el Palacio Nacional, el sistema de monitoreo es estático, cuenta con una red de diez nivelómetros, cuatro sensores de temperatura y dos inclinómetros biaxiales. La ubicación de cada uno de estos dispositivos se muestra de manera esquemática en la Fig. 19.

La señal eléctrica de cada sensor es transmitida, a través de cables, hasta una unidad periférica y de ahí a la unidad central (Fig.20), la cual cuenta con un convertidor analógico-digital, paneles de advertencia para indicar síntomas de comportamiento inapropiado tanto de la estructura como del sistema, y una computadora en la que se procesa y almacena la información cada cuatro horas de manera automática.

El sistema también está diseñado para ser activado de manera manual, a fin de que el usuario realice una adquisición de datos en el momento en que lo desee. En la unidad central existe un módem para interrogar de manera remota al equipo. Un sistema de monitoreo semejante al aquí descrito fue instalado en la Catedral de México. La manera en la que se establece la comunicación entre los equipos, el ISMES y el Instituto de Ingeniería de la UNAM aparece en el diagrama de bloques de la Fig. 21 (ref.9).

Una descripción breve de cada uno de los sensores y algunos comentarios acerca de su funcionamiento se presentan a continuación:

Sensores de temperatura. Estos instrumentos están ubicados en la azotea, en la planta baja y en las galerías de los pilotes; en los mismos sitios en los que se localizan los inclinómetros y el nivelómetro 5.

Estos dispositivos son comerciales (Fig. 22), su comportamiento ha sido estable desde su instalación; sin embargo, el sensor ubicado junto al inclinómetro de la azotea ha sufrido problemas de vandalismo por lo que en múltiples ocasiones ha dejado de registrar los cambios de temperatura.

Inclinómetros. Los inclinómetros están colocados en la fachada poniente, del lado norte de la puerta principal; uno está en la planta baja, dentro de una garita, y el otro sobre la azotea, adosado al imafronte y alineado, en un eje vertical, con el primero (Fig. 23).

El propósito de los dispositivos es medir los cambios de inclinación que sufre esta parte de la construcción, especialmente en la dirección oriente - poniente. Se trata de instrumentos comerciales con precisión de 0.01 mm/m, su comportamiento ha sido estable desde su instalación. El sensor localizado sobre la azotea también ha sufrido problemas de vandalismo, por lo que sus registros han sido interrumpidos en varias ocasiones.

Red de nivelómetros. Los asentamientos diferenciales de la cimentación de estructuras son medidos mediante un sistema de vasos niveladores llamados nivelómetros. Los nivelómetros se encuentran distribuidos en la esquina noroeste de la construcción, dentro de las galerías de los pilotes (Fig. 24). La red abarca una longitud total de 74m; 37.5 m sobre la fachada norte y 36.6 m sobre la fachada poniente. Se trata de vasos cilíndricos de cristal que se conectan entre ellos a través de mangueras para formar un sistema de vasos comunicantes. El fluido que utiliza el sistema es aceite de silicón. Los vasos tienen 300 mm de altura, y 25 mm de diámetro interior y están montados sobre un marco de acero inoxidable. En el extremo inferior del vaso existe una pieza a la que se conecta una celda eléctrica de presión y una válvula de paso para controlar el flujo del aceite hacia la línea de conducción (Fig.25). La celda de presión permite determinar el tirante de aceite contenido en el vaso con una precisión de 0.1 mm. Las líneas de conducción son mangueras de plástico cuyo diámetro es de 8 mm.

4.2 Principio de funcionamiento de los nivelómetros.

El principio bajo el cual funciona el sistema de nivelómetros es el conocido en hidrostática como "vasos comunicantes".

Se llama de vasos comunicantes a un sistema formado por dos o más recipientes unidos entre sí por la parte inferior y con el extremo superior abierto (ref.2).

Si tomamos un sistema como el descrito e introducimos un líquido cualquiera, el nivel alcanzado en todos los recipientes es el mismo, esto se debe a que la presión actuante en todos ellos es la atmosférica (ref.2) como se aprecia en la Fig.26, en donde la línea piezométrica AD que señala la altura de la carga estática en cada punto resulta horizontal, la presión puede obtenerse conociendo la carga estática, la carga de presión en un punto es la altura a la cual subirá el líquido en un tubo piezométrico conectado en correspondencia a dicho punto.

Para pasar de la carga estática a la de presión hay que multiplicar dicha altura por el peso específico del líquido que se trate (ref.4).

De acuerdo con la ecuación fundamental de la estática de fluidos (ecuación 1), la presión dentro de un fluido en reposo varía solamente con la coordenada vertical z y es constante en todos los puntos contenidos en un mismo plano horizontal (ref.11).

$$dp = -\gamma dz \dots (1)$$

donde:

dp = diferencial de presión

γ = peso específico del líquido

dz = diferencial de elevación

el signo negativo de la expresión indica que la presión decrece cuando la coordenada vertical z aumenta y que cuando ésta última disminuye la presión aumenta (ref.1) y sabiendo que el tirante h es directamente proporcional a la presión,

$$h = \frac{P}{\gamma} = \text{carga de presión}$$

el comportamiento del tirante será el mismo que el de la presión cuando la coordenada vertical z varíe (Fig.26).

Principio de conservación de la materia. De acuerdo con éste, la masa de fluido total contenida en un sistema de vasos comunicantes no debe sufrir alteración alguna en su cantidad, por las variaciones que pudieran presentarse en el valor de la coordenada vertical z , de la posición de los vasos que integran a dicho sistema, por lo que la sumatoria de los tirantes de todos y cada uno de los vasos debe ser siempre igual a un valor constante (ref.11).

La ecuación 2 expresa la situación anteriormente descrita.

$$\sum_i^n h_i = \text{Constante} \dots (2)$$

donde:

h = tirante de líquido

n = número de vasos del sistema

4.3 Modelo experimental.

Con el propósito de lograr una comprensión más clara acerca del comportamiento de un sistema de vasos comunicantes y para verificar los principios hidrostáticos en los que se basa dicho sistema, fue elaborado el modelo experimental que aparece en la Fig.27 . En términos generales dicho modelo consistió en:

- Un marco fabricado con solera de aluminio de 20 mm de ancho x 3 mm de espesor, cuyas uniones están articuladas.
- Manguera de plástico de $\frac{1}{2}$ "(12.7 mm) de diámetro, utilizada como conducción del sistema.
- "T" de plástico de $\frac{1}{2}$ "(12.7 mm) de diámetro para ensamblar la línea de conducción con los piezómetros o vasos.
- Tubos de vidrio de 20 mm de diámetro, utilizados como piezómetros.
- Válvulas de plástico en los extremos de la línea de conducción para facilitar el purgado de la misma.
- Piezas rectangulares de madera de 5 mm de espesor, utilizadas para calzar el modelo y aumentar así la elevación de los vasos hasta el valor deseado.

El modelo fue diseñado con articulaciones en las uniones, para realizar las pruebas del sistema hidráulico bajo diversas posiciones de los vasos, el propósito fue representar diferentes escenarios de hundimientos diferenciales, que son las condiciones bajo las cuales trabaja el sistema de nivelómetros instalado en la estructura del Palacio Nacional.

Otro de los objetivos del modelo fue el comprender los problemas más comunes que ocurren en el funcionamiento de este tipo de sistemas.

Uno de los principales problemas que se detectaron, fue la presencia de aire en la línea de conducción del sistema, al principio éste no contaba con las válvulas en los extremos de la línea de conducción, sin embargo al observar la cantidad de aire que llegaba a quedar atrapada dentro de la misma, fue que se decidió colocar éstas, que facilitaron enormemente la expulsión de aire del sistema.

Prueba y resultados de la operación del modelo experimental. Una vez garantizada la completa saturación de líquido dentro de la línea de conducción del modelo se procedió a generar diversas condiciones de hundimientos, los ensayos realizados y los resultados obtenidos se comentan a continuación:

- Ensaye No 1

En la fig.28 aparece la posición correspondiente al ensaye hecho para entender el mecanismo de distribución del líquido dentro de los vasos, cuando en uno de ellos, en este caso el vaso número uno, su elevación es aumentada en un valor ΔH con respecto al nivel de referencia, y el resto de los vasos se mantienen sin cambio alguno, el vaso manipulado experimentara una reducción en la altura de su tirante de líquido con un valor igual a:

$$\Delta h_1 = \Delta H \dots(3)$$

Y el resto de los vasos sufrirán un incremento uniforme en la altura de su respectivo tirante, con un valor igual a:

$$\Delta h = \frac{\Delta h_1}{\eta - 1} \dots(4)$$

donde:

η = número de vasos que integran el modelo.

- Ensaye No 2

La fig.29 muestra la prueba que ilustra la distribución del líquido para una situación opuesta a la del caso anterior, al vaso No 1 le fue reducida su elevación, y el resto de los vasos permanecieron sin cambio en su elevación, por lo que la altura del tirante de líquido en el vaso No 1 se incrementó un valor igual a $\Delta h_1 = \Delta H$, y en el resto de los vasos las alturas de los tirantes disminuyeron de manera uniforme una cantidad igual a

$$\Delta h = \frac{\Delta h_1}{\eta - 1}$$

- Ensaye No 3

En la Fig. 30 puede observarse que el vaso No 5, aumentó su elevación con un valor $\Delta H_5 = 5$ centímetros, asimismo la posición del vaso No 1 disminuyó en una magnitud $\Delta H_1 = 5$ centímetros, y a los tres vasos restantes no se les modificó su posición inicial. El resultado de la prueba muestra, que los cinco centímetros de

líquido en que se redujo el tirante del vaso No 5, fueron los que hicieron aumentar el tirante del vaso No 1, y los tres vasos intermedios, no vieron modificado el valor de su tirante, ya que la manipulación se trató de dos acciones de la misma magnitud pero en sentido opuesto.

- Ensaye No 4.

En la Fig.31 aparece la posición resultante de otra de las pruebas realizadas, en este caso a los cinco vasos integrantes del modelo experimental, se les incrementó su elevación con un valor $\Delta H = 5$ centímetros, con lo que el tirante inicial en todos y cada uno de los vasos permaneció con el mismo valor de 10 centímetros al finalizar la prueba.

- Ensaye No 5.

La Fig.32 nos muestra como se distribuye el líquido en el sistema de vasos, al agregarle un determinado volumen de líquido adicional (V), que traerá como consecuencia un aumento del tirante total del sistema igual a:

$$\Delta h_{total} = \frac{V}{A}, \dots (5)$$

donde:

A = sección transversal del vaso.

Ante esta situación los vasos presentarán un incremento de su respectivo tirante con una magnitud igual a

$$\Delta h = \frac{h_{total}}{n} \dots (6).$$

- Ensaye No 6

Para entender el mecanismo de distribución de líquido, cuando más de un vaso modifica su posición a la vez durante un ensaye, es muy útil la aplicación del principio de superposición de las causas y los efectos.

En las Figs.33a, 33b y 33c aparecen las posiciones correspondientes a las pruebas en que fue aplicado el principio de superposición, donde fueron manipuladas las elevaciones de los vasos número uno, tres y cinco del sistema aumentándola en los tres casos, de manera independiente y cada uno de los vasos a la vez, los cuales conforme a lo que expresa la ecuación tres experimentaron un descenso en la altura de su tirante, y por consiguiente el resto de los vasos vieron aumentado su tirante en una proporción de acuerdo con la ecuación cuatro.

Por último, en la Fig.33d se muestra la posición final de la prueba, donde fueron superpuestas las tres situaciones anteriores, los efectos observados fueron sumados, los resultados obtenidos de la superposición al ser comparados contra los que llegan a obtenerse cuando el modelo es manipulado de tal forma que la posición deseada se obtiene en una sola operación coinciden totalmente según lo muestran los resultados numéricos, lo cual viene a confirmar la validez de la aplicación del principio de superposición en el comportamiento de un sistema de vasos comunicantes.

A continuación se presenta el desarrollo de las etapas que conformaron la prueba, donde son mostrados los incrementos parciales que sufrieron los tirantes de los vasos, así como la sumatoria de las tres partes.

Vaso	Tirante (h)	Etapa			Σ
		1	2	3	
1	h_1	$-\Delta H_1$	$\frac{\Delta H_5}{n-1}$	$\frac{\Delta H_3}{n-1}$	$h_1 + \frac{(\Delta H_3 + \Delta H_5)}{n-1} - \Delta H_1$
2	h_2	$\frac{\Delta H_1}{n-1}$	$\frac{\Delta H_5}{n-1}$	$\frac{\Delta H_3}{n-1}$	$h_2 + \frac{(\Delta H_1 + \Delta H_3 + \Delta H_5)}{n-1}$
3	h_3	$\frac{\Delta H_1}{n-1}$	$\frac{\Delta H_5}{n-1}$	$-\Delta H_3$	$h_3 + \frac{(\Delta H_1 + \Delta H_5)}{n-1} - \Delta H_3$
4	h_4	$\frac{\Delta H_1}{n-1}$	$\frac{\Delta H_5}{n-1}$	$\frac{\Delta H_3}{n-1}$	$h_4 + \frac{(\Delta H_1 + \Delta H_3 + \Delta H_5)}{n-1}$
5	h_5	$\frac{\Delta H_1}{n-1}$	$-\Delta H_5$	$\frac{\Delta H_3}{n-1}$	$h_5 + \frac{(\Delta H_1 + \Delta H_3)}{n-1} - \Delta H_5$

4.4 Resultados.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por el sistema de monitoreo continuo, a partir del mes de marzo de 1995.

Temperatura. La Fig. 34 presenta la variación de la temperatura dentro de las galerías de los pilotes, durante un periodo de cuatro años; se aprecia una variación periódica, la cual se atribuye a los cambios anuales de estación; dicha variación oscila entre 289 y 294 grados Kelvin (16 y 21°C respectivamente).

Inclinación de la estructura. De acuerdo con los inclinómetros, en especial con el que se localiza en la planta baja, la parte central de la fachada principal se inclinó hacia el norte y hacia la Plaza de la Constitución durante el periodo de observación; los giros fueron del orden de 0.4 y 0.3 mm/m, respectivamente (Fig. 35 y 36), como se vera más adelante los resultados del inclinómetro localizado en la planta baja, coincide con los resultados obtenidos del sistema de nivelómetros instalado en la cimentación del edificio. Por su parte el inclinómetro ubicado en la azotea como se mencionó en la descripción del sistema, ha sufrido problemas de vandalismo que han impedido tener continuidad en los registros procedentes de este aparato.

Deformación de la estructura. En la Fig. 37 se presenta la evolución del tirante de aceite en los nivelómetros, donde son comparados los registros obtenidos del sistema automático contra los que resultan de las lecturas manuales. En ambos sistemas los registros coinciden.

En el periodo comprendido entre el mes de marzo de 1995 y diciembre de 1999, el volumen de líquido contenido en los vasos experimentó una reducción del orden del 10 por ciento sin que se manifestaran problemas de fugas. La causa de esta pérdida es atribuible principalmente a la presencia de aire dentro de la línea de conducción y de algunas conexiones, parte del cual ha ido desalojándose paulatinamente, reduciéndose con ello el tirante de aceite en los nivelómetros.

Además, se ha observado que de manera consistente los tirantes de aceite en los nivelómetros se modifican con los cambios de la temperatura; durante los periodos correspondientes a los meses de calor el líquido aumenta de volumen y en los meses invernales, sucede exactamente lo contrario. Esta situación también indica que existe aire dentro de la línea, ya que el aceite solo modifica ligeramente su volumen a causa de los cambios de temperatura, mientras que el volumen de aire resulta más sensible a los mismos cambios, lo cual modifica el tirante del aceite contenido dentro de los nivelómetros. A pesar de esta situación, como más adelante se comentará, los resultados obtenidos son consistentes con aquellos que se obtienen de nivelaciones topográficas, a partir de estos registros y de los correspondientes a la calle de la Moneda fue estimada la deformación que sufrió la estructura, misma que fue comparada con la que se obtiene mediante un equipo topográfico.

Asimismo en la Fig. 38 observamos la evolución del hundimiento de los puntos donde están localizados los nivelómetros, con relación al punto donde se ubica el aparato número cinco, a partir de agosto de 1994 y hasta el mes de febrero de 2001.

En la Fig.39 aparece una representación comparativa, entre la deformación estimada a partir de los registros provenientes del sistema de monitoreo continuo tanto de manera manual como automática y la que se obtiene mediante equipo topográfico, en este caso se trata de los aparatos instalados sobre la fachada poniente del edificio. Fueron comparados los resultados en cuatro periodos, a partir del mes de junio de 1994 y hasta julio de 1998, fecha de la última nivelación topográfica realizada en el Palacio Nacional.

En general, la deformación estimada muestra una tendencia similar en los tres casos que aparecen representados y para los cuatro periodos, sin embargo como puede observarse en la misma Fig.39, existen ciertas discrepancias en la magnitud de la deformación estimada por medio del equipo topográfico y la que resultó de los registros del sistema de monitoreo continuo, esta discrepancia la origina el fenómeno de variación del tirante de aceite de los nivelómetros.

Según los resultados del sistema de monitoreo continuo, la esquina noroeste del Palacio Nacional descendió 15 mm con respecto al resto de la estructura sobre la fachada oeste, en el periodo comprendido entre junio de 1995 y el mes de julio de 1998.

La Fig. 40 por su parte muestra la deformación que ha sufrido la estructura en la fachada norte. En este caso la deformación calculada a partir de los registros del sistema de nivelómetros obtenidos de manera manual coincide con la deformación registrada mediante equipo topográfico, aunque se presenta una variación máxima del orden de los 4mm, no así la deformación que se estimó basándose en los registros de los nivelómetros obtenidos de las lecturas automáticas que realiza el propio sistema, la cual difiere hasta en 11 milímetros con respecto a las otras dos. La causa de esta discrepancia tan notable de los resultados provenientes de los registros automáticos, es la misma que la del caso de los aparatos ubicados en la fachada poniente.

Según los resultados, la esquina noroeste descendió 12.5 mm, con respecto al resto de la construcción situada sobre la calle de la Moneda.

4.5 Procedimiento de corrección del sistema de nivelómetros

El sistema de nivelómetros instalado en Palacio Nacional ha presentado a lo largo del tiempo que lleva funcionando, una serie de divergencias con respecto a los principios teóricos que rigen un sistema de vasos comunicantes, en especial el que se refiere al principio de conservación de la masa.

La manera de confirmar esto, fue efectuando la sumatoria de los valores de todos y cada uno de los tirantes de los vasos integrantes del sistema en el momento de iniciar su funcionamiento, con lo cual se obtendría un valor que multiplicado por el área de la sección circular del vaso cuyo diámetro es de 2.5 centímetros, nos da el valor del volumen total de líquido alojado en los nivelómetros.

Este volumen, no se ha mantenido constante, En la Fig.41 se muestra la manera en que ha ocurrido esta variación, a través de todo el tiempo que lleva funcionando el sistema.

Tanto la representación gráfica elaborada con los registros que son obtenidos del monitoreo manual como la que fue realizada con los registros del sistema automático, muestra que la variación del volumen de líquido que ha experimentado el sistema, coincide en cuanto a la tendencia de la misma.

En un periodo de poco más de cuatro años y medio de funcionamiento, que comprende del mes de marzo de 1995 a diciembre de 1999, el volumen de líquido contenido en los vasos según los registros del sistema automático ha experimentado una reducción acumulada del 11.11% y para el caso de los registros del monitoreo manual estos indican que la reducción alcanza el 12.37%. La Tabla 2 resume esta situación.

La variación del volumen parece depender de la temperatura, en el periodo correspondiente a los meses en los cuales ésta suele elevarse de manera notoria, da la impresión de que el líquido aumentara su volumen, y en los meses invernales sucede exactamente lo contrario, esta situación ha estado presente de manera invariable a lo largo de todo el periodo de funcionamiento de los aparatos.

La causa de este comportamiento es atribuible principalmente a la presencia de aire dentro de la línea de conducción del sistema, lo cual es muy factible debido a que por tratarse de que la línea de conducción del sistema abarca varios metros de longitud y que además cuenta con algunos cambios de dirección dentro de su trayecto, estos factores en conjunto hacen que sea difícil el garantizar la completa saturación de líquido en los conductos, lo cual genera la presencia de cierto volumen de aire que a lo largo del tiempo fue escapando del sistema y por lo tanto el espacio dejado por la masa de aire ha sido ocupado por el aceite, lo que explica la variación del volumen inicial. Cuando la temperatura ambiente aumenta, el aire contenido en la conducción sufre una dilatación, lo que provoca un aparente incremento del volumen de líquido, y por el contrario cuando la temperatura desciende el aire experimenta una contracción y el volumen de líquido en los vasos da la impresión de disminuir, esto es muy probable ya que una de las características del comportamiento térmico de los gases es su notable respuesta a los cambios de temperatura.

Por todo esto se considero necesario implementar una medida correctiva en el sistema de nivelómetros, la cual comprende dos etapas, una de corrección y la segunda de verificación y evaluación, todo esto con el objetivo de lograr una mejor saturación de líquido en la línea de conducción, y con esto garantizar que los resultados obtenidos del sistema de nivelómetros, sean más precisos.

Corrección del sistema. El primer paso fue verificar si el sistema estaba saturado de aceite. Para hacer esto le fue inyectado líquido en uno de los vasos. Primero se agrego aceite en el nivelómetro número uno, hasta hacer que el tirante del vaso subiera dos centímetros. Considerando los principios teóricos que rigen este tipo de sistemas de vasos comunicantes, tenemos que por ser 10 los aparatos que integran la red, cada uno de los vasos debería tomar el 10 % del líquido agregado, por lo que era de esperarse que el nivel del tirante de aceite de los vasos subiera dos milímetros en cada uno de ellos, la distribución del líquido no fue de manera uniforme. Lo que confirmó que efectivamente existía aire atrapado dentro de la línea de conducción.

Al inyectar por un solo vaso, es más difícil lograr una transmisión rápida, ya que existen muchos factores que impiden que esto pueda darse (longitud de la línea, cambios de dirección, y aire atrapado en la línea)

Fue implementado un procedimiento de purga, el cual consistía en inyectar líquido por uno de los nivelómetros colocados en uno de los extremos del sistema, el aceite fue agregado en el vaso del aparato número 10, hasta hacer que el tirante incrementara su altura hasta 20 centímetros, al mismo tiempo en el nivelómetro ubicado al extremo opuesto del sistema, el número uno, le fue sustituido el tapón que esta colocado donde finaliza la línea de conducción por una manguera para recuperar el líquido añadido en el vaso número 10, al resto de los nivelómetros les fue cerrada la válvula que comunica al piezómetro con la línea de conducción, la idea era hacer circular líquido a través de la línea de conducción, para que éste obligara a las burbujas de aire a salir, en la Fig.42 se muestra un esquema general del método empleado.

Los resultados de la prueba descrita en el punto anterior no fueron del todo satisfactorios, pues a pesar de tener un tirante de 20 centímetros de aceite, éste no fluía a través de toda la línea de conducción y prueba de ello es que era recuperado muy poco líquido en el extremo opuesto, por lo que fue necesario incrementar la carga de presión en el vaso 10, tal y como se aprecia en la Fig.43. Después de transcurrir 24 horas, fue evidente que la medida resulto más eficaz que la primera, pues el volumen de líquido recuperado fue mucho mayor

Una vez dado por concluido el proceso de corrección, continuaron realizándose las lecturas de los aparatos, para comprobar si el volumen de líquido contenido en ellos seguía presentando variaciones, el monitoreo fue realizado durante una semana, observándose que seguía variando el volumen.

Evaluación de la corrección. Una vez que el sistema no presentaba fugas y/o pérdidas, nuevamente le fue agregado aceite para verificar que la transmisión del líquido a través del sistema fuera de una manera uniforme, lo que indicaría que la línea de conducción estaba saturada completamente de líquido. En esta ocasión el aceite fue agregado en tres nivelómetros al mismo tiempo, el aparato uno, cinco y el 10 (Fig.44), de tal forma que cada vaso elevara su nivel de aceite en cinco centímetros, así serían agregados en total 15 centímetros de aceite al sistema, y cada vaso experimentaría un ascenso de su tirante de uno punto cinco centímetros.

Mediante un análisis estadístico de los resultados, es notorio que cuando fue agregado el aceite la primera ocasión, el volumen inyectado fue acaparado por los aparatos nueve y 10, en la Fig.45 puede apreciarse que tan solo el aparato 10 tomó el 25% del total de líquido inyectado, por su parte el aparato nueve concentro el 12%, mientras que el resto de los aparatos en promedio incrementaron su tirante entre el siete y ocho por ciento del total de cinco centímetros de aceite agregado, esto también lo indica la Tabla 3.

Después de efectuar la corrección del sistema, la distribución ocurrió de una manera más equitativa, a pesar de que los aparatos nueve y 10 siguieron concentrando un poco más del líquido que les correspondía, este valor solo fue del orden del 12% para ambos nivelómetros, casi la mitad de lo que tenían antes de que fuera corregido el sistema, en lo que concierne a los demás aparatos podemos decir que estos recibieron una aportación del orden del nueve por ciento en promedio (Fig.45)

En la Tabla 4 se resumen los cálculos de algunos índices estadísticos de los resultados anteriores, tales como, la media, la desviación estándar, y el coeficiente de variación de la distribución del líquido. Destacando el hecho de que el coeficiente de variación antes de purgar el sistema era del orden del 54%, y después de la purga presentaba un valor de 18%.

Comportamiento del sistema después de la corrección. Después de haber implementado la medida correctiva en el sistema de nivelómetros, se dio seguimiento continuo a su comportamiento, mediante la realización de lecturas de los niveles de líquido de los vasos, con el propósito de verificar si después de la intervención realizada al sistema, el principio de conservación de la masa estaba cumpliéndose o si por el contrario, seguían

presentándose los problemas de variación del volumen debidos a la falta de saturación en la línea de conducción.

La Fig. 46 muestra una gráfica elaborada con los registros procedentes de este monitoreo referido renglones arriba. En ella destaca entre otras cosas, cómo el volumen parece tener un comportamiento estable durante los primeros dos meses posteriores a la corrección del sistema de nivelómetros. Sin embargo del 14 de marzo de 2000 al 17 de julio del mismo año el volumen total del sistema parece haber sufrido un incremento.

4.6 Efectos de la temperatura en la dilatación del aceite. Con el objeto de determinar hasta que punto la temperatura es un factor determinante en las variaciones de la masa de líquido contenida en los vasos comunicantes que integran el sistema de nivelómetros, fueron realizadas una serie de pruebas experimentales a fin de evaluar los efectos que la variación de la temperatura produce en un líquido como el aceite de silicón.

