

01/21  
103



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LOS MOVIMIENTOS  
QUE EXPERIMENTA LA CATEDRAL DE LA CIUDAD  
DE MÉXICO”**

TESIS

*Que para obtener el título de:*

INGENIERO CIVIL

*Presenta*

**OROZCO RIVAS BERNARDO**

**Director de tesis: Ing. Abraham Roberto Sánchez Ramírez**



CIUDAD UNIVERSITARIA  
MÉXICO, DF.

ABRIL 2003

A

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**PAGINACION**

**DISCONTINUA**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/162/01

Señor  
**BERNARDO OROZCO RIVAS**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ABRAHAM ROBERTO SÁNCHEZ RAMÍREZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LOS MOVIMIENTOS QUE EXPERIMENTA LA CATEDRAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO"**

- I. INTRODUCCION
- II. ANTECEDENTES
- III. ETAPAS DEL PROCESO DE REHABILITACIÓN
- IV. SISTEMA DE MONITOREO
- V. ASPECTOS CINEMÁTICOS DE LOS MOVIMIENTOS DE LA ESTRUCTURA
- VI. INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL DE LA INFORMACIÓN
- COMENTARIOS Y CONCLUSIONES
- REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 19 de septiembre de 2001.  
EL DIRECTOR

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

**A mis padres María Elena y Ricardo**

**A Ricardo por su ayuda y guía**

**A Eduardo por su apoyo incondicional**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México** donde he cursado la mayoría de mi educación y he hecho muy buenas amistades.

**A la Facultad de Ingeniería** quien me brindo mi formación profesional.

**Al Instituto de Ingeniería** por el apoyo recibido para realizar este trabajo.

**Al Ing. Roberto Sánchez** por su comentarios, paciencia y ayuda en el desarrollo de la tesis.

**A Martha y Aurora** por su amistad y apoyo todos estos años.

**A mis amigos.**

## **ÍNDICE**

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES</b>	
1.1 Aspectos históricos.....	7
1.2 Concepción estructural.....	9
1.3 Características de las cimentaciones.....	10
1.4 Origen y evolución de los hundimientos diferenciales.....	12
<b>CAPÍTULO 2 ETAPAS DEL PROCESO DE REHABILITACIÓN</b>	
2.1 Elección del proceso de rehabilitación.....	17
2.2 Trabajos previos a la Subexcavación.....	19
2.3 Subexcavación.....	19
2.4 Inyección de mortero.....	20
2.5 Etapas de reposo.....	21
<b>CAPÍTULO 3 SISTEMA DE MONITOREO</b>	
3.1 Importancia del monitoreo.....	23
3.2 Descripción general.....	24
3.3 Sistema de monitoreo automático.....	24
3.4 Sistema de monitoreo Manual.....	25
<b>CAPÍTULO 4 ASPECTOS CINEMÁTICOS DE LOS MOVIMIENTOS PRESENTADOS POR LA ESTRUCTURA</b>	
4.1 Características de la información derivada del sistema de monitoreo manual.....	31
4.2 Nivelación diferencial en plintos.....	33
4.3 Medición de desplomes en columnas y muros.....	36

4.4	Medición de Convergencias.....	38
4.5	Medición de la emersión de pilotes.....	40
<b>CAPÍTULO 5 INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL DE LA INFORMACIÓN</b>		
5.1	Perfiles de piso.....	43
5.2	Comparación entre el movimiento de los elementos de soporte y el hundimiento del piso. ....	45
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>47</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>51</b>
<b>TABLAS.....</b>		<b>53</b>
<b>FIGURAS.....</b>		<b>57</b>
<b>ANEXO A.....</b>		<b>I</b>

## **INTRODUCCIÓN**

La Catedral y el Sagrario de la Ciudad de México fueron cimentados sobre un suelo con diferentes grados de compresibilidad, lo que provocó, desde el inicio de su edificación, problemas constructivos complejos, sobre todo obligó a realizar múltiples ajustes en las alturas de muros y columnas, así como ajustes en la geometría de las bóvedas.

Las diferencias de compresibilidad del suelo fueron ocasionadas por la existencia de construcciones prehispánicas distribuidas de manera irregular sobre las superficies que abarcan las cimentaciones de los templos.

El peso de los templos continuó con el proceso de consolidación del suelo, y la distribución irregular de éste aunado a los diferentes grados de compresibilidad del terreno causaron una parte significativa de los hundimientos diferenciales que han sufrido sus cimientos, dichos hundimientos se vieron incrementados durante los dos últimos siglos de manera alarmante debido a la extracción de agua del subsuelo para abastecer a los habitantes de la Ciudad de México.

El interés de conocer la manera en la que se producen los hundimientos diferenciales en los templos siempre ha existido, reflejándose en los registros que desde 1907 se han realizado. Dichos registros han permitido conocer la evolución del hundimiento que ha sufrido la estructura.

A causa de la magnitud que alcanzaron los hundimientos, las cimentaciones y superestructuras sufrieron daños severos, lo que obligó, durante el siglo pasado, a realizar dos intervenciones en las cimentaciones con el propósito de evitar que los hundimientos diferenciales aumentaran y así evitar que la estructura siguiera dañándose, pero por diversas causas los resultados obtenidos no fueron los esperados, y los asentamientos diferenciales continuaron incrementándose. Situación

que resultó evidente en abril de 1989, al detectarse un grupo de grietas en las bóvedas que cubren la zona del presbiterio, pues el agua de la lluvia ocurrida ese día se introdujo a través de ellas dañando obras de arte de gran valor cultural.

Para enfrentar los daños se realizaron algunos estudios, sobre todo de tipo geotécnico para determinar la magnitud del problema y elaborar propuestas de solución. A partir de esos estudios se decidió que lo más conveniente para los templos era reducir la magnitud de los hundimientos diferenciales, mediante el proceso de subexcavación, el cual consiste en términos generales en hacer descender las partes de las estructuras que han sufrido menor hundimiento, con la extracción lenta y controlada de suelo.

Dicha acción fue complementada, mediante un proceso de inyección de mortero en el subsuelo, a fin de reducir la deformabilidad de las zonas más blandas de éste, y así disminuir la velocidad con la que se presentan los hundimientos diferenciales.

Antes de iniciar los trabajos de subexcavación se determinó que era necesario evaluar la bondad de esta nueva técnica, por lo que se decidió aplicar el método observacional para realizar dicha evaluación y sobre todo para vigilar que la respuesta de la estructura durante dicho proceso fuera adecuada; es decir, que no se pusiera en riesgo su estabilidad.

Para aplicar este método se implementó un ambicioso programa de monitoreo, a través del cual se pudiera conocer la evolución del comportamiento estructural, con el propósito de tomar decisiones de manera objetiva y oportuna acerca del avance de los trabajos y de las medidas correctivas que pudieran requerirse.

Para realizar el monitoreo se utilizaron dos sistemas; uno manual y otro automático. El primero involucra más de 3126 puntos de medición y el automático 39 sensores electrónicos.

Ambos sistemas también resultaron útiles para evaluar el comportamiento del conjunto religioso aún después de haber concluido la subexcavación, así como para analizar la influencia de la inyección de mortero que se realizó en el subsuelo para abatir la magnitud en la que avanzaban los hundimientos diferenciales.

La cantidad de registros obtenidos por los sistemas de monitoreo fue inmensa. El Instituto de Ingeniería de la UNAM interesado por estudiar con mayor detalle el comportamiento de la estructura decidió emprender un proyecto para recopilar, procesar e interpretar la información obtenida.

El trabajo presente, que forma parte de dicho proyecto, está enfocado esencialmente a los dos primeros aspectos; es decir, a recopilar y procesar la información obtenida del sistema manual, a fin de que posteriormente pueda ser interpretada desde el punto de vista estructural. De manera complementaria se realiza una semblanza histórica del proceso constructivo de los templos y de las intervenciones a las que se han sometido para preservar su integridad estructural, esto con el fin de comprender con mayor detalle la problemática que sufren los templos. Para ello, se han planteado los siguientes objetivos:

- ✓ Describir de manera general los sistemas de monitoreo, haciendo especial énfasis en el sistema manual
- ✓ Recopilar la información producida entre 1991-2002, debido a que durante este lapso el conjunto religioso ha experimentado movimientos importantes
- ✓ Generar bases de datos y programas de cómputo para procesar la información
- ✓ Realizar representaciones gráficas a partir de los registros obtenidos para que puedan interpretarse desde el punto de vista estructural
- ✓ Analizar los aspectos cinemáticos de los movimientos que experimenta la estructura a partir de los registros derivados del sistema de monitoreo



## **CAPÍTULO 1**

### **ANTECEDENTES**

#### **1.1 Aspectos históricos**

**Catedral.** Hernán Cortés ordenó la edificación de un primer templo en el año 1524, siendo terminado por fray Juan de Zumárraga en 1532, este edificio siempre fue considerado como provisional, y desde 1536, se pensaba en un nuevo templo, dado que otros construidos posteriormente en la ciudad lo rebasaban en belleza y tamaño, para la construcción de sus cimientos destacó el uso de los restos de las edificaciones prehispánicas que se alzaban en la zona; esta primera estructura, se levantó en el frente del actual templo; su uso se alargó hasta 1626 cuando fue demolido.

El proyecto del nuevo templo incluía 7 naves y su fachada principal veía al poniente; sin embargo por problemas relacionados tanto a la traza de la ciudad como a los hundimientos que sufrían las estructuras al apoyarse en los suelos blandos de la zona, provocaron modificaciones al proyecto original, por lo que se decidió reducir el número de naves a 5, y cambiar la fachada principal, quedando ésta orientada al sur.

La construcción de su cimentación inició en 1562, pero fue hasta 1573 cuando comenzó el desplante del edificio; los muros y la fachada norte se culminaron en 1615, y para 1623 las bóvedas de sacristía fueron cerradas.

El avance en la construcción del templo fue detenido en 1629 a causa de una gran inundación que sufrió la ciudad, todas las actividades desarrolladas en el templo fueron suspendidas, incluidas las ceremonias de culto. El reinicio de los trabajos tuvo lugar hasta 1635, al haber fracasado los intentos de cambiar la ciudad de sitio para evitar futuras inundaciones.

Para 1640, se había logrado el cierre de las bóvedas del altar de los reyes y cinco de las pertenecientes a las naves procesionales, pero no fue sino hasta 1667 cuando fue cerrada la última bóveda.

Entre 1672 y 1689, el proyecto sufrió la modificación de la fachada principal y se concluyen las que dan al oriente y poniente, lo que motivo el inicio de la construcción del primer cuerpo de las torres y en 1792 era desplantado el segundo cuerpo.

La terminación de la obra fue encomendada a Manuel Tolsá, cuyos trabajos consistieron en la modificación de la linternilla de la cúpula, y la construcción de los ornamentos y balaustradas del templo. Dentro de estos trabajos destaca la colocación de las estatuas de la Fe, la Esperanza y la Caridad en el cubo del reloj. Los trabajos fueron concluidos en el año de 1813, fecha que puede considerarse como terminación de la obra.

*Sagrario.* Cuando en 1626, se ordenó la demolición del templo construido por Cortés, las funciones que tenía el edificio fueron trasladadas a Catedral, pero el espacio asignado para tal efecto no resultó ser el adecuado, por lo que se decidió la construcción de una obra al oriente de Catedral que alojara la Sacristía.

El proyecto causó preocupación por los posibles daños que su construcción provocaría en Catedral, sin embargo la opinión de los expertos de la época, aseguró que lejos de poner en riesgo la seguridad de la estructura, perjudicarla o causarle algún daño, el Sagrario funcionaría como contrafuerte a Catedral.

Así su construcción inició en 1749, el proyecto estuvo basado en la concepción que se tuvo para la Catedral de Granada, en España, la cual había iniciado su construcción a principios de ese siglo.

Ha sido halagado, por ser uno de los templos de la época colonial mejor iluminados, así como por el contraste que provoca al resaltar la sobriedad de las fachadas que caracterizan a Catedral, con las suyas ricamente ornamentadas con una magnífica labor en cantera.

La obra quedó terminada en 1768, aunque, en 1777 se realizó una modificación que cambió su distribución; ésta consistió en el cambio de lugar asignado a los músicos en la planta baja y colocarlos en el coro sobre la puerta principal, como existe actualmente.

## **1.2 Concepción estructural**

*Catedral.* El templo tiene forma de cruz latina. Sus dimensiones, incluyendo muros, son de 127 m de largo por 58 m de ancho y 61 m de altura desde el nivel de plintos hasta la punta de las cruces de las torres. La planta interior del templo es una sección rectangular de 109 m de largo por 54 m de ancho, consta de 5 naves atravesadas por el crucero; la distribución, dimensiones y fachadas de la estructura aparecen en las Fig. 1 y 2.

El techo de la nave central lo constituyen bóvedas de cañón con lunetos; las naves procesionales o de tránsito están cerradas con bóvedas vaídas y las naves exteriores forman siete capillas hornacinas de cada lado, en la Fig. 3 se presenta un esquema de su distribución.

Las naves laterales extremas están divididas en capillas, por medio de muros de mampostería; las dos naves procesionales y la central están divididas por las columnas de sillares; de tal forma que el trabajo conjunto permite considerar al templo como una estructura de gravedad, para soportar las fuerzas verticales; las fuerzas y empujes horizontales son resistidos principalmente por los muros laterales. El peso aproximado de la estructura es de 127 000 toneladas, incluyendo la cimentación.

De su planta se levantan 36 columnas robustas, de éstas 20 están adosadas a los muros; las otras 16, aisladas, a una altura de 13.5 metros reciben los arcos de las naves laterales, y después suben hasta los 19.3 metros para sustentar los arcos de la nave central, como se indica en los cortes interiores del templo en la Fig. 4 (*Meli et al, 1993*).

**Sagrario.** Tiene una planta en forma de cruz griega doblemente simétrica con cúpula en el crucero, sus dimensiones son de 47.20 m por 47.77 m. Las cuatro esquinas están apoyadas en los muros laterales y constituyen la parte más resistente de la estructura; la cúpula descansa sobre las columnas de sillares.

Como Catedral ya estaba casi terminada cuando inicio la construcción del Sagrario, este último se adosó al muro oriente de Catedral y se intercomunicó con ella. El peso del templo es de 22,500 toneladas; en la Fig. 5 se muestran las fachadas, la planta y algunos detalles de la cimentación.

### 1.3 Características de las cimentaciones

Para conocer la forma en que estaban cimentados los templos se realizaron diversos estudios, que además de reflejar la dificultad que enfrentaron los constructores para el desplante de las estructuras, sirvieron como base para realizar las dos primeras recimentaciones, una descripción detallada de las cimentaciones se puede encontrar en *Tamez et al, 1992*.

#### 1.3.1 Cimentación original

**Catedral.** Se desplanta sobre un basamento constituido por una retícula de contratraves de mampostería de 3.6 m de peralte, que se apoya sobre un pedraplén de aproximadamente 1 m de espesor; el pedraplén descansa sobre una plantilla de 20 cm de espesor, la cual sirve de cabezal a una retícula de estacones de madera de 2 a 3 m de longitud y 20 cm de diámetro, espaciados unos 60 cm, como lo muestra la Fig. 1. Las contratraves y el pedraplén sobresalen de la periferia del templo.

**Sagrario.** La cimentación de Sagrario está constituida por un pedraplén de 1.20 m, que en su parte poniente aprovecha parte del pedraplén construido para Catedral, el cual extiende más allá de su planta unos 7 m, el resto del pedraplén de Sagrario se apoya sobre un firme de 30 cm de espesor que sirve de cabezal a una retícula de pilotes de madera que tienen 20 cm de diámetro y una longitud cercana a los 2 m. Detalles de la cimentación del templo se presentan en la Fig. 5.

### **1.3.2 Primera recimentación**

El arquitecto Manuel Ortiz Monasterio estudió la cimentación de Catedral y Sagrario en 1929, debido a que los hundimientos habían causado daños que la Comisión Técnica de la Catedral y el Sagrario, en su momento, consideró alarmantes. El encargado de la revisión fue el Ing. Roberto Gayol. Como primer medida fue demolido en 1933 lo que había sido el edificio del Seminario, con el propósito de descargar la zona oriente.

Los trabajos en las cimentaciones se demoraron hasta el principio de la década de los cuarenta, y esencialmente consistieron en vaciar las celdas de cimentación de Catedral, con lo que los esfuerzos disminuían según los cálculos un 25 por ciento, pero esta disminución se perdió posteriormente por el peso de las criptas que agregaron.

Los trabajos realizados en Sagrario, durante la década de 1940, consistieron en el hincado de pilotes de madera de 25 cm de diámetro, y adosar al piso de feligresía, una losa de concreto reforzado soportada en una retícula de trabes de acero.

Posteriormente, en el periodo comprendido entre 1960 y 1964, se colocaron pilotes de concreto en tramos; en celdas realizadas en 1975, abajo del Sagrario se pudo apreciar que los pilotes de madera están hincados a poca profundidad y muchos de los pilotes de concreto solo penetraron hasta la zona de rellenos, y no hasta la capa dura que se localiza, en esa zona, a más de 35 m de profundidad.

### **1.3.3 Segunda recimentación**

En 1972 la Secretaría del Patrimonio Nacional llevó a cabo un estudio estructural y geotécnico del estado de la Catedral; y se encomendó el diseño de la cimentación al Ing. Manuel González Flores, quien concluyó que con el uso de pilotes de control se resolvería el problema del hundimiento diferencial.

El Ing. González Flores proyectó la colocación de 280 pilotes, que al parecer por la dificultad del hincado de los mismos, así como la falta de espacio por la existencia de los nichos, provocó cambios al proyecto, tanto en número como en ubicación; quedando el número de pilotes incrementado a 387 y su distribución como lo muestra la Fig. 6; el tipo de pilotes usado fue de concreto reforzado en tramos de 90 cm y en diámetros de 40 y 45 cm.

En Sagrario se hincaron 133 pilotes de control del mismo tipo que en Catedral, su colocación obligó a la construcción de un sistema de contratrabes y losas. La ubicación de estos pilotes se muestra en la Fig. 7.

De los pilotes colocados en Catedral se estima que el 27 por ciento están correctamente apoyados en la capa dura, y para el Sagrario únicamente el 11 por ciento (*Tamez et al, 1992*).

#### 1.4 Origen y evolución de los hundimientos diferenciales

Los hundimientos diferenciales que han sufrido los templos a lo largo de su historia tienen su origen en tres causas principales, a saber: el diferente grado de consolidación del suelo formado por arcillas donde fueron cimentadas las estructuras, la distribución irregular del peso de las construcciones y el hundimiento regional que sufre la ciudad.

**Consolidación del suelo.** El suelo elegido para la edificación de los templos presentaba diferentes grados de consolidación, que fueron ocasionados principalmente, por la existencia de construcciones aztecas en la zona, las cuales al paso del tiempo por la acción de su peso preconsolidaron el terreno en forma irregular, la ubicación de estas construcciones, así como el área ocupada actualmente por los templos se muestra en la Fig. 8.

**Peso de las estructuras.** La variación en la distribución de los pesos en los templos también ha sido causa de hundimientos diferenciales, ya que las zonas más pesadas provocan una consolidación mayor en el suelo que otras con menores cargas; al ser la zona de las torres y en general toda la zona sur de Catedral más pesada que el resto del templo se han provocado hundimientos mayores en esta zona.

**Hundimiento regional.** La Ciudad ha venido sufriendo hundimientos desde sus primeros días, pero fue hasta fines del siglo XIX que el fenómeno se detectó; Don Manuel Rincón Miranda fue el primero en exponer este hundimiento, posteriormente, a principios del siglo pasado, el Ing. Roberto Gayol confirmó esta aseveración a partir de sus trabajos en el drenaje profundo.

Desde entonces el fenómeno ha sido documentado y se acepta que esta íntimamente ligado a la extracción por bombeo de agua del subsuelo, la cual provoca la pérdida de presión en el agua contenida en los distintos estratos de arcilla; el hundimiento regional se ha registrado a partir del punto denominado TICA (tangente inferior del calendario Azteca) ubicado en la fachada poniente de Catedral, la evolución de dicho hundimiento se presenta en la Fig. 9.

La aportación de cada uno de las causas al hundimiento sufrido por los templos ha variado, en un principio la preconsolidación del suelo y el peso de las estructuras eran las que ocasionaban la mayoría de los hundimientos, posteriormente debido a la consolidación del suelo, la velocidad con que se presentaban los hundimientos disminuyó. Pero, el aumento en la extracción de agua del subsuelo, desde el siglo XIX, reactivó la velocidad del fenómeno.

Los hundimientos diferenciales han afectado a las estructuras a lo largo de su vida, al inicio de su construcción ocasionaron problemas constructivos, haciendo necesario la variación de la altura del pedraplén, la realización de ajustes en las alturas de muros y columnas, así como la modificación de la geometría de los arcos y bóvedas; el incremento que fue necesario realizar en la altura de las columnas y muros para nivelar el arranque de las bóvedas llegó a ser de hasta 85 cm como se presenta en la Fig. 10.

#### 1.4.1 Evolución

La forma en que se incrementaban los hundimientos diferenciales y los efectos que causaron en las cimentaciones de los templos están ampliamente estudiados en *Tamez et al, 1992*. A continuación, de manera resumida, se presentaran algunos de los principales aspectos relacionados con ambos temas.

**Catedral.** Los hundimientos acumulados entre 1573 y 1989, provocaron un diferencial de 2.42 m entre las pilastras ubicadas en la intersecciones de los ejes C3 y B10, y de 1.25 m entre ambas torres, estos diferenciales han provocado desplomes de muros y columnas, y agrietamiento de bóvedas.

Los hundimientos se han producido en diferentes épocas, así desde el inicio de su construcción, el pedraplén experimento hundimientos, que no generaron problemas graves, sin embargo, obligó a los constructores a realizar variaciones en su espesor.

En 1642 inició la construcción de las torres y el revestimiento de la fachada con cantera de Chiluca; en cinco meses las torres llegaban a lo que es su segunda ventana, pero la obra fue suspendida por nueve años. A su reinicio en 1651, fue necesario la colocación de una hilada de ajuste en los sillares de cantera para absorber el hundimiento diferencial de 22.5 cm de la torre poniente.

Posteriormente, entre 1672 y 1907, la estructura se hundió lentamente por su peso, la variación de la compresibilidad de las arcillas y la existencia de cargas mayores en las torres y las fachadas agravó las diferencias entre los hundimientos que la estructura presentaba, en la Fig.11 se puede observar la configuración del templo en 1907, en ella se utilizó como referencia cero el plinto de la pilastra C-3 debajo de arco triunfal del ábside.

Desde 1907, la velocidad del hundimiento diferencial se incrementó, al aumentar la perforación de pozos artesianos y al inicio de la extracción de agua por bombeo; esta situación llevó al templo a la configuración de la Fig. 11 realizada en 1927; la velocidad de hundimiento diferencial que alcanzó el templo tuvo un valor de 0.4 mm/mes.

Entre 1927 y 1956, los hundimientos diferenciales aumentaron notablemente a consecuencia del bombeo profundo, como lo presenta la Fig.11; la cual presenta las configuraciones que se presentaron en 1927, 1934 y la diferencial de 1953 a 1955, de ellas se estimó que la velocidad de deformación varió entre 0.80 y 2.60 mm/mes; en este periodo el hundimiento regional presentó una velocidad de hasta 33.3 mm/mes, y el hundimiento total de la torre poniente llegó a los 5.20 m en 1956. La influencia de la primera recimentación no está documentada con mediciones topográficas suficientes, y es difícil saber el comportamiento logrado.

La velocidad del hundimiento regional se redujo entre 1956 y 1967, al prohibir la apertura de nuevos pozos de extracción, pero la velocidad del hundimiento diferencial alcanzó un valor de 0.8 mm/mes en el mismo periodo, esta situación se puede observar en la Fig. 9, la cual muestra la historia del hundimiento regional representado por el TICA y la diferencia existente con la pilastra C3, desde 1642 hasta 1989.

Entre 1967 y 1978, se realizaron las obras de construcción del cajón del metro y un colector semiprofundo; el cajón del metro abatió durante 6 meses el nivel freático hasta 15 m; el colector sale de la calle 5 de mayo, pasa por el frente de los templos y continua por la calle de moneda. La localización de las dos obras se muestra en la Fig. 8; las dos estructuras drenan agua del subsuelo y provocan un abatimiento en el nivel freático. La combinación del efecto de las obras y el bombeo profundo aceleraron el hundimiento diferencial a velocidades de 2.6 mm/mes.

Los trabajos de la segunda recimentación aumentaron la deformación diferencial en 20 cm, lo que representa una velocidad de 9.1 mm/mes, en la Fig. 12, aparece de forma gradual, pero se sabe que ocurrieron hundimientos diferenciales de por lo menos 14.5 cm en dos meses lo que representa una velocidad de 72.2 mm/mes.

A los seis meses del inicio de la operación de los pilotes, en 1977, se presentó una velocidad de hundimiento diferencial de 1.2 mm/mes, mayor que los 0.8 mm/mes previos a la recimentación; no hay suficiente información para aclarar esta situación debido a que en el sismo de 1985 se perdieron los archivos, pero es un indicador de las limitaciones que tuvieron los pilotes para detener el hundimiento.

Entre 1978 y 1989, con información existente se reconstruyó la configuración de 1983 y enero de 1989 (Fig. 11b), y se calculó una velocidad de 0.2 mm/mes, muy pequeña comparada con la de hundimiento regional que varió entre 4.2 y 8.8 mm/mes, por lo que el hundimiento diferencial calculado seguramente es impreciso. La configuración que aparece en la Fig. 11c, fue hecha en diciembre de 1989, en ella se aprecia el estado previo a los trabajos de renivelación.

Con la revisión de las nivelaciones existentes se llegó a la identificación de siete periodos significativos mostrados en la Fig. 12, donde se ilustran las curvas de velocidad con las que se

presentaba el hundimiento en cada uno de ellos. De ellas se puede apreciar que, en Catedral el centro se hunde menos que la periferia, los muros del lado norte tienden a abrirse y la parte sur se desploma hacia el sur poniente.

Posteriormente, de enero a septiembre de 1991, se realizaron nivelaciones con las que se obtuvo la configuración de la Fig. 13, previa a los trabajos de rehabilitación, en ella se observan las velocidades de hundimiento y se tiene que el diferencial máximo es de 12 mm/año entre los puntos C3 y A12, presentado entre la torre poniente y la columna C3.

*Sagrario.* La información disponible para el Sagrario es escasa, se tiene una configuración de 1972 y los registros de PICOSA de los movimientos diferenciales entre el 14 de diciembre de 1983 y el 20 de enero de 1989, así como las nivelaciones realizadas por HIPLAC en 1989, esta última configuración del Sagrario se presentan en la Fig. 14. De ella se puede establecer que la esquina sur y la fachada oriente de Sagrario se alejan de la estructura central.

## **CAPÍTULO 2**

### **ETAPAS DEL PROCESO DE REHABILITACIÓN**

#### **2.1 Elección del proceso de rehabilitación**

Las tres posibles soluciones que se evaluaron para resolver el problema de los hundimientos diferenciales fueron las siguientes:

- ✓ Disminuir el incremento de los hundimientos restituyendo la presión hidrostática del acuífero
- ✓ Agregar elementos de cimentación profunda, como pilas o pilotes
- ✓ Descender las zonas altas mediante la subexcavación

La primera fue descartada debido a que las características tanto de la zona como de la ciudad impiden la restitución del nivel freático al ser incierto el suministro del agua necesaria, la calidad de la misma y el mantenimiento constante de los pozos de inyección; la segunda tiene el problema del espacio originada por los pilotes existentes, además de requerir la reestructuración de la cimentación; la tercera finalmente se adoptó como solución, al ser el sistema que lograría llevar a la estructura a una condición más estable y hacerla capaz de resistir de una mejor manera los hundimientos y solicitaciones futuras.

Los trabajos necesarios alrededor de la subexcavación consistieron en la instalación de un sistema de apuntalamiento de la estructura, la construcción de lumbreras, el refuerzo de la cimentación de Sagrario y el uso de un sistema de monitoreo, la descripción de cada uno de estos trabajos aparece en diversos reportes y artículos técnicos, sobre todo en *Tamez et al, 1995*.

La subexcavación fue complementada, mediante un proceso de inyección de mortero en el subsuelo, a fin de reducir la deformabilidad de éste en las zonas más blandas, con el fin de disminuir la velocidad con la que se producen los hundimientos diferenciales.

Durante todas las etapas de la rehabilitación el monitoreo de la estructura adquirió una gran relevancia al ser un medio eficaz para evaluar los trabajos realizados y detectar cualquier situación que se alejara de los objetivos o pusiera en peligro la seguridad de la estructura.

La rehabilitación se puede dividir en cuatro etapas, la primera abarca a los trabajos previos a la subexcavación, la segunda a los dos periodos de subexcavación en las estructuras, la tercera a la inyección de mortero, y la cuarta que se refiere a los periodos de reposo de la estructura en donde se paralizaron las principales actividades para realizar ajustes y observar el comportamiento de la estructura.

Durante todo el proceso de rehabilitación el monitoreo de la estructura resulto un elemento fundamental para evaluar la efectividad de los trabajos y realizar los ajustes necesarios para el cumplimiento de los objetivos planteados.

## 2.2 Trabajos previos a la Subexcavación

**Apuntalamiento.** Tenía como objetivo mejorar las condiciones de estabilidad y resistencia de los elementos estructurales de forma que soportaran los esfuerzos provocados por los movimientos que serían inducidos durante el proceso de subexcavación, además de permitir los cambios de geometría del templo durante el proceso. Para cumplir su objetivo, el sistema permitía el cambio de forma y el aumento de su capacidad de carga en cualquier momento, en la Fig. 15 se muestran detalles de un arco apuntalado.

**Lumbreras.** Tienen forma cilíndrica con un diámetro externo de 3.4 m, alcanzando una profundidad media de 17 m, medidos desde el nivel de piso de criptas. El número de lumbreras requerido fue de 32 y están distribuidas como lo muestra la Fig. 16.

**Refuerzo de la cimentación del Sagrario.** Tiene como objetivo el frenar el hundimiento diferencial de la esquina oriente del Sagrario y consistió en la colocación de 64 pilotes de punta con funda deformable apoyados en la capa dura, la funda evita la transmisión de la fricción negativa al pilote permitiéndole un mejor funcionamiento.

Fueron equipados 27 pilotes de fricción negativa con puentes de carga para operarlos como pilotes de control de movimientos verticales. Se aprovecharon los 14 pilotes de control existentes y la carga de los pilotes fue ajustada mediante puentes de carga provisionales; en la Fig. 7 aparece la distribución de los mismos.

## 2.3 Subexcavación

Tiene como objetivo el corregir los desniveles y desplomes de los edificios que han sufrido hundimientos diferenciales, haciendo descender las partes altas de la cimentación, respecto a las bajas; lo logra extrayendo el material del suelo donde se apoya la cimentación.

El procedimiento se realiza desde lumbreras o zanjas que permiten el acceso al estrato deformable, del cual será extraído el material mediante pequeñas perforaciones horizontales; se busca que el estrato de suelo elegido para la extracción sea el más compresible de la zona.

El proceso se realizó de forma lenta y controlada, mediante la información que aportó el sistema de monitoreo continuo, se realizaron los ajustes necesarios ante los movimientos inducidos a la estructura.

En una primera etapa se intentó detener el hundimiento diferencial de la zona norte del crucero frenando la tendencia de giro de las naves procesionales y de los muros de contrarresto hacia el exterior, posteriormente se le obligaría a girar hacia el centro de la nave principal.

En una segunda etapa se procuró corregir los desplomos de muros y columnas, sin modificar la geometría de los de contrarresto, simulando un comportamiento de cuerpo rígido. Los logros alcanzados por este método serán discutidos en los capítulos. 4 y 5 de este trabajo.

El peso y volumen del suelo subexcavado durante todo el proceso fue de 5 335 065 kg y 4219.5 m<sup>3</sup>, respectivamente; en la Fig. 17 aparece la ubicación y el volumen extraído por cada una de las lumbreras.

## **2.4 Inyección de mortero**

La inyección de mortero al subsuelo tiene como objetivo disminuir la compresibilidad del suelo, de manera que la deformabilidad de los estratos inyectados se reduzca, y así se provoque que los hundimientos diferenciales que sufren las estructuras reduzcan la velocidad con la que se incrementan.

El procedimiento resultaba complejo, pero los resultados que se obtuvieron en experiencias anteriores y en la etapa experimental apoyaron su realización.

De una forma muy simple, el procedimiento consiste en inyectar a presión mortero en el subsuelo, la cantidad usada varía de acuerdo a las condiciones del suelo; el volumen de mortero inyectado en

cada zona siempre se expresó como un porcentaje del volumen del suelo a mejorar. En la Fig. 18 se muestran las zonas y el porcentaje donde el mortero fue inyectado.

## **2.5 Etapas de reposo**

La primera se presentó en abril de 1995, duró un mes y es denominada en este trabajo como suspensión temporal de la subexcavación. El periodo fue utilizado para ajustar el programa de subexcavación en su siguiente fase. La segunda etapa de observación, empezó el 20 de diciembre del 2000, al terminar la inyección del mortero en Catedral; como la mayoría de los trabajos de la intervención en los templos habían llegado a su fin, se considera que los movimientos presentados por los templos después de esa fecha continuaran sin cambios inducidos importantes.



## **CAPÍTULO 3**

### **SISTEMA DE MONITOREO**

#### **3.1 Importancia del monitoreo**

En la actualidad, cualquier proyecto de rehabilitación de un edificio histórico requiere de la implementación de un sistema de monitoreo que permita conocer las características y movimientos de la estructura, a partir de mediciones repetidas en intervalos cortos de tiempo. El estudio de estas mediciones durante un periodo amplio permite realizar un mejor diagnóstico del problema, determinar el efecto de las diferentes etapas de la intervención y detectar la aparición de condiciones desfavorables para la seguridad de la estructura.

El sistema de monitoreo que se elija, debe permitir el control del mayor número posible de aspectos relacionados con el comportamiento de la estructura, además de cumplir con la precisión y permanencia a largo plazo requeridas por la obra.

Para edificios como Catedral y Sagrario, las incertidumbres existentes acerca del estado estructural en que se encontraban y la forma en cómo reaccionarían ante los movimientos que serían inducidos por la subexcavación y posteriormente por la inyección de mortero, obligaron a la instalación de un sistema que permitiera dar seguimiento al comportamiento de los elementos estructurales durante el desarrollo de los trabajos; este sistema sirvió de base para evaluar la afectación de cada uno de los procesos a los que se sometieron las estructuras, lo que permitió realizar adecuaciones al proyecto, además de que identificaba las posibles situaciones que podrían poner en riesgo la seguridad de los templos; así como ser una herramienta para la calibración de los modelos matemáticos que fueron desarrollados.

### 3.2 Descripción general

El sistema de monitoreo debía proporcionar la información de manera simple, directa y oportuna para poder influir correctamente en la toma de decisiones; para ello fue elegido un conjunto de mediciones periódicas, que incluían desde levantamientos topográficos, el uso de plomadas y cinta métrica, llegando hasta el empleo de dispositivos electrónicos (*Tamez et al, 1995*).

El sistema se dividió en dos grandes grupos, las mediciones automáticas y las mediciones realizadas de forma manual.

### 3.3 Sistema de monitoreo automático

El sistema de monitoreo automático consta de 39 sensores electrónicos conectados a una estación central, donde cada cuatro horas se registra la medición de cada uno de los dispositivos de manera automática; esta estación permite además la realización de alguna medición extraordinaria en cualquier momento; el número de sensores y la medición que realiza cada uno de ellos se puede resumir como sigue:

- ✓ Diez telecoordinómetros para medir el cambio de verticalidad en las columnas del crucero de Catedral, en sus dos torres, en el ábside y en la esquina norponiente del mismo templo. Así como en dos de las cuatro columnas que soportan la cúpula del Sagrario.
- ✓ Veintidós extensómetros de hilo para medir la variación de longitud de los arcos, de los cuales cuatro están en el crucero del Sagrario y dieciocho en diversas zonas de la Catedral.
- ✓ Un radiómetro para medir la radiación solar, localizado en el éxtrados del arranque de la cúpula principal de Catedral.
- ✓ Seis termómetros distribuidos en ambos templos.

La Fig.19 muestra la localización en planta de los sensores.

### 3.4 Sistema de monitoreo manual

A diferencia del sistema automático, el sistema manual, abarcó un número más amplio de puntos ya que se aplicaban técnicas relativamente sencillas y económicas, entre ellas se encuentran los levantamientos topográficos, la medición de desplomes de columnas y muros, las convergencias de columnas y arcos, la variación de la inclinación de columnas y muros, el comportamiento de grietas y la emersión de pilotes; en la tabla 1 se presenta un resumen de las características de cada una de ellas.

Las mediciones estaban programadas para realizarse de acuerdo a la tabla 1, su frecuencia variaba dependiendo de la importancia de la medición o a la sensibilidad del aparato con que se realizaba la medición, teniendo así, desde mediciones quincenales hasta semestrales. Al terminar la subexcavación la necesidad de conocer el comportamiento de la estructura bajo, provocando que algunas mediciones perdieran su importancia, dejando así de reportarse; aquellas mediciones que continúan reportándose bajaron la frecuencia con la que se realizan.

#### 3.4.1 Mediciones topográficas

Con este procedimiento se conocen las elevaciones de los puntos de control instalados a nivel de plintos y a nivel de bóvedas, y el cambio que sufren a través del tiempo, así como los desplazamientos de los puntos de control instalados en la fachada sur y las torres; de manera que se llevó un control de los movimientos sufridos por la estructura tanto en el espacio como en el tiempo.

**Sistema topográfico de referencia.** La necesidad de un sistema de referencia fijo con relación a la zona estudiada, se resolvió mediante un banco de nivel instalado a 100 m de profundidad (BNP-100) cuya cota estará siempre referida al banco de nivel Atzacalco y una cuadrícula de puntos de referencia fijos en el piso de la Plaza de la Constitución representada en la Fig. 20.

La cuadrícula está trazada e instalada con relación al punto de origen de coordenadas (0, 0, Z), situado a 2 metros del paño oeste de la base de la Torre poniente y a 193 m de su paño sur, como lo muestra la Fig. 20.

El sistema permite tener el control de los desplazamientos horizontales y verticales de los puntos de apoyo topográfico para las nivelaciones y los levantamientos de coordenadas de las estructuras.

**Control de fachada sur, torres y cúpulas.** El objetivo es conocer los desplazamientos horizontales que presentan estos elementos mediante la diferencia entre dos levantamientos. La ubicación de los 59 puntos utilizados para registrar trimestralmente el desplazamiento se aprecia en la Fig. 21.

Los puntos de control están formados por una placa de aluminio provista de una caja que permite colocar un prisma reflejante portátil siempre en la misma posición; en el caso de los muros de la fachada se utilizaron placas reflejantes en lugar de prismas.

Previamente a la medición de las posiciones del prisma, se realiza la nivelación y el levantamiento de coordenadas de los puntos de referencia J, K, L desde el origen de coordenadas Z, se hace estación en cada uno de ellos y colocando el prisma en las placas se obtiene sus coordenadas. Los puntos que se visan desde cada referencia están listados en la Fig. 21.

**Nivelación diferencial de bóvedas.** La ubicación de los puntos de control al nivel de bóvedas aparece en la Fig. 22. Cada punto está formado por una varilla de acero embebida con resina dentro de barrenos realizados en la mampostería de la estructura, las varillas quedan protegidas con un tubo de acero galvanizado.

Las cotas de los puntos fijos se determinan mediante el método de radicaciones utilizando un nivel NA3000 y estatal invar con código de barras, la elevación se toma con el banco de nivel BNP-100. El número de puntos instalados es de 640 y las lecturas se realizan mensualmente.

**Nivelación diferencial en plintos.** La localización de los 277 puntos de control a nivel de plintos y a nivel de piso de feligresía aparece en la Fig. 23. Los puntos de referencia están constituidos por pernos empotrados en la estructura. Las lecturas se realizaron inicialmente de manera quincenal, y

desde enero de 2000 se realizan mensualmente; el procedimiento es el mismo que en la nivelación de bóvedas.

### **3.4.2 Medición de desplomes en columnas y muros**

Se colocaron 184 plomadas en muros y columnas para evaluar el cambio de verticalidad que presentaban durante las diferentes etapas de la intervención, principalmente durante la subexcavación; mensualmente se registraba el desplazamiento que tenía cada una de ellas.

Las plomadas fueron colocadas en serie por lo tanto algunas columnas tienen varias plomadas a diferentes alturas y con una orientación diferente. Las plomadas se instalan donde arrancan los arcos de las naves procesionales y en los arranques de los arcos de la nave central de Catedral.

El sistema consiste en ménsulas colocadas en las cornisas de los muros y columnas, de las cuales penden alambres que en el extremo llevan una argolla donde por medio de un gancho se coloca la plomada.

Una vez instaladas las ménsulas se colocó la plomada correspondiente y se dejó estabilizar, marcando así la posición inicial o de partida de la plomada, en octubre de 1992, posteriormente se fijaron cuatro pernos en el piso que permiten la colocación del marco de referencia móvil que se emplea para tomar las lecturas, en la Fig. 24 se muestra el equipo utilizado para llevar a cabo la medición.

Para la realización de las siguientes mediciones se coloca el marco de referencia portátil en los puntos fijos del piso y se toma la nueva posición de la plomada mediante una regla T que señala la lectura en las escalas milimétricas del marco de referencia, respecto a las direcciones N-S y E-W.

El procedimiento se repite desde la colocación del marco de referencia tres veces no permitiendo una variación entre las lecturas mayor que 1 mm, en caso contrario la medición se realiza a otra hora del día con menos viento.

### **3.4.3 Medición de convergencias en arcos y columnas**

Para determinar la variación del claro de los arcos entre las columnas se hicieron mediciones de convergencias. Las mediciones se realizan a diferentes alturas, incluyendo el extradós de la bóveda de la nave central de Catedral, la Fig. 25 muestra un esquema de la ubicación de los puntos de control donde se realiza la medición.

En junio de 1992 fueron instalados los puntos de control en los fustes de las columnas en las secciones de las naves central y procesional; en 1994 se instalaron las armellas para medir las convergencias en la nave central y Crucero, así como en la junta de Catedral y Sagrario.

La medición se realiza mensualmente con un extensómetro de cinta (Fig. 25), el aparato tiene una sensibilidad de 0.1 mm, pero las condiciones en que se realiza la lectura permiten una precisión de  $\pm 1$  mm.

### **3.4.4 Medición la variación de la inclinación de columnas y muros**

El objetivo es conocer el giro a distintas alturas de los elementos para registrar los movimientos locales; la medición se lleva acabo con una plomada electrónica o tiltmeter, con una precisión de un minuto de arco. Es la única lectura que no mide desplazamientos sino giros o cambios de inclinación; el número de puntos de control era de 324 y las lecturas se realizaban mensualmente.

El procedimiento consiste en colocar el sensor sobre una placa base, que a su vez está instalado en un juego de pernos fijos, se toma la lectura y se repite la operación en los dos sentidos y en dos direcciones, en la Fig. 26 se presenta un esquema del equipo utilizado.

### **3.4.5 Medición del comportamiento de grietas**

El agrietamiento de las estructuras no se puede evitar mientras sigan sufriendo movimientos los templos, ya sean propios o inducidos, pero para que no afecte la seguridad de la misma debe estar

en rangos razonables, por esta razón fue necesario el control del comportamiento de las grietas existentes, así como el registro de la aparición de nuevas grietas con el fin de detectar posibles situaciones indeseables.

La precisión de este tipo de lecturas es de 0.1 mm, se lleva a cabo con un vernier electrónico cuyas puntas son apoyadas en las marcas de los testigos, que son pernos colocados a cada lado de la grieta en estudio, ubicados en grupos de dos o de cuatro puntos sobre la trayectoria de las grietas; una vez colocado se lee la distancia existente entre los testigos.

Se separo la medición de las grietas en dos grupos de acuerdo a la frecuencia con que se realizaban las mediciones, el primero abarca aquellas grietas que existían o aparecieron en muros y fachadas, se reportaban 419 puntos trimestralmente; al segundo grupo pertenecían las grietas en bóvedas, con 270 puntos de control y una frecuencia mensual.

#### 3.4.6 Medición de la emersión de pilotes

Los pilotes existentes en Catedral y Sagrario teóricamente deben emerger de la cimentación cuando los templos, esta emersión llega a un punto donde hace necesario recortar la cabeza del pilote y ajustar los mecanismos de control para permitir el correcto funcionamiento del pilote, por lo que se decidió llevar un control de las mismas.

El procedimiento consiste en medir la distancia perpendicular existente entre la cabeza del pilote y un punto fijo en la cimentación, como lo muestra la Fig. 27; cuando la cabeza del pilote es recortada, el punto de referencia es trasladado para continuar las mediciones. Se dio seguimiento a la emersión de 436 pilotes en Catedral y Sagrario desde junio de 1995.



## **CAPÍTULO 4**

### **ASPECTOS CINEMÁTICOS DE LOS MOVIMIENTOS PRESENTADOS POR LA ESTRUCTURA**

#### **4.1 Características de la información derivada del sistema de monitoreo manual**

Los diferentes tipos de mediciones que se realizaron para dar seguimiento al comportamiento estructural del conjunto religioso están indicados en la tabla 1, además de las frecuencias con las que se hacían dichas mediciones; en *Tamez et al, 1995* fueron documentados los detalles de cada una de las mediciones, así como algunos aspectos relacionados con los registros obtenidos.

Durante el proceso de rehabilitación se desarrollaban diversas actividades, las cuales por su naturaleza en ciertas ocasiones afectaban a los puntos de control o impedían realizar alguna medición, lo que provocó interrupciones en los registros y en algunos casos modificaciones en los sistemas de referencia. Para corregir estas anomalías, en la mayoría de los casos era suficiente realizar una interpolación lineal entre los registros con los que se contaban antes y después de la interrupción, y en el menor de los casos además era necesario ajustar los registros previos al nuevo sistema de referencia; en este último caso se considera que las alteraciones en los registros no era significativa debido a que el movimiento registrado entre dos mediciones consecutivas generalmente era de poca magnitud, siendo esta consideración respaldada con mediciones redundantes del mismo sistema.

El trabajo presente recopila la información obtenida de las diversas nivelaciones efectuadas al nivel de plintos, así como los registros del movimiento de plomadas, los cambios de longitud de arcos y la emersión de los pilotes con respecto a la cimentación, habiéndose registrado en conjunto más de 100 000 lecturas durante un periodo de 12 años.

Para almacenar la información generada fueron creadas bases de datos, y se realizaron programas para actualizar y manejar dichas bases con el fin de obtener representaciones gráficas que sirvieran de base para la interpretación tanto del comportamiento estructural de los recintos como del terreno donde están apoyados. Para ello fue elegida la hoja de cálculo EXCEL y los programas fueron desarrollados a partir de utilerías de la misma.

La información de las bases se agrupó pensando en una matriz de datos donde los renglones representan los puntos de control utilizados y las columnas contienen las mediciones realizadas; la primera columna contiene la identificación de las secciones y en el primer renglón aparecen las fechas en las que se realizaron dichas mediciones.

Dada la gran cantidad de registros, fue necesario emplear técnicas estadísticas para obtener valores representativos de los hundimientos y de las deformaciones que experimentaba la estructura, siendo de especial interés los siguientes parámetros:

El valor medio

$$V_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad Ec. (1)$$

el valor máximo

$$V_{max} = \max |lec_{inicial} - lect_{final}| \quad Ec. (2)$$

el valor mínimo

$$V_{min} = \min |lec_{inicial} - lect_{final}| \quad Ec. (3)$$

la desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_m)^2}{n-1}} \quad Ec. (4)$$

y el coeficiente de variación

$$CV = \sum_{i=1}^n \frac{x_i - x_m}{n} \quad Ec. (5)$$

## 4.2 Nivelación diferencial en plintos

Los datos de las nivelaciones son almacenados en una hoja de cálculo; el nombre de dicha hoja esta formado por el prefijo *CN*, seguido del número de nivelación correspondiente, separada por un guión la terminación *Nl*, y con una extensión *wk1*, (ej. *CN226-Nl.wk1*). La elevación de los puntos de control referidos al banco de nivel es registrada en metros.

Hasta diciembre de 2002 han sido realizadas 244 nivelaciones, con estos datos se construyó una matriz de 277 renglones por 244 columnas, la cual fue almacenada en una base de datos denominada *Bplintos.xls*. Asimismo se elaboró un programa de cómputo que actualiza la base a partir del archivo que contiene la última medición, el mismo programa también fue concebido para calcular el hundimiento diferencial que se genera entre dos puntos de control, previamente definidos por el usuario, y genera una gráfica que contiene la evolución de dicho hundimiento. En el anexo 1 se presentan el diagrama de flujo del programa así como el manual para su uso.

Para determinar el hundimiento de la estructura en un punto de interés y en un cierto periodo, se determina la diferencia de elevación de dicho punto entre las fechas seleccionadas, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$H_p = N_i - N_j \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

- $H_p$  Hundimiento relativo sufrido por el punto  $p$  entre las nivelaciones  $i$  e  $j$
- $N_i$  y  $N_j$  Elevación del punto  $p$  en la nivelación tomando como base el banco de nivel profundo en las nivelaciones  $i$  e  $j$

El hundimiento de un solo punto no refleja la complejidad del movimiento de la estructura, siendo necesario determinar el hundimiento relativo del punto de interés a otros puntos de la misma estructura; el hundimiento relativo entre dos puntos de interés puede estimarse a partir de la Ec. (7), a la que generalmente se le conoce como hundimiento diferencial ya que refleja las distorsiones que sufre la estructura entre los puntos elegidos.

$$H_d = H_{p_i} - H_{p_j} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

$H_{pi}$  y  $H_j$  Hundimiento de los puntos  $i$  e  $j$  durante el periodo de interés

$H_d$  Hundimiento diferencial entre los puntos  $i$  e  $j$

La velocidad con que se presenta el hundimiento, es posiblemente la forma más utilizada para la evaluación de la efectividad de los trabajos de rehabilitación, dicha velocidad expresada en mm/año, se calcula de acuerdo con la Ec. (8).

$$V = \frac{H_p}{\Delta_t} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

$H_p$  Hundimiento del punto  $p$  durante el periodo de interés

$\Delta_t$  Duración del periodo

$V$  Velocidad de hundimiento del punto  $p$

Las principales representaciones gráficas utilizadas para plasmar la información que generan las nivelaciones son tres: las curvas de nivel representadas en la planta del conjunto religioso; gráficas que representa la evolución del hundimiento total de los puntos de control y el hundimiento diferencial entre ellos; finalmente, a través de un diagrama de barras se representa la velocidad a la que se hunden los puntos elegidos durante el periodo seleccionado. Esta última representación permite detectar aquellas zonas que se hunden con mayor rapidez, así como modificaciones en la velocidad de hundimiento de los mismos.

**Hundimientos de la estructura.** Para conocer el hundimiento y la velocidad de cada uno de los puntos de control, el análisis de la información fue dividida en las siete etapas siguientes:

1. Trabajos previos de subexcavación (1991-1992)
2. Primer periodo de subexcavación (1993-1995)
3. Suspensión temporal de la subexcavación (1995)
4. Segundo periodo de subexcavación (1995-1998)
5. Periodo de inyección (1999-2000)
6. Último periodo de observación (2000-2002)
7. Proceso completo de la intervención (1991-2002)

A partir de dicho análisis fueron seleccionados los registros de seis puntos para mostrar de manera general la cinemática de los recintos durante dichas etapas. La ubicación de estos puntos aparece indicada en la Fig. 28; la evolución de su hundimiento se presenta en la Fig. 29, la cual en todos los casos incluyen la evolución del hundimiento del punto 5 correspondiente a la esquina sur poniente de la Catedral; el propósito de estas representaciones es comparar el hundimiento diferencial respecto a la zona que menor hundimiento sufrió, a partir de estas figuras se determinó el hundimiento de cada punto así como su velocidad, los resultados obtenidos en cada una de las etapas se presentan en las tablas 4 y 5.

Del análisis de la Fig. 29 y de las tablas 4 y 5, puede decirse que cada una de las etapas de la rehabilitación de los templos afecto la velocidad de hundimiento de la estructura. Además, durante los trabajos previos a subexcavación puede decirse que los hundimientos y la velocidad con la que estos se produjeron fue variable; a lo largo del primer periodo de subexcavación la estructura experimentó un hundimiento diferencial importante respecto al punto 5, que fue la zona que se hundió a menor velocidad; al suspenderse esta acción los hundimientos en la mayoría de los puntos dejaron de progresar, incluso en algunos casos la velocidad prácticamente se anuló. Esta situación se mantuvo casi en su totalidad hasta que se reactivó el proceso de subexcavación, ya en esta etapa la velocidad de hundimiento volvió a crecer pero sin alcanzar los valores obtenidos durante el primer periodo de subexcavación.

En el caso particular de la esquina norponiente (punto 27) la velocidad de hundimiento, que en el primer periodo fue de 136 mm/año, se incremento a 258.3 mm/año; posteriormente, se abatió a 60.8 mm/año, lo cual implica una reducción de 400 por ciento, respecto a la etapa previa. Al reactivarse la subexcavación, la velocidad de hundimiento sufrió un nuevo incremento, semejante al anterior, nuevamente se redujo la velocidad después de concluir, en junio de 1998, el proceso de subexcavación, situación que se prolongó por cerca de 11 meses; a partir de 1999 y hasta el 2000 la velocidad de hundimiento de la misma esquina volvió a progresar alcanzando una magnitud de 51.0 mm/año durante ese periodo; por último, a partir de enero de 2001 y hasta diciembre de 2002 la velocidad de hundimiento sufrió un nuevo incremento alcanzando un valor de 57.9 mm/año para este periodo. Una situación semejante se aprecia en el resto de la estructura como puede apreciarse en las figuras y tablas ya mencionadas. Los hundimientos sufridos al final de la subexcavación y hasta diciembre de 2002 se aprecian en las Fig. 30 y 31.

Una zona muy particular fue la torre poniente (en donde se encuentra el punto 5), la cual no modificó sustancialmente su velocidad en las diversas etapas, esta situación se atribuye fundamentalmente a que durante la subexcavación no se extrajo suelo de esa zona, sin embargo de acuerdo con los estudios de mecánica de suelos se espera que dicha velocidad se abata a corto plazo a consecuencia de la inyección de mortero, previamente descrita.

### 4.3 Medición de desplomes en columnas y muros

Los datos correspondientes a los cambios de verticalidad de muros y columnas fueron almacenados en una base de datos denominada Bplomcat.xls para el caso de la Catedral; dicha información esta ordenada en una matriz de 74 columnas por 122 renglones, los cuales corresponden, respectivamente, con los puntos de medición y el número de registros realizados, respecto a la información correspondiente al Sagrario, ésta se agrupó en una matriz de 74 columnas por 53 renglones ordenada de manera semejante al caso anterior, dicha matriz fue almacenada en la base de datos denominada Bplomsag.xls. Debido a que la información que se obtiene de la medición de cada plomada contiene dos registros: uno correspondiente a la dirección norte-sur y la otra a la dirección oriente-poniente, en las matrices antes mencionadas la primera columna esta asociada con la identificación del punto de medición y las siguientes están agrupadas en parejas para cada una de las mediciones realizadas.

El desplazamiento que sufre cada uno de los elementos de soporte, se determina a partir de las Ec. 9, 10 y 11, las cuales corresponden al desplazamiento en la dirección norte sur, este oeste y total, respectivamente.

$$Cv_{N-S} = P_1 - P_2 \quad Ec. (9)$$

$$Cv_{E-O} = P_1 - P_2 \quad Ec. (10)$$

$$Cv = \sqrt{Cv_{N-S}^2 + Cv_{E-O}^2} \quad Ec. (11)$$

Recordando que las plomadas estaban a distinta altura, el cambio de verticalidad se determinó a través de la modificación de la pendiente, según la Ec. 12.

$$CV = \frac{Cv}{h} \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

- $Cv$  Cambio de verticalidad en la sección
- $P_1$  y  $P_2$  Posición de la plomada en la dirección NS y EO de la referencia móvil
- $CV$  Cambio de verticalidad por unidad de altura
- $h$  Altura de la plomada

**Cambios de verticalidad y desplomes.** En la Fig. 32 aparece el desplome medido al inicio de los trabajos, así como el cambio de verticalidad logrado hasta junio de 1998; en ella se puede observar que la Catedral giró hacia el nor oriente mientras el Sagrario lo hizo hacia el nor poniente; es decir en ambos casos los templos experimentaron un movimiento correctivo, ya que en la mayoría de los casos se redujo el desplome de los elementos de soporte.

En la Catedral, el cambio de verticalidad promedio logrado en las columnas y muros fue de 0.501 por ciento con un rumbo de 41° NO, Fig. 33; este cambio en la verticalidad se compone del 0.419 por ciento en la dirección NS y de un 0.275 por ciento en la EO. El máximo cambio de verticalidad se produjo en la intersección de los ejes F y 12, donde se alcanzó 1.09 por ciento (Fig. 34). En la Fig. 35 se muestra un diagrama de barras con la distribución del cambio de verticalidad en los puntos de medición destacando que el 30 por ciento de las 122 estudiadas lograron una corrección entre 0.5 y 0.6 por ciento.

Para tener una visión más detallada del movimiento que experimentaron las distintas zonas de la Catedral, su planta fue dividida en cuatro partes, utilizando como límites la nave central y el crucero. Para cada zona se calculó la dirección y magnitud promedio del movimiento de todas las plomadas contenidas en ella, los resultados obtenidos aparecen en la Fig. 33; en ella destaca la zona Sur-poniente por ser la que mayor movimiento experimentó, pues presenta un cambio de verticalidad del 0.624 por ciento con un rumbo de 47° NO.

En el caso del Sagrario el movimiento de la mayoría de las plomadas se dirigió al norponiente, provocando un cambio de verticalidad promedio en las elementos de soporte de 0.464 por ciento con un rumbo de 16° NE (Fig.31). El diagrama de barras de la Fig.36, presenta que 34 de las 53 plomadas registraron un cambio de verticalidad cercano al 0.5 por ciento.

La comparación de los desplomes iniciales con los movimientos inducidos (Fig. 32), permite conocer el nuevo estado de las columnas, teniendo en promedio una corrección del 25 por ciento en el desplome. Como una zona particular se tiene a la zona nororiente, donde al ser los desplomes iniciales tan pequeños los movimientos de las secciones cambiaron la orientación del desplome y excedieron en magnitud a los iniciales, pese a ello, esta zona es la que presenta el menor desplomo en sus elementos.

La situación en el Sagrario es semejante a la de Catedral, pues la reducción promedio de desplomo alcanzó el 17 por ciento, y también los elementos de soporte que presentaban desplomes pequeños al inicio de los trabajos cambiaron de dirección y crecieron en magnitud.

#### **4.4 Medición de Convergencias**

Los datos correspondientes a la medición de convergencias fueron agrupados en una matriz de 69 columnas por 293 renglones, misma que fue almacenada en la base de datos identificada como Bconvergencias.xls. En este caso la primera columna esta asociada con la sección de la medición y en el resto de las columnas se encuentran los claros registrados en cada una de las mediciones.