Según la ref.8 como la forma de un fluido no está definida, solamente tiene sentido hablar del cambio de volumen con la temperatura, la respuesta de los gases a los cambios de temperatura o de presión es muy notable, en tanto que el cambio en el volumen de un líquido, para cambios en la temperatura o la presión, es muy pequeño. Si β representa el coeficiente de dilatación volumétrica de un líquido, es decir:

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \dots (7).$$

donde:

V= volumen total de líquido contenido en la muestra.

ΔV = incremento de volumen.

ΔT = incremento de temperatura.

Se encuentra que β depende poco de la temperatura, los líquidos tienen la característica de dilatarse al aumentar la temperatura, siendo su dilatación volumétrica unas diez veces mayor que la de los sólidos.

Sin embargo, el líquido más común, el agua, no se comporta como el resto de los demás líquidos, ya que presenta dilatación cuando desciende la temperatura, cosa que no sucede en ningún otro líquido (ref.8).

A fin de poder determinar el valor de β en el aceite de silicón fue hecha una pequeña prueba, donde el líquido era colocado dentro de un matraz de vidrio el cual a su vez estaba dentro de otro recipiente con cierto volumen de agua lo que es conocido como baño María, en un principio el agua estaba en estado sólido, es

decir en forma de hielos, para hacer que poco a poco la temperatura dentro del recipiente conteniendo el aceite fuera disminuyendo, una vez logrado esto el recipiente conteniendo el agua fría y el matraz con el aceite, era colocado sobre un mechero a fuego lento a fin de poder establecer un incremento de temperatura (ΔT) (Fig.47), por otra parte periódicamente fue verificándose el nivel de aceite dentro del matraz primero a medida que descendía la temperatura y luego cuando aumentaba al ser colocado el recipiente sobre el fuego, a fin de establecer un incremento de volumen (Δv) correspondientes a cada incremento de temperatura, para así poder aplicar la ecuación 7 y determinar el coeficiente de dilatación térmica.

Fue realizada un aprueba similar con la variante de que en lugar de utilizar un matraz que contuviera el aceite, éste fue colocado dentro de un tubo en forma de U (Fig.47), donde el aceite no saturaba el interior del tubo, sino que estaban presentes algunas burbujas de aire en la parte central del mismo, lo que simula la situación prevaleciente en el sistema de nivelómetros. En lo demás la prueba fue idéntica a la anterior, el objetivo era ver la influencia que el aire presente dentro del tubo hacía variar los resultados con respecto a la anterior prueba, resultando lo siguiente.

Los valores del coeficiente de dilatación térmica (β) obtenidos para el aceite en el matraz, fueron del orden de $9.8 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, valor inferior respecto a los que resultaron de la prueba con el aceite dentro del tubo en U que fueron del orden de $2.3 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ (Fig.48) lo que indica que la presencia de aire dentro del tubo influyó.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

5 ASPECTOS ESTRUCTURALES.

En este capítulo son comentados algunos de los efectos que causan los hundimientos diferenciales en el comportamiento estructural del Palacio Nacional atención especial se presta a la pérdida de verticalidad de los elementos de soporte y a la presencia de grietas, principalmente en la zona norponiente, en la cual está instalado el sistema de monitoreo continuo y que como fue descrito en capítulos anteriores es la que más ha sido afectada por la problemática del subsuelo sobre el que está asentada.

En las Figs.49 y 50 está representada la deformación ocurrida en la cimentación de las fachadas norte y poniente. En las mismas figuras fue sobrepuesta la deformación estimada a partir de los registros del sistema de monitoreo continuo y de las deformaciones medidas con equipo topográfico, todo esto en el periodo que comprende del mes de junio de 1995 a julio de 1998; en ellas puede observarse que en ambas fachadas la zona noroeste detuvo su descenso y el resto de la estructura descendió a mayor velocidad. Esta configuración ha provocado agrietamientos en la estructura e incrementado el desplomo de los elementos de soporte , sobre todo en la zona del torreón norte.

5.1 Desplomo del torreón norte.

El torreón al igual que el resto del Palacio Nacional, consta de planta baja y tres niveles los cuales fueron construidos a partir del siglo XVIII y en diferentes épocas, el desplomo para cada entrepiso fue medido como lo muestra la Fig.51.

En la Fig.52, por su parte, aparece representada la resultante del desplomo de cada entrepiso; los vectores dibujados indican que los dos primeros niveles están desplomados en dirección norponiente, mientras que el segundo y el tercero lo están hacia el poniente (ref.12), es notorio también que la magnitud del desplomo decrece conforme aumenta la altura del torreón, lo cual indica que los primeros cuerpos del elemento, los primeros cronológicamente en ser edificados son los que han sufrido más los efectos derivados de los hundimientos diferenciales, por el contrario los dos últimos niveles al ser construidos posteriormente encontraron un terreno cuyas zonas mas compresibles se habían consolidado por efecto del peso transmitido por los dos primeros cuerpos del torreón.

5.2 Rotación del torreón.

Para asociar la inclinación del torreón con el giro de su base, fue determinada de manera analítica la ecuación de un plano que se forma a partir de tres puntos ubicados en la base del elemento.

A partir de su posición con respecto a un sistema de referencia X,Y,Z es posible llegar a obtener una ecuación del tipo

$$Ax+By+Cz=0....(8)$$

que representa el plano donde estos tres puntos están contenidos (ref.5).

Primero fue obtenida la ecuación del plano considerando la elevación de los puntos en el mes de junio de 1995, las coordenadas de los puntos en cuestión son:

$$0 (0,0,0), 1 (0.2, 2.20, 0.104), 2 (-3.25, 6.02, 0.248).$$

para después efectuar las operaciones vectoriales siguientes:

$$r_1-r_0 = 0.20i+2.2j+0.104k$$

$$r_2-r_0 = 3.25i+6.02j+0.248k$$

$$r-r_0 = 0i-0j-0k.$$

$$(r-r_0)[r_1-r_0] \times [r_2-r_0]$$

$$[r_1-r_0] \times [r_2-r_0] = \begin{pmatrix} i & j & k \\ 0.2 & 2.2 & 0.10 \\ -3.25 & 6.02 & 0.248 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.08048i \\ -0.3876 j \\ 8.354 k \end{pmatrix}$$

$$(r-r_0)[r_1-r_0] \times [r_2-r_0] = -0.08048(x+0) - 0.3876(y+0) + 8.354(z+0).$$

Para finalmente llegar a la ecuación del plano (ref.5).

$$-0.08048X - 0.3876Y + 8.354Z = 0 \dots \dots (9)$$

Despejando la variable Z de la ecuación anterior se obtiene la expresión:

$$Z = \frac{0.08048X + 0.3876Y}{8.354} \dots \dots (10)$$

Que nos permite conocer la elevación de cualquier punto contenido dentro del plano

Procediendo de manera similar, fue obtenida la ecuación del plano a partir de los registros topográficos de la nivelación efectuada en el mes de julio de 1998, la cual resulto ser:

$$-0.083118X - 0.394575Y + 8.354Z = 0 \dots \dots (11).$$

La Fig.53 muestra el plano que representa la ecuación 9, la cual indica la manera en que ha ocurrido la rotación de la base del torreón debido a los efectos de los hundimientos diferenciales. Al analizar los resultados se obtuvo que la base del elemento rotó en la dirección norte-sur alrededor del 0.76%, mientras que en la dirección este-oeste fue del 3.2%, lo que da una resultante de 3.33% en la dirección norte - poniente, lo cual coincide con el valor de 3.55% obtenido por las mediciones topográficas descritas en la Fig.51 y 52.

5.3 Agrietamientos en la estructura.

Como resultado de la deformación que ha sufrido la estructura del Palacio Nacional por efecto de los hundimientos diferenciales, han aparecido una serie de agrietamientos en la estructura, principalmente en los muros.

En los muros las grietas presentan una dirección inclinada a 45° y en otros casos verticales, y están concentradas principalmente sobre la fachada norte en el primero y segundo nivel. Esto se debe al patrón de deformación que se produce en esa zona. Puede observarse que la deformación adquiere una configuración convexa como puede verse en la Fig.49.

En la Figs.54 y 55 aparece una planta arquitectónica donde se indica la ubicación de algunas de estas grietas en la zona norponiente del Palacio Nacional, a partir del primer nivel de la construcción y hasta el segundo. La ubicación de las grietas aparece con un número, el cual corresponde al de la fotografía correspondiente, que en el anexo de este trabajo puede encontrarse.

6. CONCLUSIONES.

Las principales conclusiones a que se llegó con la elaboración de este trabajo son las siguientes:

El Palacio Nacional al igual que muchas de las construcciones históricas, asentadas en la zona centro de la ciudad de México, sufre los efectos provocados por el hundimiento regional debido a la intensiva extracción del agua de los mantos acuíferos. Además los restos de antiguas construcciones prehispánicas han generado diversos grados de consolidación del terreno en esta zona de la ciudad de México, lo cual hace que las edificaciones se hundan de manera diferencial.

A pesar de las diversas intervenciones realizadas en el siglo XX en la cimentación y estructura del Palacio Nacional, para contrarrestar los efectos que ocasiona el hundimiento diferencial, continúan ocurriendo agrietamientos y pérdida de verticalidad de los elementos de soporte. Si bien los pilotes instalados en la zona norponiente de la construcción han logrado disminuir la velocidad de hundimiento

de esa zona, es evidente que en el resto de la estructura que no cuenta con pilotes en su cimentación, desciende a mayor velocidad, lo cual muestra la dificultad de poder controlar el hundimiento de una estructura de la magnitud del Palacio Nacional.

El sistema de monitoreo continuo ha demostrado ser herramienta fundamental para entender el comportamiento estructural de la construcción. Su uso en el Palacio ha permitido conocer con mayor detalle la manera en la que se deforma su esquina noroeste. Además, ha servido de referencia para manipular los pilotes que se han instalado en la cimentación de la construcción para controlar el descenso de dicha parte de la estructura.

En cuanto a los resultados obtenidos del sistema de monitoreo continuo se observó que la información obtenida de los inclinómetros es consistente con la deformación medida en la cimentación por parte de los nivelómetros y las nivelaciones topográficas; sin embargo, deben tomarse ciertas reservas en su interpretación, ya que las características propias de la mampostería pueden hacer que los sensores registren movimientos locales que no sean representativos de la estructura en su conjunto.

Por su parte los resultados derivados del sistema de nivelómetros, permitieron estimar la deformación sufrida por la cimentación del edificio, la cual aunque coincide con los registros topográficos en la tendencia de ésta, difiere en la magnitud, sobre todo en el caso de los registros ubicados sobre la parte poniente de la estructura, esta diferencia es debida en gran parte a los problemas de variación del volumen de aceite dentro del sistema hidráulico.

La corrección de que fue objeto el sistema de nivelómetros por medio del purgado de la línea de conducción, seguramente mejorará la estabilidad de los registros; sin embargo, es deseable implementar algunas modificaciones en el diseño del sistema a fin de que el aire atrapado en la línea de conducción y en las conexiones pueda ser expulsado de manera práctica.

La evolución de la deformación en función del tiempo y de la temperatura permite separar los efectos térmicos de la deformación debida a otras causas como: asentamientos de la cimentación, modificaciones en la estructura, nuevas fuerzas inducidas a ésta y envejecimiento de los materiales, entre otras.

RECONOCIMIENTOS.

Un agradecimiento especial a la Universidad Nacional Autónoma de México, por la educación y formación profesional recibidas.

Gracias al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por el apoyo y las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

Al arquitecto Sergio Zaldívar Guerra, Coordinador General de Obras Especiales de la Dirección General de Sitios y Monumentos del CONACULTA, quien es el responsable del proyecto de rehabilitación del Palacio Nacional.

Al Arq. Guillermo Carranza Frías, Director de proyectos de la Dirección General de Sitios y Monumentos del CONACULTA, por la información facilitada para la realización de este trabajo.

Un agradecimiento al Ing. Manuel Santarriaga de la compañía TGC. Ingeniería por haber proporcionado información para la realización de este trabajo.

Al Sr. José Rosales Enríquez por su colaboración en diversas actividades correspondientes a la realización de este trabajo

Un reconocimiento muy especial al Ing. Abraham Roberto Sánchez Ramírez, por su apoyo y comprensión que llevó a feliz término este trabajo.

REFERENCIAS.

- 1) R.Giles, **Mecánica de los fluidos e hidráulica**, Ed. McGraw-Hill, E,U , 1970
- 2) J.Gutierrez, **Enciclopedia de Física**, Ed. Salvat , México, 120-126,1978
- 3) E. Juárez Badillo, **Mecánica de Suelos**, Tomo 1, Ed.Limusa, México, 127-130 y 245-280. 1963.
- 4) E. Levi, **Hidráulica** , Ed Limusa , México, 8-30 , 1995
- 5) Mendelson y F. Ayres, **Calculo diferencial e integral**, Ed Mc Graw-Hill, E.U, 1975
- 6) G. Moreno Pecero,(1981) "Refoundation Research of Mexico`s National Palace" . X Conferencia Internacional sobre Mecánica de suelos, Estocolmo.
- 7) Presidencia de la República, **El Palacio Nacional**,(Ed. Sep),México,15-20,1980.
- 8) R. Resnick y David Halliday, **Física** , Ed. Continental , México , 482-489 , 1980
- 9) A.R. Sánchez Ramírez, R.Meli y J.C.Terrones "Sistema automático de monitoreo para estudiar el comportamiento estructural del Palacio Nacional" memorias del XV Congreso de instrumentación, Guadalajara Jal. Octubre de 2000.

- 10) E. Santoyo y J.A Segovia, Renivelación y Recimentación de estructuras, articulo publicado en la revista " Ingeniería Civil" No 314, junio de 1995.
- 11) G. Sotelo, Hidráulica general, Ed. Limusa-Noriega , México, 39-43 y 114, 1990
- 12) TGC, Ingeniería, "Informes técnicos del mantenimiento de los pilotes con funda antifriccionante instalados en la zona de S.H.C.P. "I, México D. F., 1997 y 1998.
- 13) TGC, Ingeniería, " Medición de condiciones hidráulicas del subsuelo de la Catedral y del Palacio Nacional y de sus alrededores", México D.F, julio de 1999

TABLAS

Tabla 1 *Propiedades mecánicas del subsuelo sobre el que se apoya el Palacio Nacional.*

	W %		LL %		LP %		q _u Ton/m ²		γ _m Ton/m ³		k cm/seg	m _v cm ² /seg
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1
MS	63.2	19.89	82.8	31.0	41.4	8.8	9.3	2.7	1.58	0.11	0.277	1.345
FAS	206	77.74	285.3	102.5	66.2	19.3	9.1	3.7	1.25	0.14	0.433	6.07
CD	106.8	68.57	179.6	65.3	48.2	15.4	41.7	57.7	1.32	0.13	0.396	1.96

Donde:

MS : estrato superficial

1 : valor medio.

FAS : formación arcillosa superior

2 : desviación estándar.

CD : capa dura

W : contenido natural de agua

LL : límite líquido

LP : límite plástico

q_u : resistencia a la compresión simple.

γ_m : peso específico del material

k : coeficiente de permeabilidad x10⁻⁸

m_v : módulo de compresibilidad X 10⁻²

Tabla 2. *Porcentajes de variación del volumen de aceite en los aparatos*

Sistema.	V_i	V_f	Diferencia V_i-V_f	%
Automático	785.84	698.51	87.33	11.11
Manual	706.47	619.05	87.42	12.37

Donde:

V_i= Volumen inicial en cm³.

V_f= Volumen final en cm³.

Tabla 3. Distribución del líquido inyectado antes y después de la corrección

Aparato	Δh_{AC}	Δh_{DC}	$\%h_{AC}$	$\%h_{DC}$
1	0.36	1.32	7.484	8.8
2	0.36	1.31	7.484	8.733
3	0.37	1.32	7.69231	8.8
4	0.37	1.34	7.69231	8.933
5	0.4	1.34	8.31	8.933
6	0.36	1.87	7.484	12.4667
7	0.39	1.35	8.1081	9
8	0.39	1.34	8.1081	8.933
9	0.61	1.92	12.6819	12.8
10	1.2	1.88	24.9480	12.533
total	4.81 cm	14.99 cm		

Volumen inyectado antes de la corrección: 5 cm

Volumen inyectado después de la corrección 15 cm

Donde:

Δh_{AC} = Incremento del tirante antes de la corrección.

Δh_{DC} = Incremento del tirante después de la corrección.

$\%h_{AC}$ = Porcentaje de líquido tomado por cada aparato antes de la corrección.

$\%h_{DC}$ = Porcentaje de líquido tomado por cada aparato después de la corrección.

Tabla 4. Indices estadísticos de la corrección de los nivelómetros

Indice	símbolo	Antes de corregir	Después de corregir
Media	(\bar{X})	0.481	1.499
Desviación estándar	(σ_{n-1})	0.2635	0.2703
Coefficiente de variación	$(\frac{\sigma - 1}{\bar{X}}) . 100$	54.799	18.024

FIGURAS

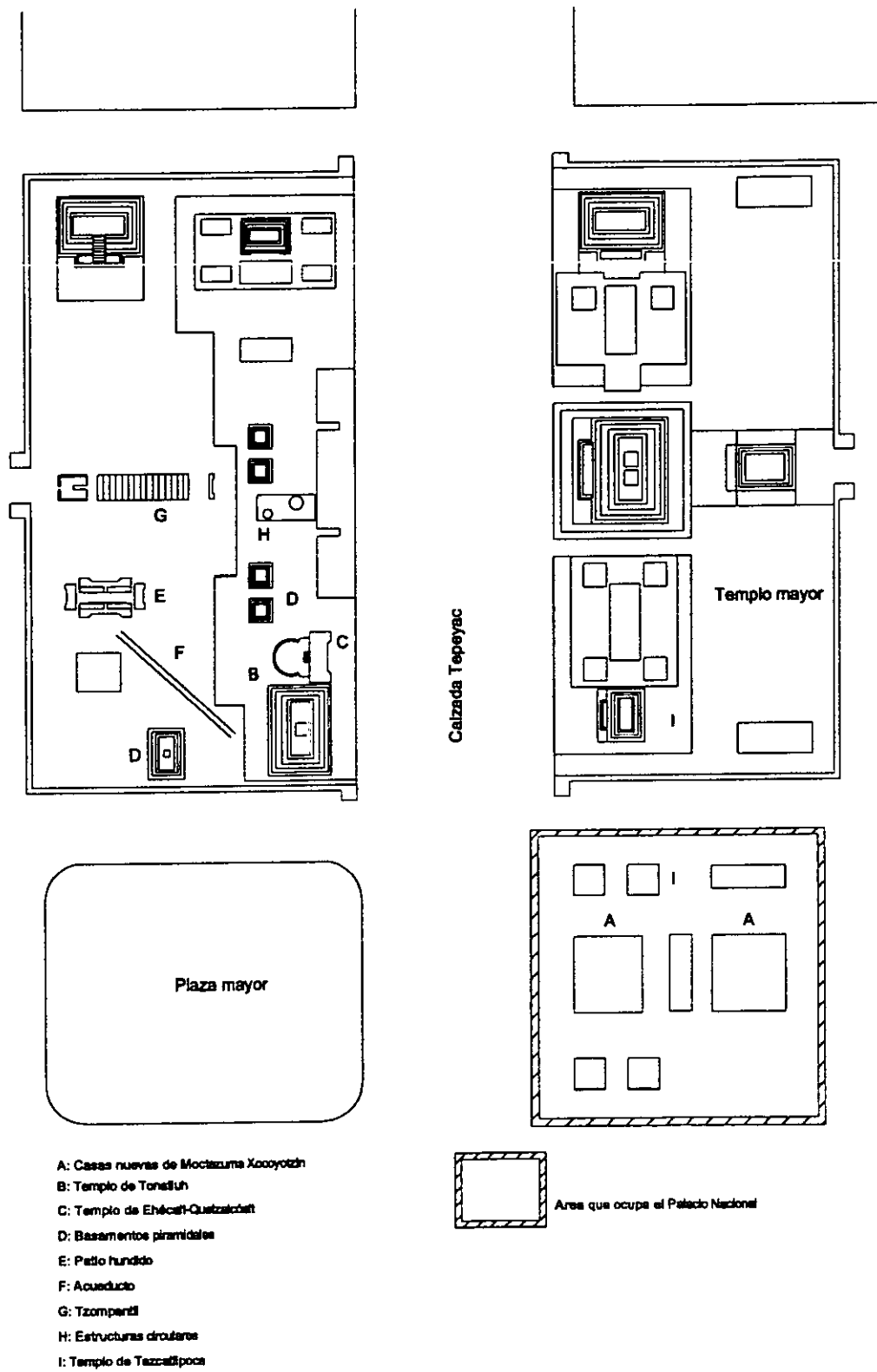


Fig.1 Ubicación de estructuras prehispánicas en el área que ocupa el Palacio Nacional

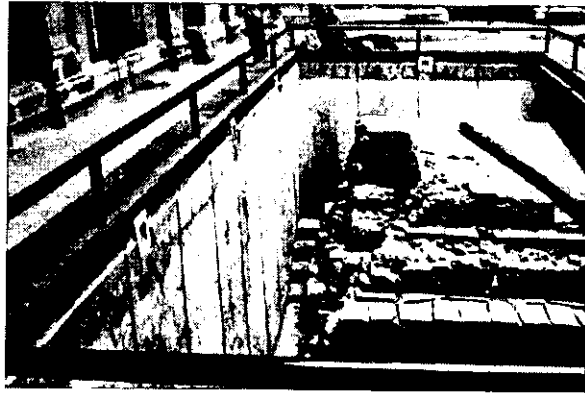


Fig.2 Ventana arqueológica ubicada en el segundo patio Mariano del Palacio Nacional.



Fig.3 Daños sufridos en el torreón sur (1840)

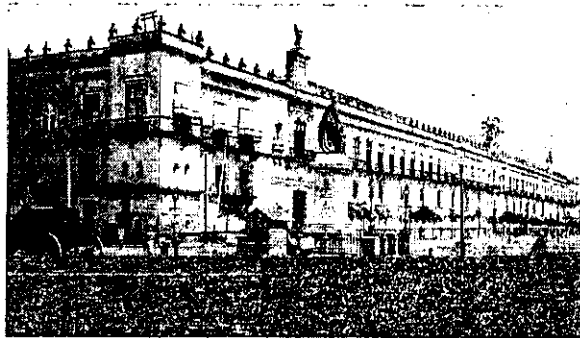


Fig.4 Aspecto del Palacio Nacional durante el Porfiriato

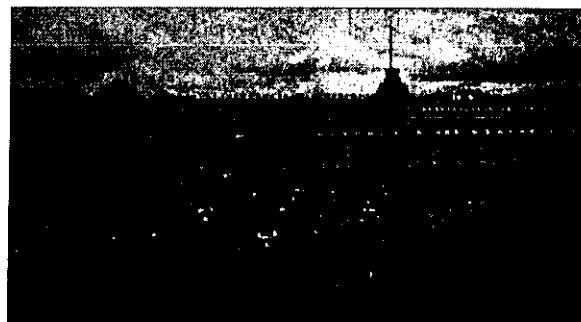


Fig.5 Aspecto del Palacio Nacional a partir de 1928

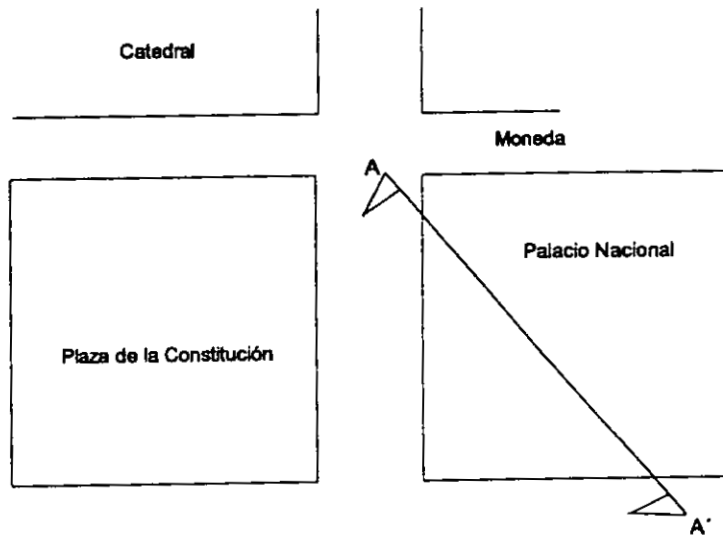
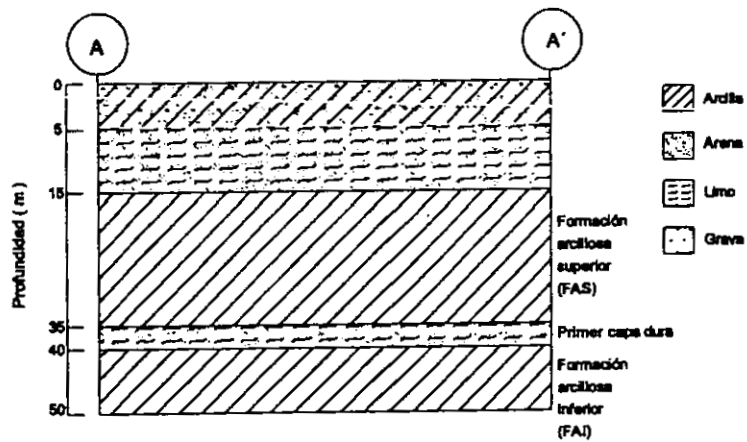


Fig.6 Perfil estratigráfico del terreno sobre el que se asienta el Palacio Nacional

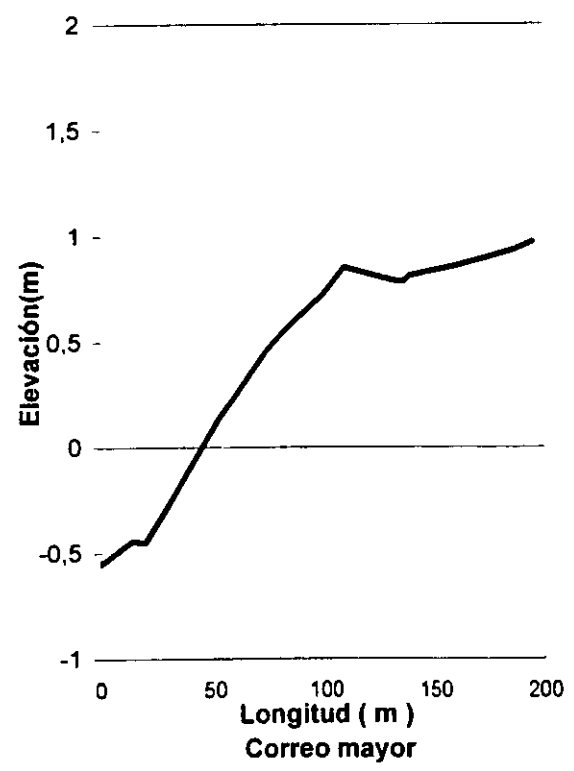
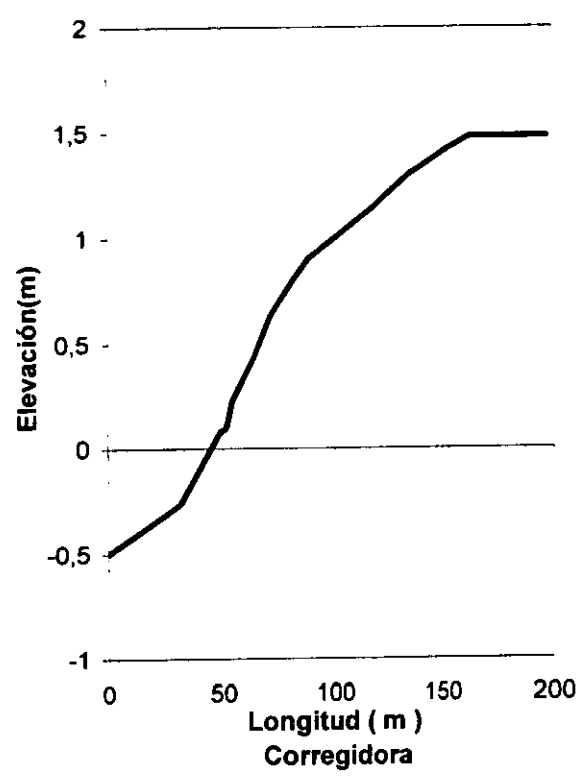
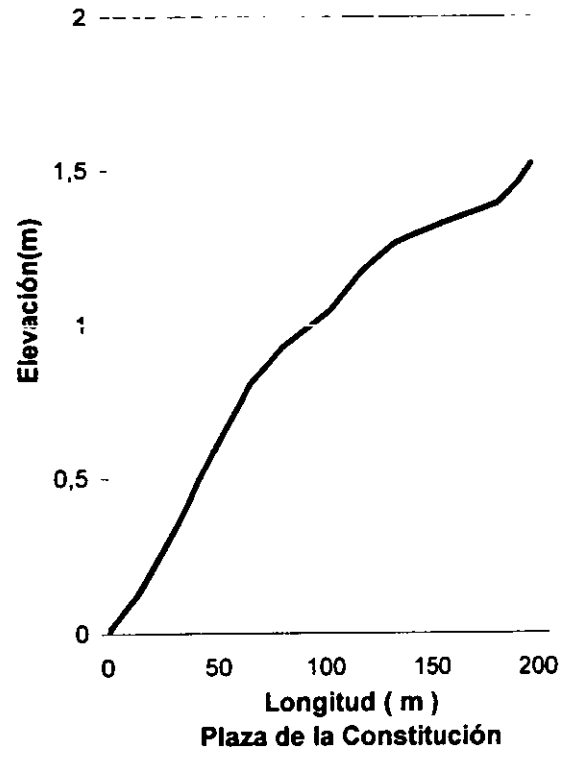
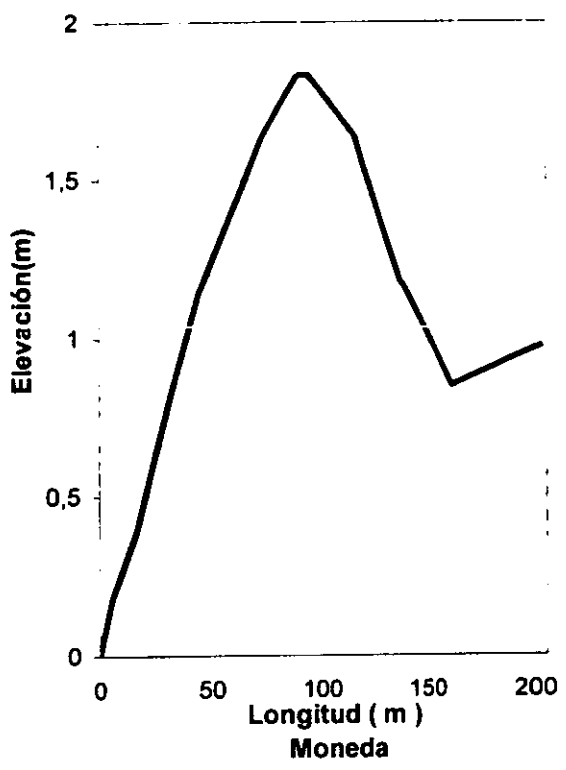
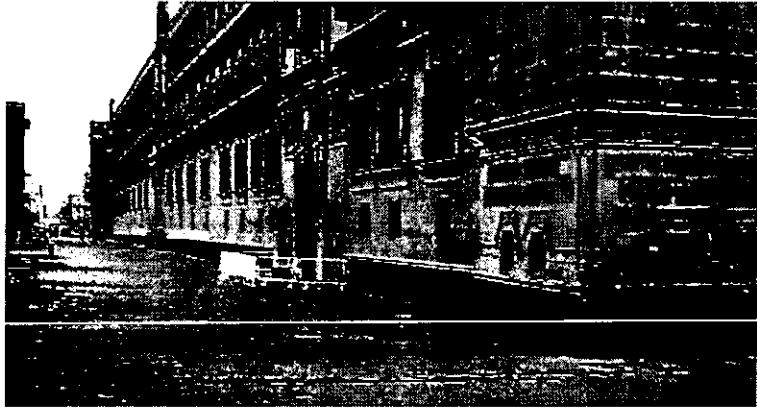


Fig.7 Deformación acumulada en las cuatro fachadas.



a) Fachada poniente (Plaza de la Constitución)



b) Fachada norte (Calle de la Moneda)

Fig 8. Vista general de la deformación que se ha producido en dos de las fachadas. En ambos casos la deformación adopta una configuración convexa.

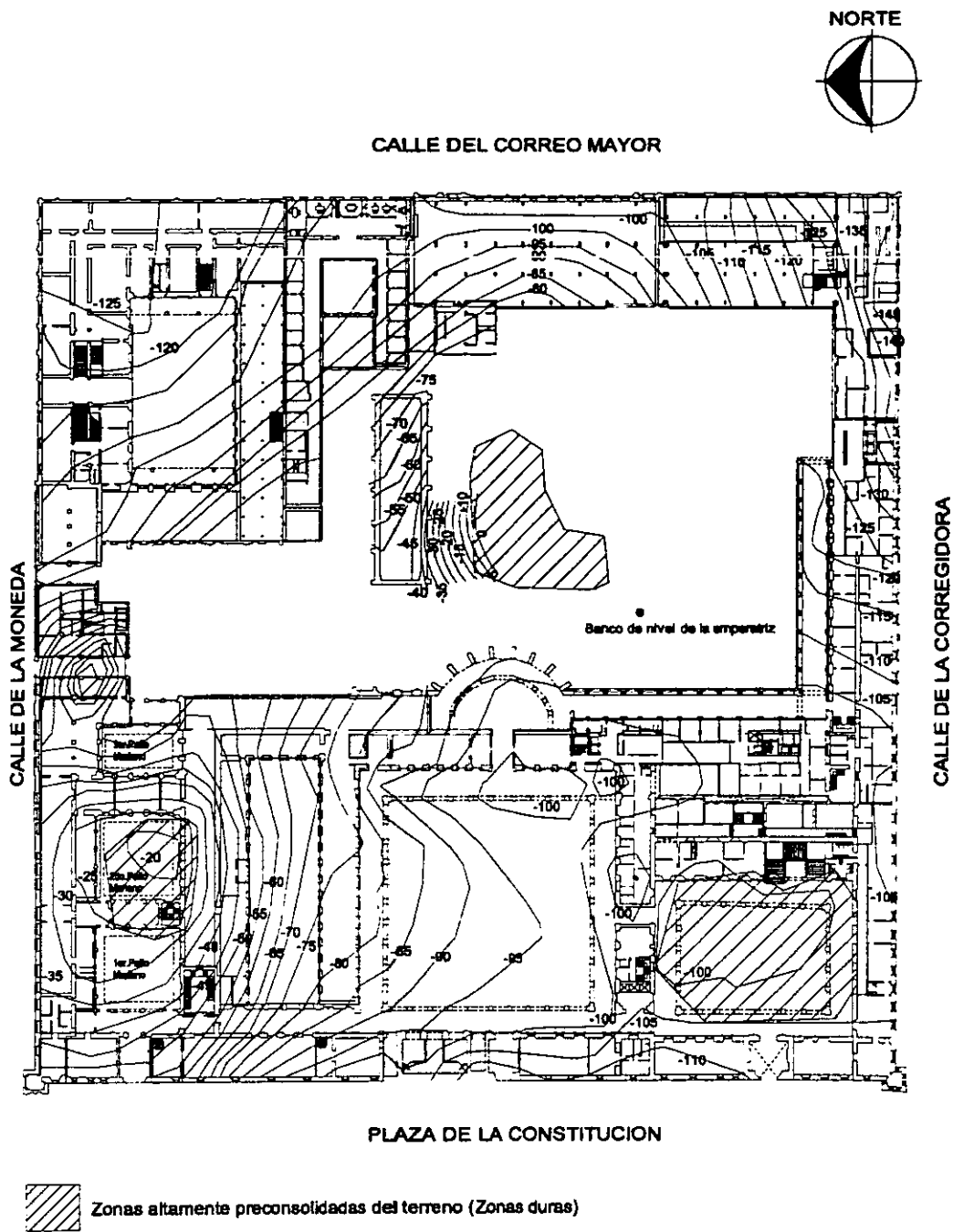
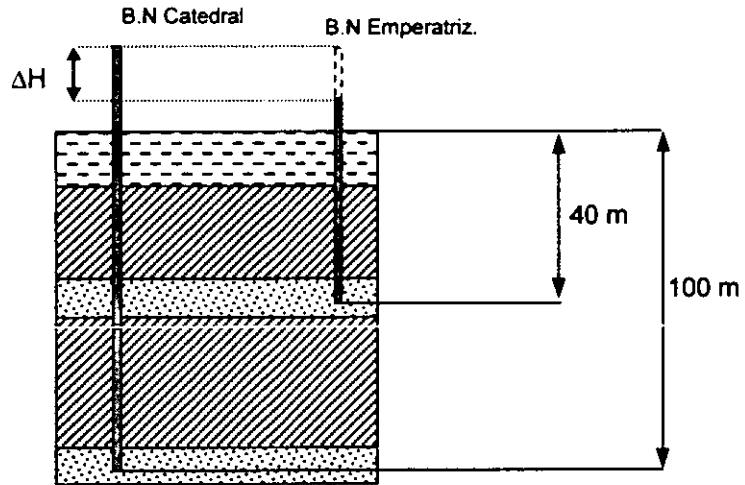


Fig.9 Curvas de igual asentamiento en mm, medidas en el área que ocupa el Palacio Nacional



ΔH = Hundimiento del banco de nivel de la Emperatriz con respecto al banco de nivel de la Catedral

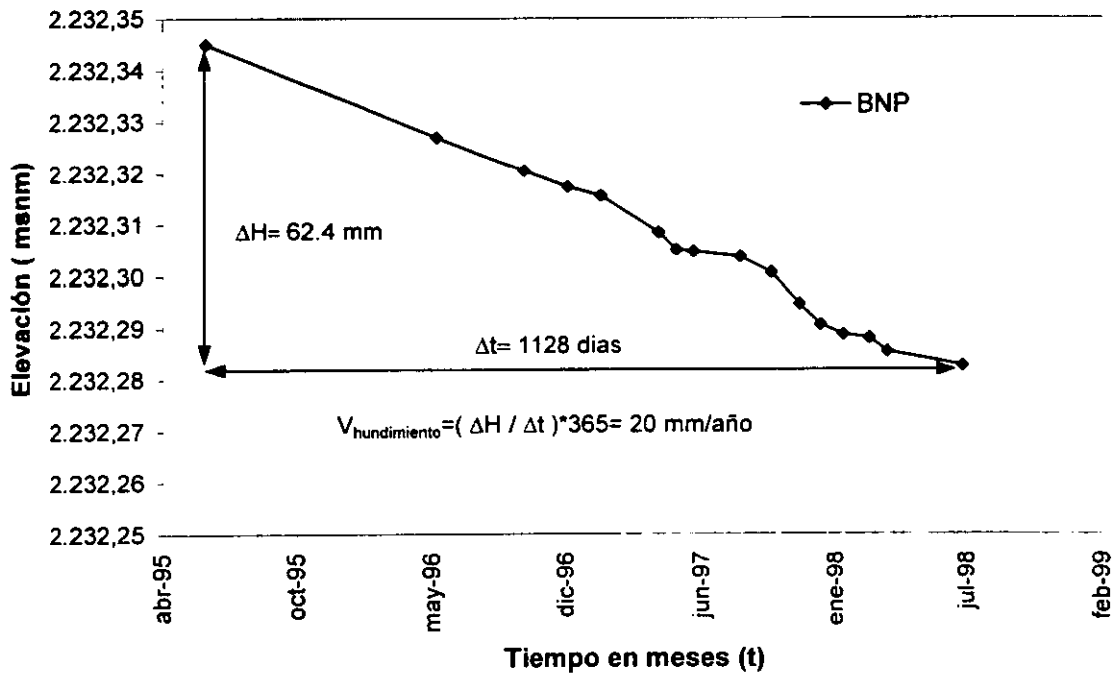


Fig.10 Evolución del hundimiento del banco de nivel de la Emperatriz.

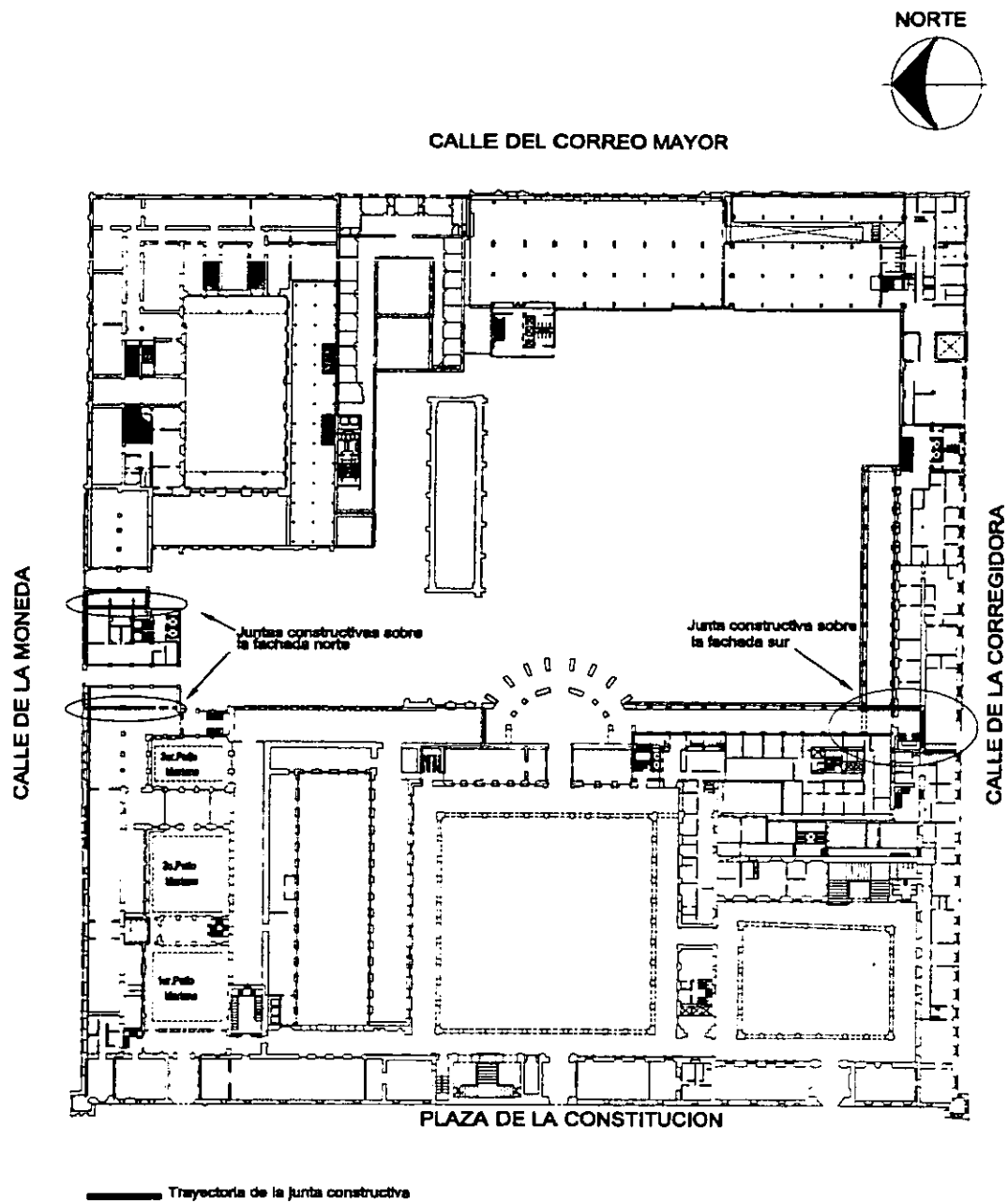
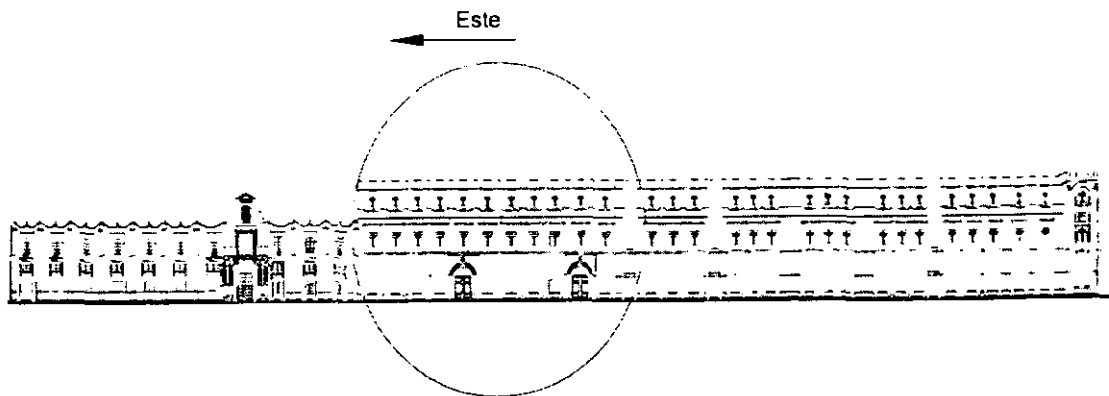


Fig.11 Ubicación en planta de las juntas constructivas



Fachada norte del Palacio Nacional

Grietas en el tercer y cuarto nivel de la estructura cerca de la junta constructiva

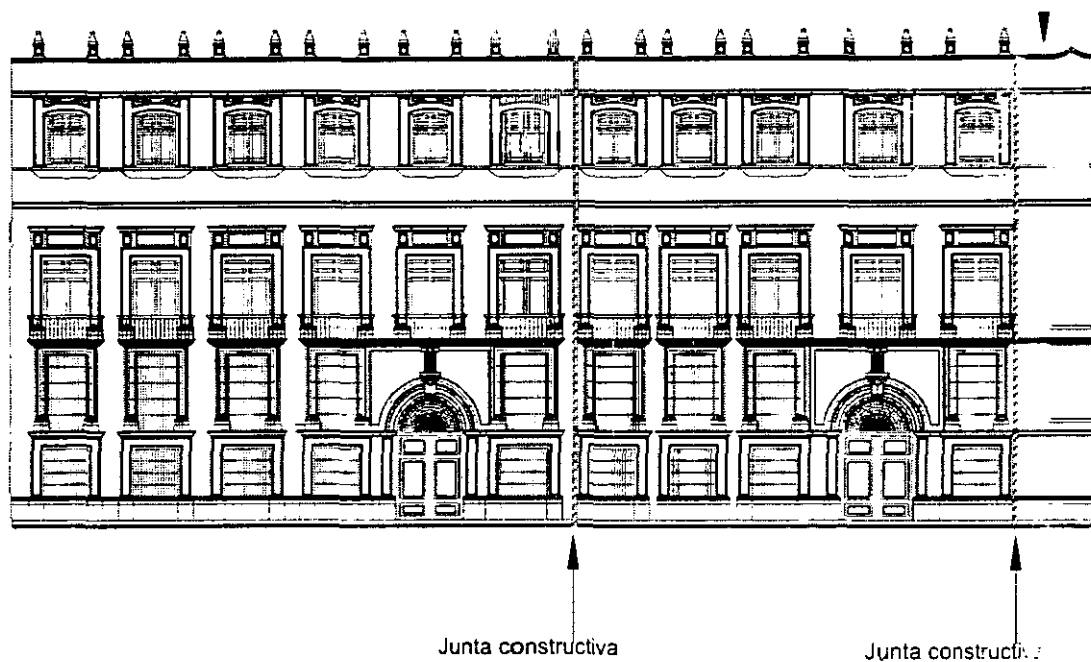
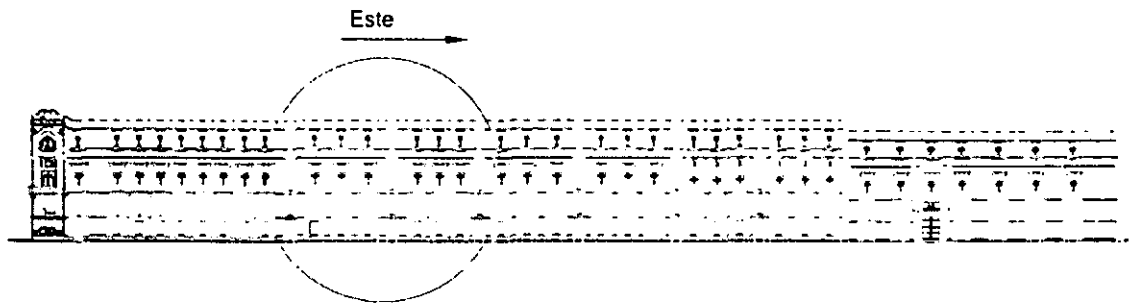
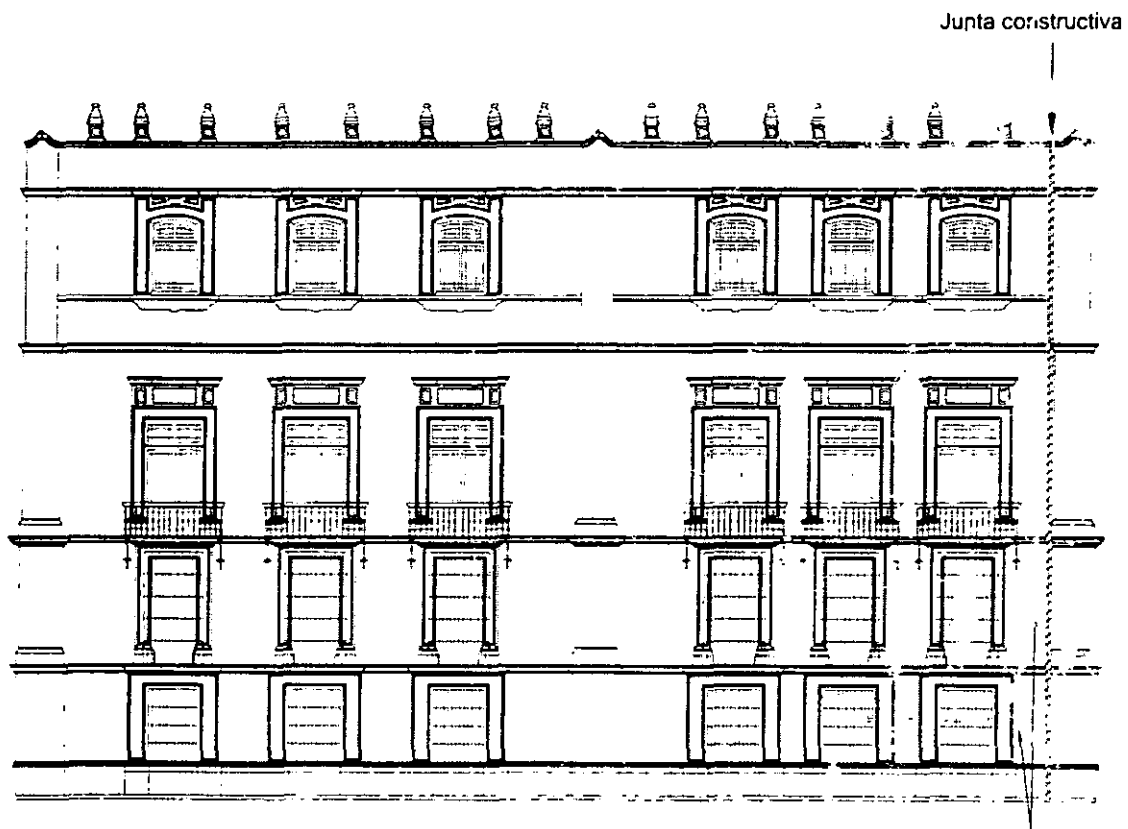


Fig.12 Ubicación de las juntas constructivas en la fachada norte del Palacio Nacional

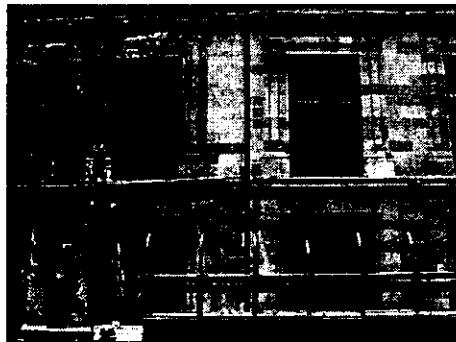


Fachada sur del Palacio Nacional



Grietas en el primero y segundo nivel de la estructura cerca de la junta constructiva

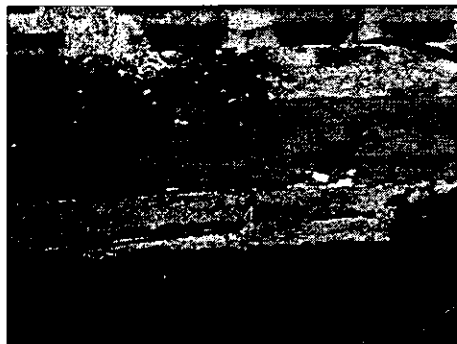
Fig.13 Ubicación de la junta constructiva sobre la fachada sur del Palacio Nacional



a) Vista de la *primer junta constructiva sobre la calle de la Moneda.*



b) *Grieta en el último nivel de la construcción, cerca de la junta constructiva.*



c) *Continuación de la grieta anterior en la azotea del edificio*



d) *Aspecto de la junta constructiva en la azotea del edificio*

Fig.14 *Aspectos de la primer junta constructiva localizada sobre la fachada norte del Palacio Nacional.*