A partir de 1993, se midieron las convergencias en la parte inferior y a media altura de los fustes de las columnas, sitios que fueron identificados como bajos y altos, respectivamente, posteriormente, en enero de 1994, el programa de mediciones incluyó la longitud de los arranque de arcos, y meses más tarde se añadieron los claros a nivel del extradós de la nave central (Tamez et al, 1994).

La variación de longitud del claro se determinó haciendo la diferencia entre dos lecturas de acuerdo con la Ec. 13, con base en dicha expresión los valores positivos indican una abertura, mientras que los valores negativos denotan un cierre.

$$\Delta l = L_i - L_j$$

Ec. (13)

Donde

- $\Delta l$  Variación de la longitud del claro entre las lecturas  $i$  e  $j$
- $L_i$  Longitud de la sección en la medición  $i$
- $L_j$  Longitud de la sección en la medición  $j$

**Cambios de longitud de los claros medidos.** En la Fig. 37 se aprecian los cambios de longitud inducidos en las secciones ubicadas entre los ejes de Catedral a las distintas alturas en que se realizaban las mediciones, siendo la sección entre los ejes C y D sobre el eje 3 donde se presentaron los mayores cierres, alcanzando un valor de 42.5 mm; esto a media altura de las pilastras que sostienen al arco triunfal. Durante el periodo de análisis también se detectaron zonas que incrementaron su claro, como en el caso de las naves procesionales del lado poniente, en donde sobre el eje 2 se registro una abertura de ocho mm a la altura de los capiteles de dicha nave, siendo este el valor máximo registrado.

En las convergencias bajas, 4 de las 16 secciones medidas sufrieron aberturas cuyas magnitudes no excedieron los 5 mm.

En el extradós, los claros longitudinales se cerraron 1.3 mm en promedio, mientras que en los transversales alcanzaron valores de cierre de 5.7 mm; la sección en la cual se registro el mayor cierre se ubica sobre el eje 5, entre los ejes C y D, con un valor de 50 mm.

En el arranque de los arcos se logró un movimiento generalizado de cierre en la dirección norte-sur, obteniendo un valor medio de 12.6 mm, mientras que en la dirección transversal el movimiento tuvo variaciones de tal manera que el valor promedio indica que el claro de la nave central se redujo 5 mm; además se logró un cierre máximo de la misma bóveda de 42 mm, esto sobre el eje 3.

La evolución del cambio de longitud de todas las secciones durante el periodo de análisis se representó en gráficas como la que aparece en la Fig. 38, en ella pueden apreciarse dichos cambios en cuatro elevaciones diferentes: baja, alta, arranque de arcos y extradós.

Esta medición fue la más divergente, ya que la variación entre los claros de las secciones resultó grande, lo que impidió la agrupación de las convergencias en zonas, como en el caso de las plomadas.

#### 4.5 Medición de la emersión de pilotes

Durante el periodo comprendido entre Jun-96 y Dic-00 fue documentada la emersión presentada por los pilotes de los templos en 45 mediciones, con las cuales se formaron tres matrices: una correspondiente a los pilotes de control ubicados en Catedral, otra referente a los pilotes de control instalados en el Sagrario y la tercera asociada a los pilotes de control con funda antifriccionante. Cada una de las matrices contiene en su primera columna la identificación del pilote y en las subsecuentes la distancia medida del cabezal a la losa de cimentación. En el caso de los pilotes de control con funda antifriccionante la matriz correspondiente tiene un tamaño de 29 renglones por 25 columnas y respecto a los pilotes de control convencionales instalados tanto en la Catedral como en el Sagrario los tamaños de las matrices son de 363 por 36 y 154 por 33, respectivamente.

El procedimiento para interpretar la información es semejante al utilizado para las nivelaciones en plintos. La diferencia entre dos lecturas se realiza a partir de la Ec. 14, si ésta resulta positiva indica que el pilote emerge respecto a la cimentación de los templos por lo que se trata de un movimiento relativo.

$$E = D_i - D_j \quad \dots Ec. (14)$$

Donde

$D_i$  y  $D_j$  Distancia de la cabeza del pilote a la cimentación

$E$  Emersión sufrida en el periodo comprendido entre las lectura  $i$  e  $j$

**Análisis de la emersión de pilotes.** De manera ideal, si los pilotes estuviesen instalados sobre el mismo estrato sobre el que se apoya el banco de referencia, sería de esperarse que el pilote de control emerja, con respecto a la losa de cimentación, la misma proporción en que los estratos de suelo reducen su espesor; sin embargo, generalmente esto no sucede por dos causas principales: primero porque el hundimiento del suelo no se debe exclusivamente a la consolidación de los

estratos que abarcan los pilotes, sino que además los estratos más profundos también se deforman por la extracción de agua del subsuelo; el otro motivo esta asociado con el buen funcionamiento del pilote, lo cual generalmente depende de su correcto apoyo sobre la primera capa dura.

Durante el periodo comprendido entre enero de 1996 y junio de 1998, los pilotes de control de la Catedral emergieron 64 por ciento respecto al hundimiento medido en la estructura, después de haber concluido la subexcavación, en junio de 1998 y hasta diciembre de 2000, dicho movimiento se redujo en promedio a tan solo 25 por ciento del hundimiento (Fig. 39).

En los pilotes de control de Sagrario el comportamiento fue similar, ya que durante la subexcavación la emersión representó el 40 por ciento, y después de dicho proceso este movimiento solo alcanza el 10 por ciento del hundimiento de la cimentación.

En la Fig. 40 se presenta la evolución de la emersión del pilote 69, localizado en el sur oriente de Catedral (Fig. 6); dicho movimiento representa el 83 por ciento del hundimiento en la primera etapa y del 5 por ciento en la segunda del hundimiento del punto 160 en el mismo periodo (Fig. 23).

En el caso de los pilotes con funda antifriccionante, el desplazamiento entre su cabeza y la losa de cimentación representa el 57 por ciento del hundimiento inducido en la estructura durante la subexcavación, y en el periodo posterior a este proceso, dicho relación se redujo al 11 por ciento

La tabla 6 muestra en por ciento la relación entre la emersión de los pilotes y el hundimiento de la estructura, en términos generales puede decirse en el caso de la Catedral que 23 pilote de los 363 pilotes no emergen y que en 35 pilotes el desplazamiento relativo entre la cimentación y el cabezal de los mismos representa entre el 50 y el 100 por ciento del hundimiento de la estructura.



## **CAPÍTULO 5**

### **INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL DE LA INFORMACIÓN**

A partir de los registros obtenidos por los sistemas de monitoreo, se elaboraron diversas representaciones gráficas que relacionan el movimiento inducido en la base con los desplazamientos presentados por las superestructuras. Algunas de estas representaciones asocian el cambio de verticalidad de los elementos de soporte y la variación de los claros de las distintas naves con los cambios de pendiente provocados por los hundimientos diferenciales producido en los cimientos.

Atención especial se puso a los registros obtenidos por las nivelaciones en plintos y a la relación que guardan con los cambios de verticalidad de muros y columnas.

#### **5.1 Perfiles de piso**

A partir de las nivelaciones efectuadas entre octubre de 1991 y diciembre de 2002 fueron determinados los perfiles de hundimientos inducidos en los ejes constructivos de los templos. Debido a que se generaron un número sustancial de representaciones de este tipo, el trabajo presente dará especial énfasis solo a un grupo de ellas.

En los perfiles de los ejes transversales de Catedral, representados en la Fig. 41, se aprecia que la estructura, al norte del crucero se deforma de manera convexa mientras que la zona sur históricamente ha tendido a girar hacia el poniente, asimismo llama la atención en que buena parte de la zona oriente descendió de manera uniforme como más adelante se comentará. En la misma figura también se aprecia que el templo redujo la inclinación oriente poniente.

Los ejes longitudinales de la Catedral (Fig. 42) indican que el hundimiento del templo es hacia el sur y que durante la subexcavación el movimiento consistió, además de un descenso total, en un giro generalizado hacia el norte.

Un caso típico que muestra las configuraciones deformadas de los ejes longitudinales se presenta en la Fig. 43; en ella puede observarse la deformación que sufría el eje C durante las etapas de interés, además puede apreciarse que el movimiento se produjo de manera suave lo que evito daños considerables en la estructura.

Un resumen de las correcciones logradas por la rehabilitación por ejes constructivo de los templos se presenta en las tablas 7 y 8; en ella puede apreciarse que entre octubre de 1991 y junio de 1998 el desnivel entre los extremos del eje C se redujo 820 mm. La corrección máxima, de acuerdo con las mismas tablas, se obtuvo sobre el eje F, el cual redujo su desnivel en un 94 por ciento, lo cual esencialmente se debe a que el desnivel de dicho eje inicialmente era pequeño.

Haciendo caso omiso de este último resultado se determinó que el desnivel en el resto de la estructura se redujo en 35 por ciento en la dirección longitudinal y un 20 por ciento en la dirección transversal. Después de haber concluido el proceso de subexcavación y hasta diciembre de 2002 el hundimiento diferencial sufrió un incremento de 2.5 por ciento en promedio.

Las correcciones en los desniveles de las fachadas de Sagrario durante la subexcavación mostradas en las tablas 8 y 9 son de 25 por ciento en promedio; después de subexcavación y hasta diciembre de 2002 el desnivel creció 3 por ciento en promedio. Los perfiles de cada uno de los ejes se presentan en la Fig. 44, y la manera en la cual evolucionó el hundimiento en un eje transversal típico se presenta en la Fig. 45.

## **5.2 Comparación entre el movimiento de los elementos de soporte y el hundimiento del piso.**

La disminución en los desplomes en columnas y muros fue uno de los principales objetivos de la subexcavación para llevar a los templos a condiciones de mayor estabilidad, con el movimiento que se indujo a través de dicho proceso se pretendía que las columnas siguieran el movimiento del piso.

Para evaluar el efecto del hundimiento de la cimentación sobre la superestructura se determinó el giro que se producía en cada uno de los ejes del recinto y se comparó con la rotación que experimentó la superestructura. El giro de esta última se obtuvo mediante dos procesos: uno haciendo uso de los registros de las plomadas y el segundo por medio de un modelo matemático basado en el análisis matricial. En este último caso se realizó un modelo ideal mediante barras, el cual simuló la cimentación y las columnas al estar todo el conjunto sometido a desplazamientos en los apoyos, de acuerdo con los hundimientos registrados en cada uno de los ejes de la cimentación. Un modelo típico de los 30 realizados aparece en la Fig. 46.

Con base en los resultados obtenidos aplicando ambos métodos se realizaron las representaciones gráficas que aparecen en las Fig. 47, de acuerdo con ellas puede decirse que el movimiento de columnas y muros no siempre fue similar al cambio de pendiente del piso, ni tampoco al movimiento ideal que experimentaría la columna si la bóveda no opusiera resistencia alguna; esto último se atribuye a la rigidez y resistencia que ofrecieron el sistema abovedado, lo cual en la mayoría de los casos redujo el giro que debieron haber presentado las columnas.

La comparación entre el movimiento registrado por las plomadas de Catedral y los cambios de pendiente del piso calculados entre 1993–1998, se aprecian en la Fig. 48; en ella se observa que el 65 por ciento de las plomadas giró menos que el piso, presentando el resto rotaciones mayores; además, hubo casos, como la zona nor-oriente, donde las plomadas no siguieron el sentido del movimiento del piso, principalmente en la dirección este–oeste, en esa zona mientras que el piso giraba hacia el poniente, las columnas lo hacían hacia el oriente.

La relación que existe ente la pendiente del piso, el movimiento registro por las plomadas y el desplazamiento ideal de las columnas y muros se presenta en la Fig. 48. En términos generales se

obtuvo que el 25 por ciento de las plomadas giró más que el piso, otro 25 por ciento tuvo el mismo giro que el piso y el 50 por ciento restante quedó rezagado respecto al giro del piso. Hay que destacar que el grupo de plomadas instaladas en los muros giró de manera semejante al piso.

En Sagrario la relación del giro del piso con los cambios de pendiente medidos con las plomadas y con los obtenidos de manera analítica, se presentan en la Fig. 49; en ella puede apreciarse que el 18 por ciento de las plomadas giró más que el piso, que el 30 por ciento se movió en armonía con él y que en el resto de ellas el giro quedó retrasado respecto al del piso.

## **CONCLUSIONES**

De una importancia trascendente resultaron los sistemas de monitoreo que redujeron las incertidumbres que se tenían a cerca del comportamiento de los templos, pues permitieron dar un seguimiento periódico de cada una de las acciones tomadas, valuando su efectividad y avisando de situaciones no previstas o riesgosas para la estructura, lo que permitía una toma de decisiones más rápida y oportuna, así como cumplir los objetivos y metas propuestos.

Cada una de las mediciones que integran los sistemas de monitoreo son independientes, pero a la vez complementarias y redundantes, lo que permitió conocer adecuadamente los efectos de cualquier acción tomada sobre cada uno de los elementos de la estructura.

Todas las mediciones fueron utilizadas durante la subexcavación, sin embargo al término de la misma muchas dejaron de realizarse debido a que los movimientos son ya muy pequeños y su realización se complicaba sobre todo debido a que los sistemas de apuntalamiento fueron retirados.

Una de las mediciones que se ha mantenido es la nivelación a nivel de plintos, pues como se ha destacado en los Cáp. 4 y 5 de este trabajo, es quizá la medición más sencilla y económica que permite relacionarse con otras mediciones. Además de poder realizar con ella representaciones gráficas que permiten una comprensión rápida y adecuada del comportamiento de los templos.

La rehabilitación en Catedral y Sagrario ha sido un proceso largo y complicado, durante el cual fue desarrollada una gran cantidad de actividades con el propósito de preservar el conjunto religioso en condiciones de servicio y seguridad adecuadas.

La subexcavación de las cimentaciones ha resultado ser un procedimiento efectivo para disminuir los desniveles existentes en las construcciones, ya que permite hacer descender las partes altas de las estructuras respecto a las bajas, mediante la extracción lenta y controlada del terreno de apoyo.

Este descenso de las partes altas de la cimentación de los templos indujo movimientos en la superestructura, entre ellos se pueden mencionar las reducciones en los desplomes de muros y columnas, el cierre de los claros entre los elementos de soporte, arcos y bóvedas. En general, la mayoría de estos movimientos fueron correctivos, con lo que se logró llevar a las estructuras a condiciones de estabilidad más favorables.

Dentro de las principales correcciones logradas se encuentran la disminución de alrededor del 25 por ciento tanto en los desniveles iniciales, como en la inclinación de la estructura.

Para evitar que los hundimientos diferenciales siguieran progresando después de concluida la subexcavación se decidió implementar un sistema con el fin de reducir la deformabilidad del subsuelo mediante la inyección de morteros en las zonas más blandas del mismo.

Los resultados del monitoreo y del estudio que sobre la emersión de pilotes se realizó permitirán evaluar, desde los puntos de vista geotécnico y estructural, la efectividad de los trabajos de inyección que se realizaron para reducir la deformabilidad del subsuelo.

Del análisis del movimiento relativo entre la emersión de los pilotes y el hundimiento de la estructura se concluye, que los pilotes emergen un porcentaje menor al hundimiento de la cimentación de los templos, lo que parece indicar que los estratos que abarcan los pilotes son menos deformables que aquellos que los subyacen.

Se sugiere hacer uso del sistema completo de monitoreo con una frecuencia anual para tener una historia continua de la deformación que sufran las estructuras y con ello lograr una visión más amplia del comportamiento estructural del conjunto religioso a largo plazo, esta acción resultará una herramienta valiosa para la preservación de tan importantes construcciones.



## REFERENCIAS

**Tamez, E., E. Santoyo, E. Cuevas (1992).** “La Catedral Metropolitana y el Sagrario de la Ciudad de México. Corrección del comportamiento de sus cimentaciones”. Sociedad Mexicana de Mecánica de suelos, Volumen Raúl J. Marsal.

**Meli, R. (1998).** “Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos”. Fundación ICA

**Tamez, E, E. Santoyo, R. Meli, R. Sánchez, F. López, E. Gutiérrez, H. Prieto, J. Díaz, S. Zaldívar (1995).** “Catedral Metropolitana: corrección geométrica, informe técnico”, Asociación de Amigos de la Catedral Metropolitana.

**Dirección General de Sitios y Monumentos, SEDUE (1990).** “Estudio de las cimentaciones de la Catedral y Sagrario Metropolitanos, Ciudad de México”. SEDUE

**Meli, R., R. Sánchez (1993).** “Rehabilitación de la Catedral de la ciudad de México: Aspectos estructurales”. Informe elaborado por el Instituto de ingeniería, UNAM para La Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Nacional. SEDESOL.

**Santoyo, E., E. Ovando (2000).** “Catedral y Sagrario de la Ciudad de México. Corrección geométrica y endurecimiento del subsuelo 1989-2000” . TGC.

**Toussaint, M. (1973).** “La Catedral de la Ciudad de México: su historia, su tesoro, su arte”. Ed. Porrúa.

**SEDUE (1986).** “Catedral de México: Patrimonio artístico y cultural”. SEDUE: Banamex, Fomento Cultural

**Henestrosa, A. (1994).** "Catedrales de México", CVS ediciones.

**Serrano, R. (1995).** "Interpretación preliminar del comportamiento estructural de la Catedral de la Ciudad de México, observado al inicio del proceso de restauración", Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

**Peña, F. (1995).** "Comportamiento Estructural de la Catedral de la Ciudad de México ante hundimientos diferenciales". Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.

**Walpole, R. R. H. Myers (1990).** "Probabilidad y estadística para ingenieros". Tercera edición , McGraw Hill, México.

**Canavos, G. (1990).** "Probabilidad y Estadística: Aplicaciones y Métodos". Mc Graw Hill, México.

Tabla 1 Características de las mediciones que integran el monitoreo manual

Medición	Puntos				Precisión	Frecuencia
	Total	Catedral	Sagrario	Museo		
Nivelación en plintos	277	154	51	72	1 mm	Quincenal
Nivelación en bóvedas	640	491	149	---	1 mm	Mensual
Movimiento de plomadas	184	122	53	9	1 mm	Mensual
Convergencia en arcos	293	229	36	28	1 mm	Mensual
Giros en columnas	324**	252**	72**	---	0.0003 rad	Mensual
Grietas en muros y fachadas	419*	313*	91*	15*	0.1 mm	Trimestral
Grietas en bóvedas	270	201	69	---	0.1 mm	Mensual
Verticalidad de torres	20	20	---	---	5 mm	Trimestral
Control de la fachada sur	59	44	15	---	5 mm	Trimestral
Levantamiento de coordenadas	640	491	149	---	5 mm	Semestral
<b>Total</b>	<b>3126</b>	<b>2317</b>	<b>685</b>	<b>124</b>		

\* Un punto corresponde a una cuarteta (4 lecturas) o un par (1 lectura) de pernos o placas

\*\* Un punto corresponde a 4 pernos: un par de pernos para dos lecturas en cada dirección (N-S y E-W)

Tabla 2 Principales etapas del proceso de rehabilitación

Etapa	Observaciones
1	Inicio de trabajos previos a la subexcavación
2	Primera etapa de subexcavación
3	Suspensión de la subexcavación
4	Segunda etapa de subexcavación
5	Periodo de inyección
6	Término de inyección a la fecha

Tabla 3 Valores característicos de hundimiento y velocidad de los templos

Periodo comprendido: Oct -91 a Jun-02			
Puntos analizados: 223			
Valor	Punto	Hundimiento	Velocidad
		Mm	mm/año
Promedio		-1190	111.7
Máximo	27	1634	153.4
Mínimo	5	750	70.4

Tabla 4 Hundimiento por zonas en Catedral y Sagrario (ver Fig. 28)

Etapa	Periodo		Días	Catedral				Sagrario	
	Inicio	Final		5	27	100	113	39	47
				mm	Mm	mm	mm	Mm	mm
1	25-Oct-91	12-Oct-92	353	70.0	132.0	106.0	129.0	64.0	67.0
2	23-Ago-93	17-Abr-95	602	143.0	426.0	388.0	441.0	262.0	218.0
3	17-Abr-95	10-Jul-95	84	15.0	14.0	4.0	4.0	10.0	10.0
4	10-Jul-95	15-Jun-98	1071	231.0	725.0	585.0	684.0	485.0	335.0
5	09-Ago-99	22-Dic-00	501	82.0	70.0	54.0	63.0	63.0	70.0
6	22-Dic-00	17-Jun-02	542	73.0	86.0	64.0	69.0	71.0	74.0
7	25-Oct-91	17-Jun-02	3888	750.0	1630.0	1334.0	1525.0	1119.0	946.0

Tabla 5 Velocidad de hundimiento por zonas en Catedral y Sagrario (ver Fig. 28)

Etapa	Periodo		Días	Catedral				Sagrario	
	Inicio	Final		5	27	100	113	39	47
				mm/año	mm/año	mm/año	mm/año	mm/año	mm/año
1	25-Oct-91	12-Oct-92	353	72.4	136.5	109.6	133.4	66.2	69.3
2	23-Ago-93	17-Abr-95	602	86.7	258.3	235.2	267.4	158.9	132.2
3	17-Abr-95	10-Jul-95	84	65.2	60.8	17.4	17.4	43.5	43.5
4	10-Jul-95	15-Jun-98	1071	78.7	247.1	199.4	233.1	165.3	114.2
5	09-Ago-99	22-Dic-00	501	59.7	51.0	39.3	45.9	45.9	51.0
6	22-Dic-00	17-Jun-02	542	49.2	57.9	43.1	46.5	47.8	49.8
7	25-Oct-91	17-Jun-02	3888	70.4	153.0	125.2	143.2	105.1	88.8

**Tabla 6** Relación entre la emersión relativa de los pilotes y el hundimiento de la Estructura

Periodo	Jul-95 a Ene 00		Jul-95 a Jun 98		Jul-95 a Ene-00	
	pilote	nivelación	Pilote	nivelación	pilote	nivelación
Hundimiento (mm)	355.69	574.19	330.43	481.00	23.61	96.93
Velocidad (mm/año)	64.27	103.75	113.78	165.63	9.50	39.01
IInivelación / IIpilote	1.61		1.46		4.11	
% IIpilote VS IInivelación	62%		69%		24%	

**Tabla 7** Desnivel y corrección de los ejes longitudinales de Catedral

EJE	Desniveles (cm)			Correcciones			
	1991	1998	2002	Subexcavación (1991-1998)		Inyección (1998-2002)	
				Cm	%	cm	%
A	275	202	207	73	27%	5	2%
B	266	187	192	79	30%	5	3%
C	246	165	169	82	33%	4	2%
D	206	131	133	75	37%	3	2%
E	139	70	71	69	49%	1	1%
F	66	4	2	62	94%	-2	-44%

**Tabla 8** Desnivel y corrección de los ejes transversales de Catedral

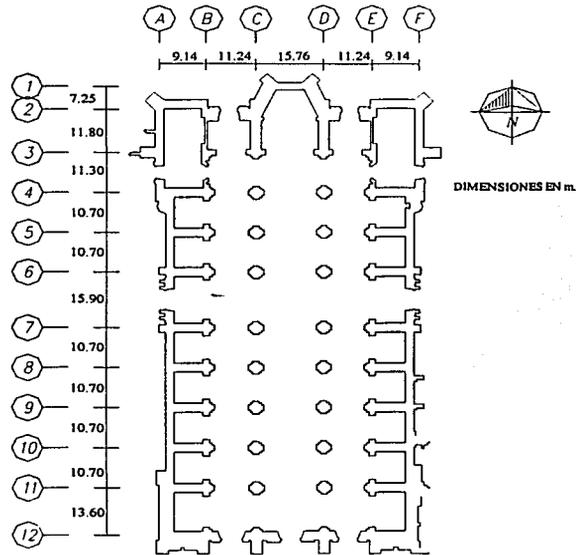
EJE	Desniveles (cm)			Correcciones			
	1991	1998	2002	Subexcavación (1991-1998)		Inyección (1998-2002)	
				cm	%	cm	%
1	8	10	11	-2	-27%	0	3%
2	22	39	42	-16	-73%	3	9%
3	49	56	58	-6	-13%	3	5%
4	28	35	37	-8	-28%	2	5%
5	48	32	32	16	33%	0	1%
6	88	71	71	18	20%	0	0%
7	152	131	132	20	14%	1	1%
8	134	120	121	14	10%	1	1%
9	134	111	113	24	18%	2	2%
10	106	86	88	20	19%	2	2%
11	259	231	234	28	11%	3	1%
12	183	156	159	27	15%	3	2%

Tabla 9 Desnivel y corrección de los ejes longitudinales de Sagrario

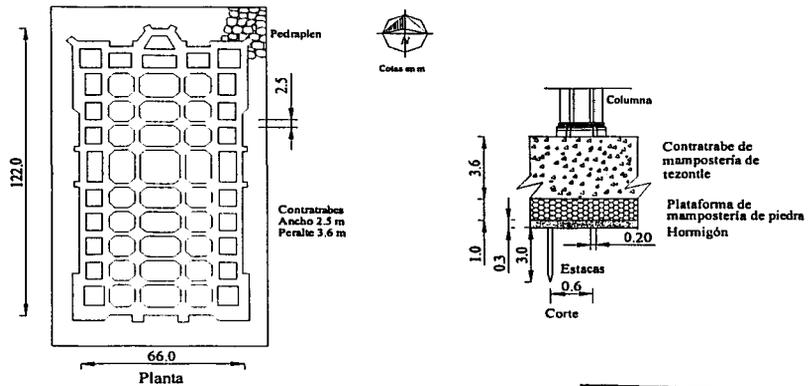
EJE	Desniveles (cm)			Correcciones			
	1991	1998	2002	Subexcavación (1991-1998)		Inyección (1998-2002)	
				cm	%	cm	%
1	32	17	19	15	47%	2	13%
2	94	84	86	9	10%	1	2%
3	110	101	103	8	8%	2	2%
4	47	39	40	9	18%	1	2%
5	143	134	135	9	6%	1	1%
6	80	75	75	5	6%	1	1%

Tabla 10 Desnivel y corrección de los ejes transversales de Sagrario

EJE	Desniveles (cm)			Correcciones			
	1991	1998	2002	Subexcavación (1991-1998)		Inyección (1998-2002)	
				cm	%	cm	%
G	114	99	100	15	13%	2	2%
H	28	5	7	23	83%	2	38%
I	52	26	28	26	51%	2	8%
J	75	57	58	19	25%	1	2%
K	95	77	77	18	19%	1	1%



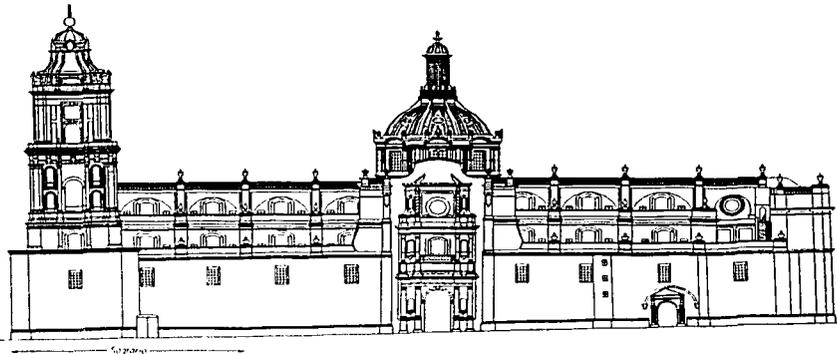
a) Planta de Catedral a nivel de feligresía



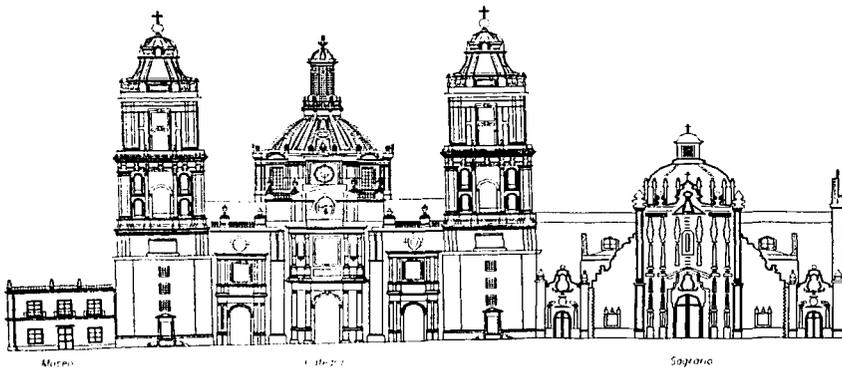
b) Cimentación original de Catedral

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 1 Características generales de Catedral



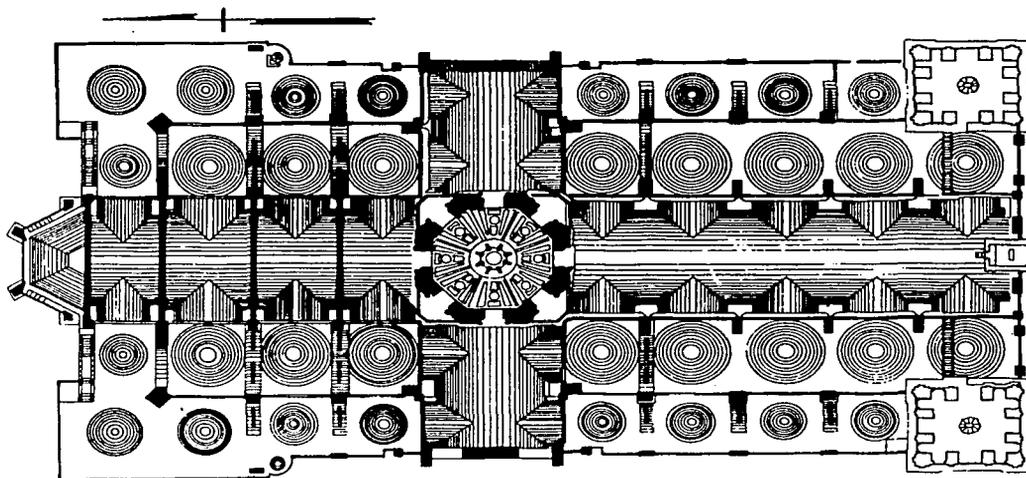
a) Fachada oriente



b) Fachada Sur

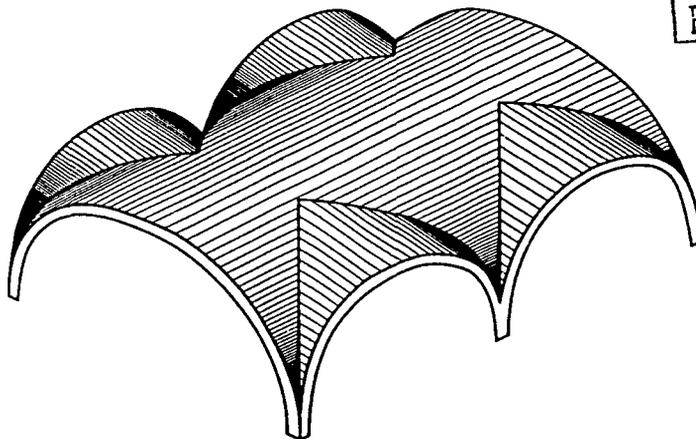
Fig. 2 Fachadas de Catedral

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



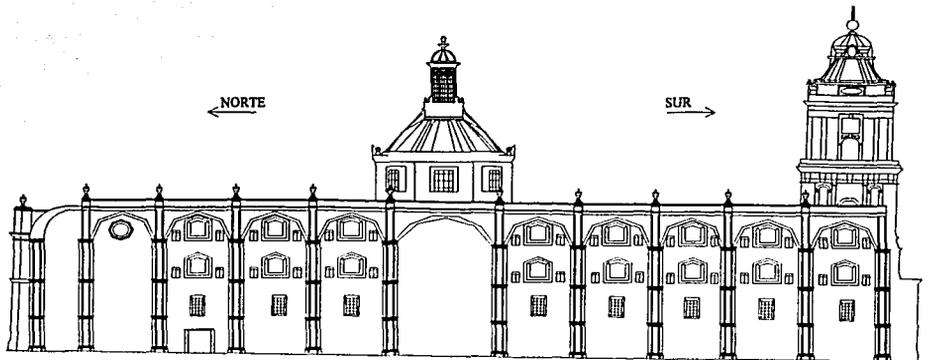
a) Planta a nivel de bóvedas

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

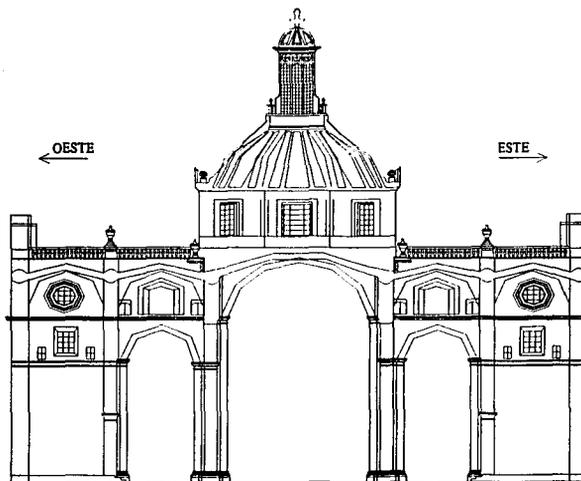


b) Geometría de la nave central

Fig. 3 Características del techo de Catedral



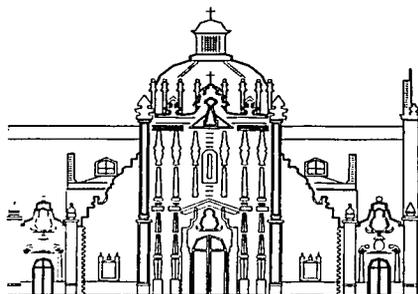
a) Corte Longitudinal



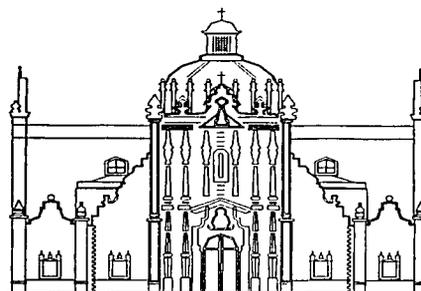
b) Corte Transversal

Fig. 4 Cortes de Catedral

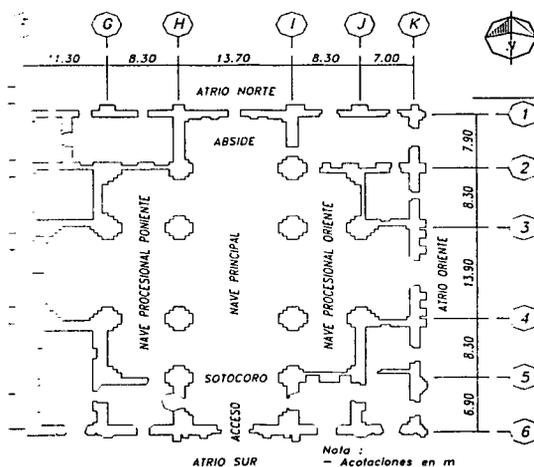
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



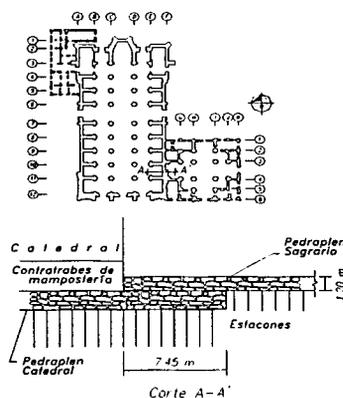
a) Fachada Sur



b) Fachada Oriente



c) Planta

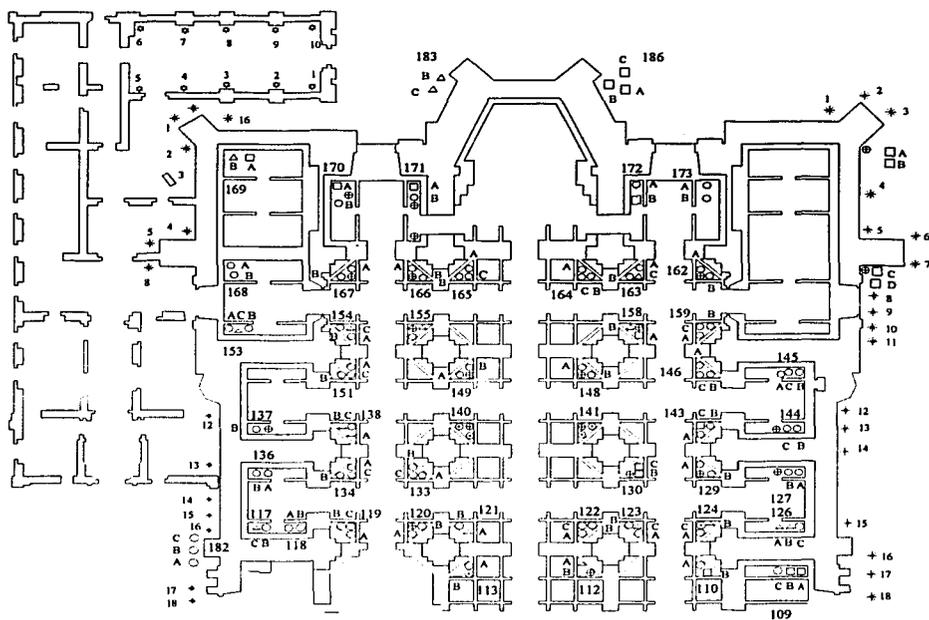


PEDRAPLEN	De calidad pobre de 1.20m de altura
ESTACIONES	Trancos hincados de 8 a 12cm de diámetro y de 1.8 a 4.0 m de longitud colocados en redícula de 1 a 2.0 m de lado

d) Cimentación

Fig. 5 Características generales de Sagrario

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

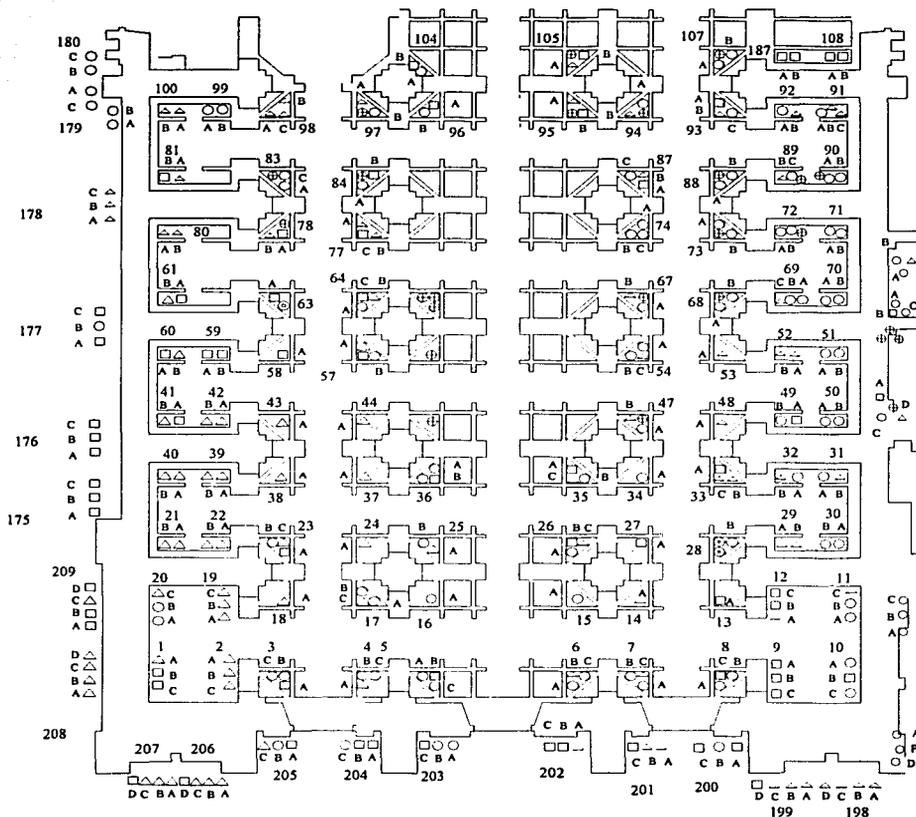


**SIMBOLOGÍA**

- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| ○ Pilotes cortos o de fricción | ⊗ Pilotes de punta con funda deformable |
| □ Pilotes inclinados o rotos   | ⊙ Pilotes sin clasificar                |
| △ Pilotes de punta             | ⊕ Perforación                           |
| + Pilotes de fricción negativa |   |

*Fig. 6a Clasificación de pilotes de Catedral (zona norte)*

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

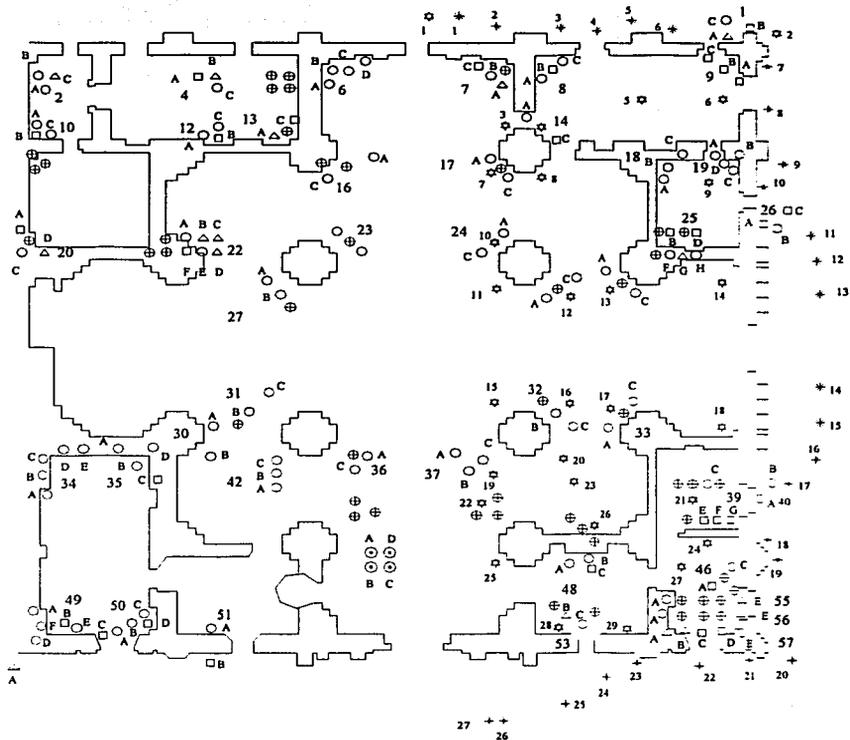


**SIMBOLOGÍA**

- Pilotes cortos o de fricción
- Pilotes inclinados o rotos
- △ Pilotes de punta
- \* Pilotes de fricción negativa
- ⊛ Pilotes de punta con funda deformable
- ⊙ Pilotes sin clasificar
- ⊕ Perforación

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Fig. 6b Clasificación de pilotes de Catedral (zona sur)

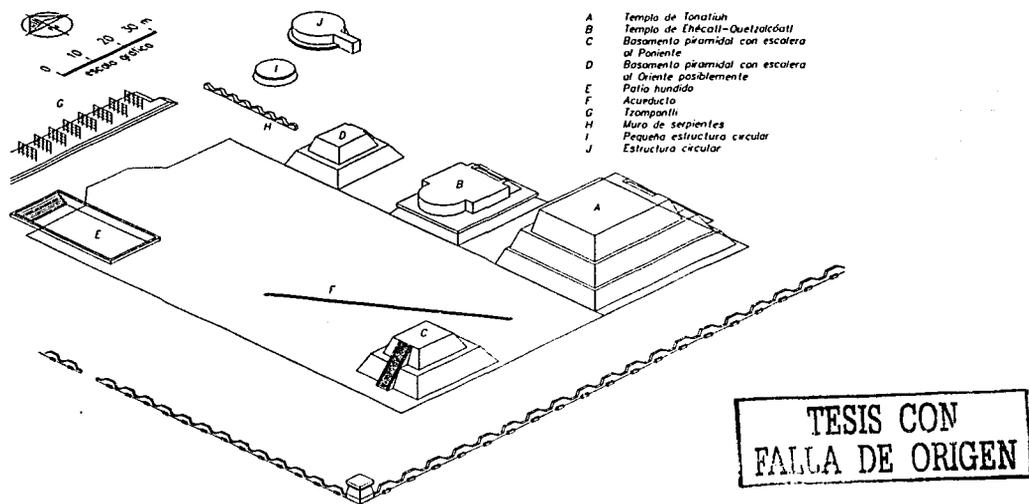


**SIMBOLOGÍA**

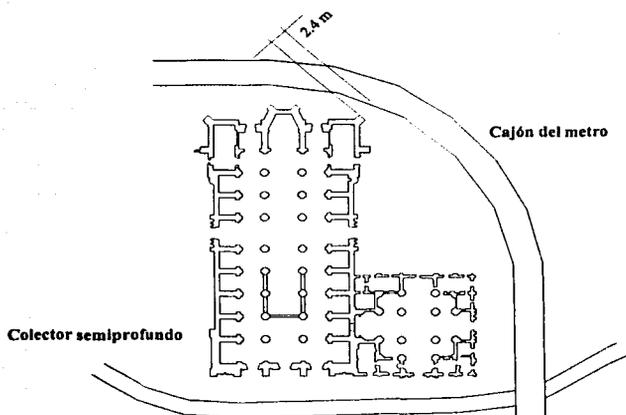
- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| ○ Pilotes cortos o de fricción | ⊞ Pilotes de punta con funda deformable |
| □ Pilotes inclinados o rotos   | ⊚ Pilotes sin clasificar                |
| △ Pilotes de punta             | ⊕ Perforación                           |
| * Pilotes de fricción negativa |   |

Fig. 7 Clasificación de pilotes de Sagrario

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



a) Ubicación aproximada de las construcciones prehispánicas



b) Cajón del metro y colector

Fig. 8 Estructuras en el perímetro de Catedral

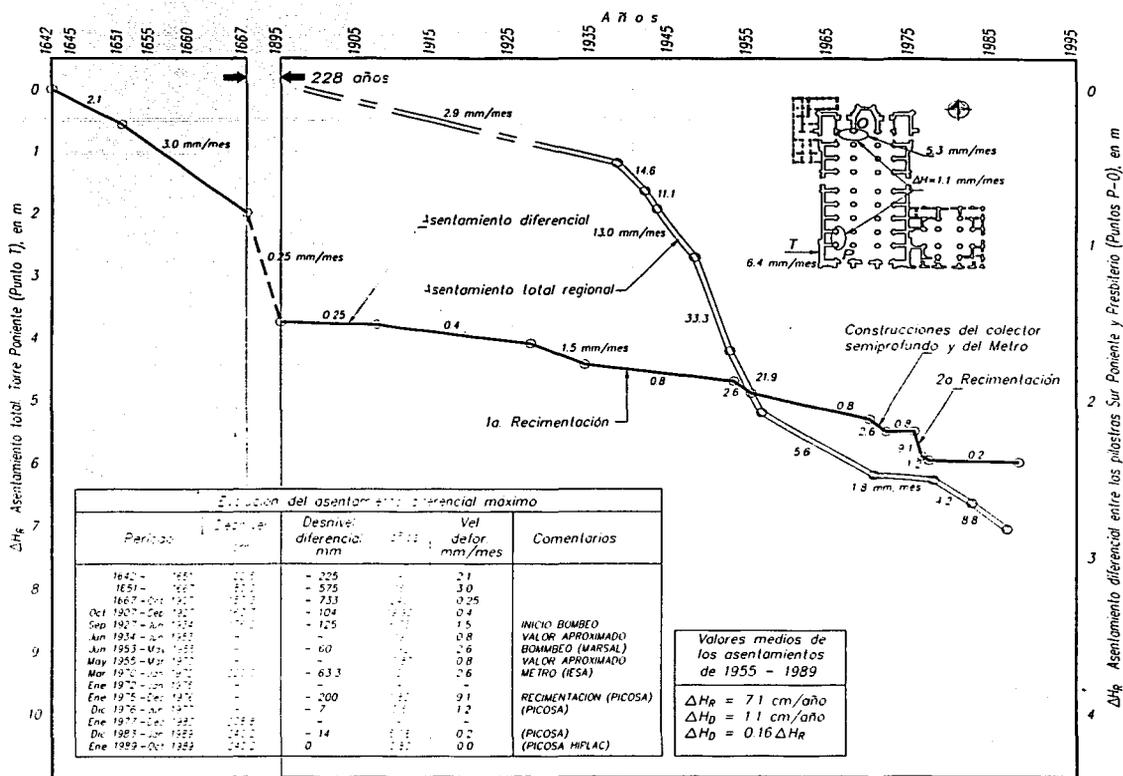
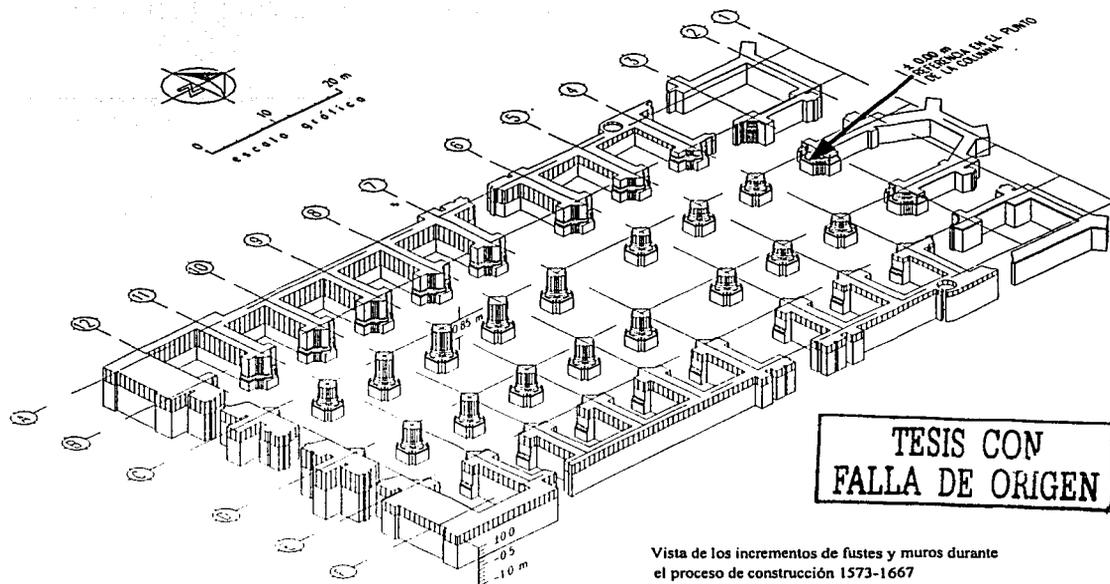
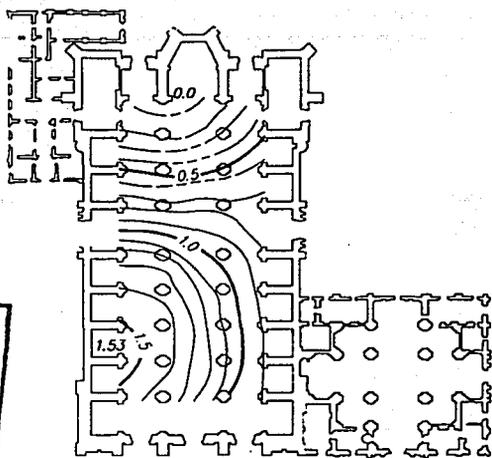


Fig. 9 Asentamiento regional y diferencial máximo

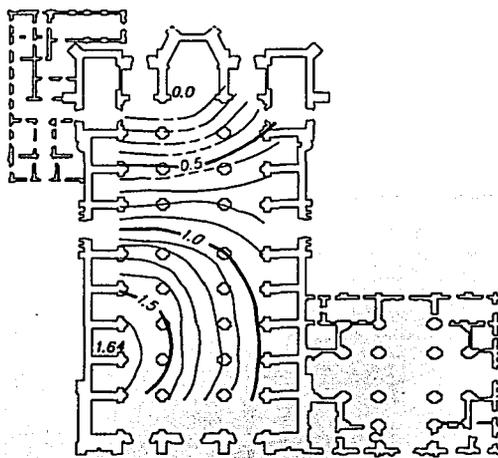
TESIS CON FALLA DE ORIGEN



*Fig. 10 Ajuste en la longitud del fuste en las columnas realizados en la Catedral*

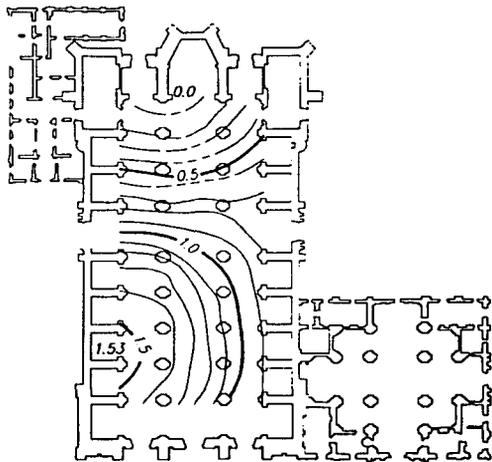


Octubre de 1907

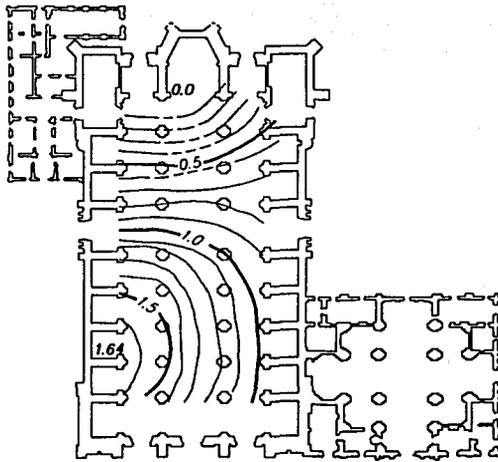


Septiembre de 1927

Configuraciones elaboradas con datos de la SPN



Junio de 1934



Junio de 1953- Mayo 1955

Configuración deducida con los perfiles de la SPN

Información obtenida por Marsal y Masari

Fig. 11a Evolución de los asentamientos diferenciales

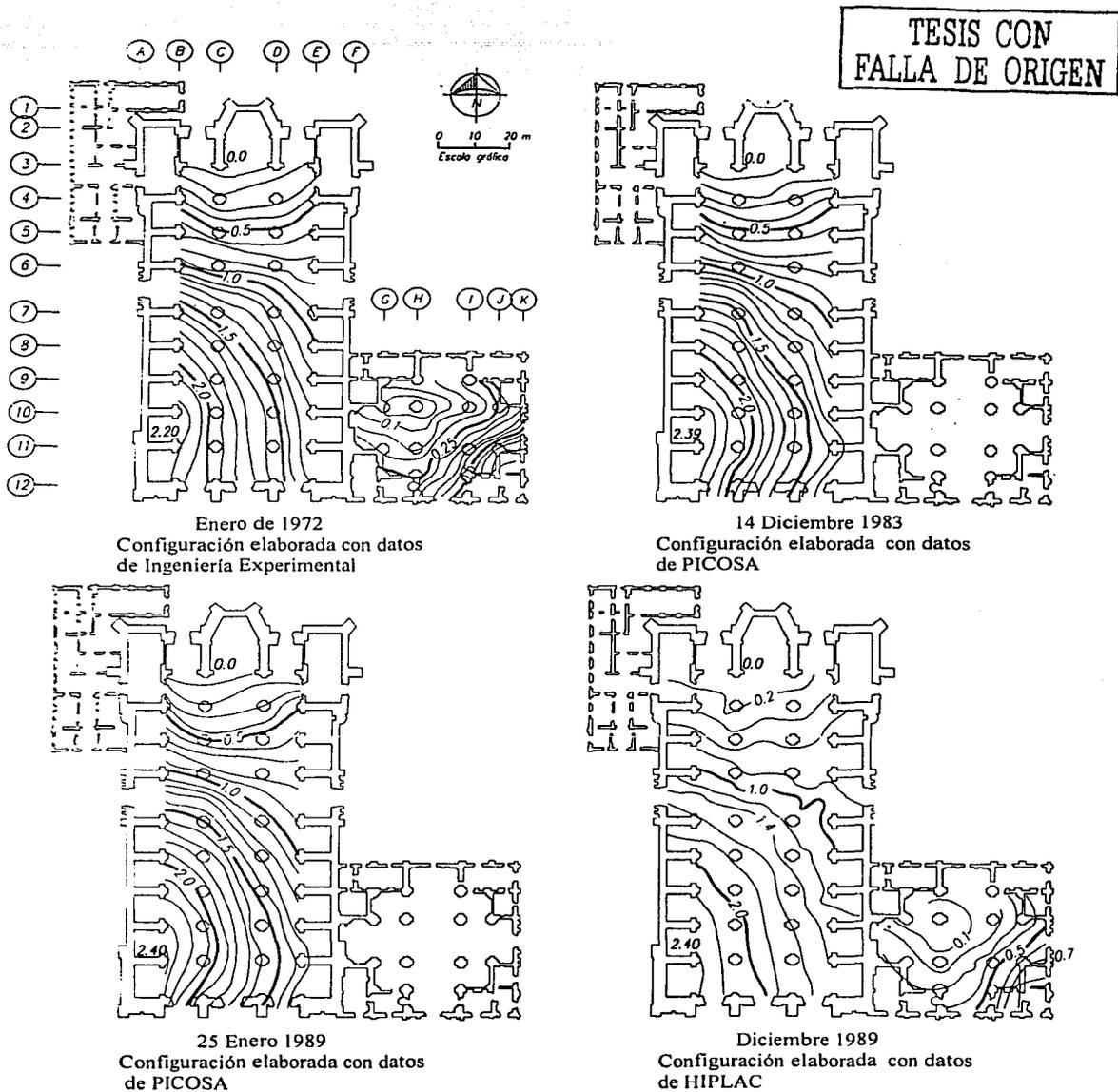


Fig. 11b Evolución de los asentamientos diferenciales

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

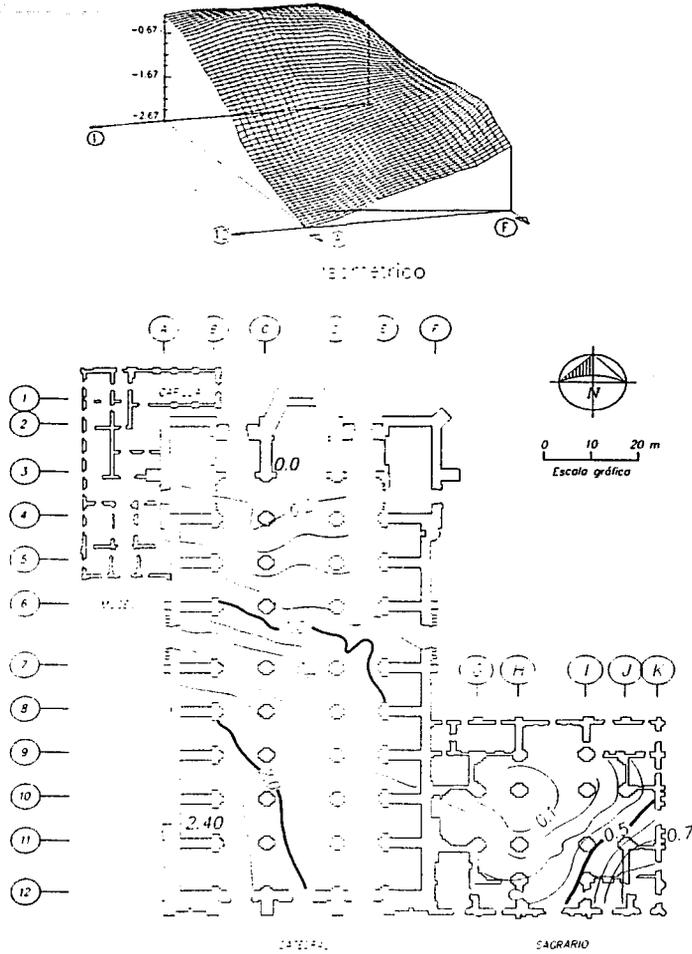
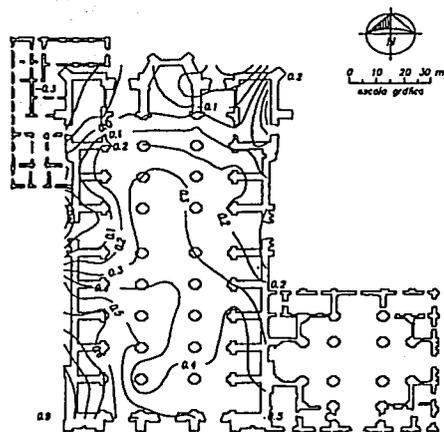
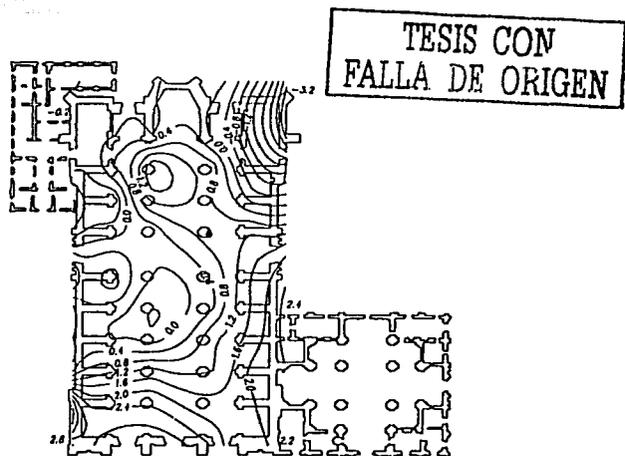