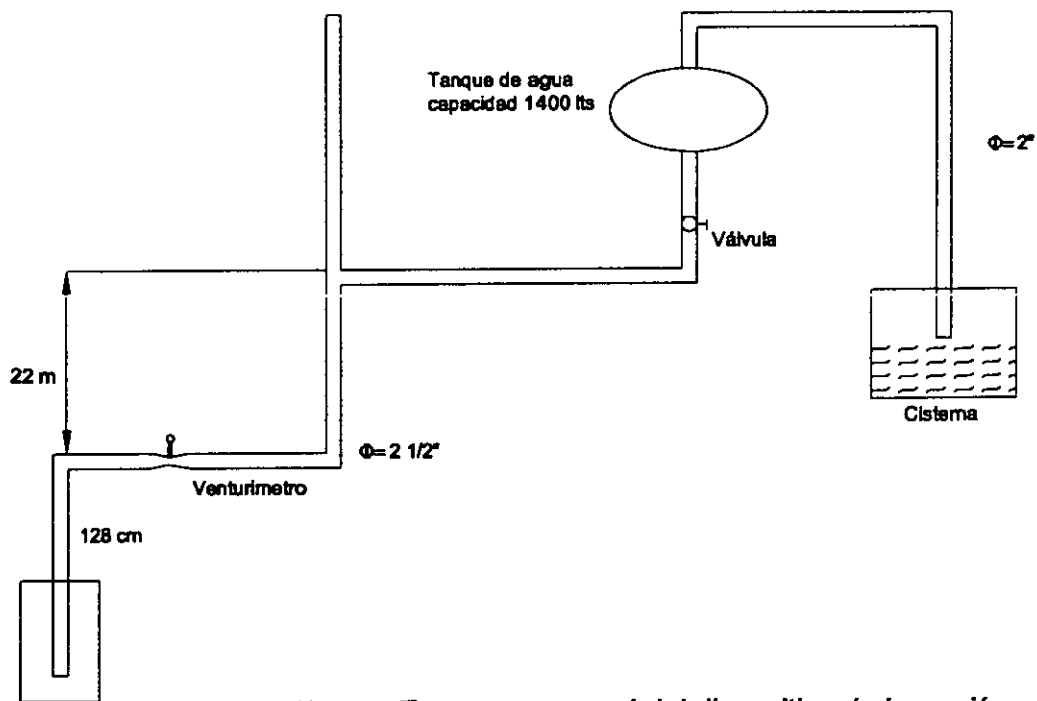


Fig.15 Esquema general del dispositivo de inyección

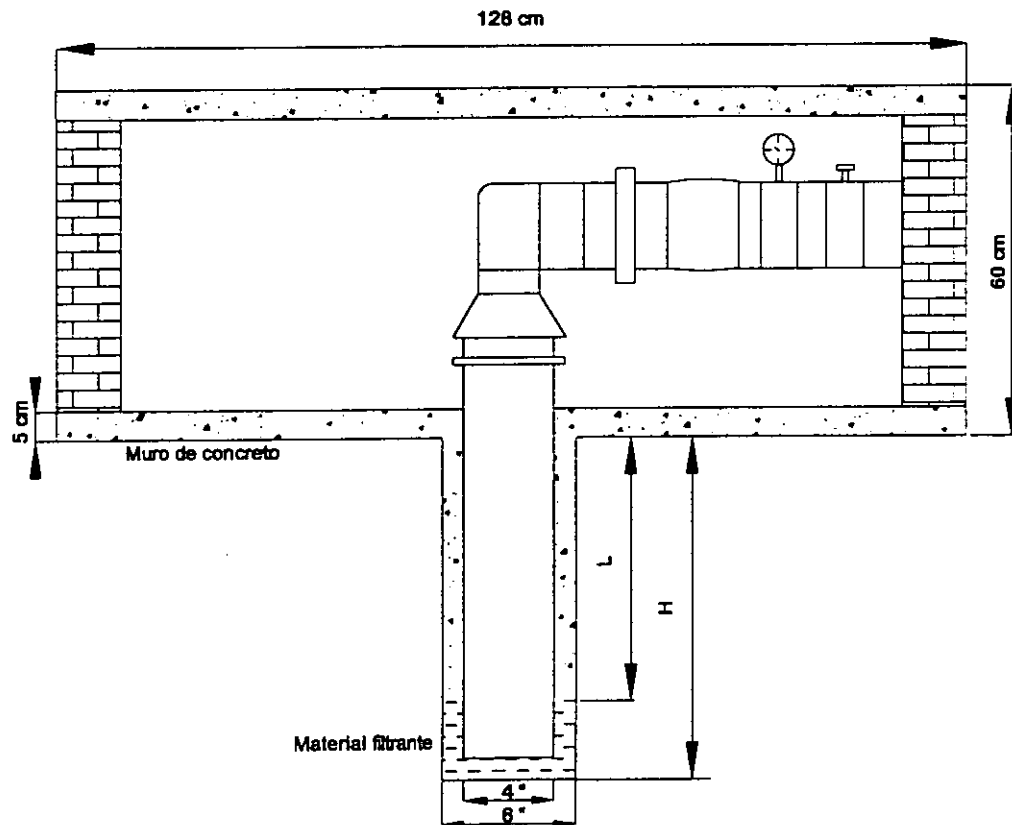


Fig.16 Detalle del dispositivo de inyección empleado

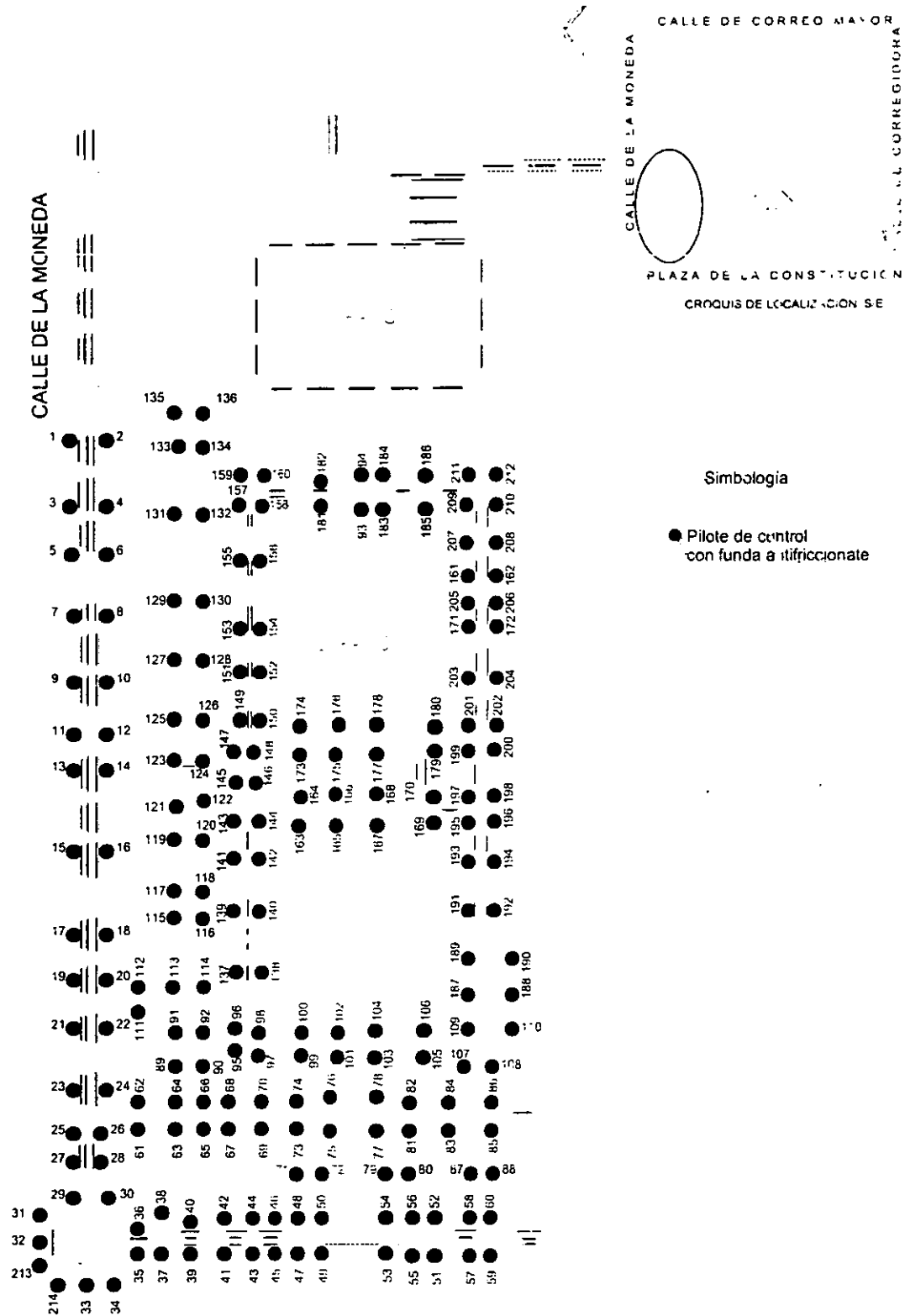


Fig.17 Localización de los pilotes de control instalados en el Palacio Nacional

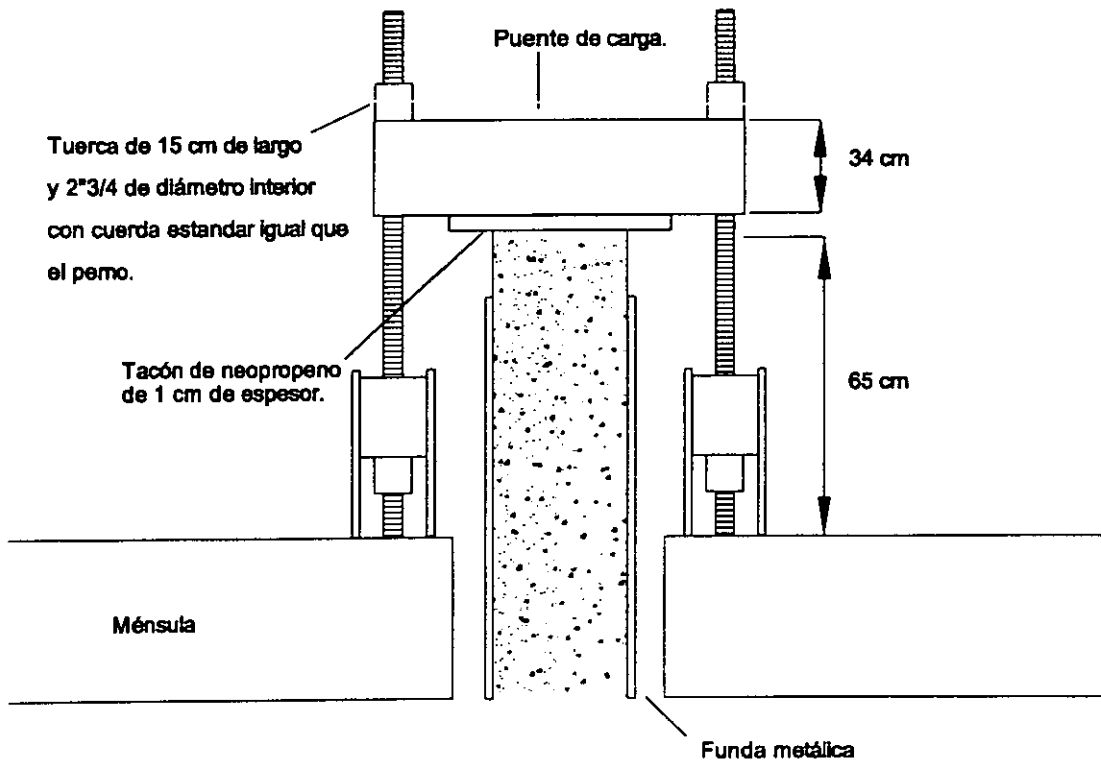


Fig.18 Esquema de un pilote de punta con funda antifriccionante colocado en la cimentación del Palacio Nacional

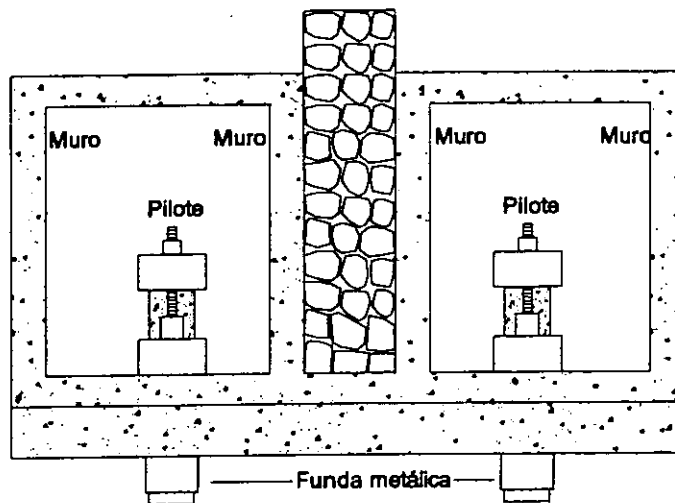


Fig.18a Disposición de los pilotes de punta colocados en Palacio Nacional

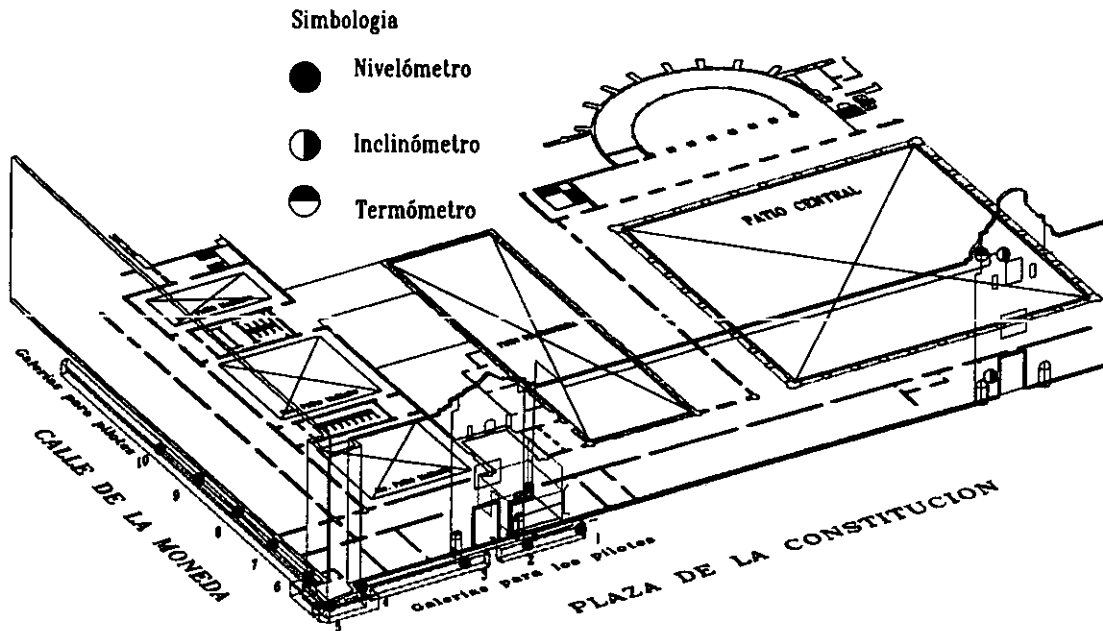


Fig. 19 Ubicación de los sensores del sistema de monitoreo continuo en la estructura.



Fig.20 Unidad central.

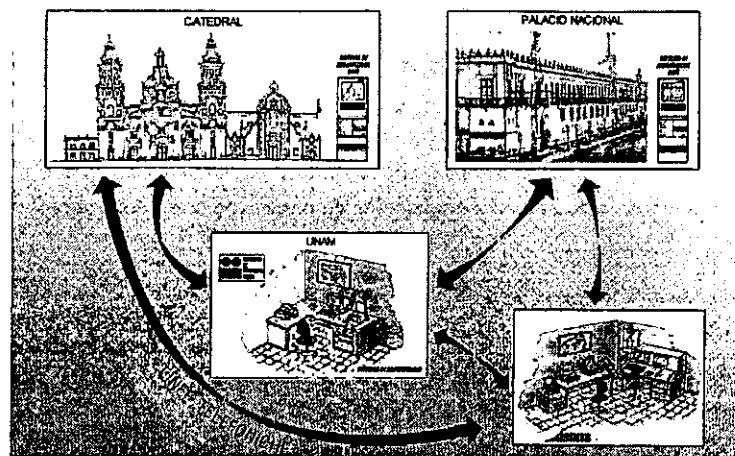


Fig. 21 Comunicación entre el Palacio Nacional, la Catedral, el ISMES y la UNAM.

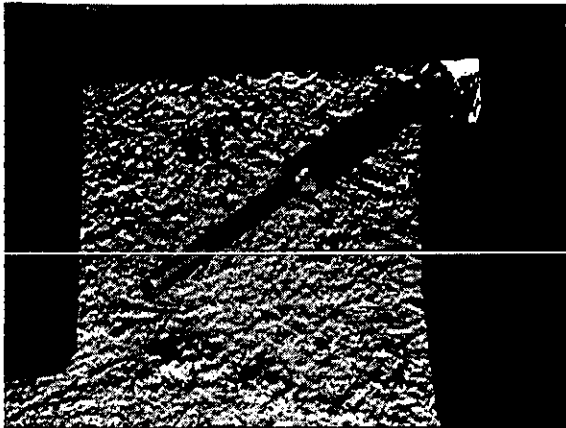


Fig.22 Sensor de temperatura

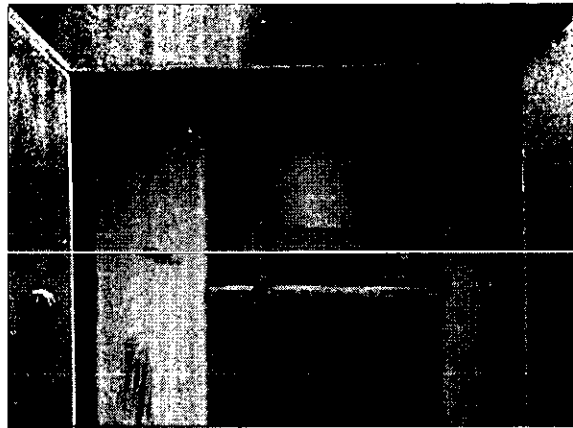


Fig.23 Inclinómetro

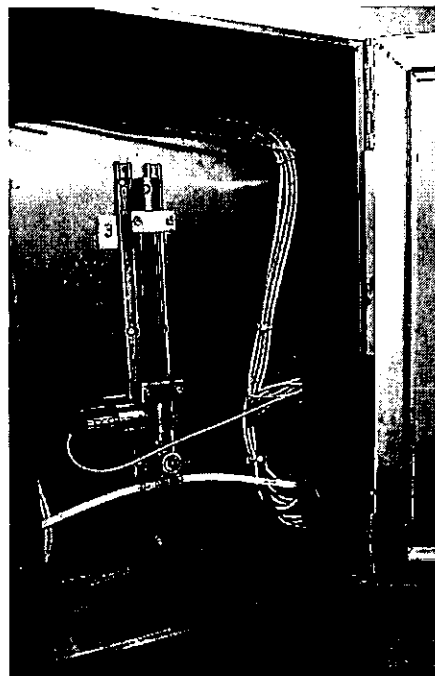


Fig.24 Nivelómetro

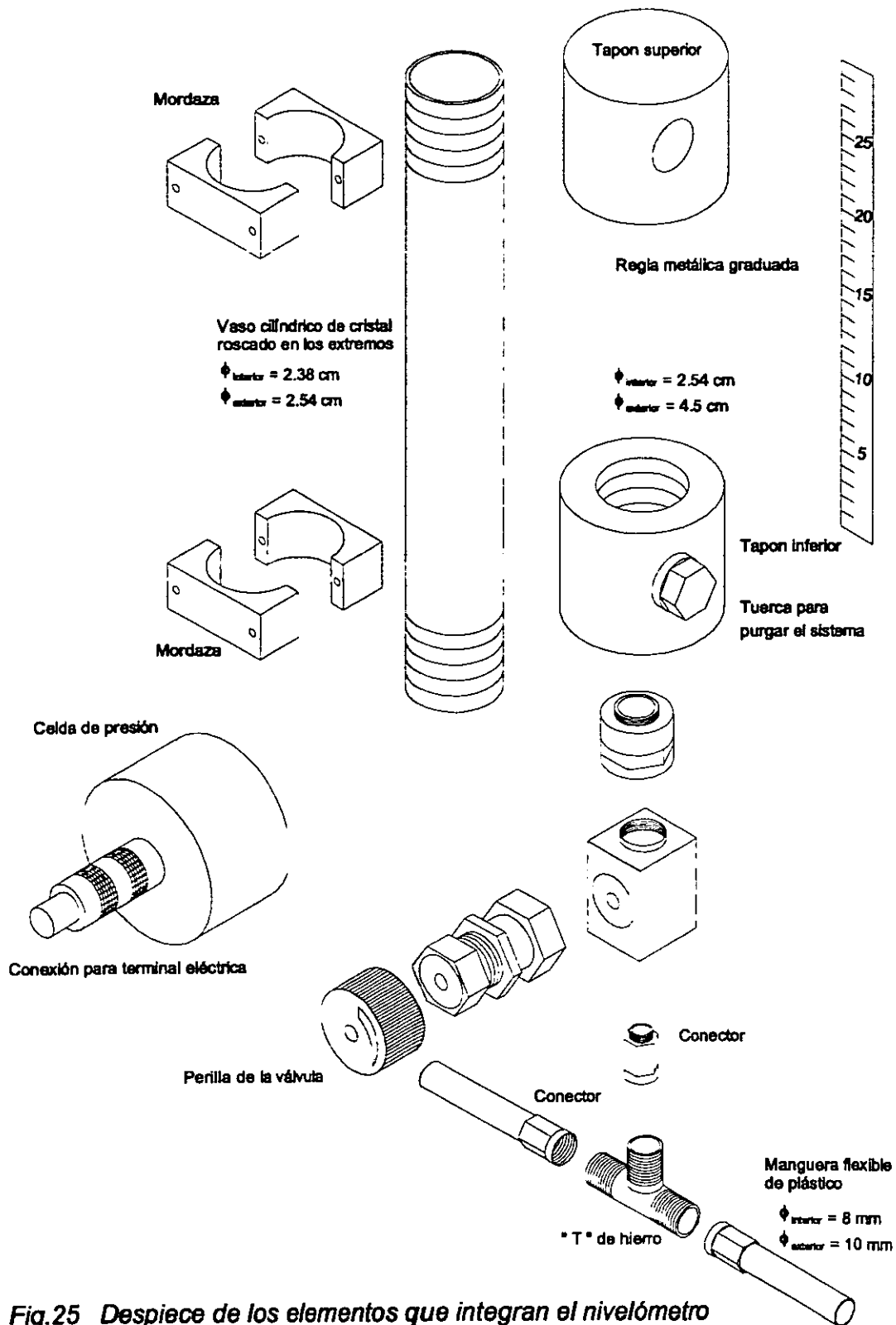
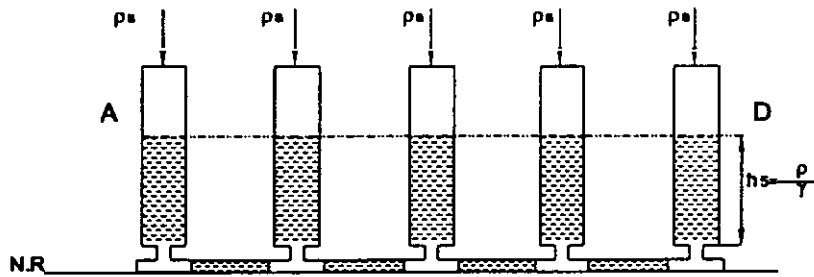
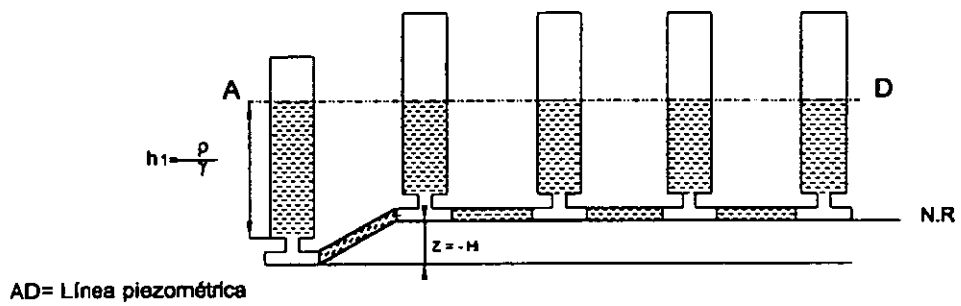


Fig.25 Despiece de los elementos que integran el nivelómetro

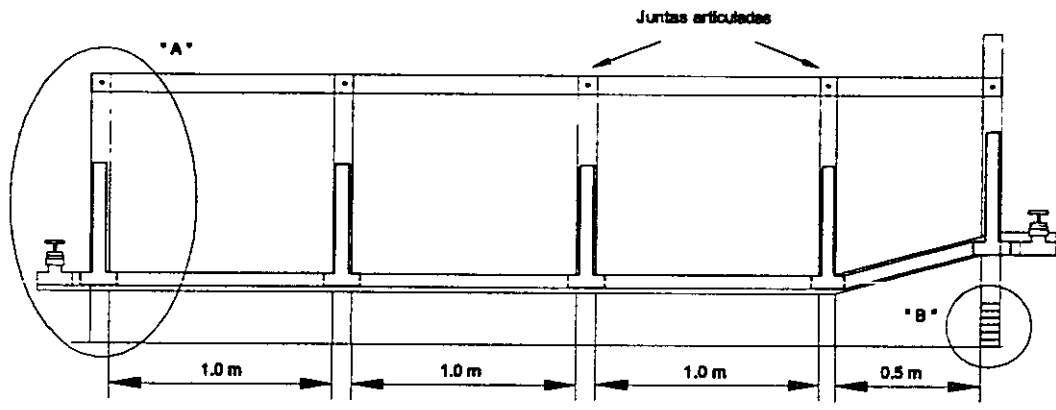


p_a = Presión atmosférica
 N.R. = Nivel de referencia

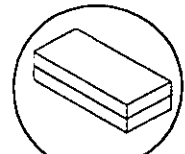


AD = Línea piezométrica

Fig.26 Sistemas de vasos comunicantes.



Piezas de madera de sección rectangular con un espesor de 5 mm



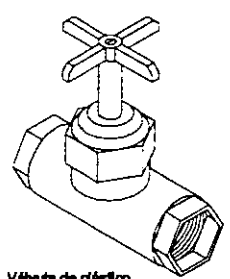
Detalle "B"

Solera de aluminio de 3 mm de espesor y 20 mm de ancho

Regla graduada

Tubo cilíndrico de cristal $\phi = 3/4"$ (2.0 cm)

Tomillo de 1/8" de diámetro



Válvula de plástico para el llenado y vaciado de la línea de conducción

Conector

Manguera de plástico $\phi = 1/2"$ (1.27 cm)

"T" de plástico

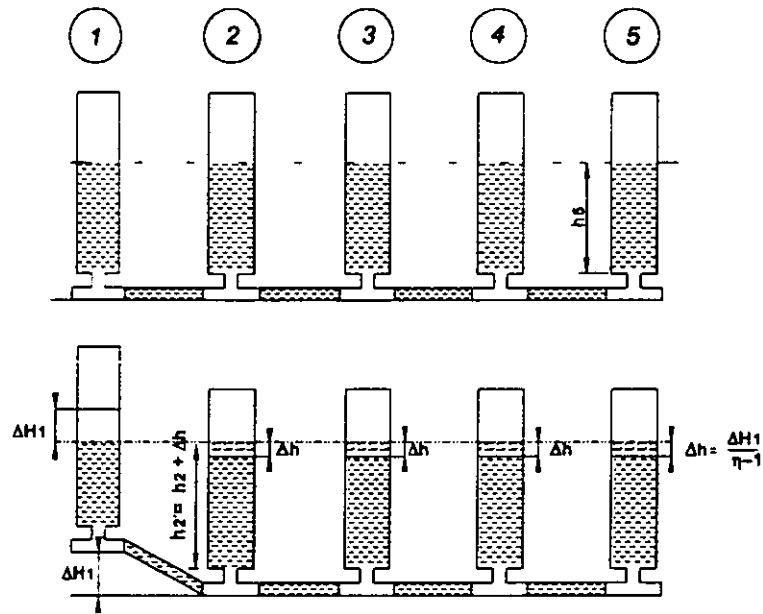
Abrazadera metálica

Detalle "A"

Manguera de plástico $\phi = 1/2"$ (1.27 cm)

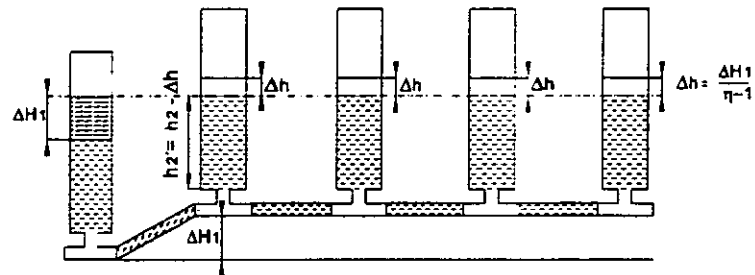
Zapatas de aluminio

Fig.27 Elementos integrantes del modelo experimental



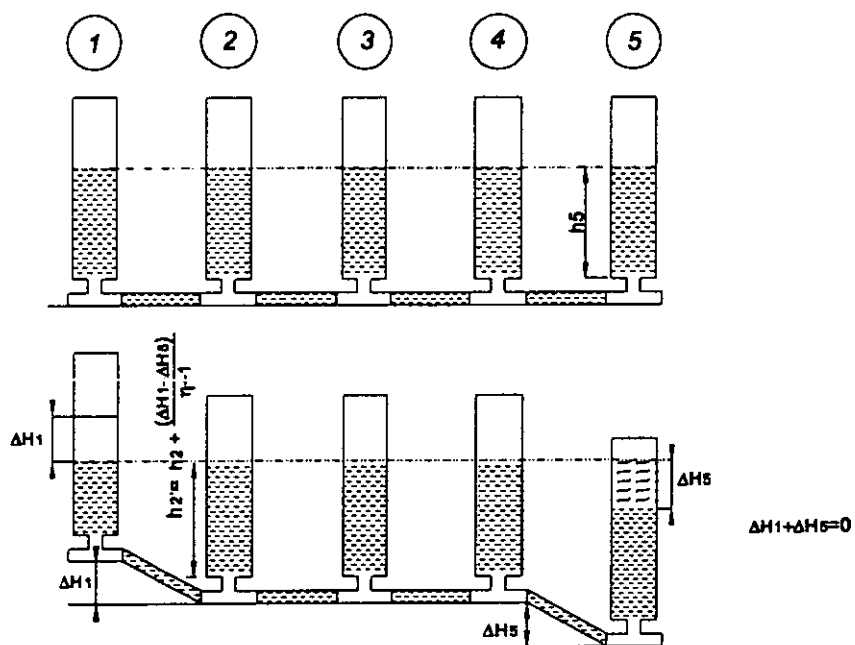
Vaso	1	2	3	4	5	Σh
<i>h inicial</i>	10	10	10	10	10	50
ΔH	6	0	0	0	0	
Δh	-6	1.5	1.5	1.5	1.5	
<i>h final</i>	4	11.5	11.5	11.5	11.5	50

Fig.28 Esquema de la primer prueba realizada con el modelo



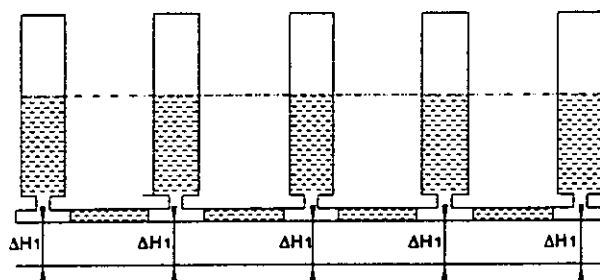
Vaso	1	2	3	4	5	Σh
<i>h inicial</i>	10	10	10	10	10	50
ΔH	-6	0	7	0	5	
Δh	6	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	
<i>h final</i>	16	8.5	8.5	8.5	8.5	50

Fig.29 Esquema de la segunda prueba realizada con el modelo



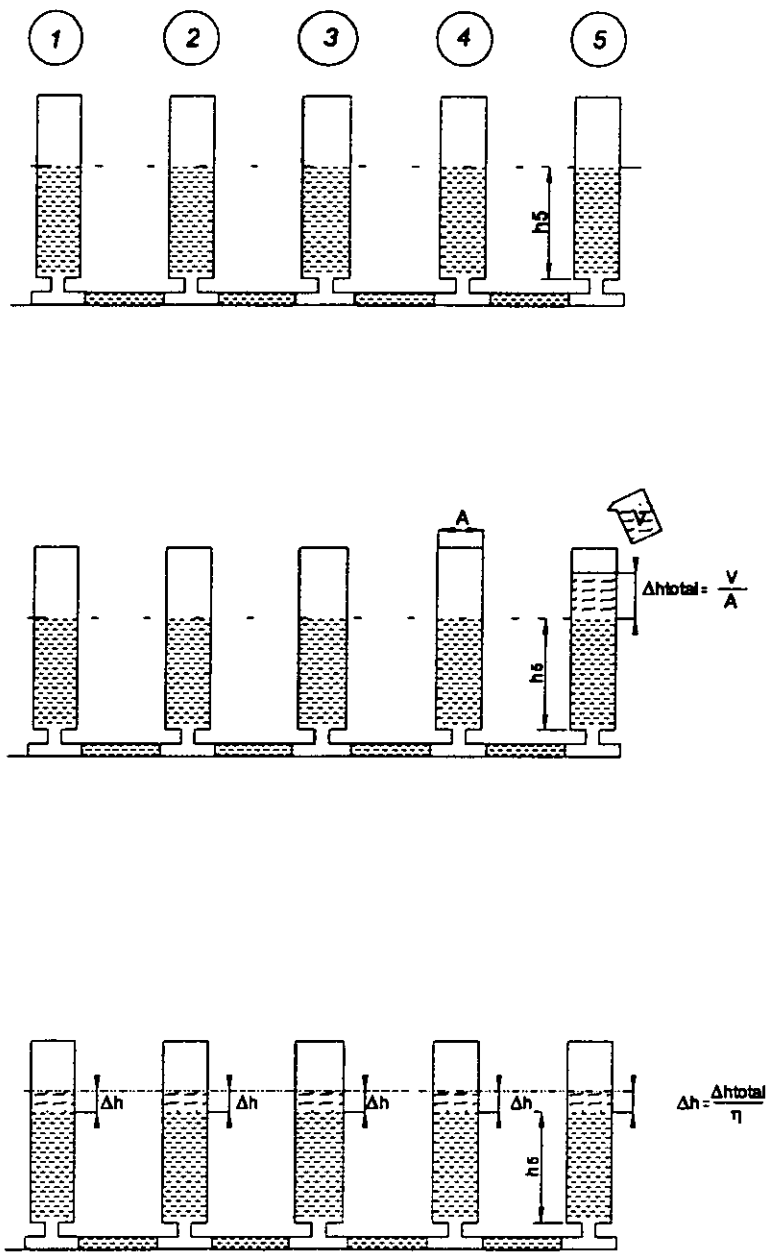
Vaso	1	2	3	4	5	Σh
<i>h inicial</i>	10	10	10	10	10	50
ΔH	5	0	0	0	-5	
Δh	-5	0	0	0	5	
<i>h final</i>	5	10	10	10	15	50

Fig.30 Esquema de la tercera prueba realizada con el modelo



Vaso	1	2	3	4	5	Σh
<i>h inicial</i>	10	10	10	10	10	50
ΔH	5	5	5	5	5	
Δh	0	0	0	0	0	
<i>h final</i>	10	10	10	10	10	50

Fig.31 Esquema de la cuarta prueba realizada con el modelo



Vaso	1	2	3	4	5	Σh
<i>h</i> Inicial	10	10	10	10	10	50
Δh total	0	0	0	0	10	
Δh	2	2	2	2	2	
<i>h</i> final	12	12	12	12	12	60

Fig.32 Esquema de la quinta prueba realizada con el modelo

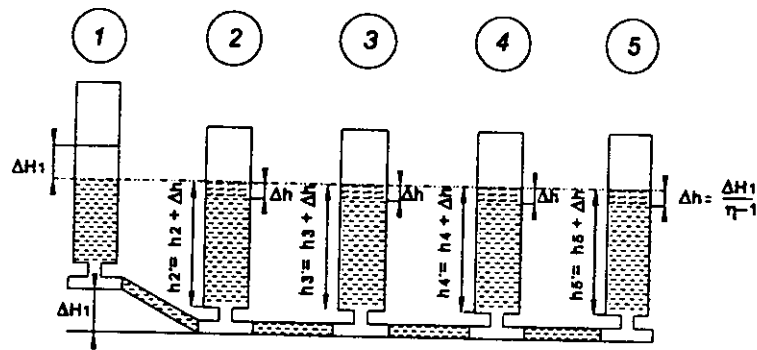


Fig.33a Primera parte de la prueba de superposición

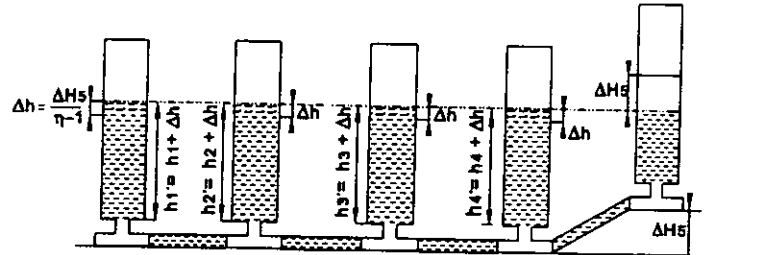


Fig.33b Segunda parte de la prueba de superposición

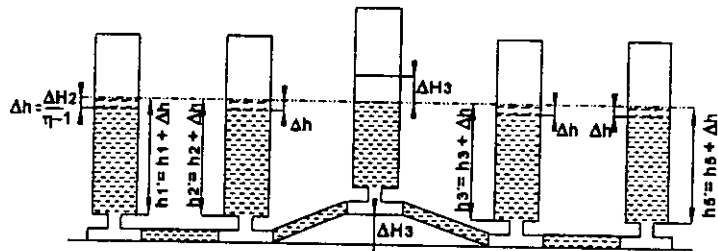


Fig.33c Tercera parte de la prueba de superposición

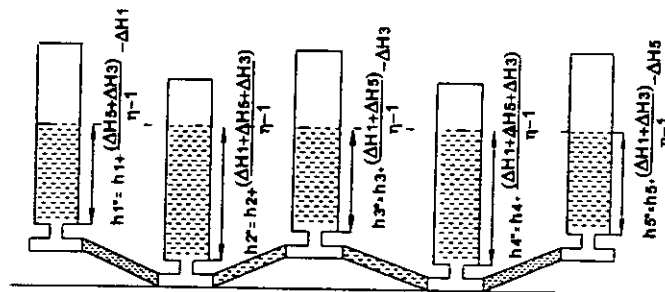


Fig.33d Superposición de las tres etapas.

Vaso	1	2	3	4	5	Σh
h Inicial	10	10	10	10	10	50
ΔH	5	0	7	0	5	
Δh	-2	4.25	-4.5	4.25	-2	
h final	8	14.25	5.5	14.25	8	50

Fig.33 Verificación del principio de superposición.

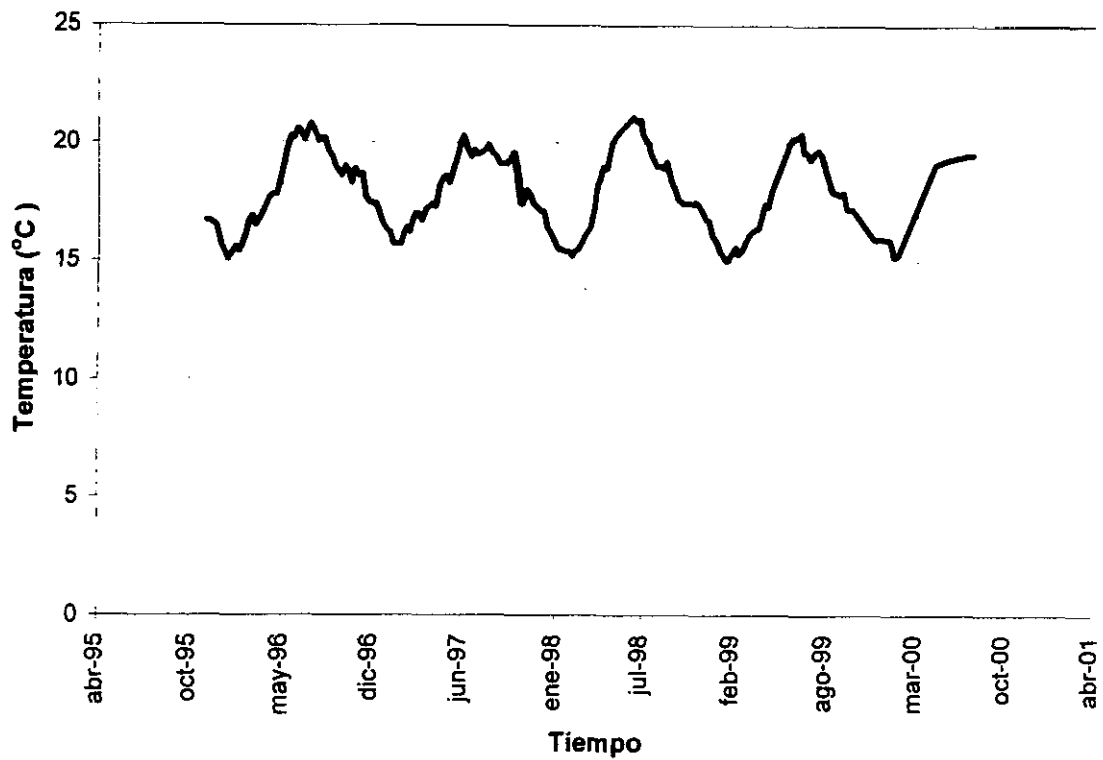


Fig.34 Variación de la temperatura en las galerías donde se ubican los pilotes y el sistema de nivelómetro.

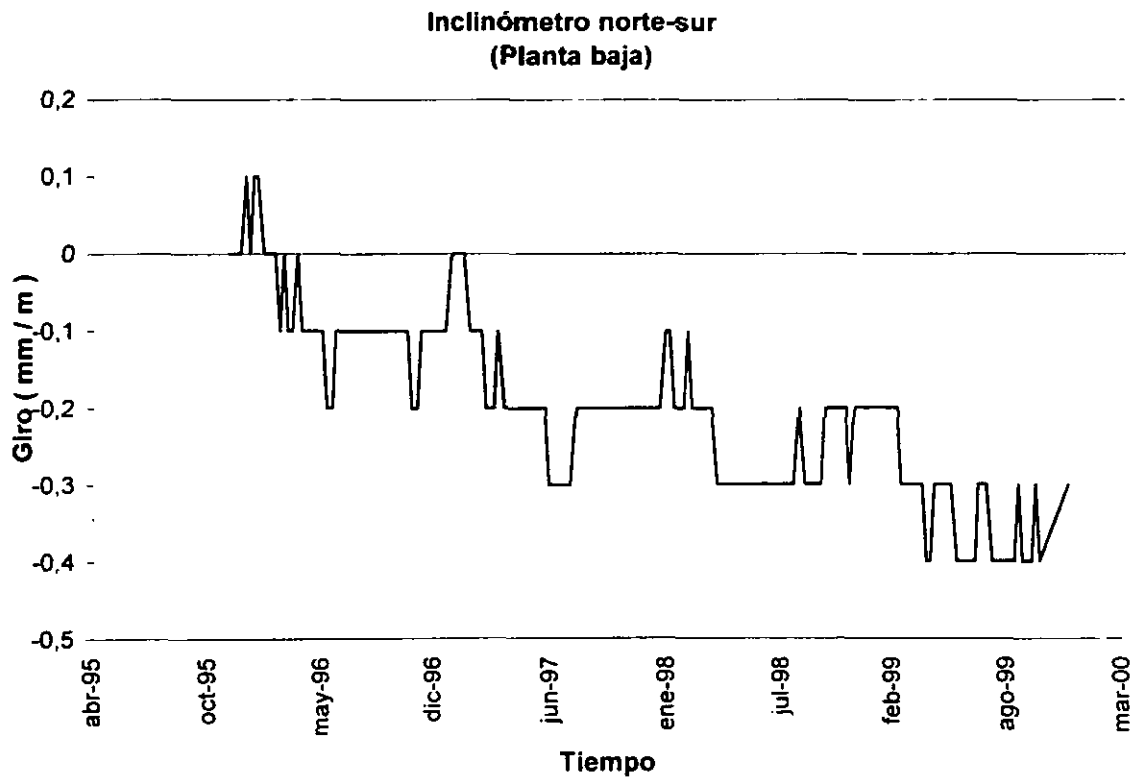
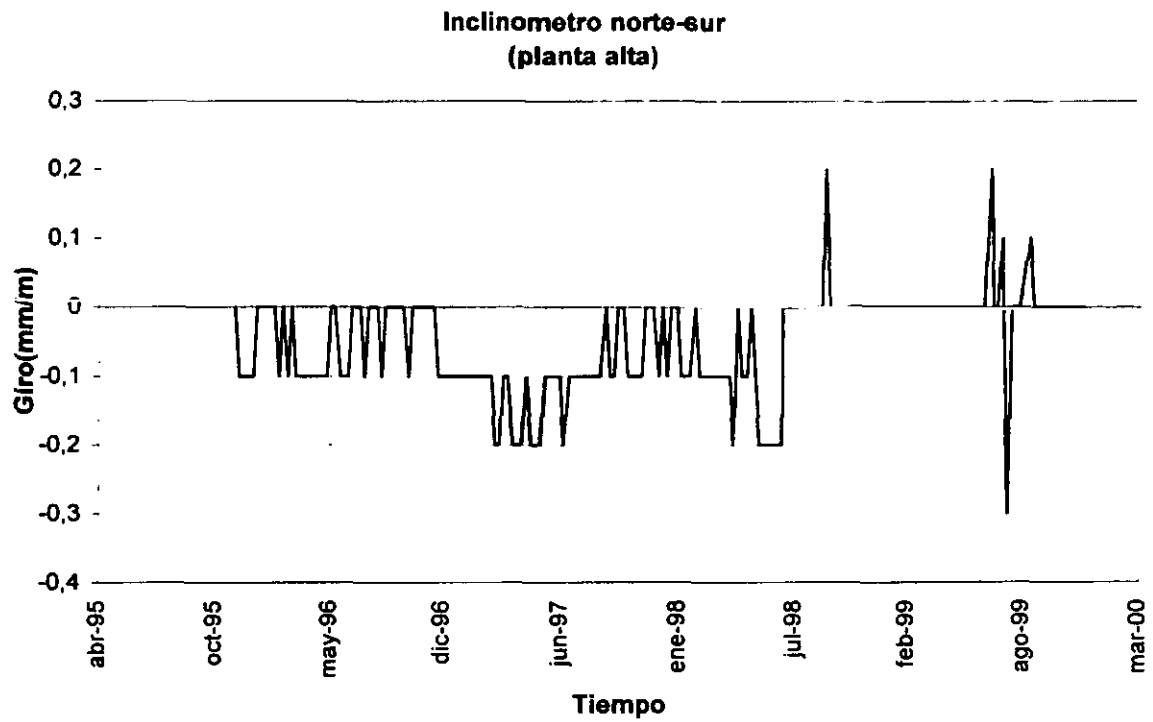
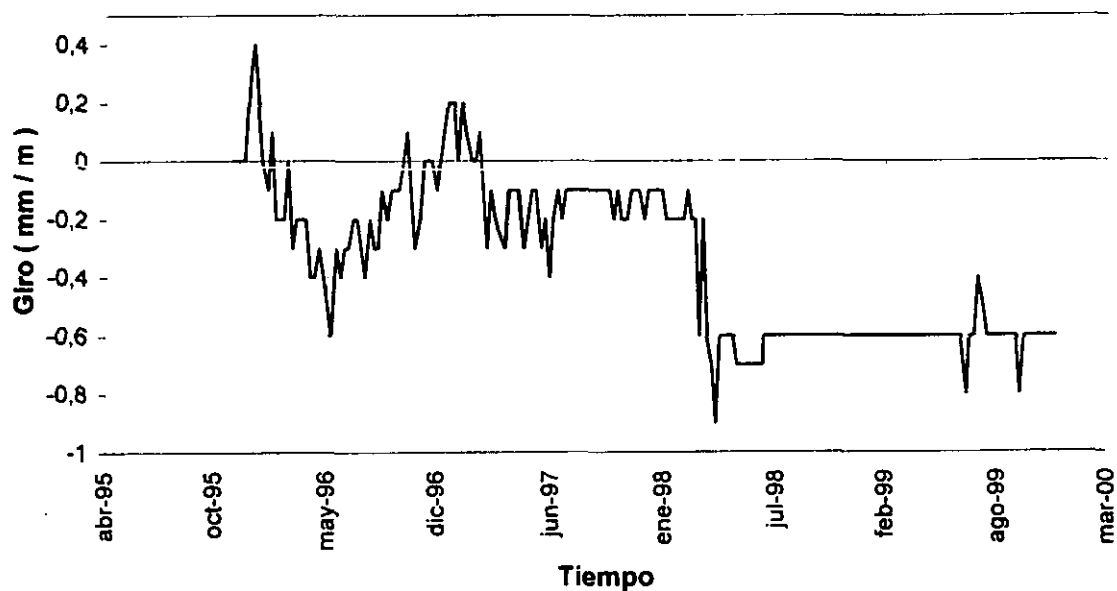