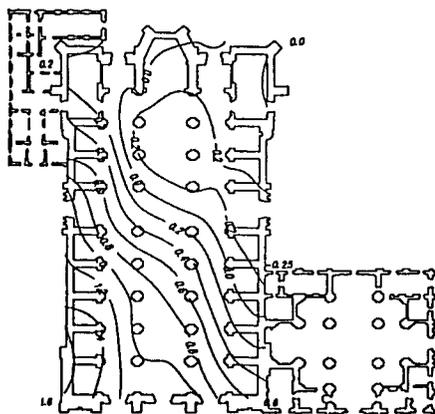
Fig. 11c Evolución de los asentamientos diferenciales (isométrico)



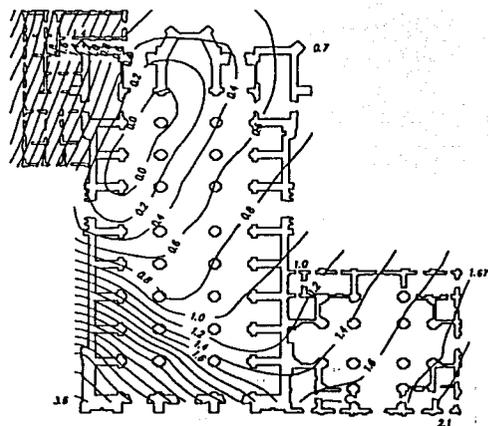
Oct 1907 (SPN) – Sep 1927 (SPN)



Sep 1927 (SPN) – Jun 1934 (SPN)



Jun 1934 (SPN) – Ene 1972 (IE)



Jun 1953- May 1955 (Marsal y Masari)

Fig. 12a Curvas velocidad anualizadas



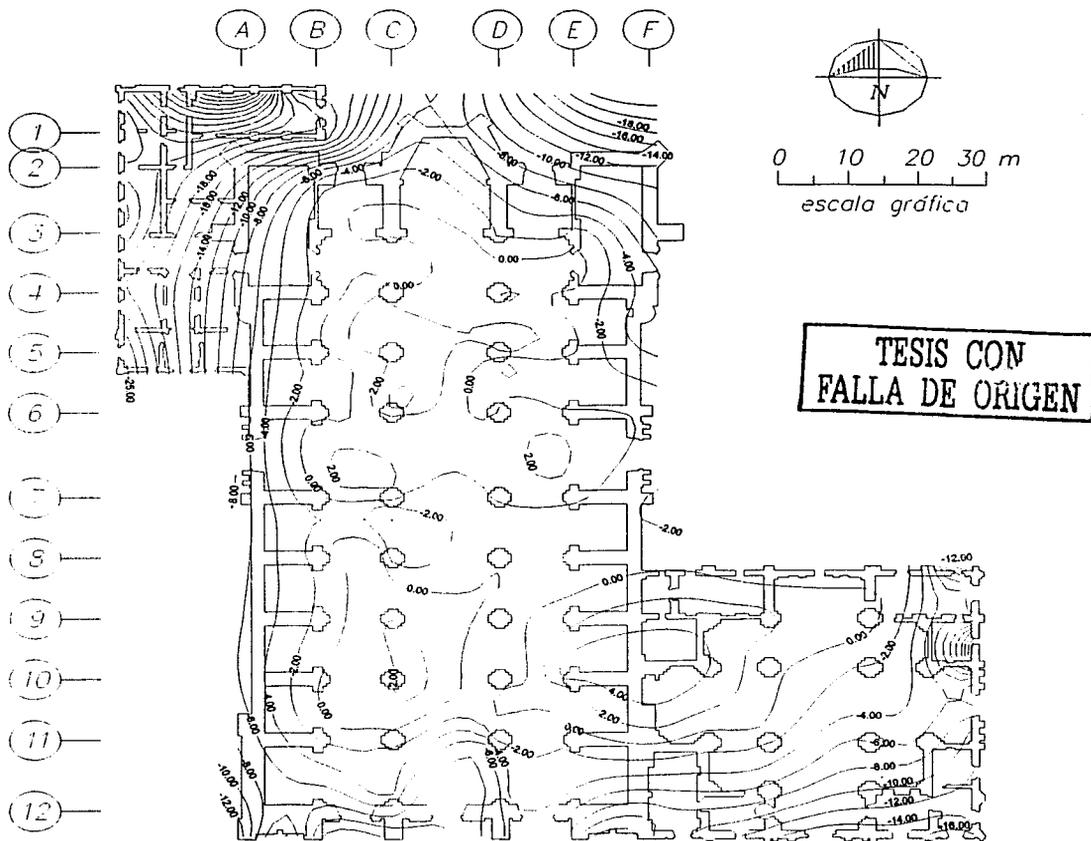


Fig. 13 Configuración de velocidades (mm/año), en el periodo enero de 1991 a septiembre de 1991

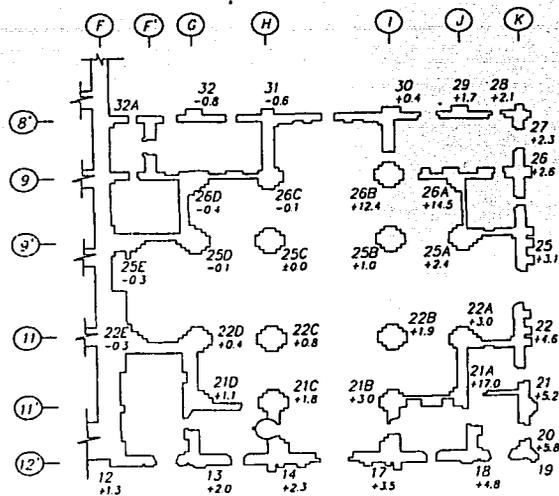
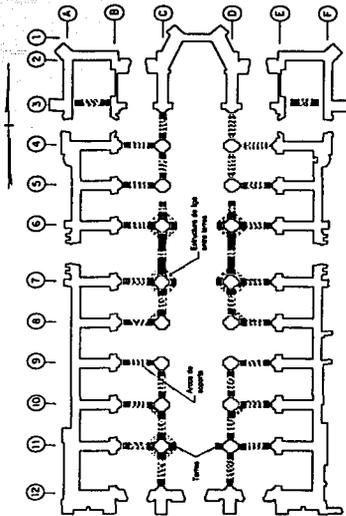


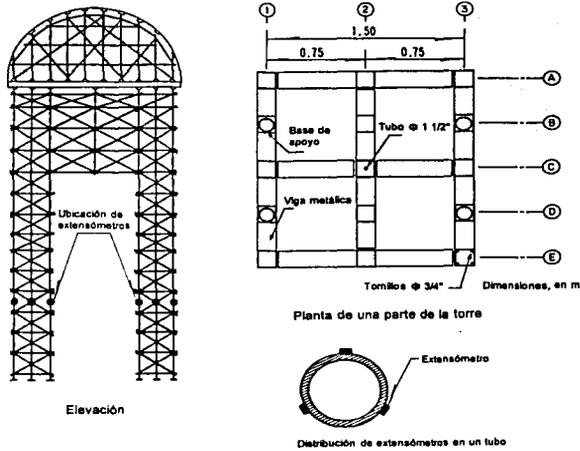
Fig. 14 Asentamiento diferencial en Sagrario de diciembre de 1983 a enero de 1989

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

a) Zonas apuntaladas



b) Esquema de una torre de apuntalamiento

Fig. 15 Apuntalamiento de la estructura

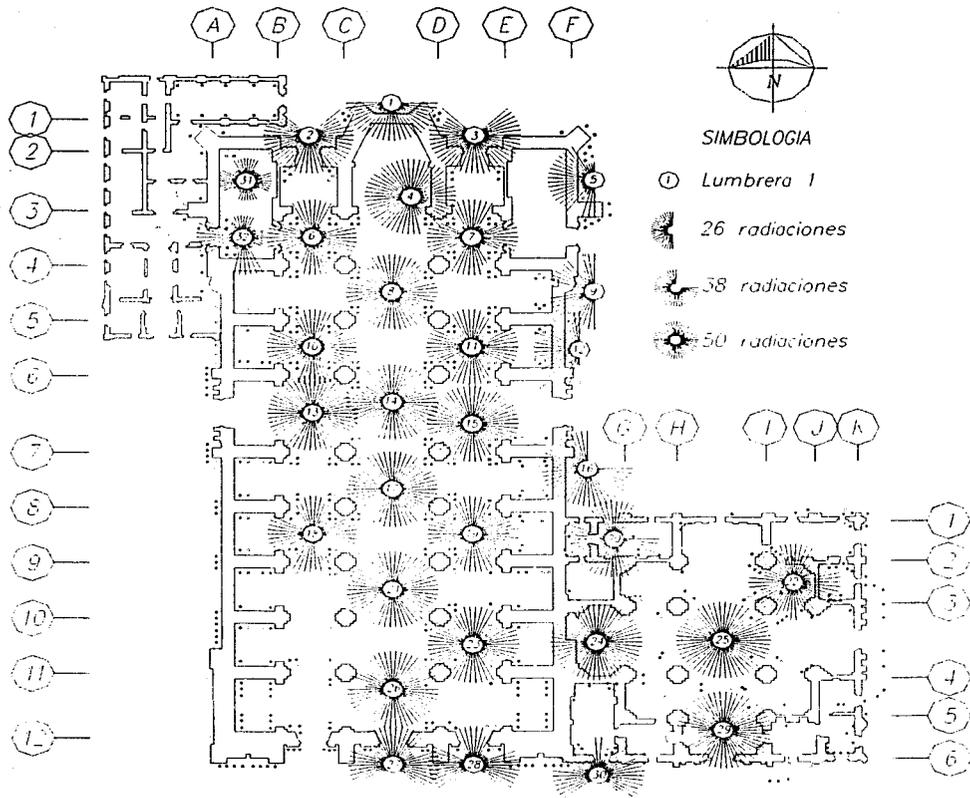


Fig. 16 Localización de luminarias

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

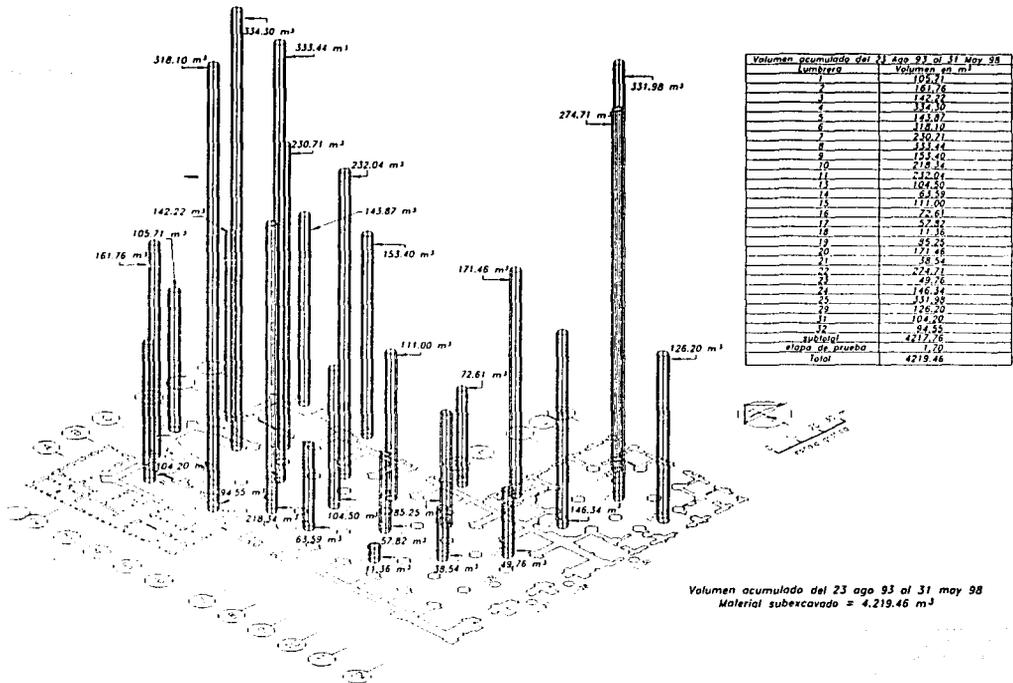


Fig. 17 Volumen extraido en lumbresas

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

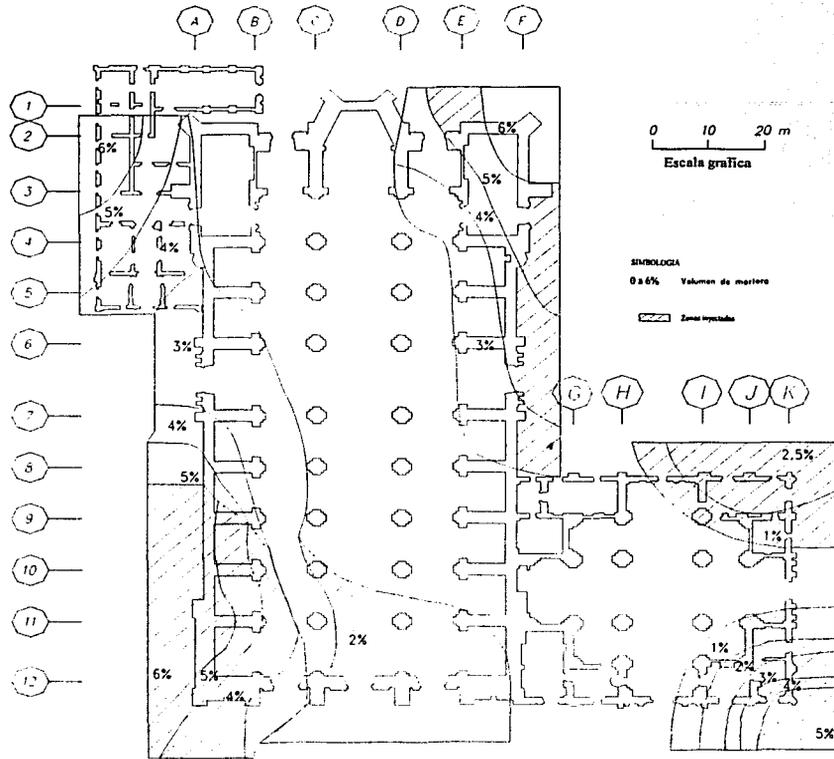


Fig. 18 Zonas inyectadas con mortero

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

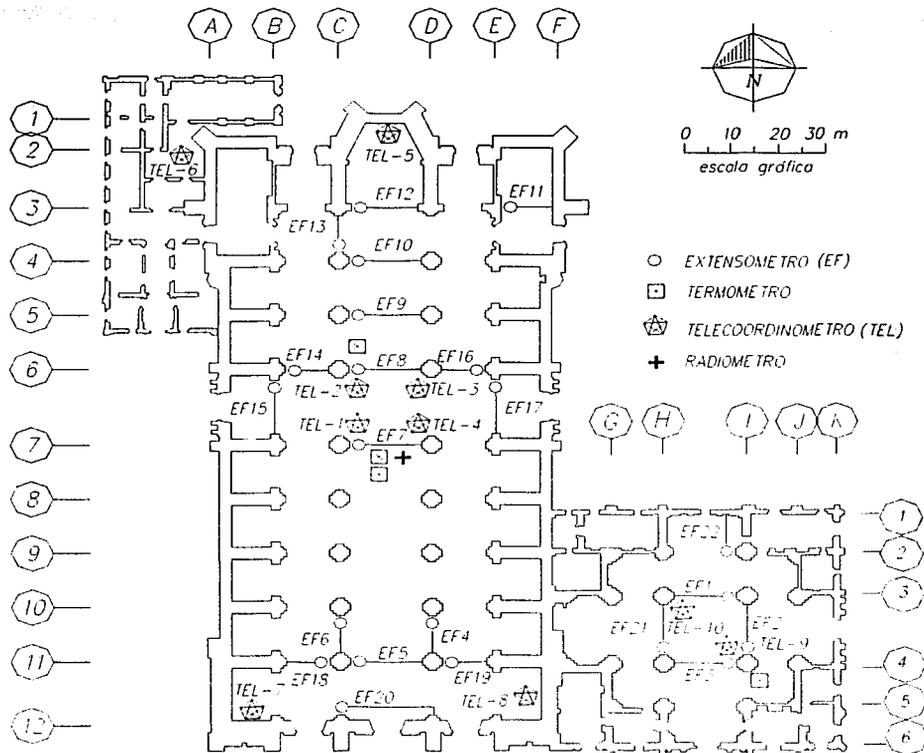


Fig. 19 Localización de los sensores del sistema automático de monitoreo

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

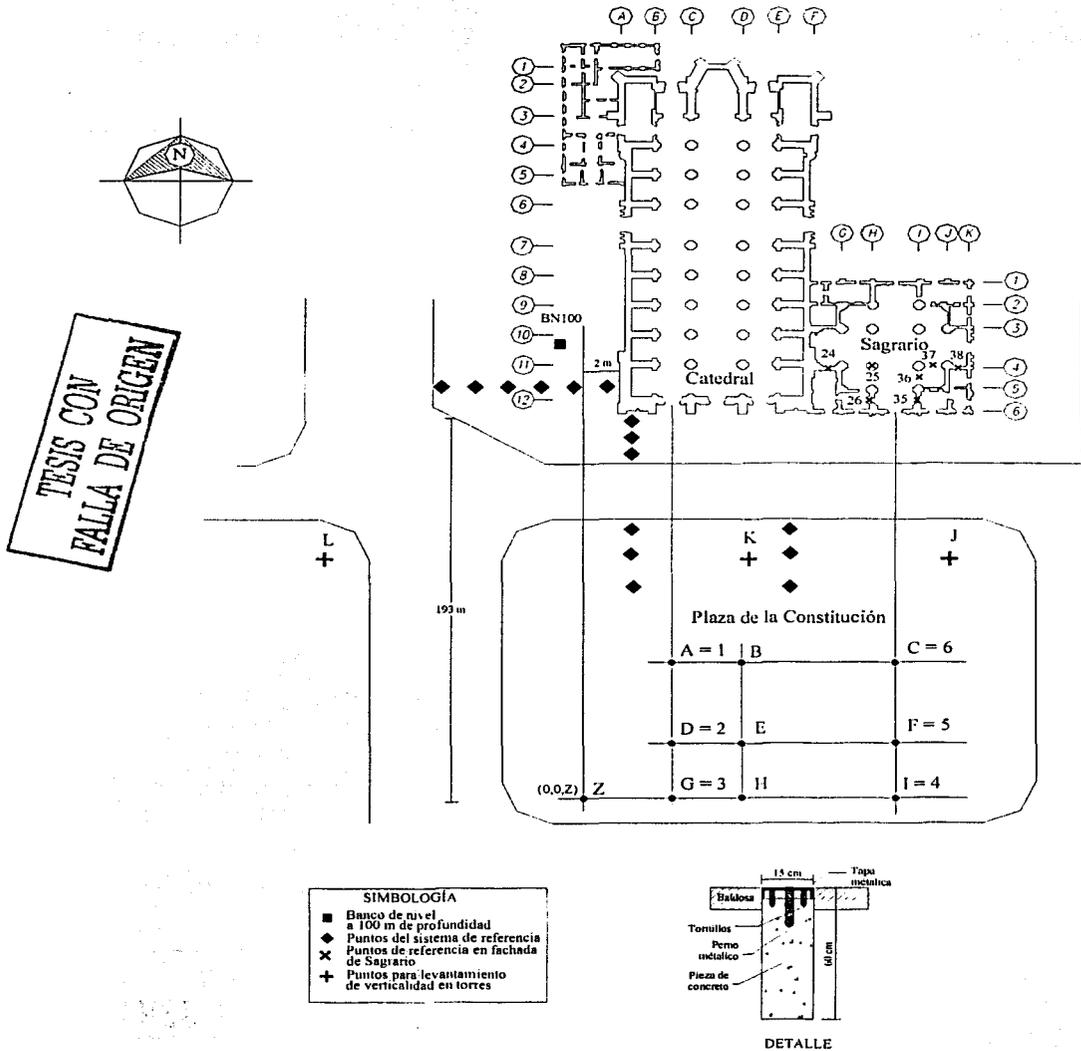
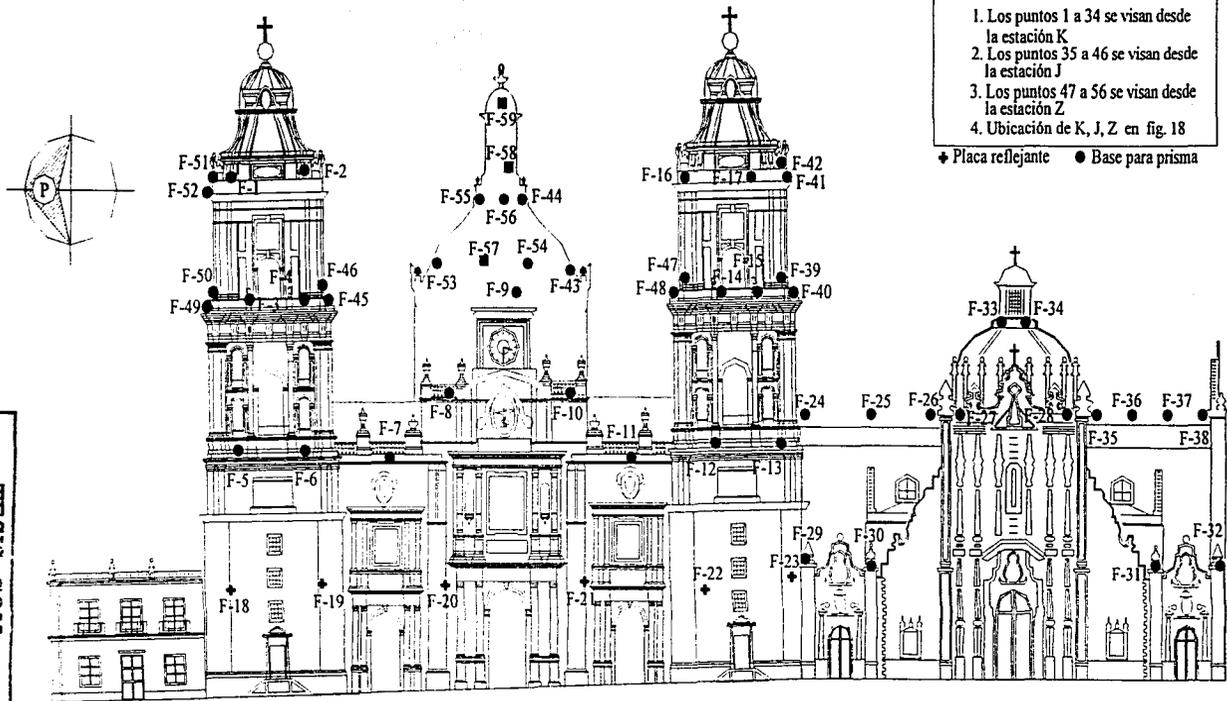


Fig. 20 Puntos de referencia ubicados en la plaza de la Constitución



NOTAS:  
 1. Los puntos 1 a 34 se visan desde la estación K  
 2. Los puntos 35 a 46 se visan desde la estación J  
 3. Los puntos 47 a 56 se visan desde la estación Z  
 4. Ubicación de K, J, Z en fig. 18

◆ Placa reflejante ● Base para prisma

Fig. 21 Puntos de control instalados en la fachada sur y cúpulas

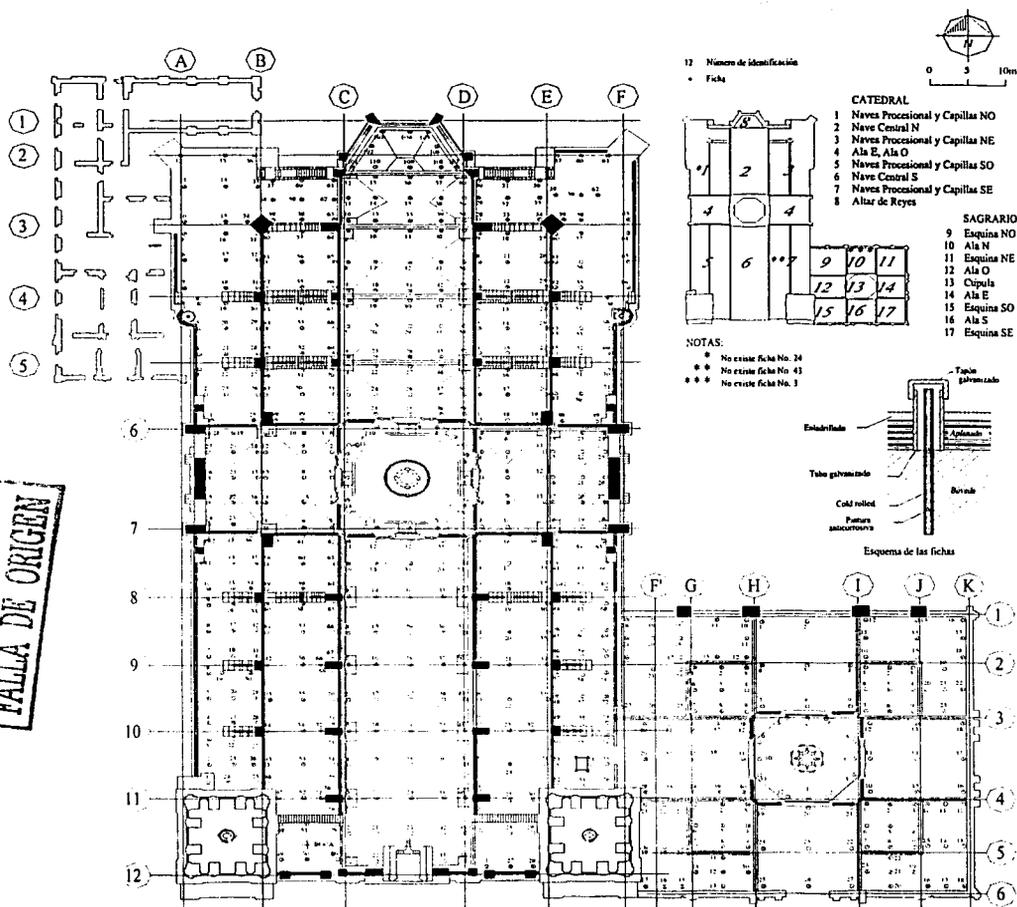


Fig. 22 Puntos de control instalados en las bóvedas

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

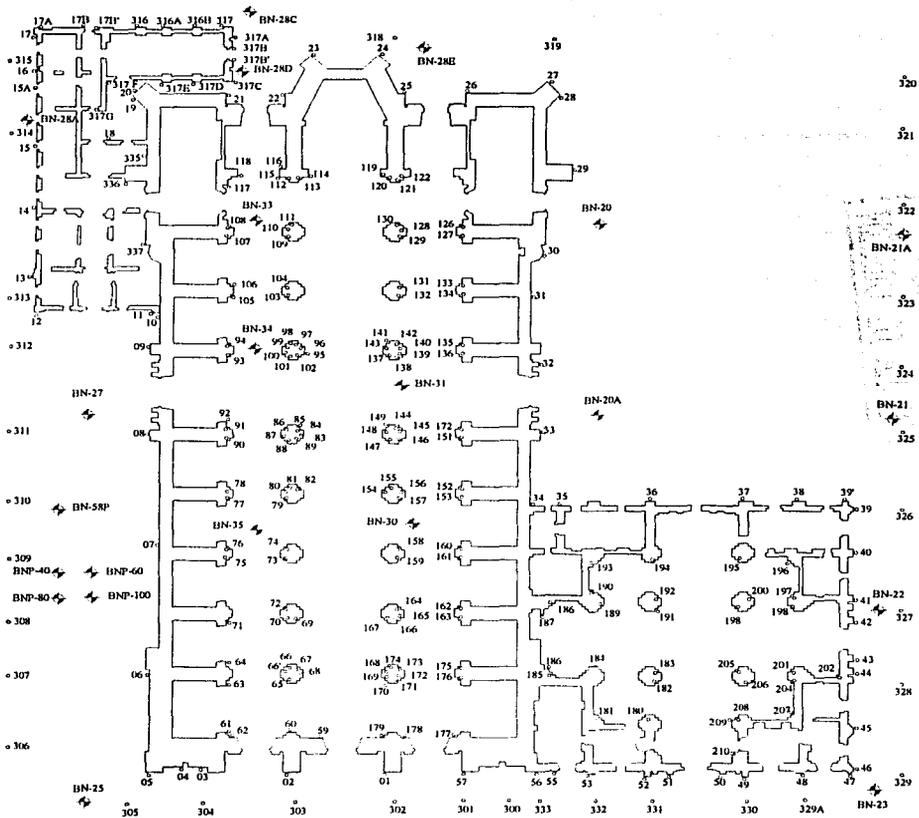


Fig. 23 Puntos de control instalados en piso de feligresía y a nivel de plintos

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

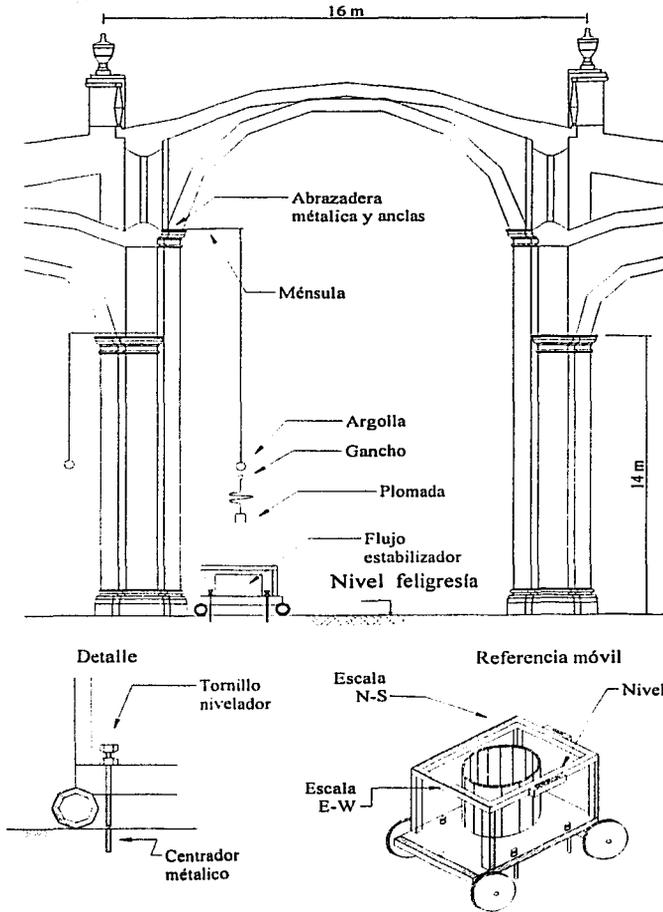


Fig. 24 Equipo utilizado para la toma de lecturas de plomadas

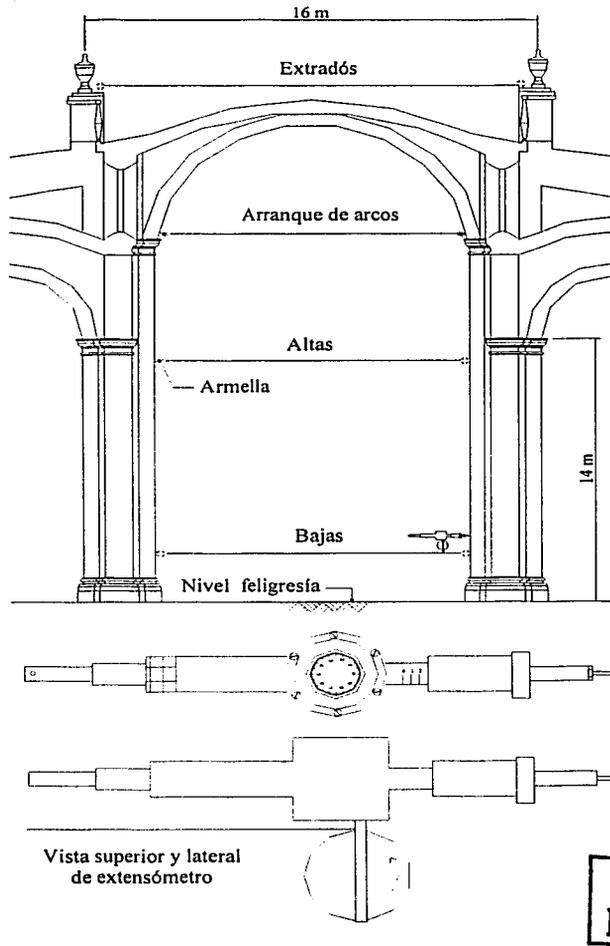
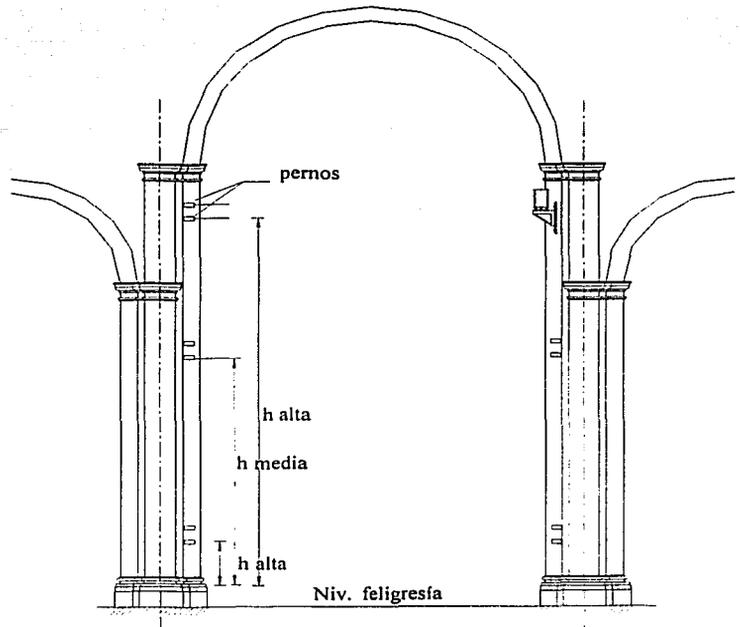


Fig. 25 Esquema del equipo utilizado para la toma de lecturas de convergencias



Esquema de medición

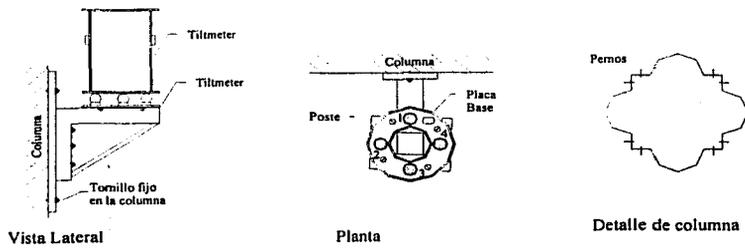


Fig. 26 Equipo utilizado para medir el giro de columnas con tiltmeter

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

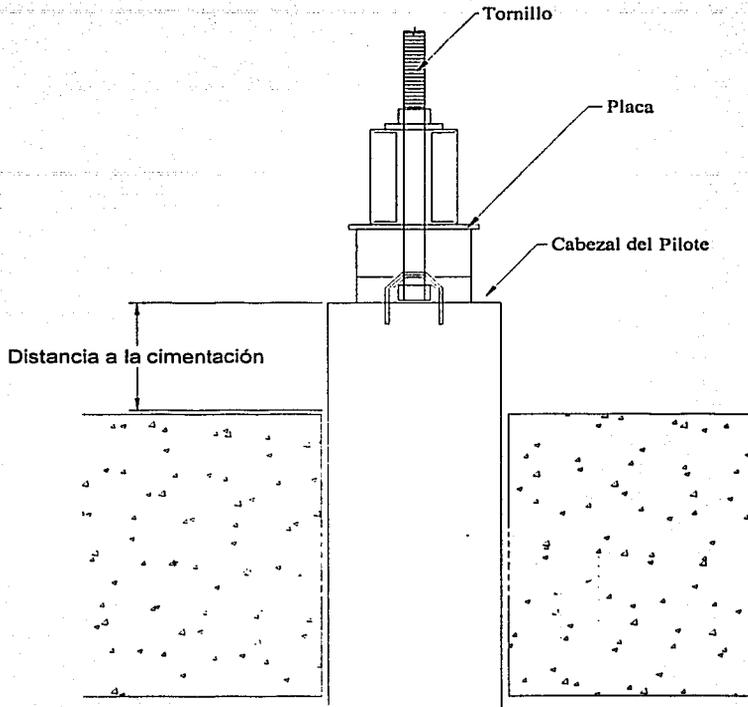


Fig. 27. Medición de la emersión de los pilotes

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

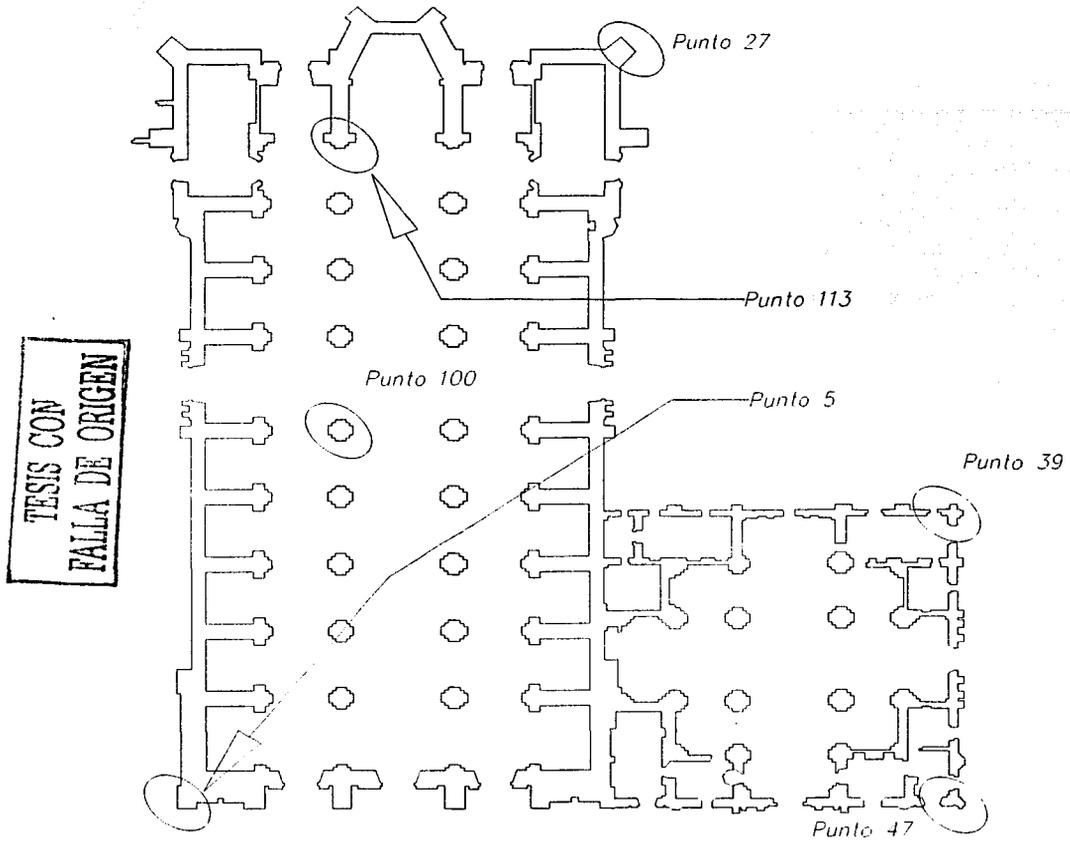


Fig. 28 Localización de los principales puntos de control a nivel de plintos

**Historia comparada del punto 27 contra el punto 5 durante el periodo Oct-91 a Dic-02**

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

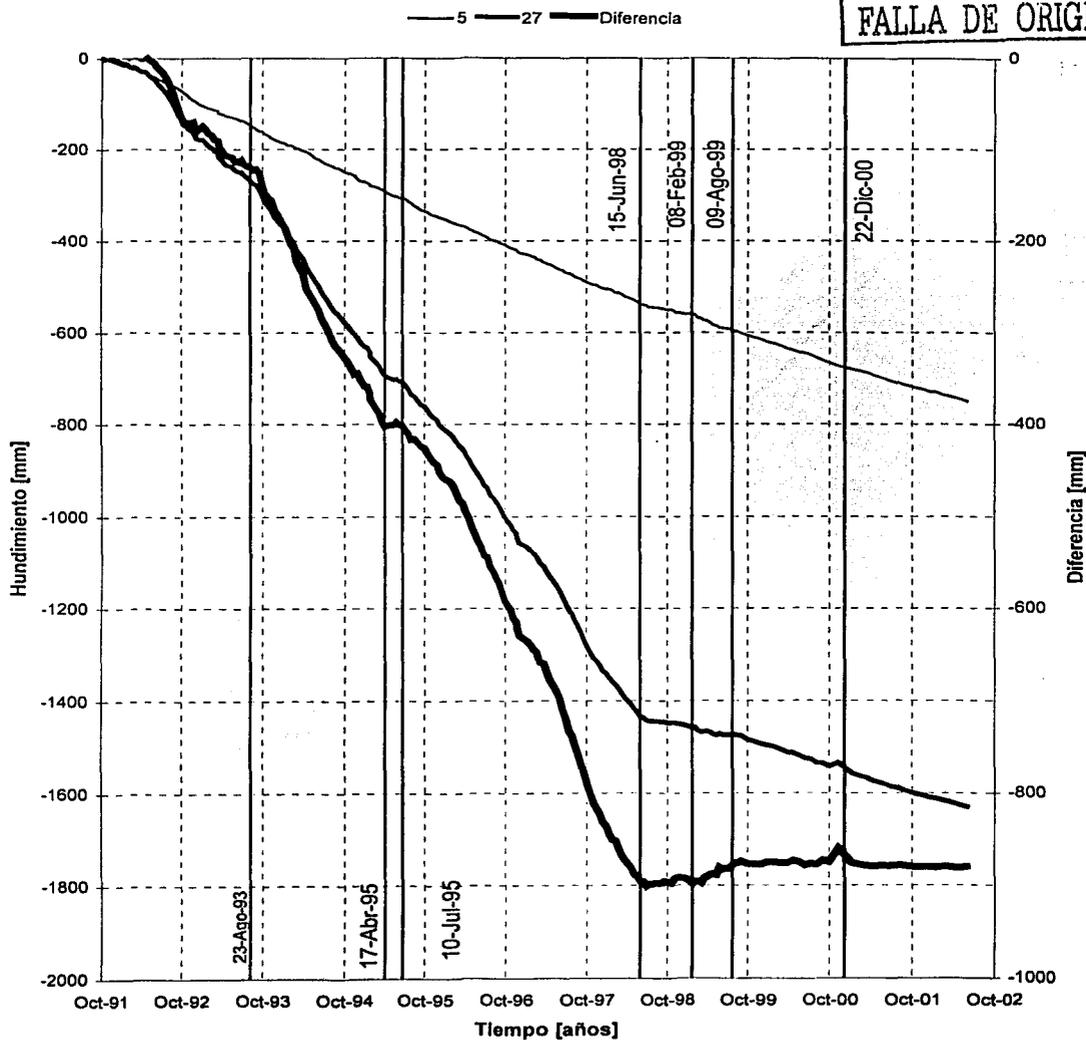


Fig. 29a Evolución del hundimiento de la estructura

**Historia comparada del punto 39 contra el punto 5 durante el periodo Oct-91 a Dic-02**

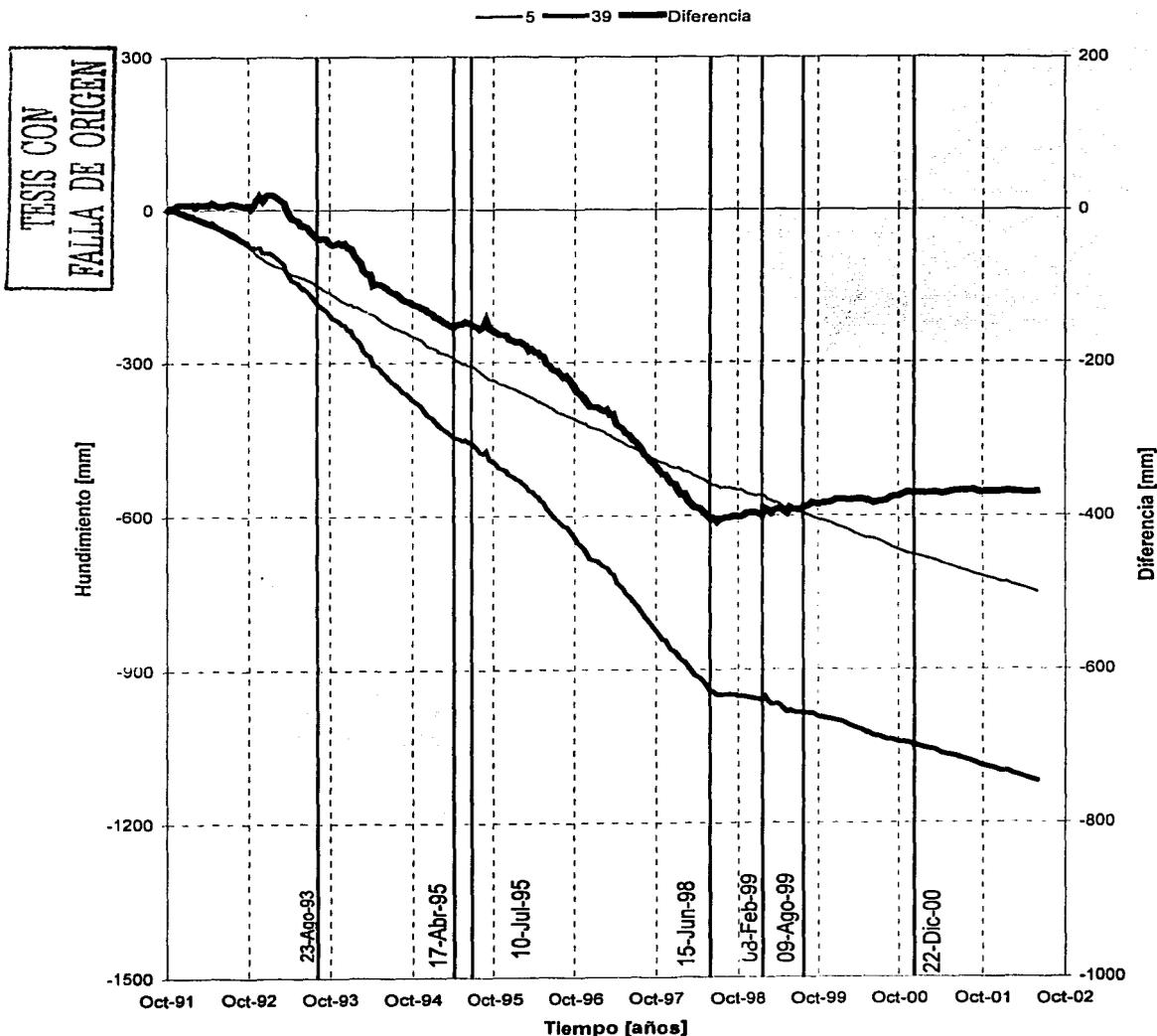


Fig. 29b Evolución del hundimiento de la estructura

**Historia comparada del punto 47 contra el punto 5 durante el periodo Oct-91 a Dic-02**

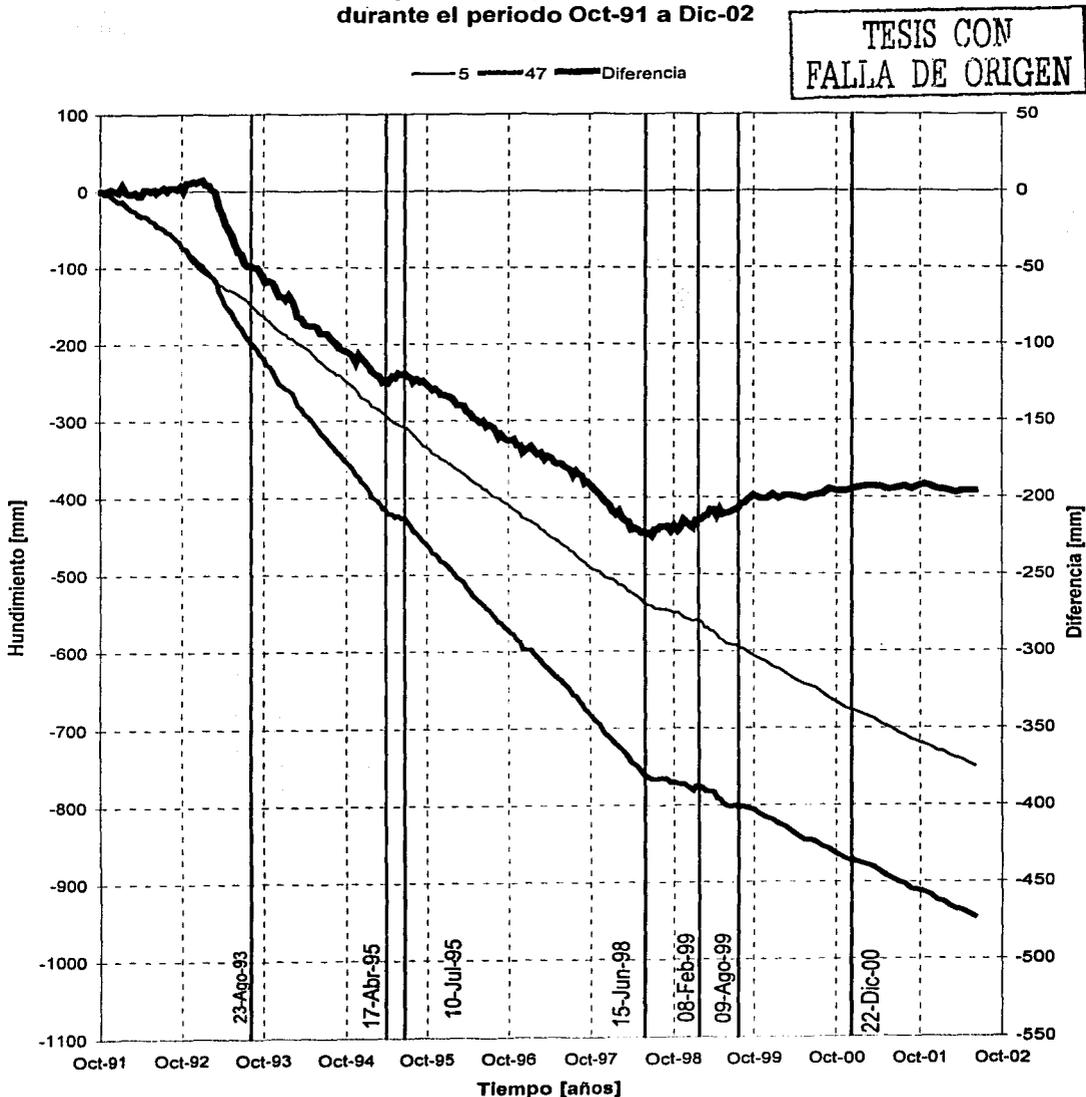


Fig. 29c Evolución del hundimiento de la estructura

Historia comparada del punto 100 contra el punto 5 durante el periodo Oct-91 a Dic-02

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

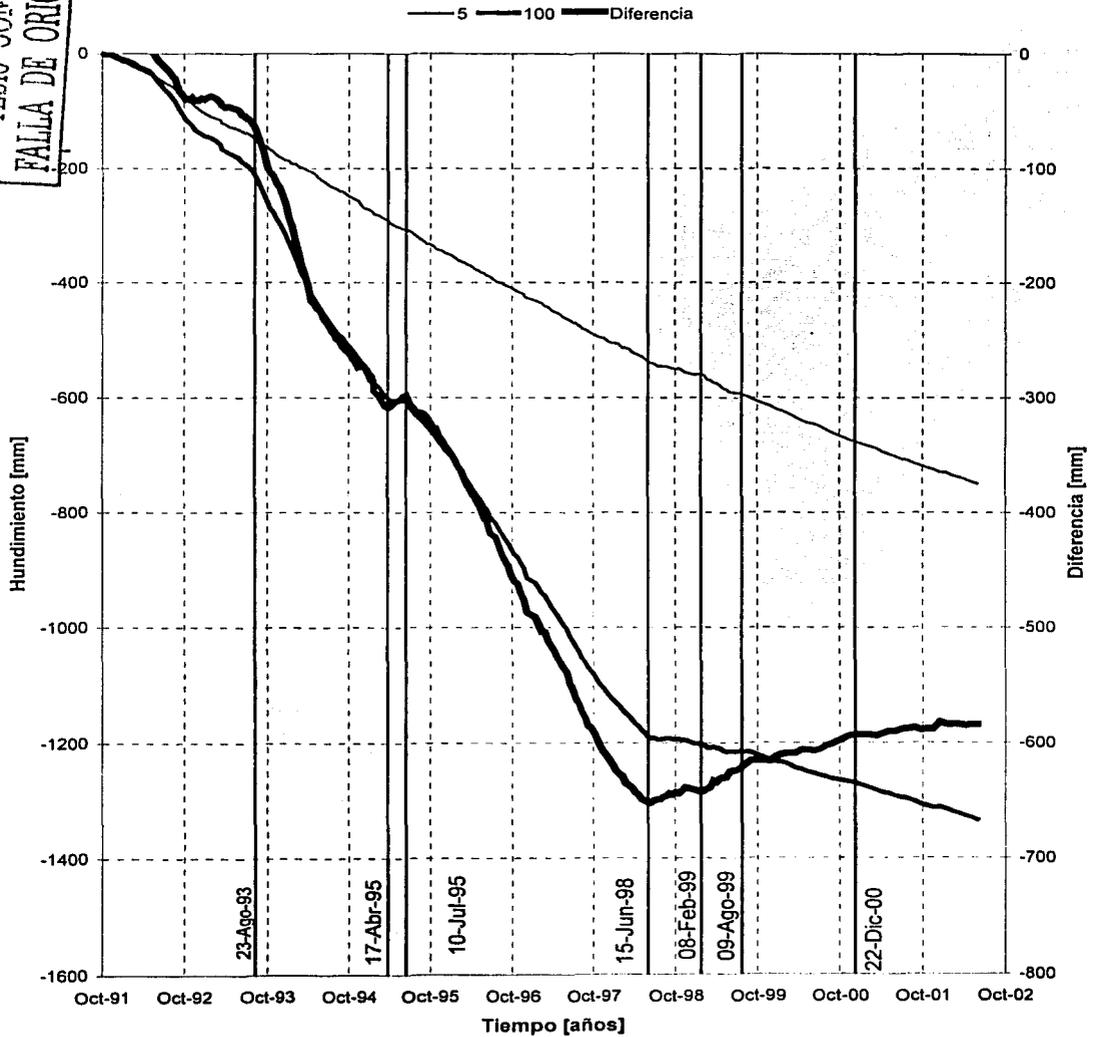


Fig. 29d Evolución del hundimiento de la estructura

Historia comparada del punto 113 contra el punto 5  
durante el periodo Oct-91 a Dic-02