Fig.35 Evolución de la inclinación en la dirección norte-sur

**Inclinómetro este oeste
(Planta alta)**



**Inclinómetro este-oeste
(Planta baja)**

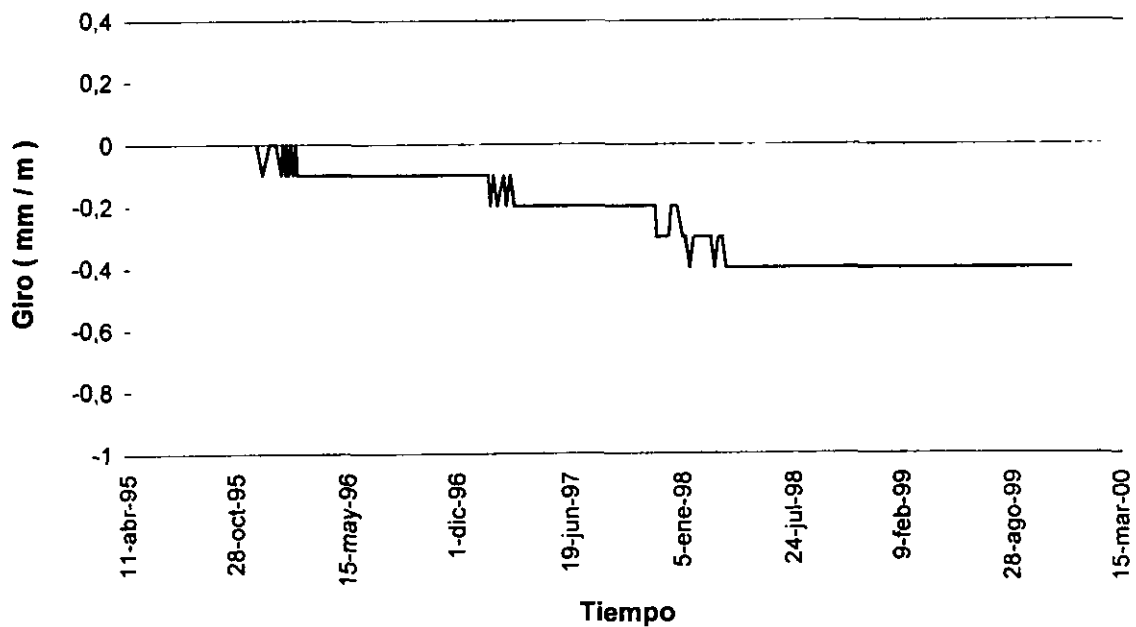


Fig.36 Evolución de la inclinación registrada en la dirección este-oeste

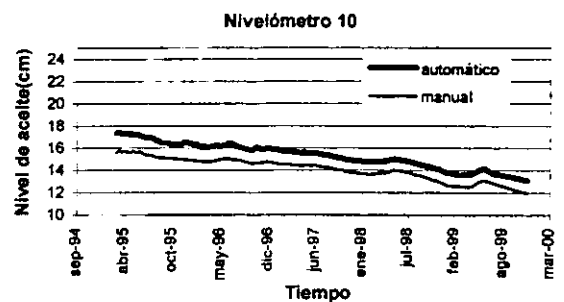
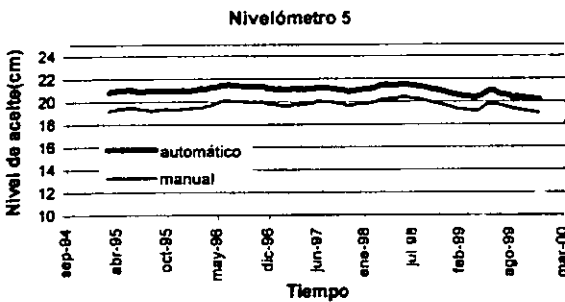
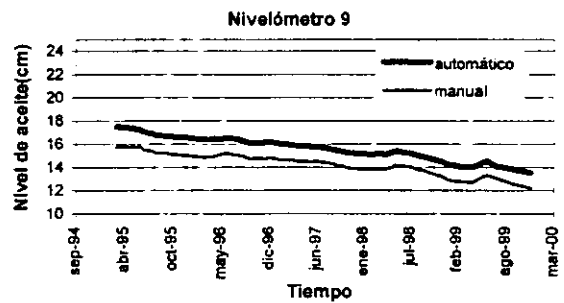
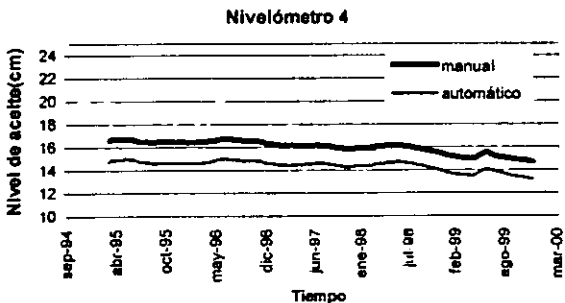
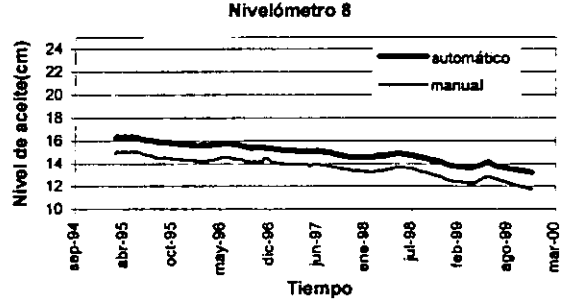
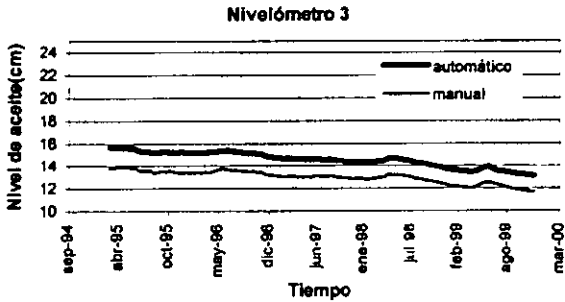
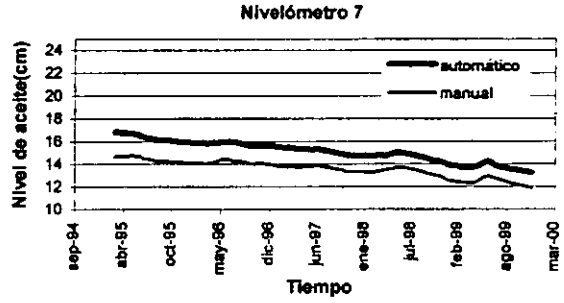
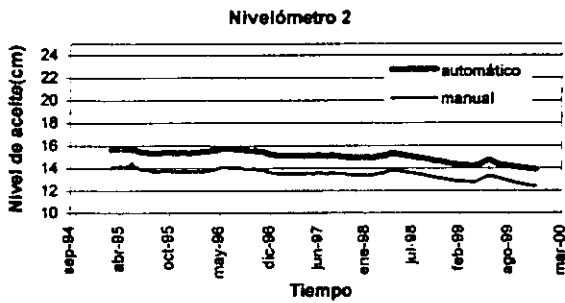
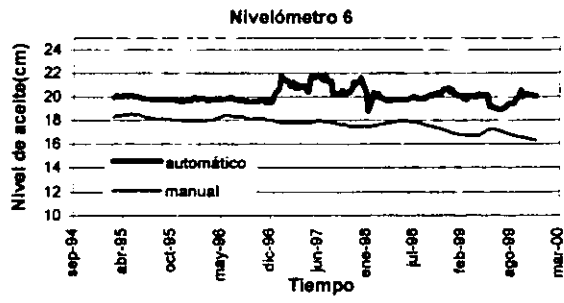
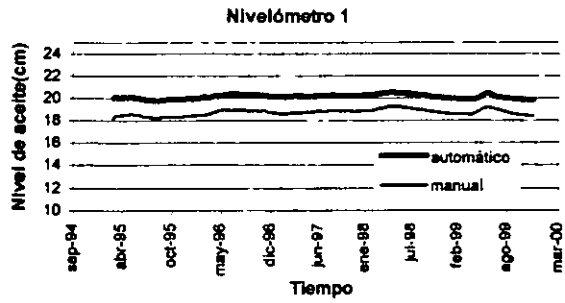
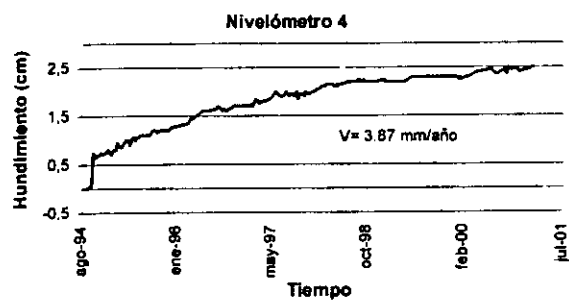
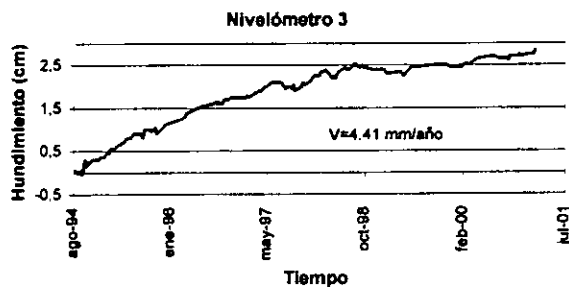
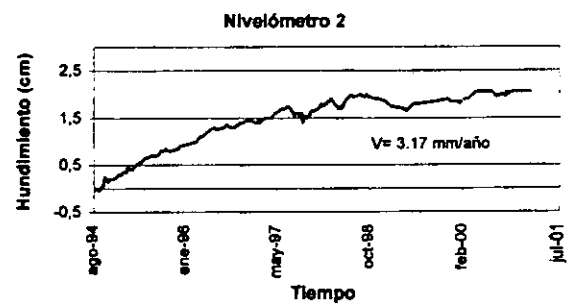
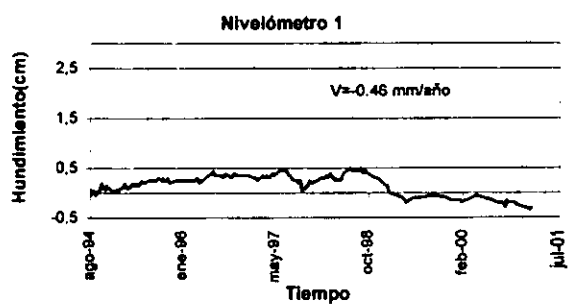


Fig.37 Evolución de los tirantes de aceite de los nivelómetros

Fachada Poniente



Fachada Norte

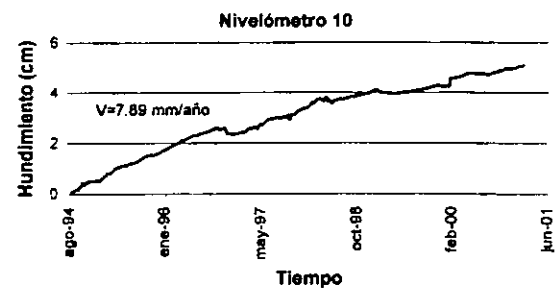
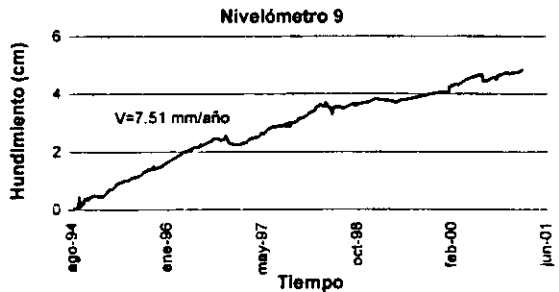
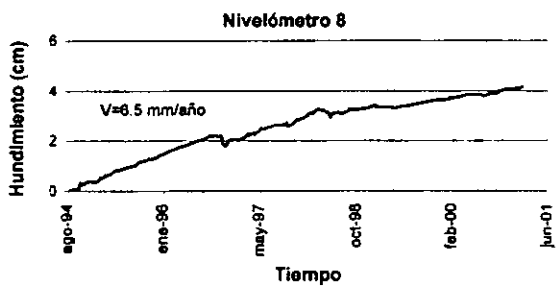
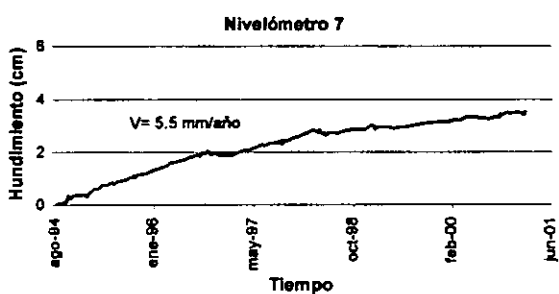
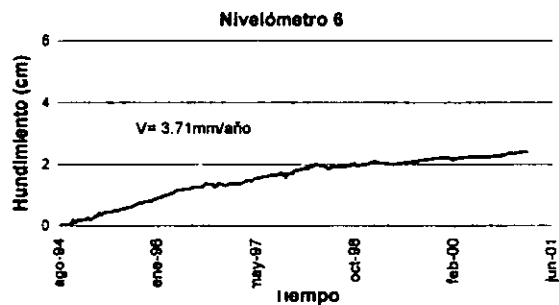


Fig.38 Evolución del hundimiento con respecto al nivelómetro 5

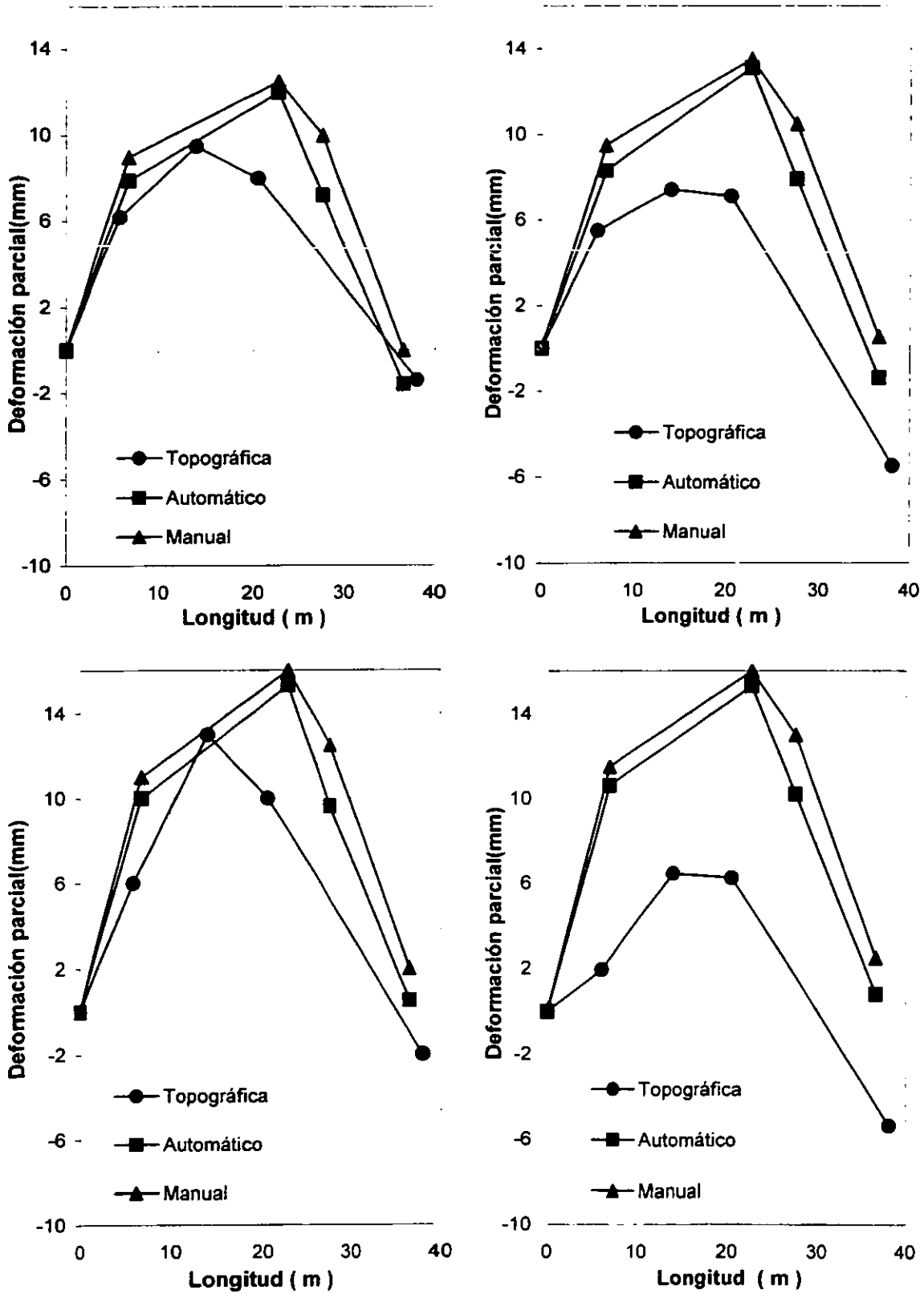


Fig.39 Deformación estimada sobre la fachada poniente

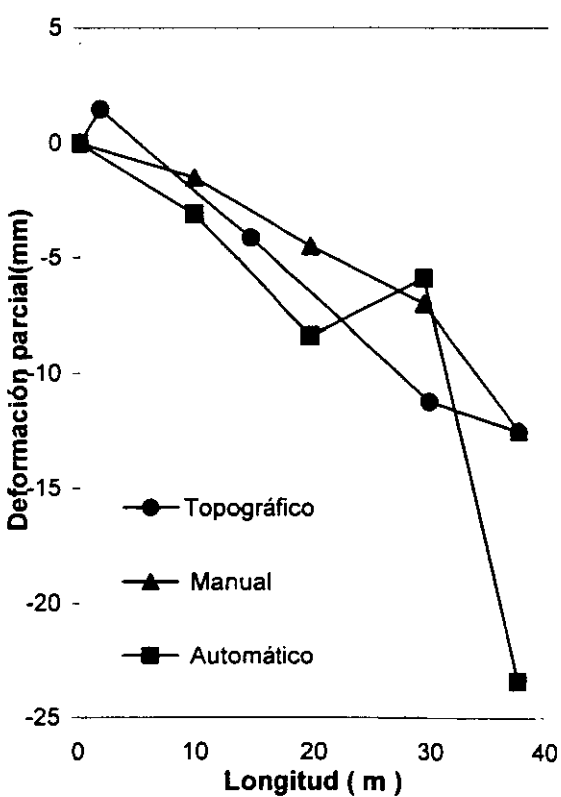
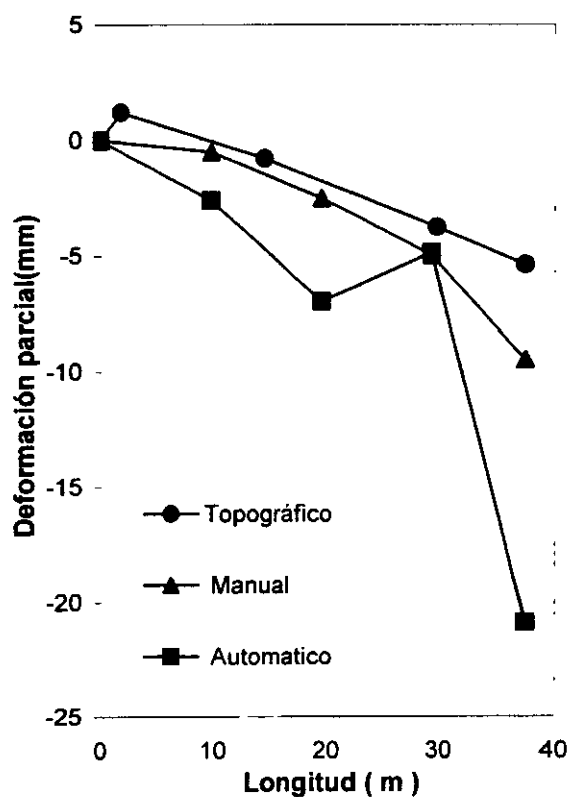
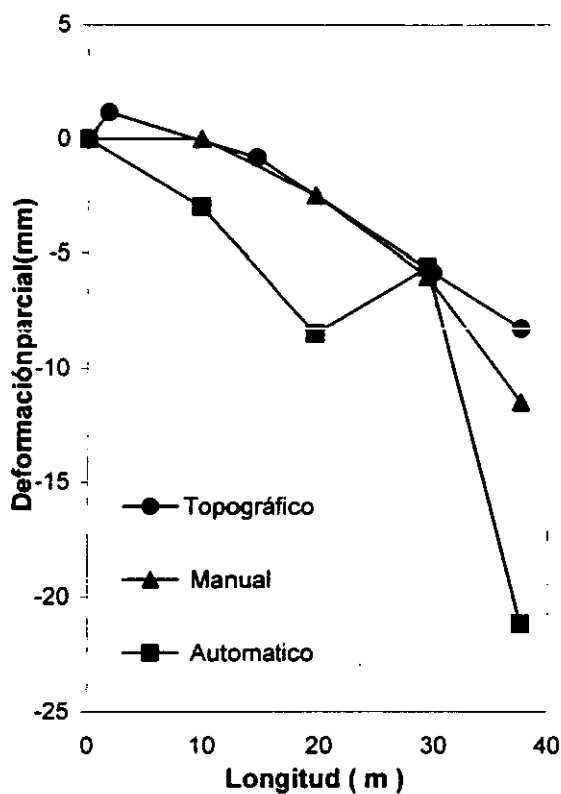
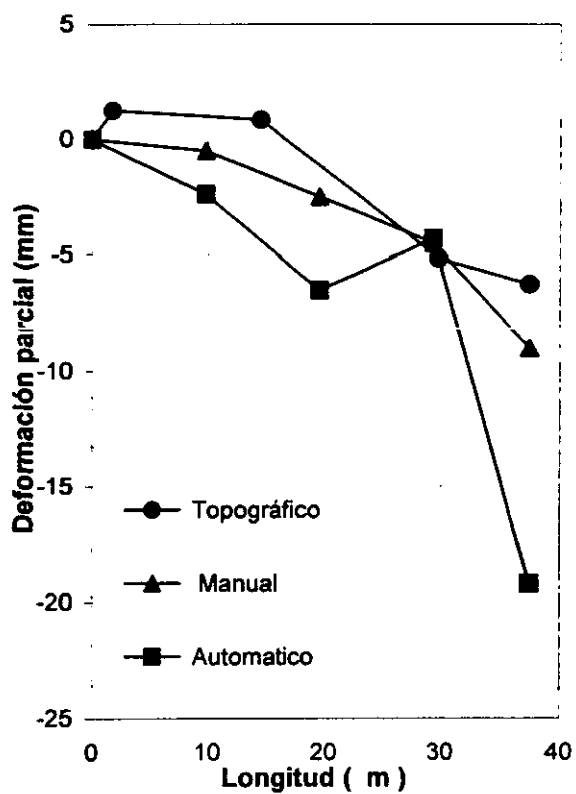


Fig.40 Deformación estimada sobre la fachada norte

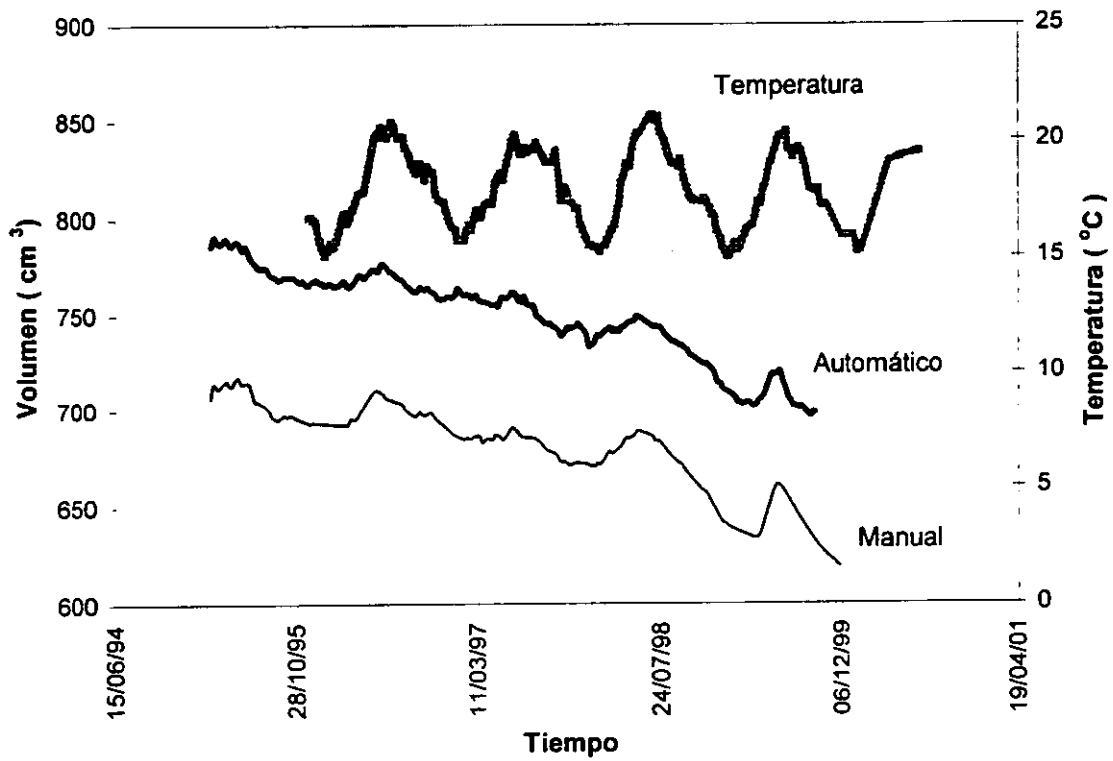


Fig.41 Variación de la temperatura y del volumen de aceite

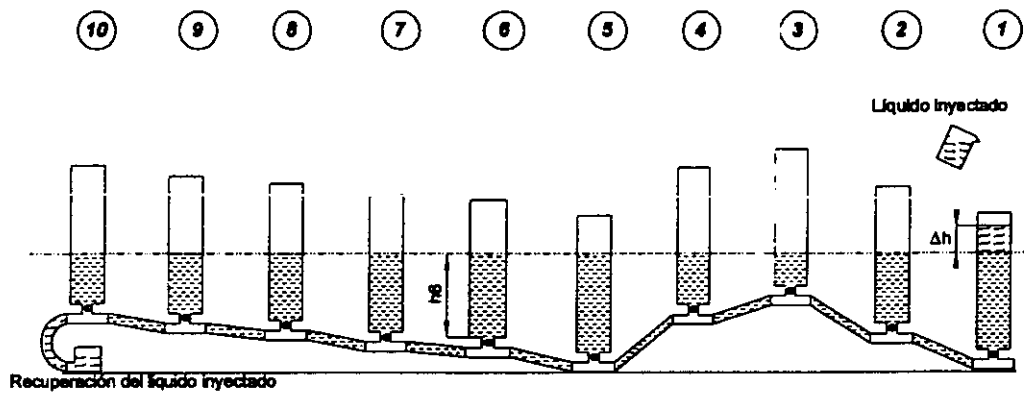


Fig.42 Primera etapa de la corrección del sistema de nivelómetros: verificación de la saturación.