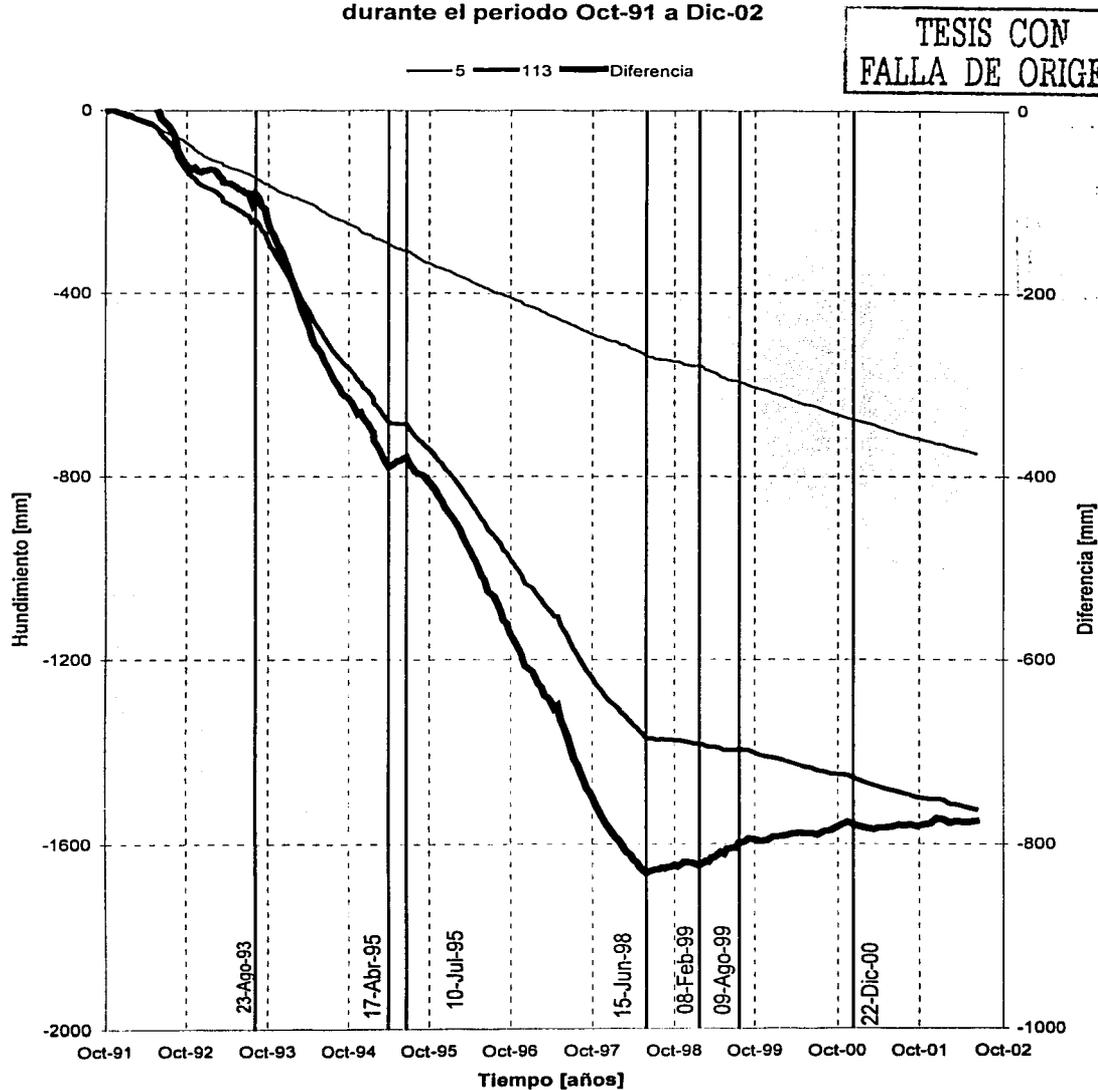


Fig. 29e Evolución del hundimiento de la estructura

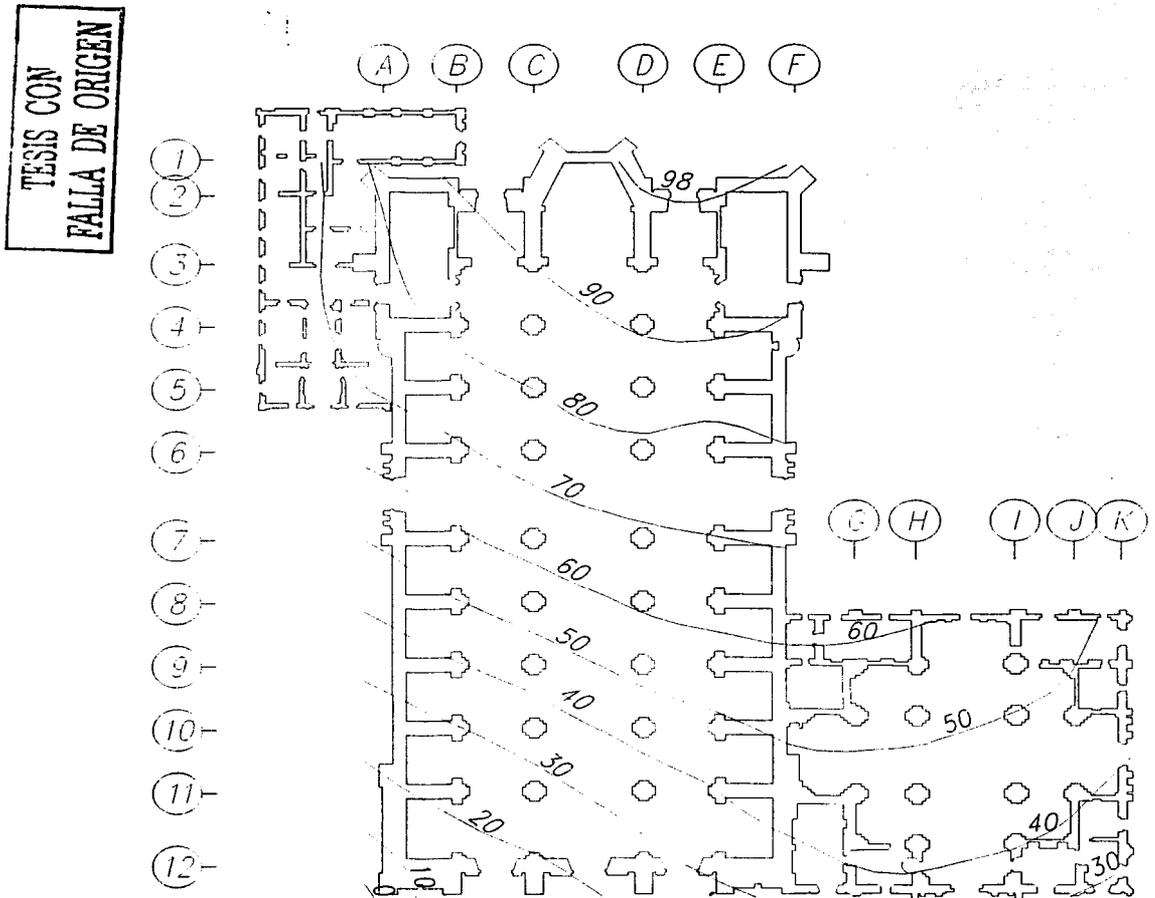
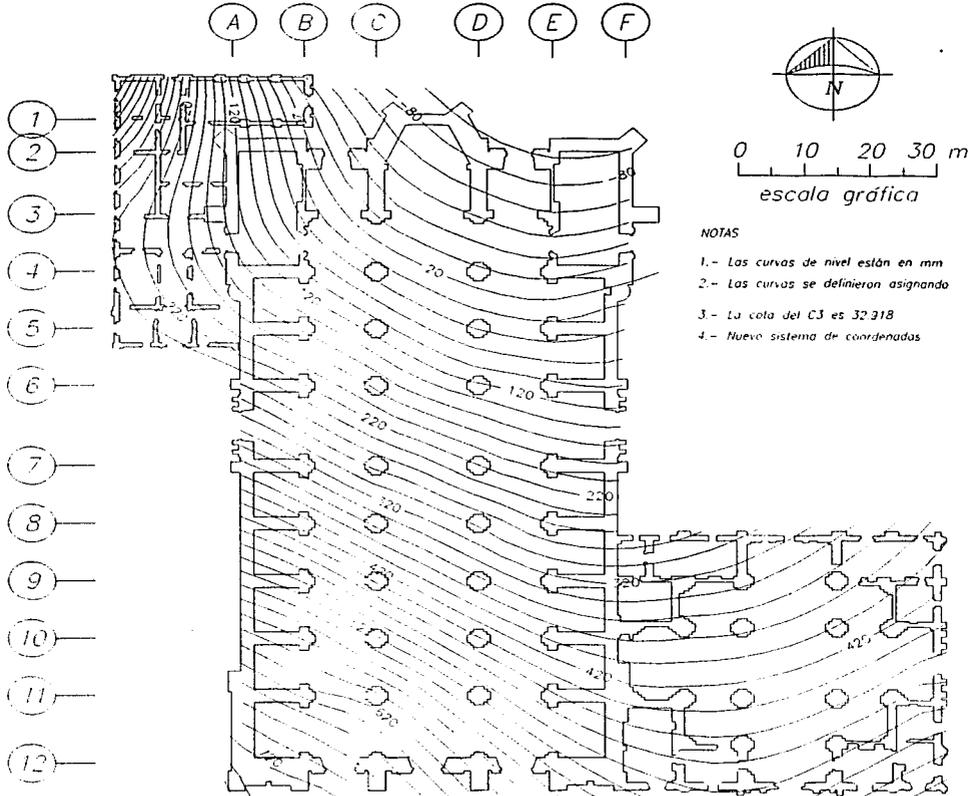


Fig. 30 *Curvas de igual hundimiento registradas al termino de la subexcavación (Junio de 1998)*

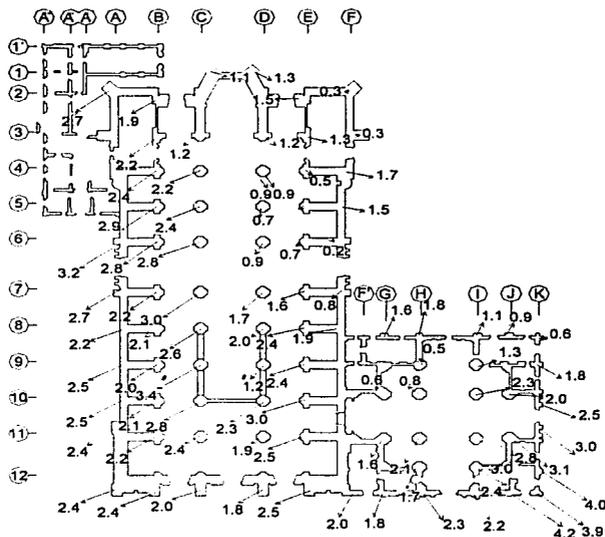


Diferencia entre la 1a y 245a nivelación  
elaboradas por TGC (25/oct/91 - 30/dic/02)

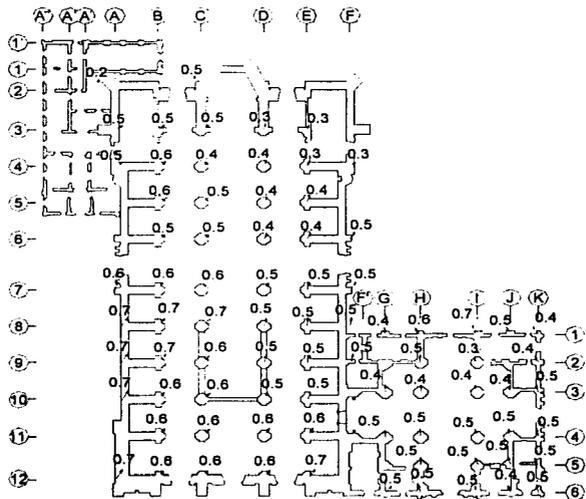
Fig. 31 Curvas de igual hundimiento registradas en Diciembre de 2002

TESTS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



a) Desplomos totales de muros y columnas medidos al inicio de los trabajos



b) Cambios de los desplomos producidos entre 1993 y 1998

Fig. 32 Comparación entre los desplomos iniciales en muros y columnas y las correcciones logradas con subexcavación

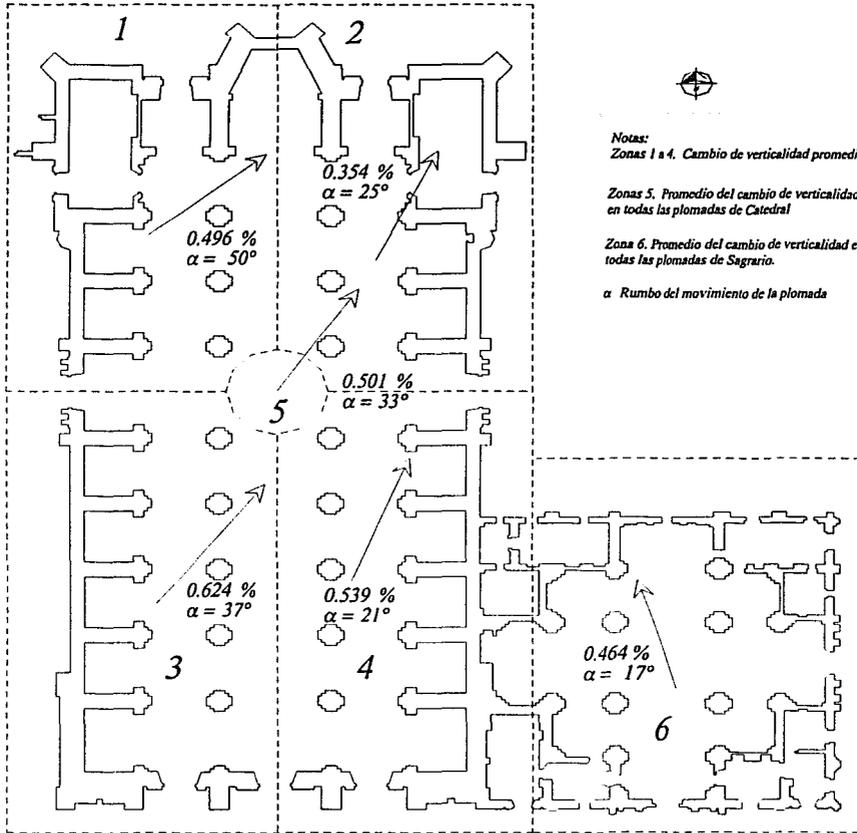
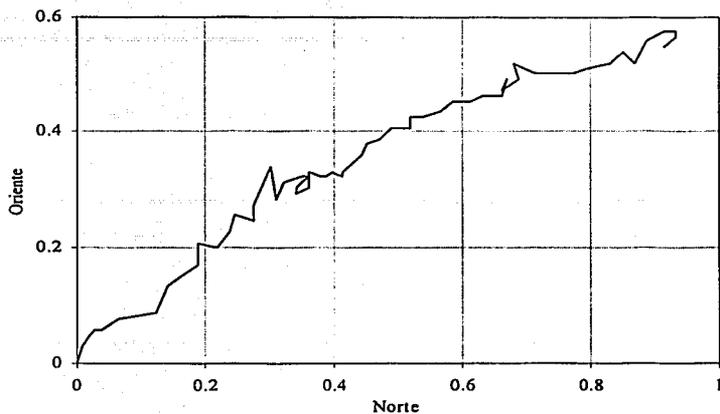


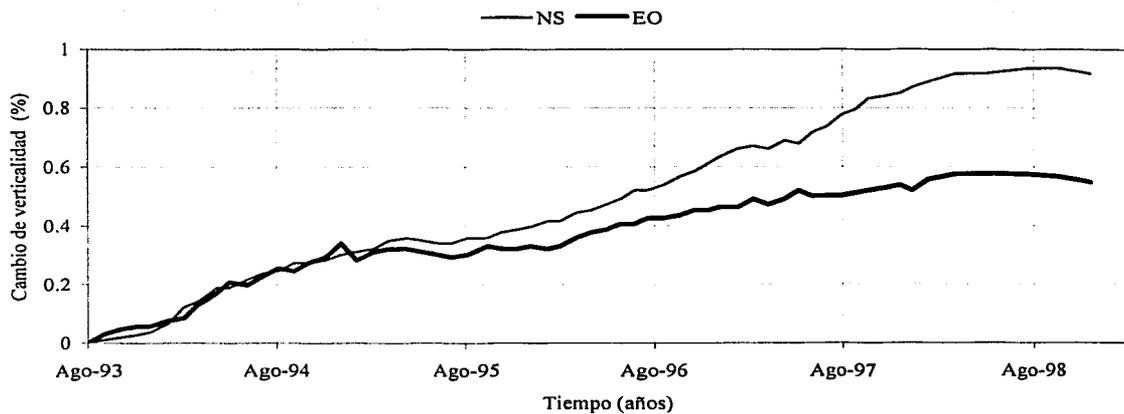
Fig. 33 Promedio del cambio de verticalidad de muros y columnas en Catedral y Sagrario

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



a) Trayectoria de la plomada F12 en el periodo comprendido entre 1993- 1998



b) Evolución del movimiento de registrado en la plomada F12 entre 1993- 1998

Fig. 34 Evolución típica del cambio de verticalidad inducido por la subexcavación

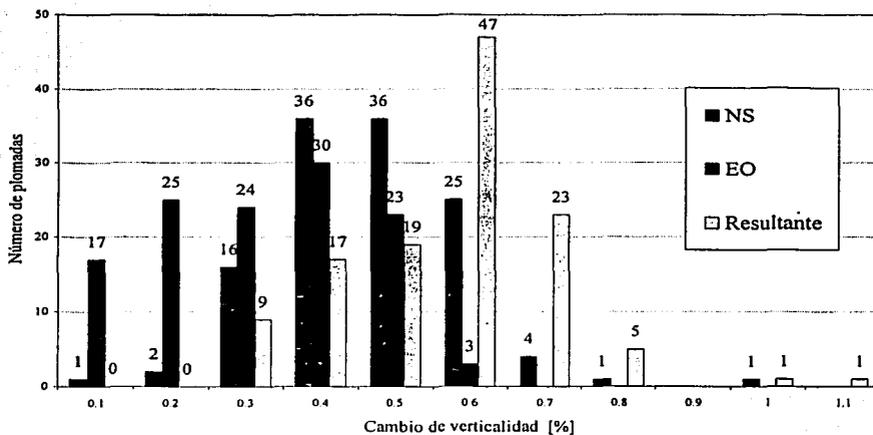


Fig. 35 Distribución del movimiento registrado en las plomadas de Catedral

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

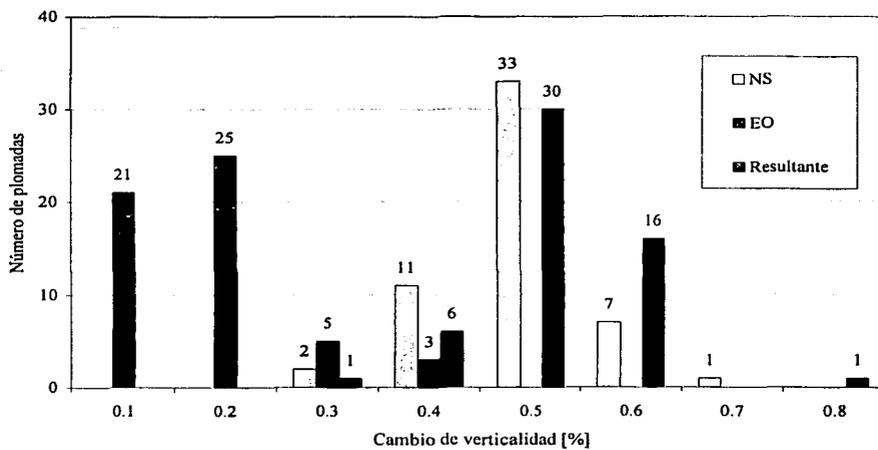
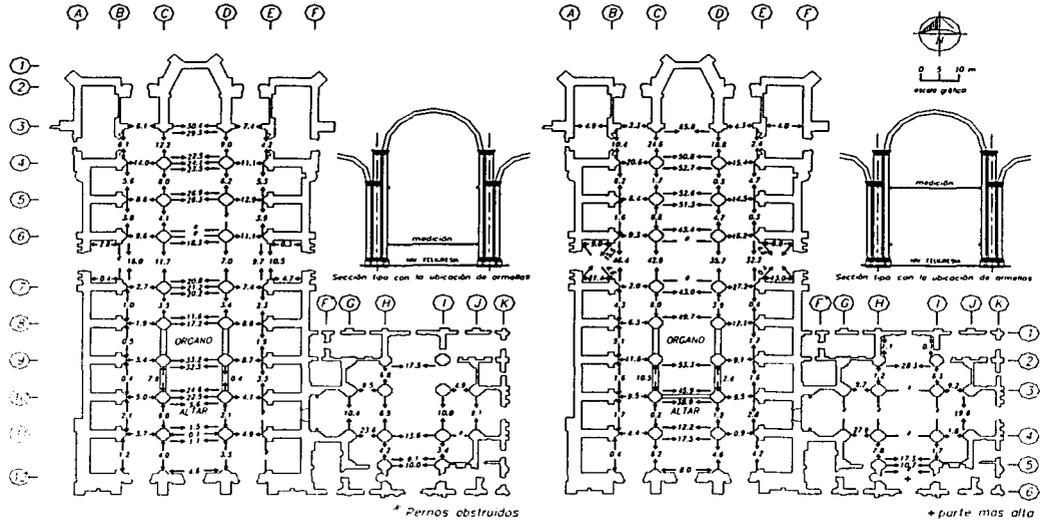


Fig. 36 Distribución del movimiento registrado en las plomadas de Sagrario

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



Convergencias entre Agosto 33 y Junio 98

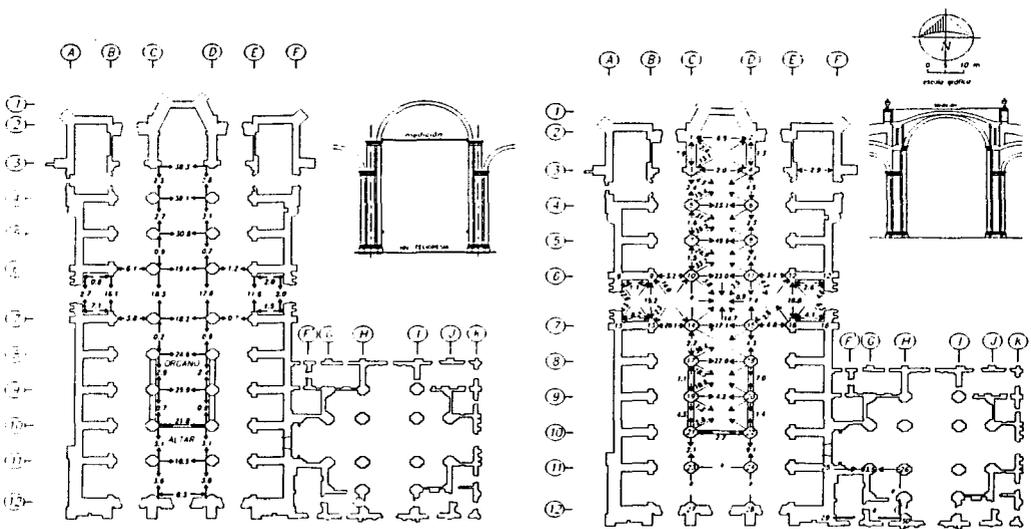
Convergencias en mm

Convergencias entre Agosto 93 y Junio 98

parte mas alta

BAJAS

ALTAS



Convergencia entre Septiembre 94 y Junio 98

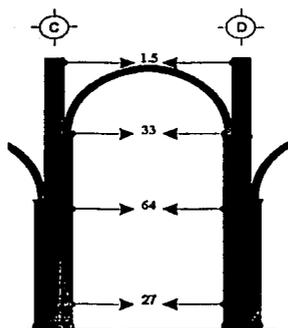
Convergencias en mm

Convergencia entre Enero 94 y Junio 98

ARRANQUE DE ARCOS

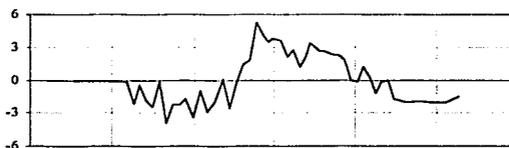
EXTRADOS

Fig. 37 Cambios de longitud en los claros de las secciones

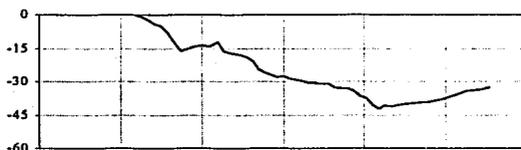


Convergencias en mm, medidas en el Eje 3

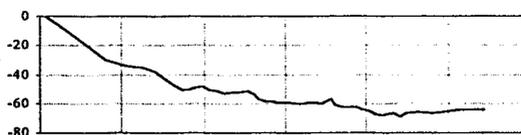
TESIS CON FALLA DE ORIGEN



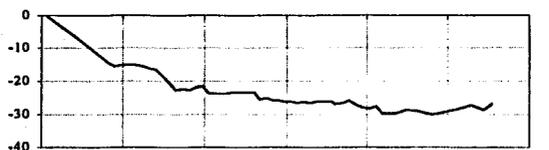
Extradós



Arranque de arcos



Altas



Bajas

Fig. 38 Evolución típica del cambio de claro en las secciones a distintas alturas

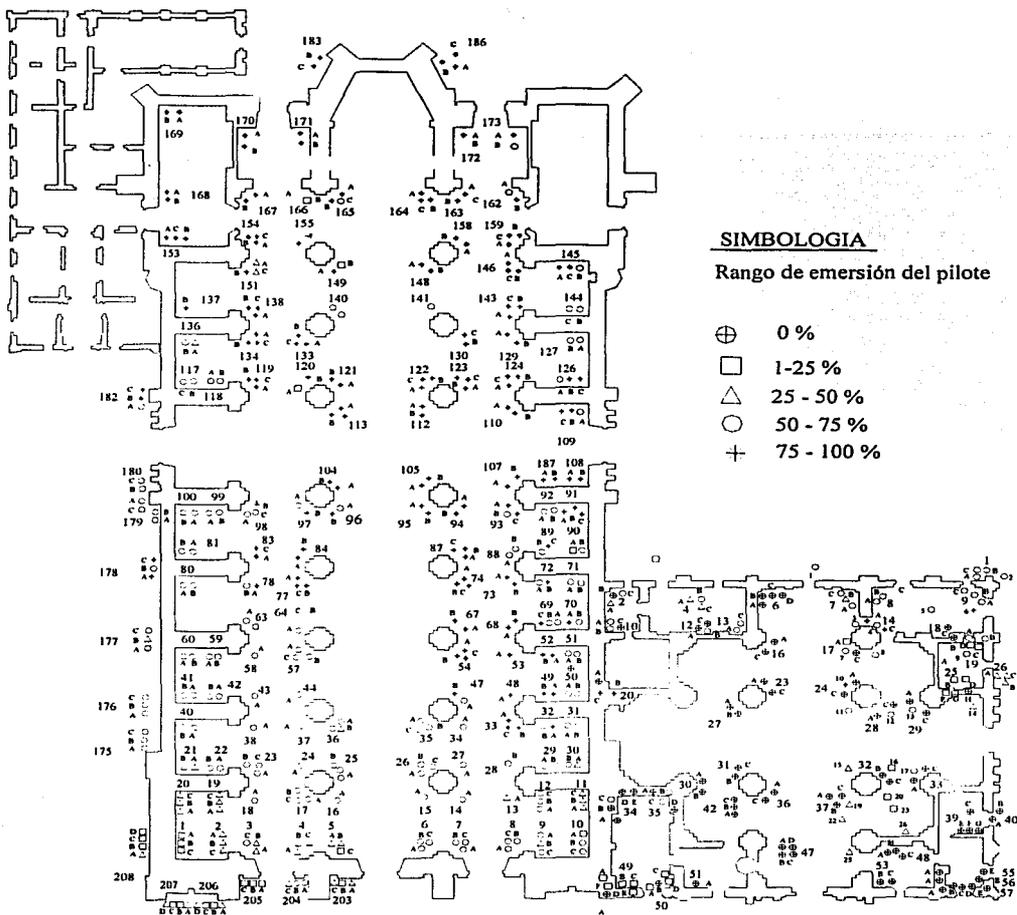
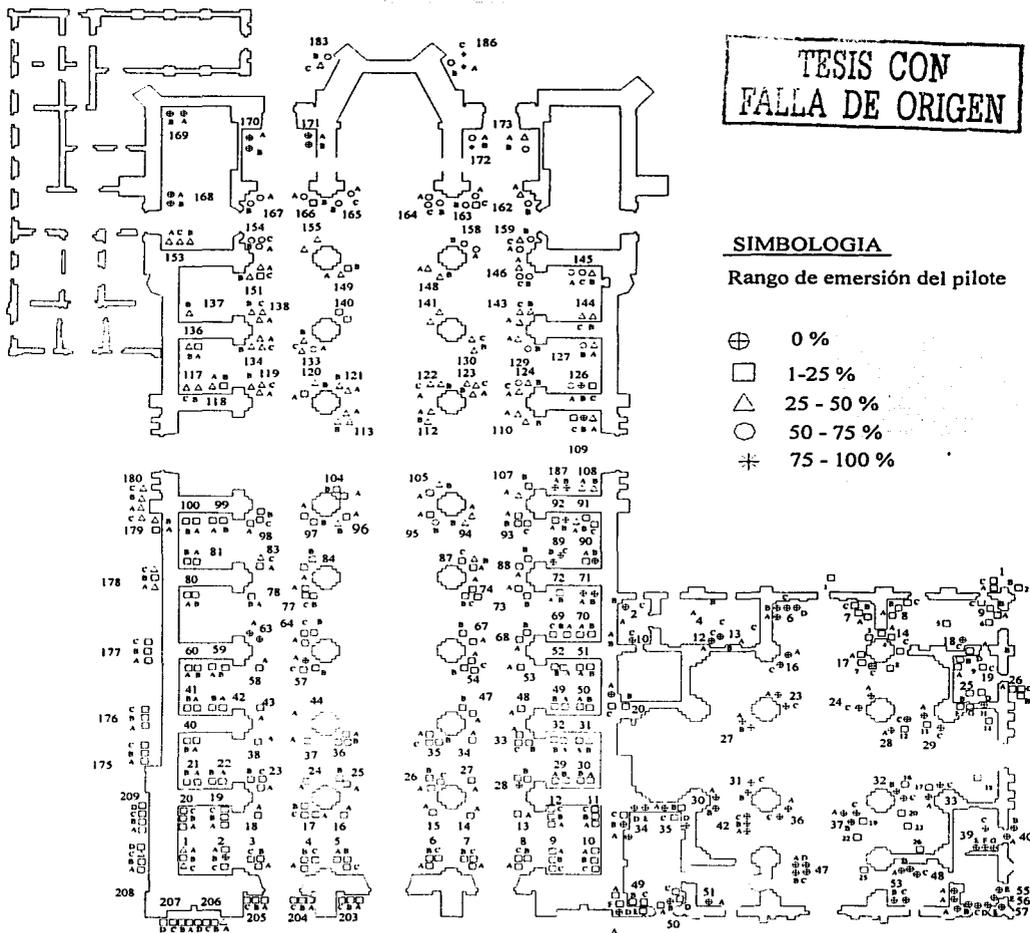
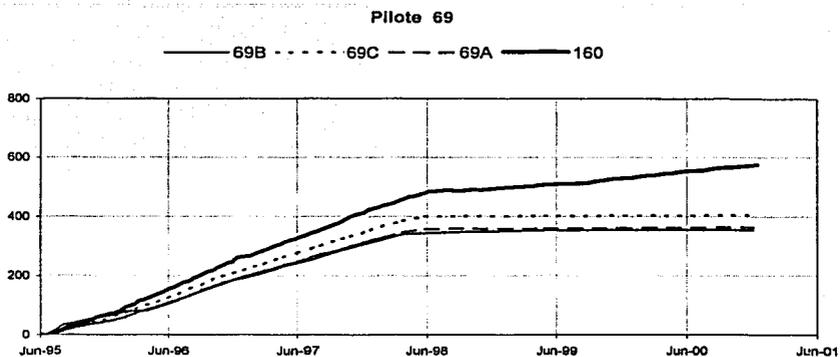