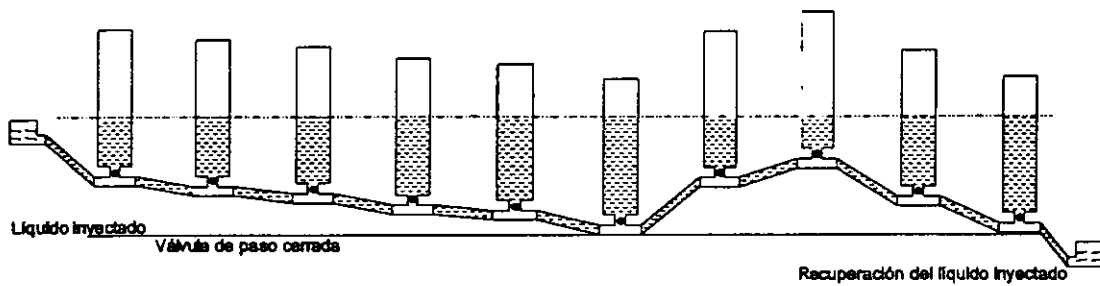


Fig.43 Segunda etapa de la corrección del sistema de nivelómetros: purgado de la línea de conducción

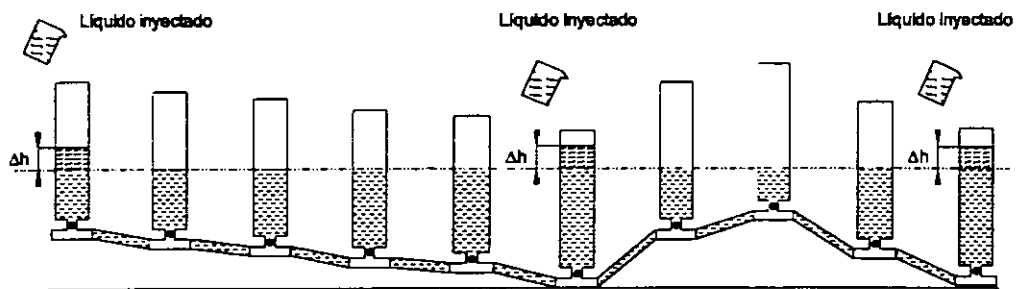


Fig.44 Tercera etapa de la corrección del sistema de nivelómetros: evaluación del purgado de la línea de conducción

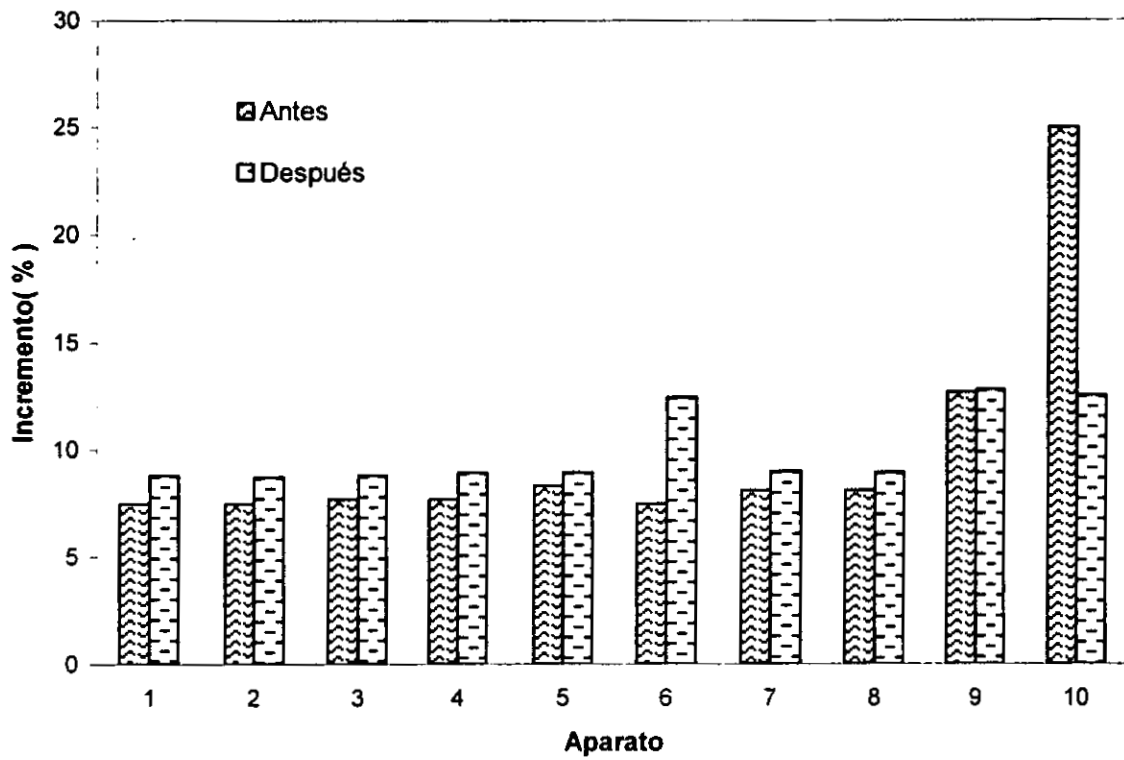


Fig.45 Distribución del líquido agregado al sistema de nivelómetros

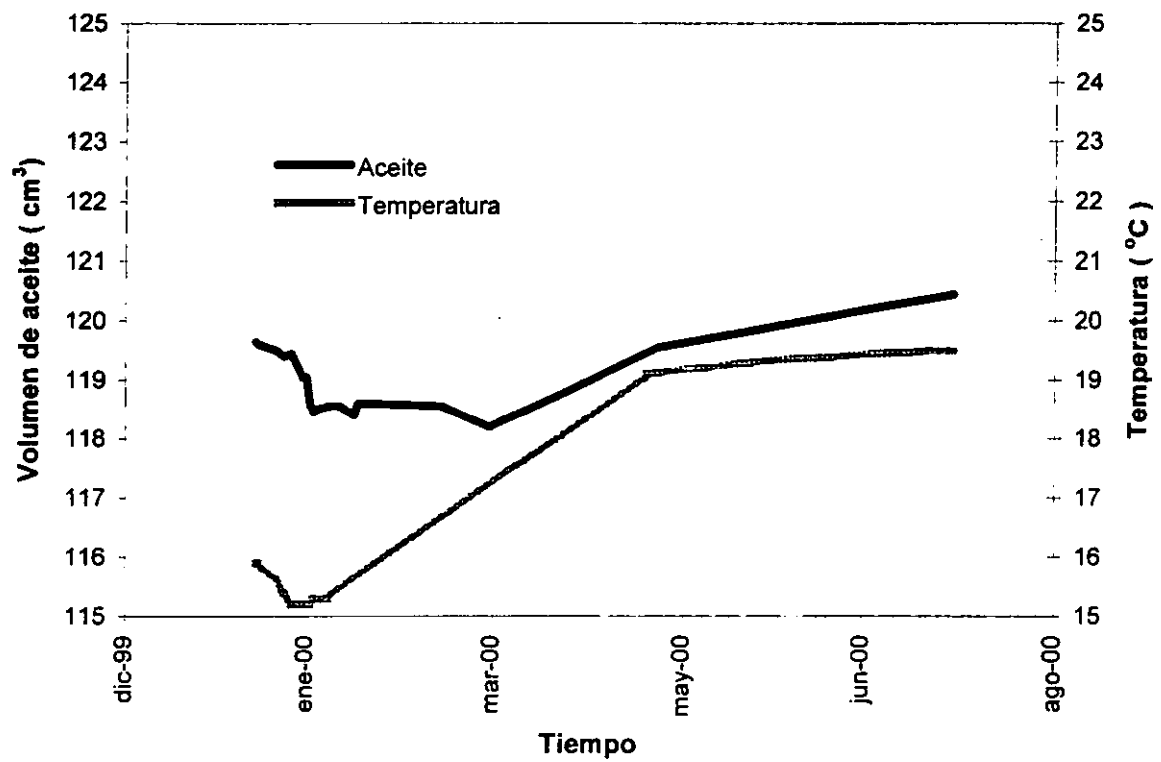


Fig.46 Comportamiento del volumen de aceite contenido en los nivelómetros después de la corrección

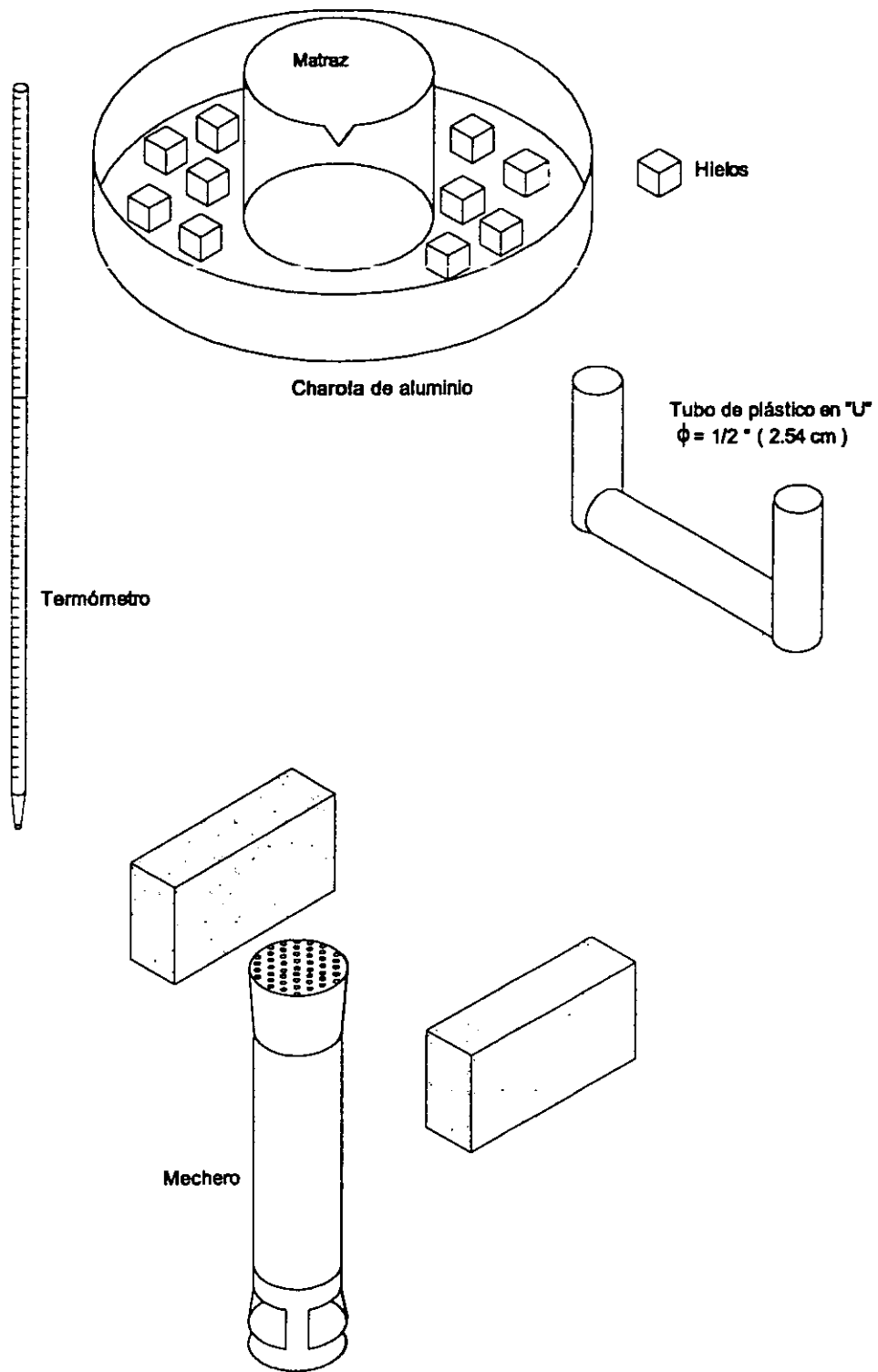


Fig.47 Elementos usados para la determinación del coeficiente de dilatación

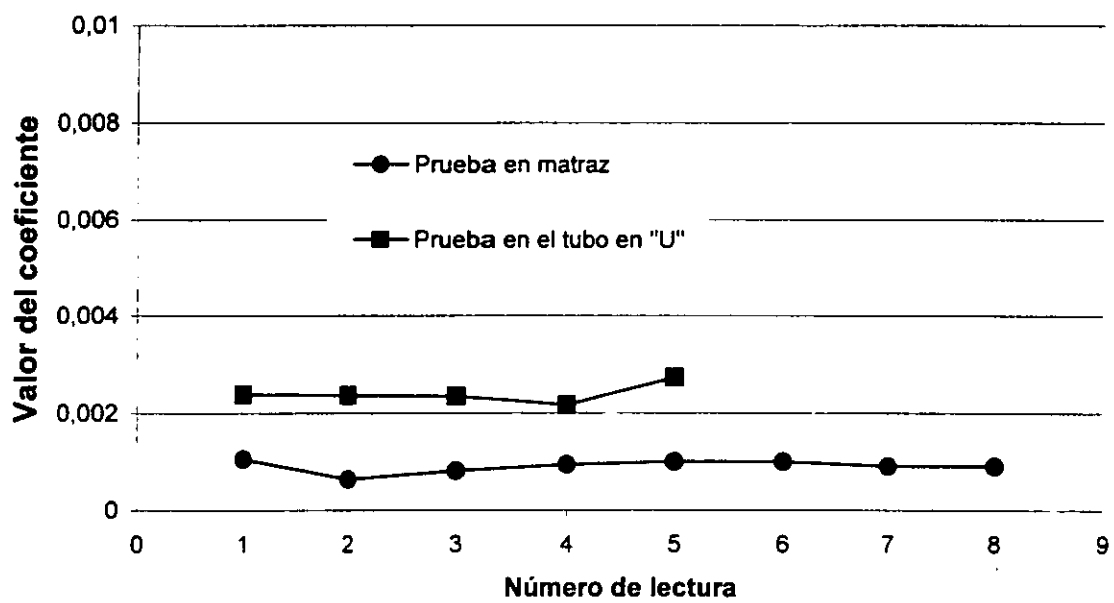


Fig.48 Valores del coeficiente de dilatación (β)

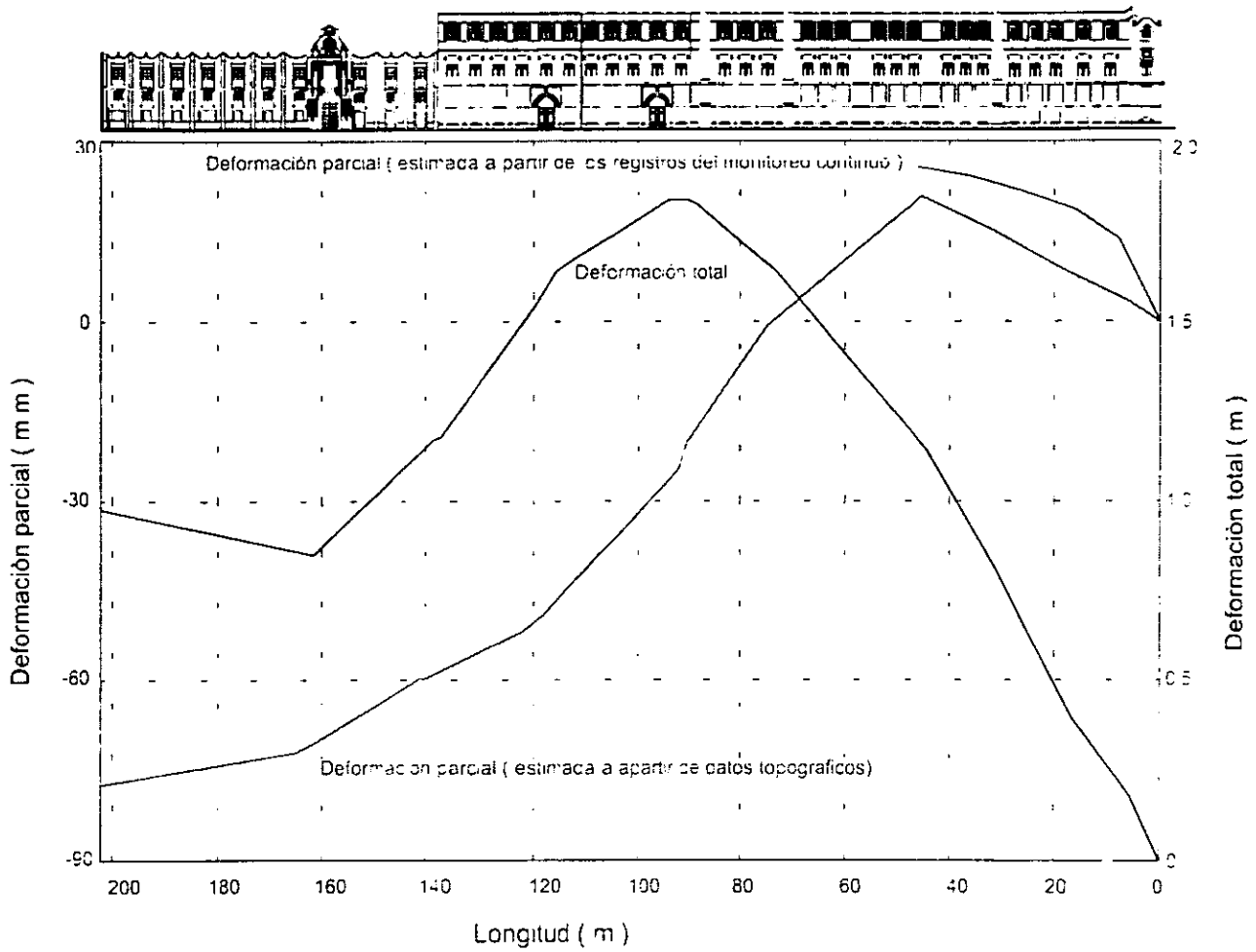


Fig.49 Deformaciones en la base de los muros de la fachada norte

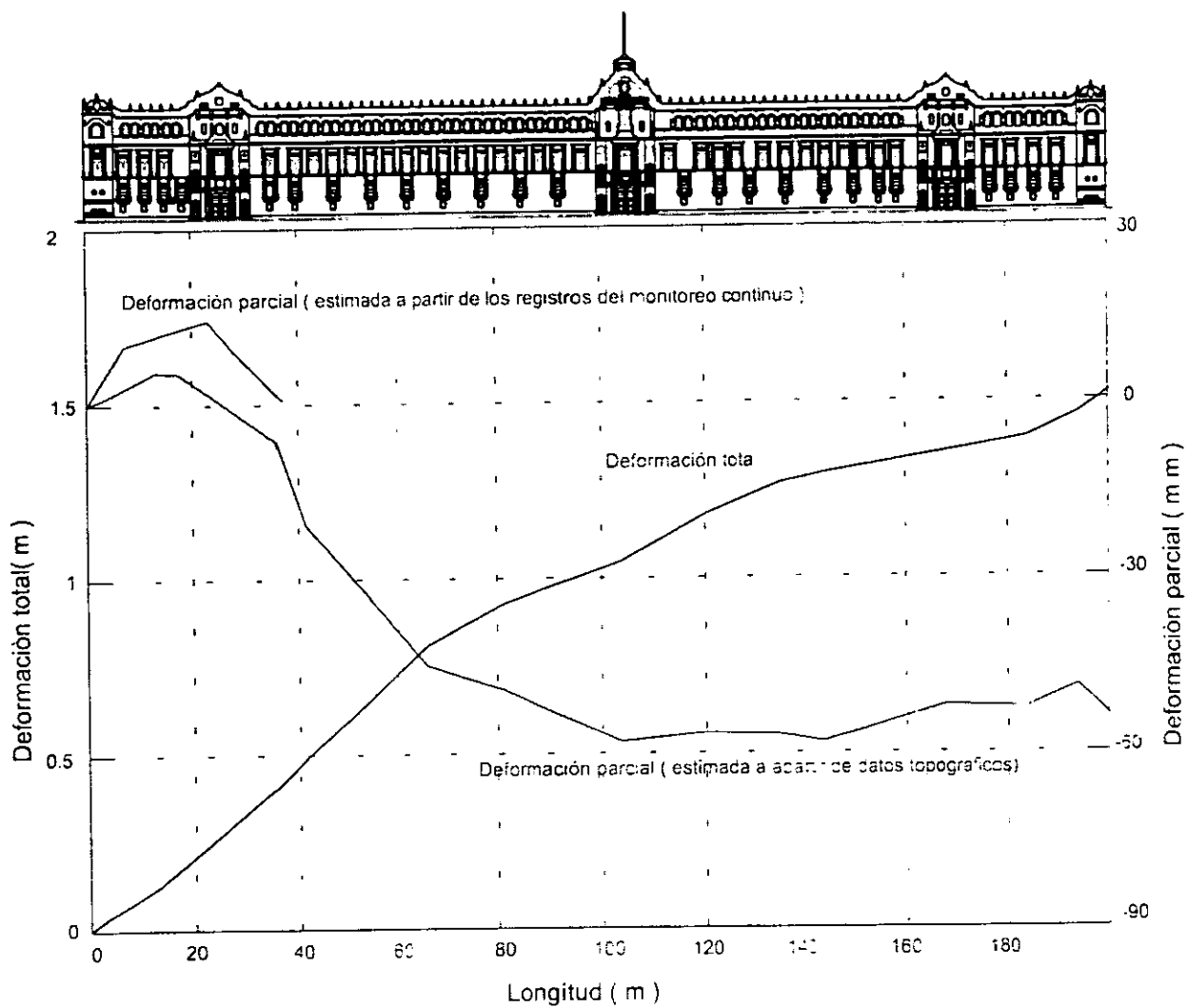
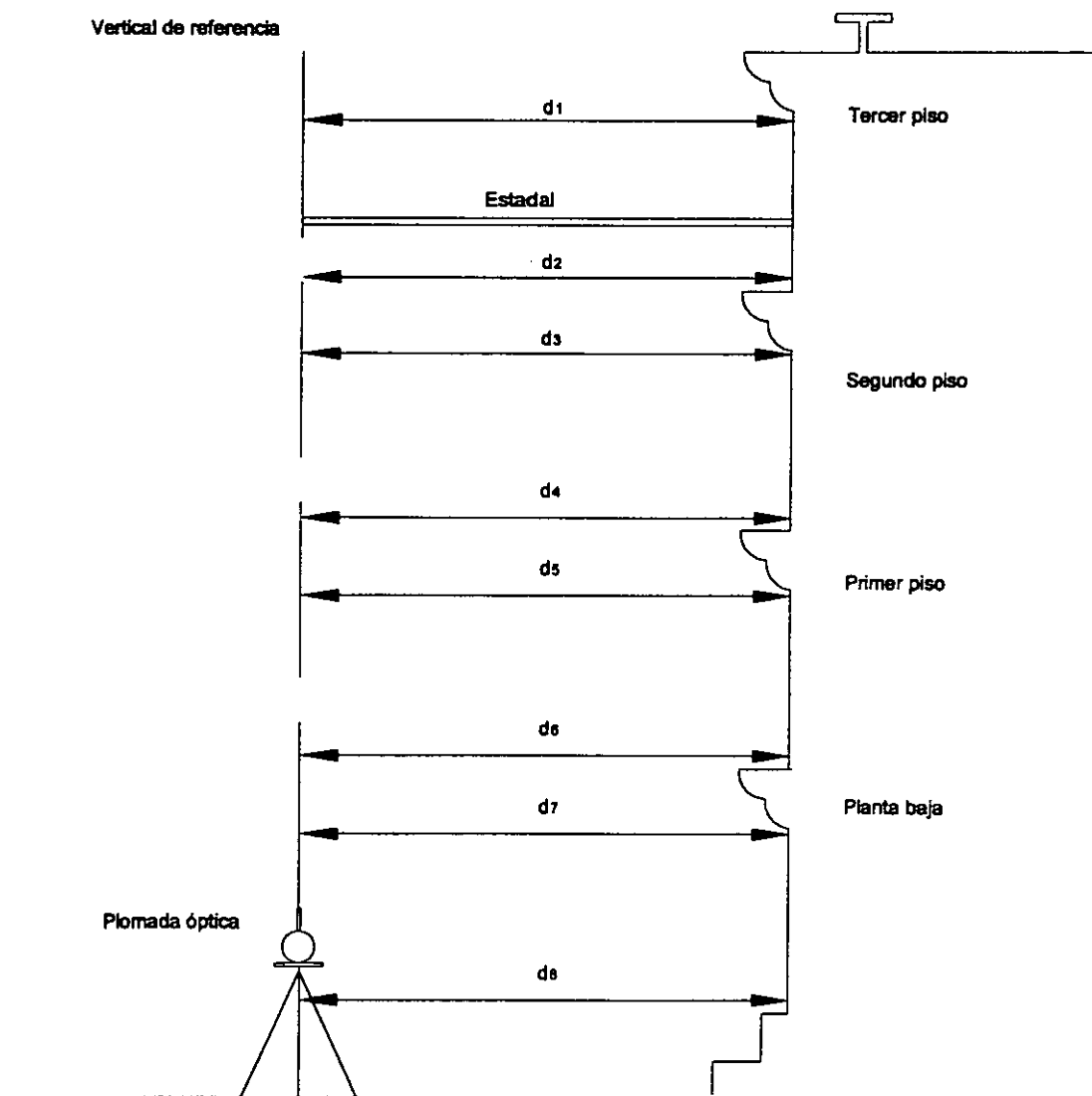


Fig.50 Deformaciones en la base de los muros de la fachada poniente



Nota.
d1 a d8 distancia entre la vertical de referencia
y la fachada del edificio

Fig.51 *Técnica para la medición del desplomo*

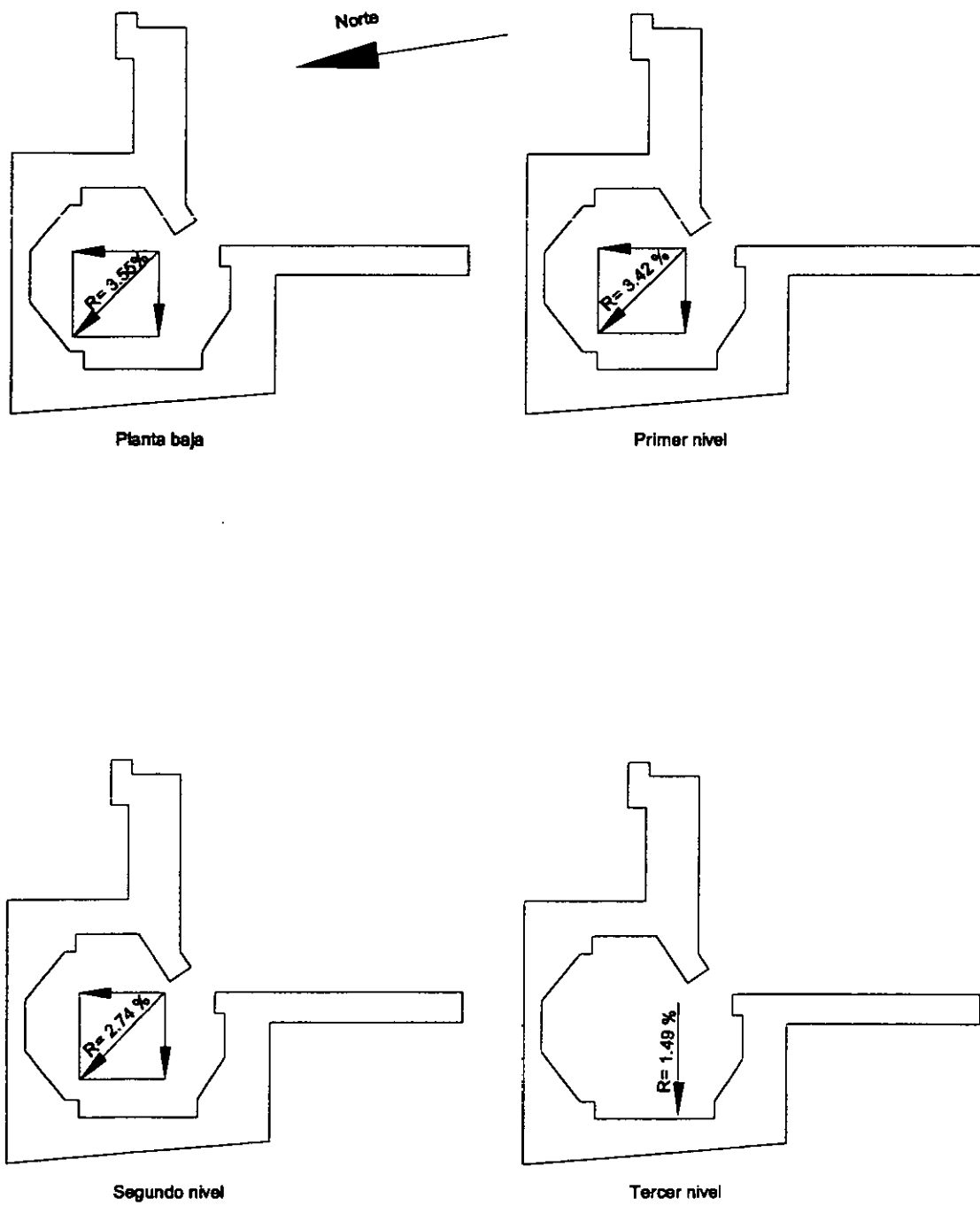


Fig.52 Representación de los desplomos medidos en el torreón norte

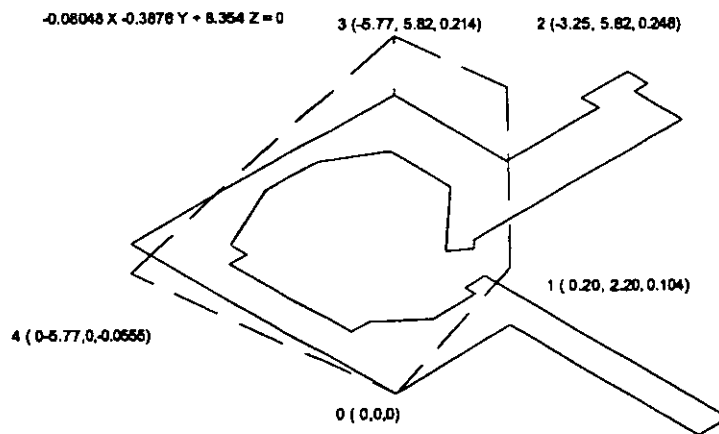
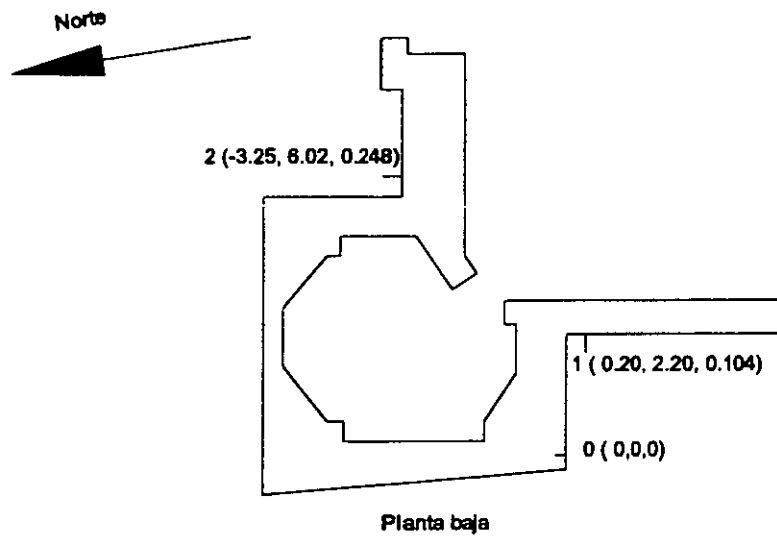


Fig.53 Representación de la rotación del torreón

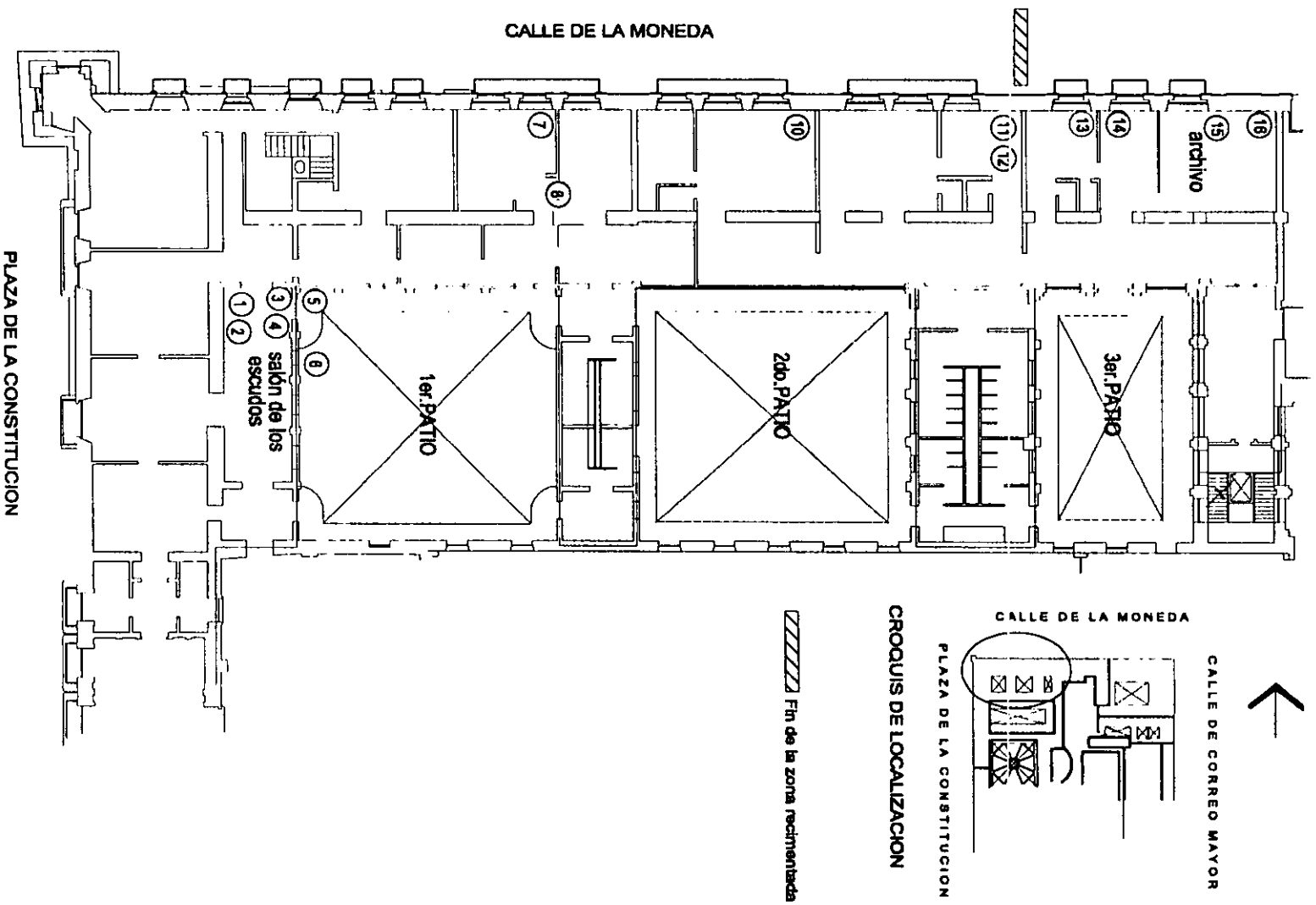


Fig. 54 Ubicación de daños en elementos estructurales, en el primer nivel
(ver anexo)

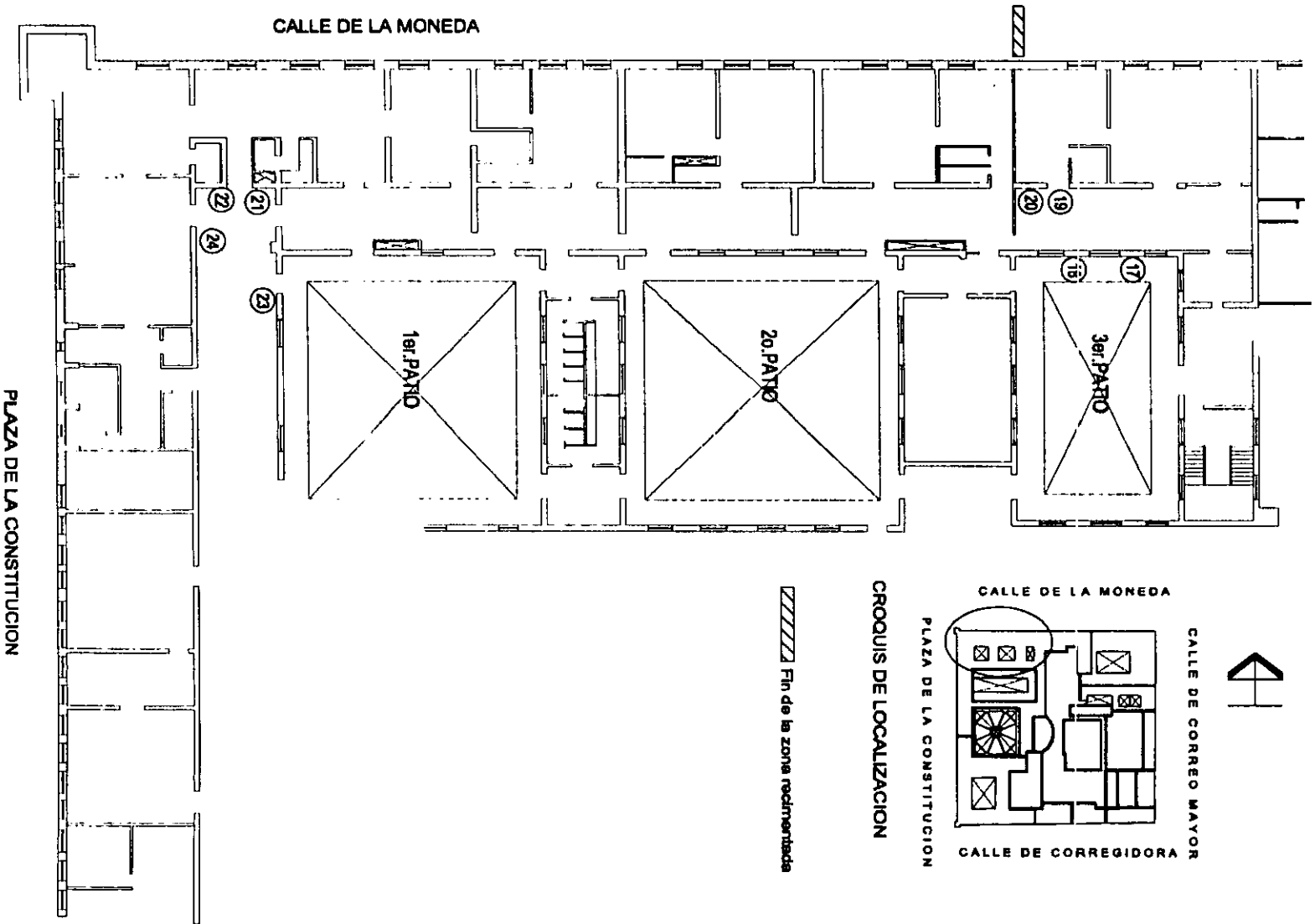


Fig. 55 Ubicación de gretas en elementos estructurales, en el segundo nivel
(ver anexo)

ANEXO

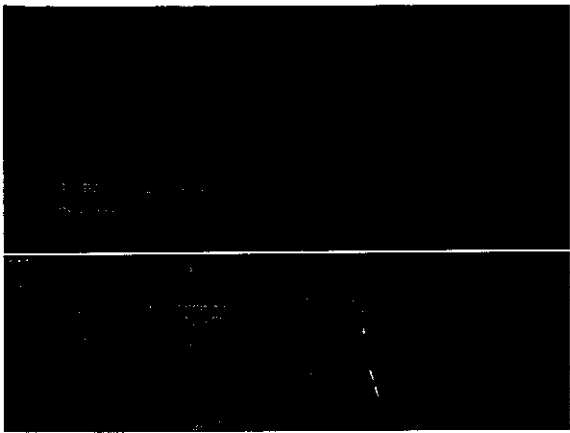


Foto 1

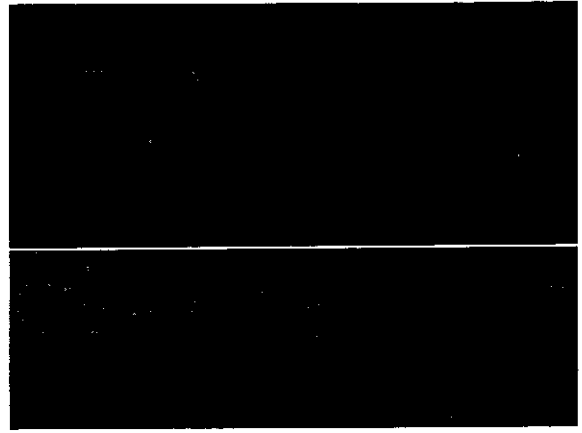


Foto 2



Foto 3



Foto 4

Agrietamientos en el salón de escudos de Palacio Nacional



Foto 5

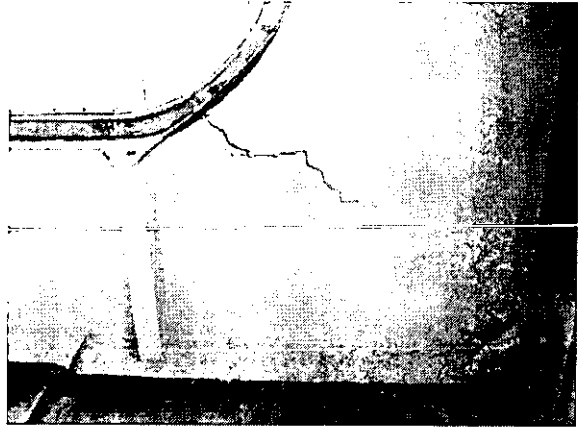


Foto 6

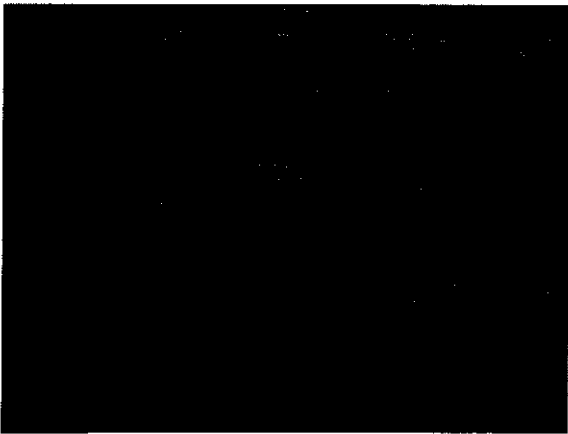


Foto 7

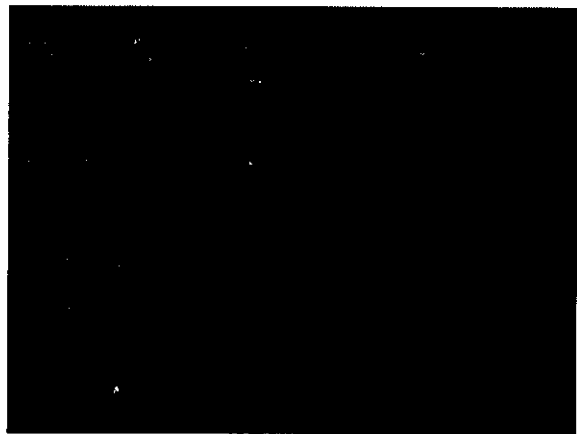


Foto 8

Agrietamientos en exteriores e interiores de los edificios de la zona norponiente.

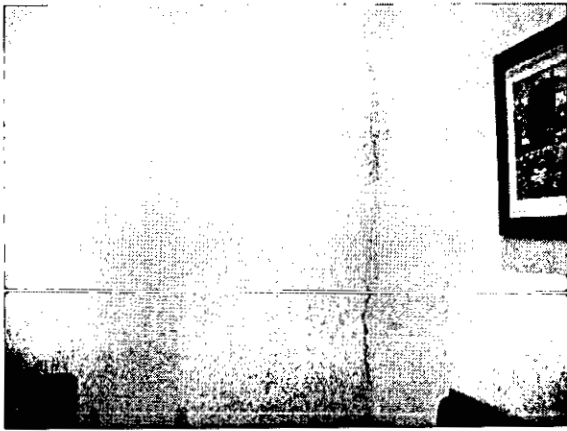


Foto 9

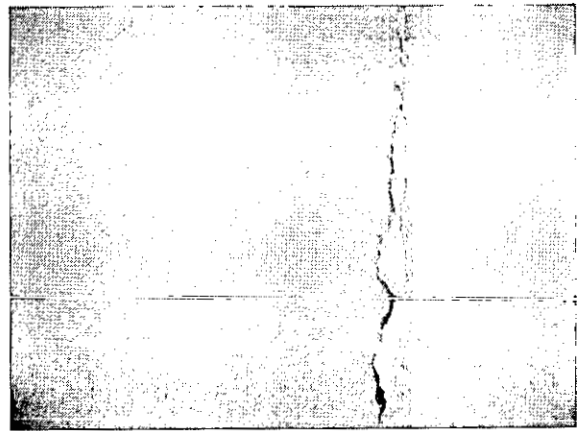


Foto 10

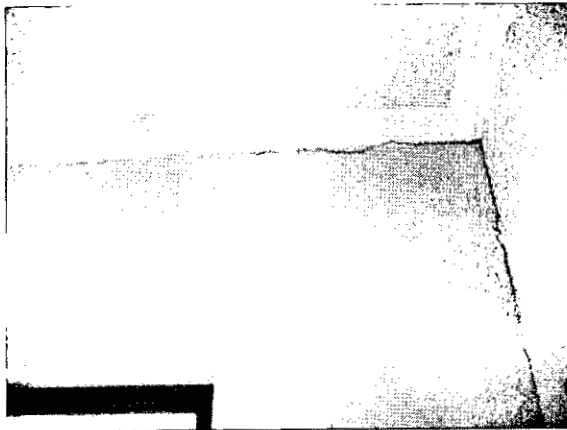


Foto 11



Foto 12

Agrietamientos en la zona de la fachada norte, en el segundo nivel del Palacio Nacional

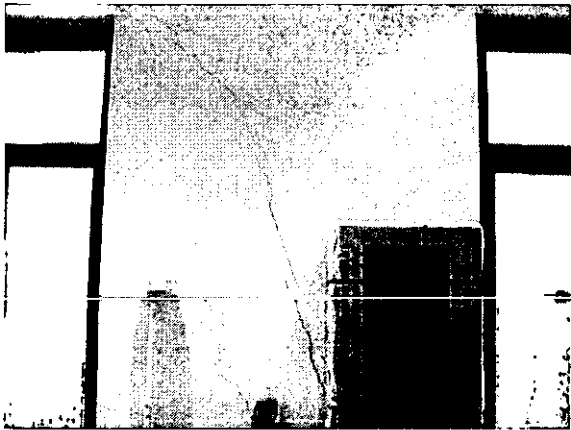


Foto 13



Foto 14

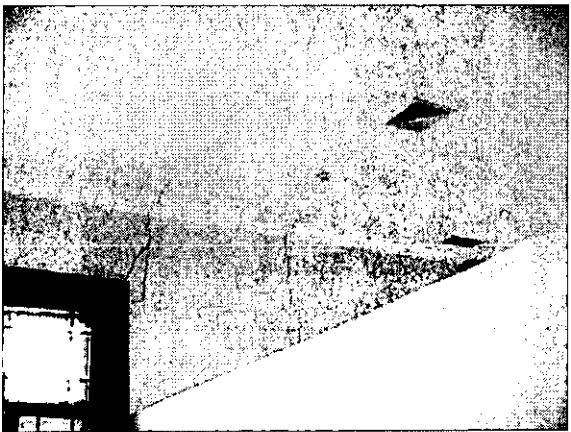


Foto 15

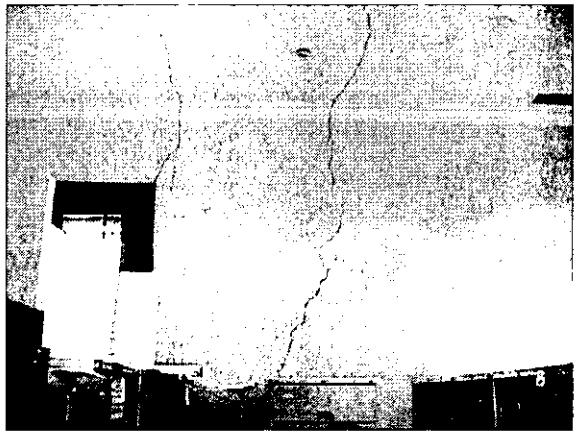


Foto 16

Agrietamientos en muros de la fachada norte, segundo nivel de Palacio Nacional

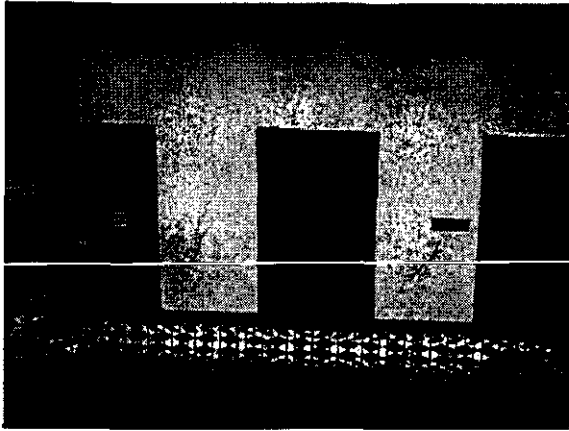


Foto 17

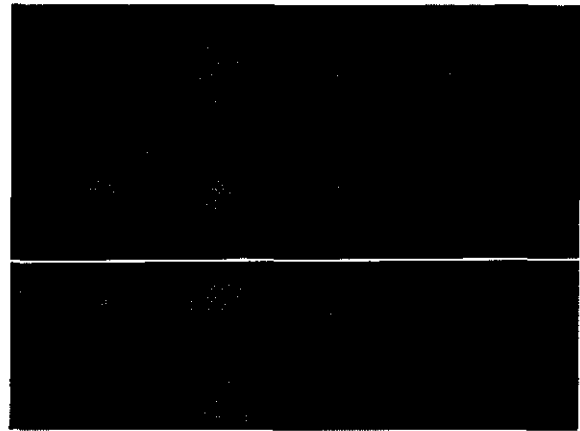


Foto 18

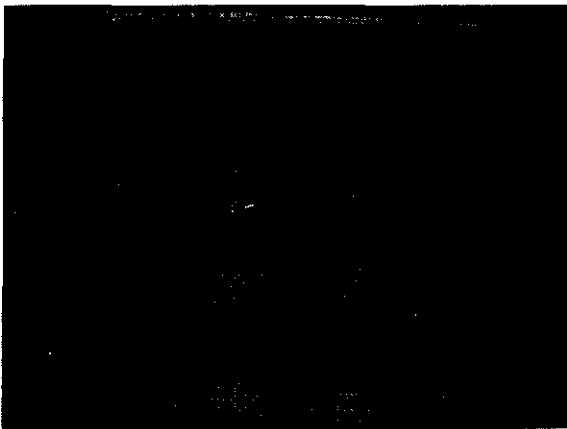


Foto 19

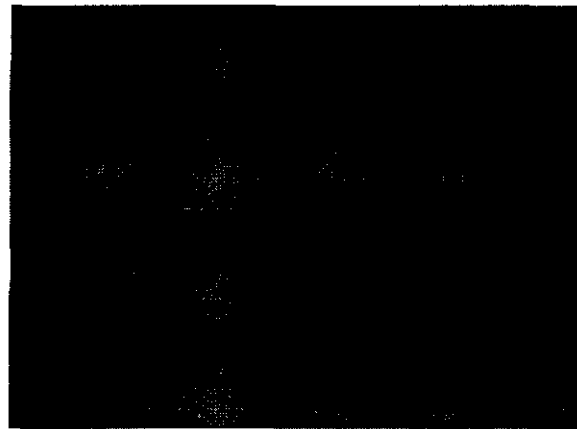


Foto 20

Agrietamientos en estructuras ubicadas en el tercer nivel, en el límite de la zona recimentada, tercer patio Mariano del Palacio Nacional



Foto 21

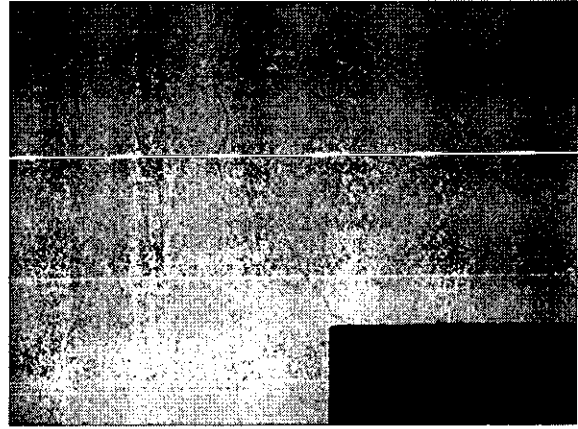


Foto 22

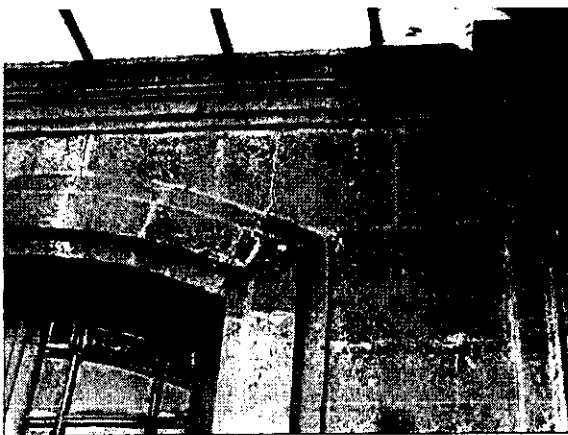


Foto 23

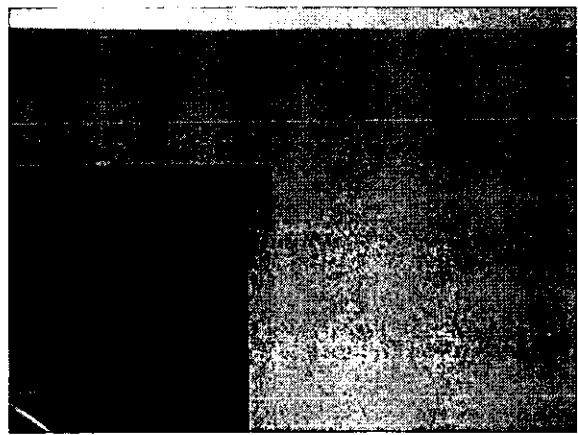


Foto 24

Agrietamientos en el tercer nivel de la estructura cerca del torreón norte