Fig. 39a Emersión relativa de los pilotes entre 1995 y 1998

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



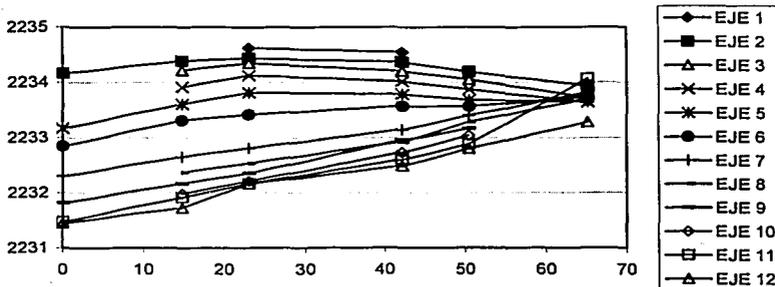
*Fig. 39b Emersión relativa de los pilotes entre 1998 y 2000*



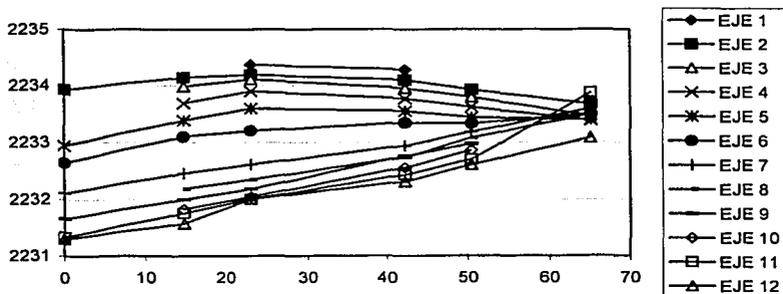
*Fig. 40 Evolución típica de la emersión relativa sufrida por los pilotes*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

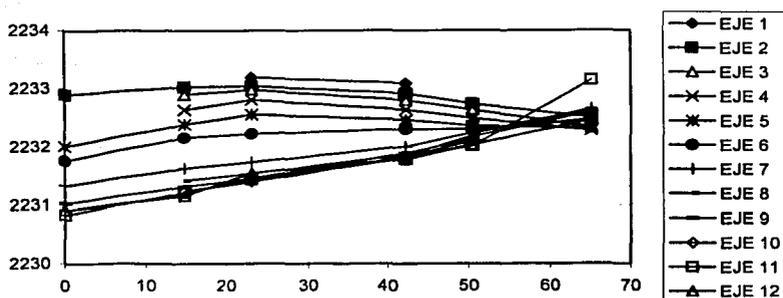
PERFIL DE EJES TRANSVERSALES EN 1991



PERFIL DE EJES TRANSVERSALES EN 1993



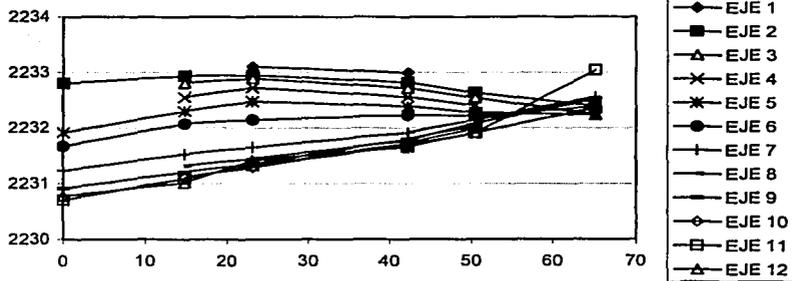
PERFIL DE EJES TRANSVERSALES EN 1998



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 41a Perfiles de los ejes transversales de Catedral

PERFIL DE EJES TRANSVERSALES EN 2000



PERFIL DE EJES TRANSVERSALES EN 2002

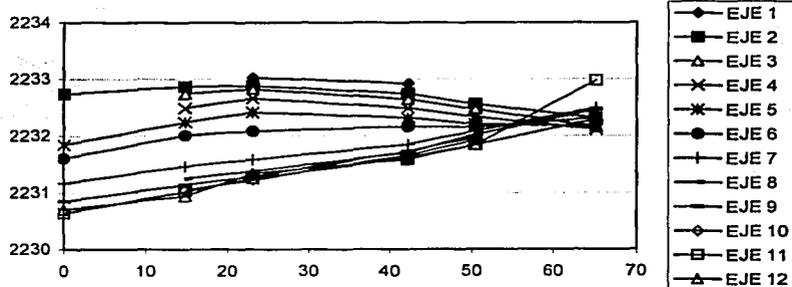
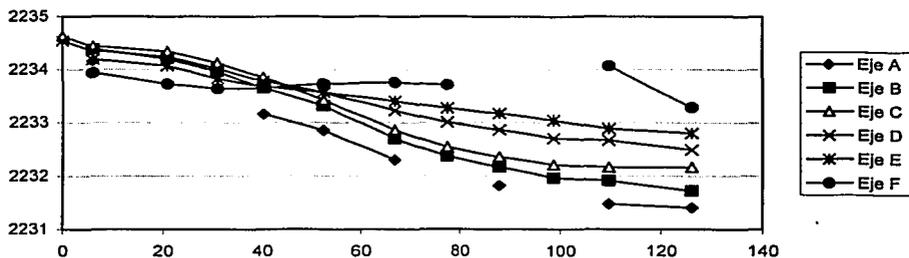


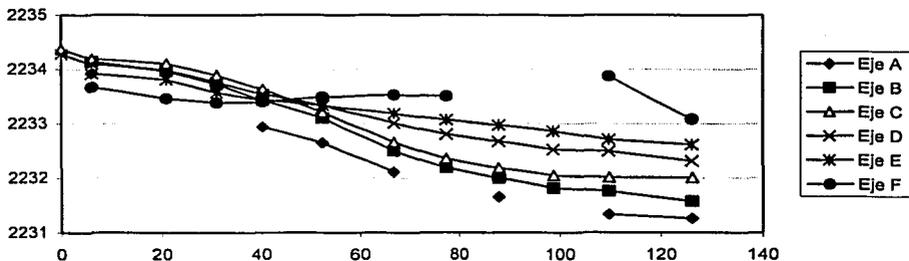
Fig. 41b Perfiles de los ejes transversales de Catedral

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

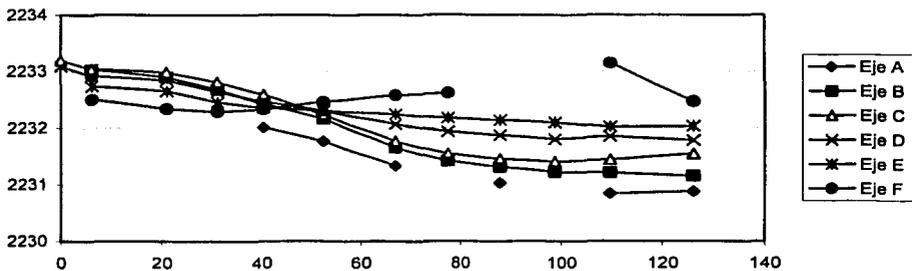
Perfil de Ejes longitudinales en 1991



Perfil de Ejes longitudinales en 1993



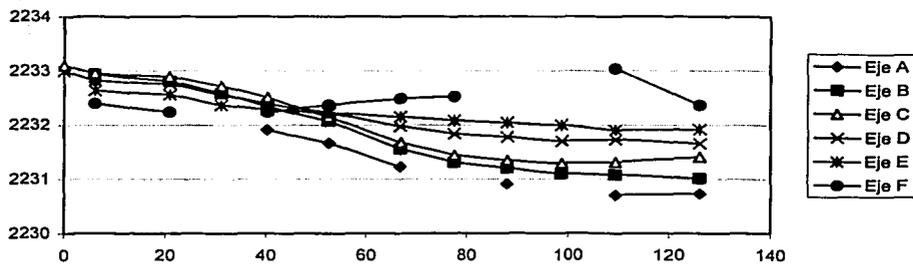
Perfil de Ejes longitudinales en 1998



TESIS CON FALLA DE ORI...

Fig. 42a Perfiles de los ejes longitudinales de Catedral

Perfil de Ejes longitudinales  
en 2000



Perfil de Ejes longitudinales  
en 2002

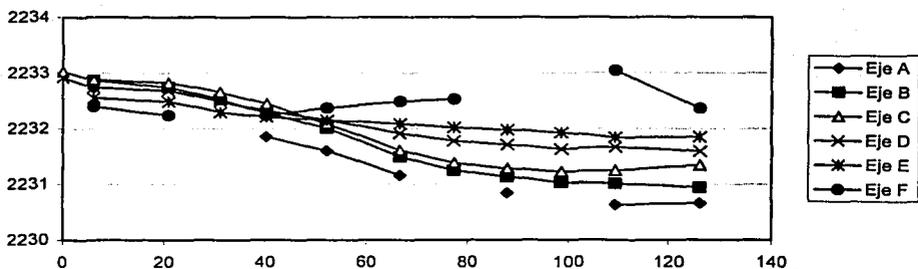
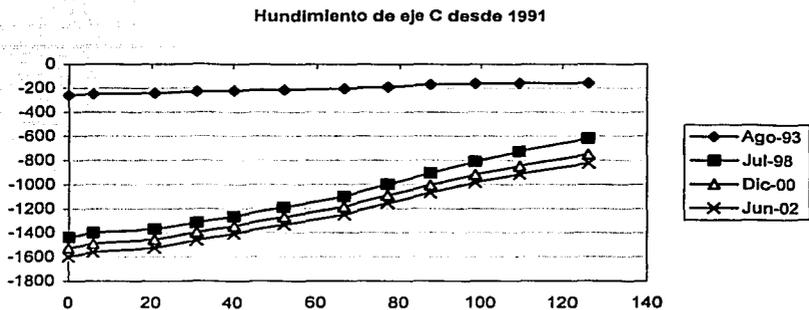


Fig. 42b Perfiles de los ejes longitudinales de Catedral

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIG...

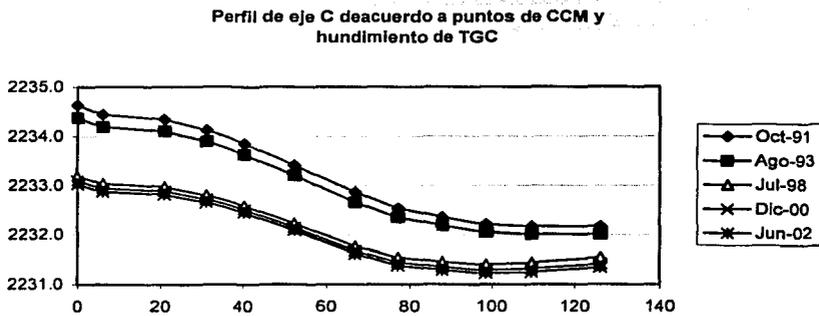
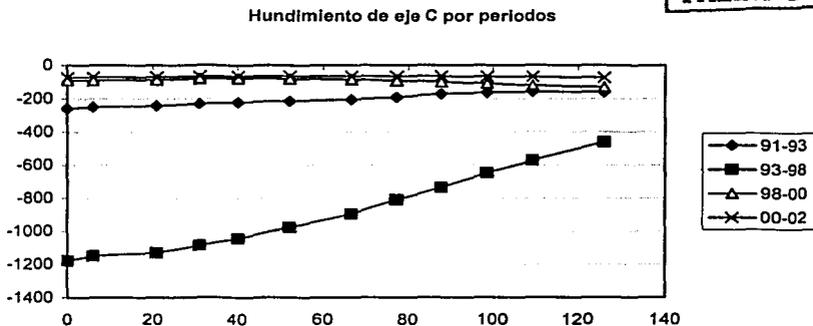
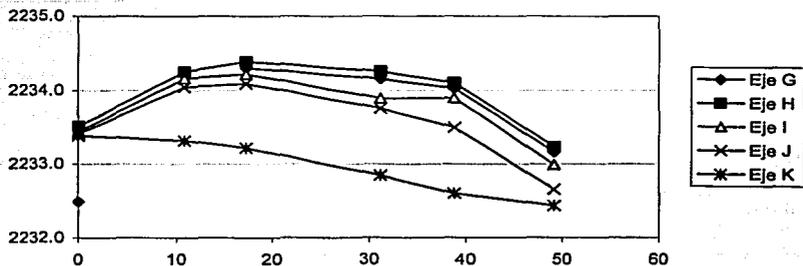
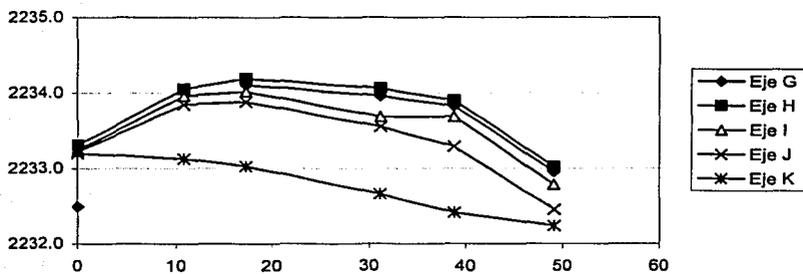


Fig. 43 Evolución del perfil de un eje de Catedral

Ejes longitudinales en 1991



Ejes longitudinales en 1993



Ejes longitudinales en 1998

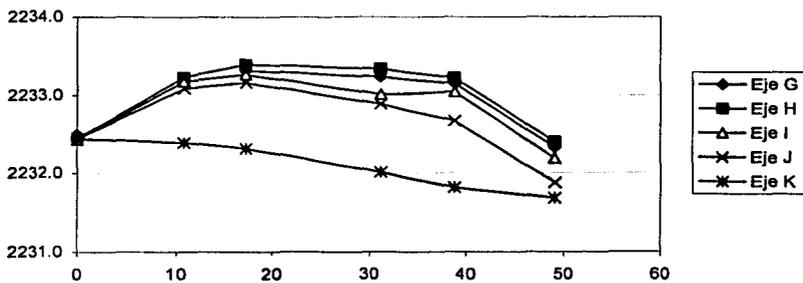
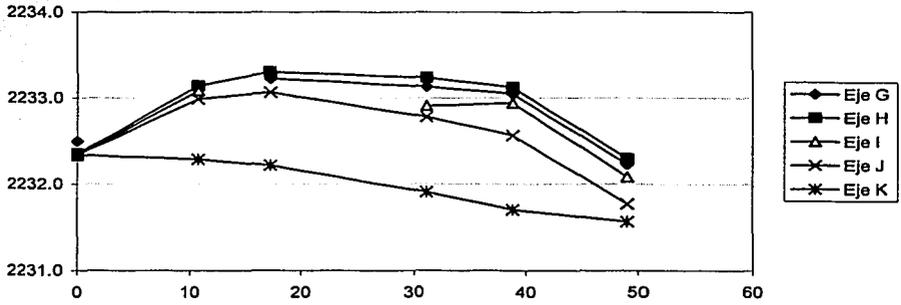


Fig. 44a Perfiles de los ejes de Sagrario

Ejes longitudinales en 2000



TESIS CON FALLA DE ORIGEN.

Ejes longitudinales en 2002

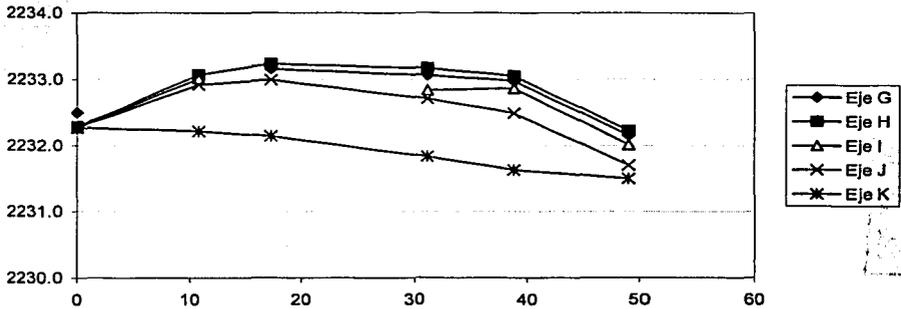
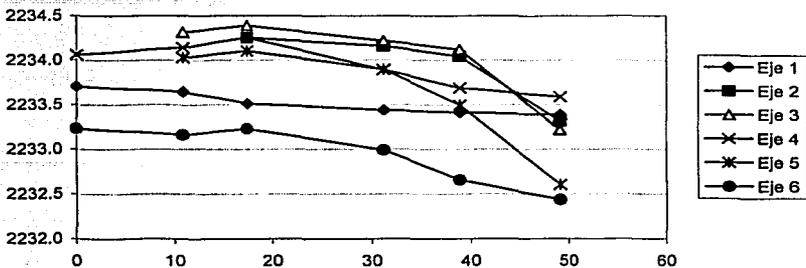
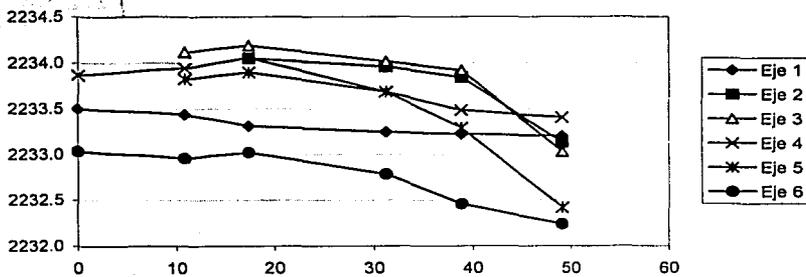


Fig. 44b Perfiles de los ejes de Sagrario

Ejes transversales en 1991



Ejes transversales en 1993



Ejes transversales en 1998

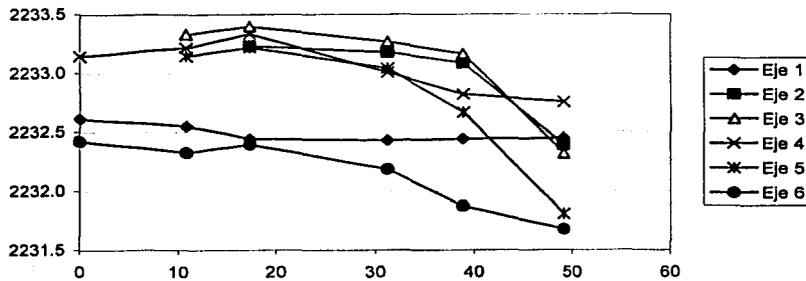
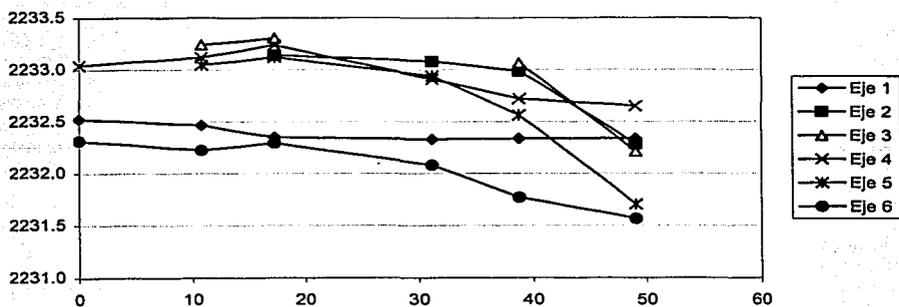


Fig. 44c Perfiles de los ejes de Sagrario

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## Ejes transversales en 2000



## Ejes transversales en 2002

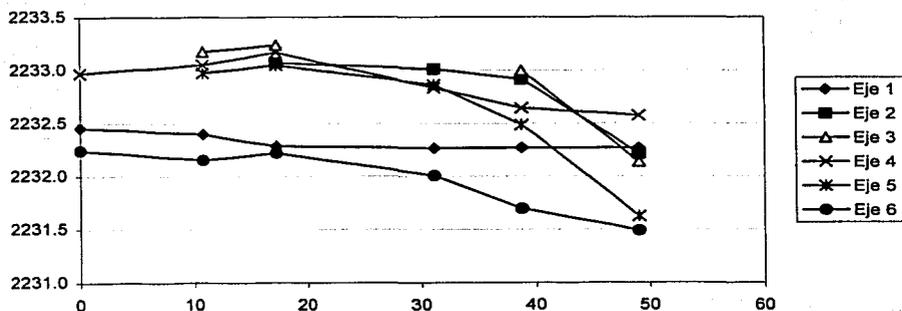
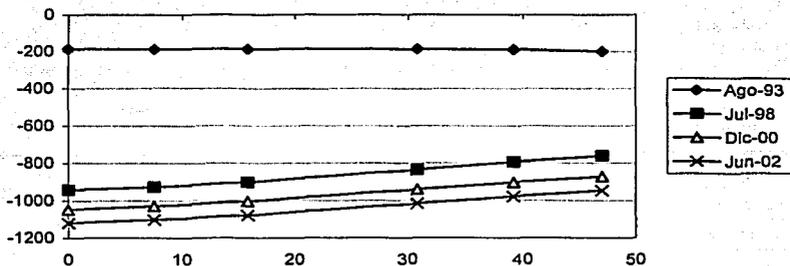


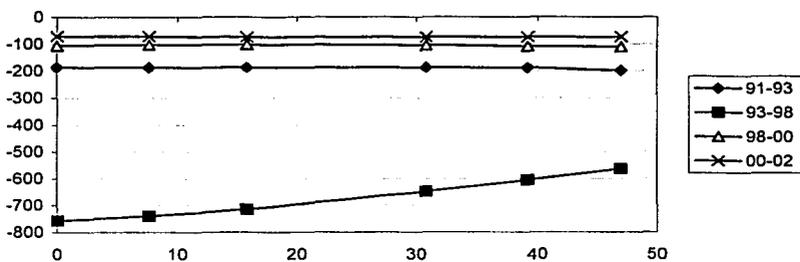
Fig. 44d Perfiles de los ejes de Sagrario

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Hundimiento eje K desde 1991



Hundimientos de eje K entre periodos



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Perfil de eje K de acuerdo a puntos de CCM y hundimiento de TGC

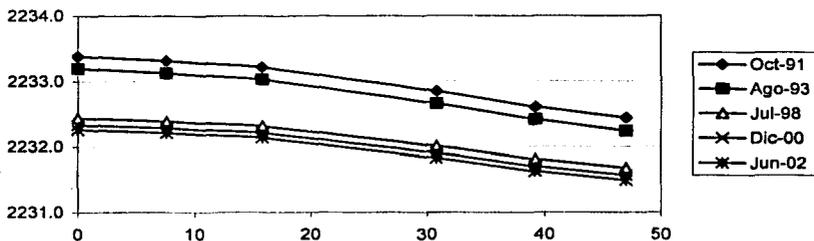
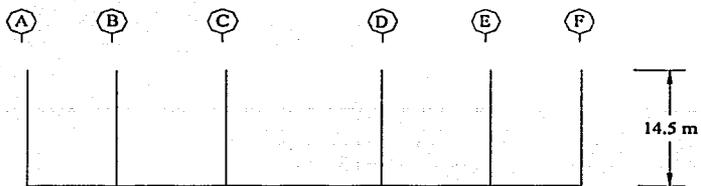
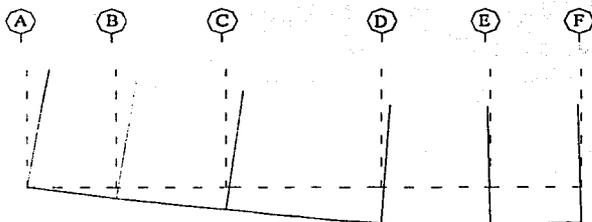


Fig. 45 Evolución del perfil de un eje de Sagrario



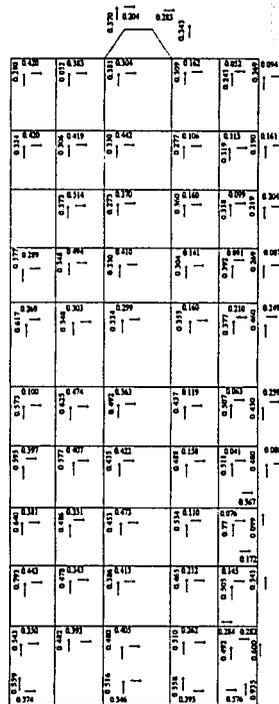
a) Geometría del modelo



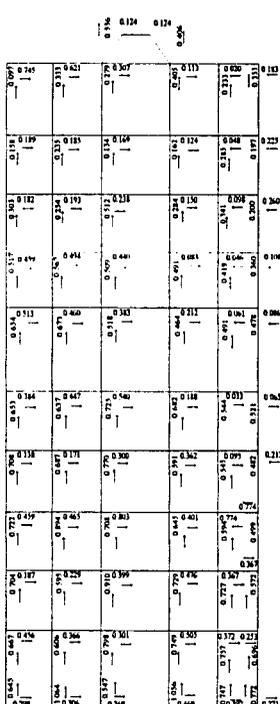
b) Movimiento ideal de las columnas y muros inducidos por los hundimientos diferenciales

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

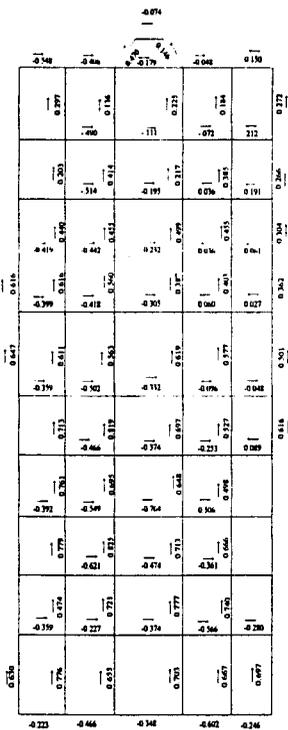
Fig. 46 Modelo ideal utilizado para simular el movimiento de muros y columnas



Movimiento de plomadas en Catedral



Movimiento de las columnas en Catedral si hubieran seguido libremente al piso



Cambio de la pendiente del piso en Catedral

TESIS CON  
 FALTA DE ORIGEN

Fig. 47 Pendientes de piso, movimiento de plomadas medido y teórico



0.506	0.506	0.506	0.506	0.506
0.498	0.498	0.498	0.498	0.498
0.506	0.454	0.333	0.280	0.22
0.498	0.498	0.391	0.435	0.304
0.498	0.498	0.526	0.382	0.439
0.498	0.576	0.475	0.595	0.513
0.498	0.524	0.507	0.457	0.556

Cambio en la pendiente del piso



0.489	0.010	0.002	0.029	0.444	0.62	0.279	0.457	0.196	0.361
0.231	0.020	0.034	0.007	0.408	0.316	0.063	0.216	0.174	0.391
0.477	0.049	0.059	0.014	0.478	0.52	0.112	0.481	0.126	0.467
0.465	0.041	0.065	0.014	0.506	0.111	0.420	0.474	0.121	0.457
0.349	0.227	0.294	0.450	0.118	0.457	0.110	0.420	0.146	0.456

Movimiento de las plomadas

0.014	0.483	0.164	0.302	0.393	0.244	0.269	0.213	0.219
0.300	0.483	0.334	0.294	0.339	0.256	0.245	0.218	0.240
0.243	0.444	0.232	0.225	0.437	0.028	0.273	0.331	0.393
0.024	0.339	0.073	0.660	0.478	0.191	0.172	0.185	0.486
0.043	0.370	0.039	0.589	0.551	0.232	0.356	0.208	0.385
0.353	0.566	0.044	0.511	0.644	0.240	0.442	0.240	0.018

Movimiento de las plomadas si hubieran seguido libremente al piso

1.408	1.303	1.037	1.127	0.954	1.322	0.935	1.41	0.980
1.115	1.110	0.993	0.647	1.132	-0.443	1.179	1.254	1.002
0.496	1.110	1.342	0.866	1.712	1.712	1.476	1.001	0.717
1.213	0.952	1.231	1.089	2.082	1.110	1.722	1.324	1.285
1.558	1.716	1.112	1.352	2.185	1.093	1.711	1.227	1.427

Comparación del movimiento de plomadas con el del piso

Fig. 49 Pendientes de piso, movimiento de plomadas teórico y registrado en Sagrario

# PAGINACIÓN DISCONTINUA

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**Anexo A**

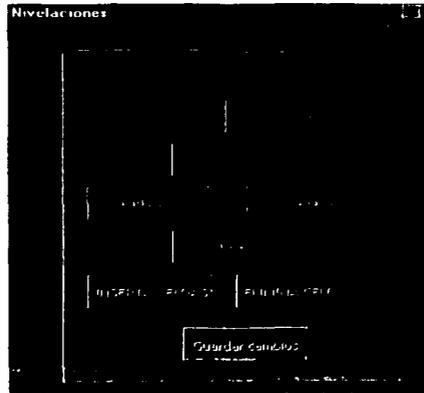
A continuación se presenta el diagrama de flujo, listado e instructivo de uso del programa que actualiza la base de nivelaciones contenida en la hoja de calculo Bplinto.xls

Tiene como objetivo actualizar la base de datos Bplintos.xls, además de graficar los hundimientos de cualquier punto comparándolo con cualquier otro existente en las nivelaciones. Tiene tres ventanas básicas:

**Botón de Inicio.** Para empezar a ejecutar el programa, situado dentro de la hoja

Punto		x	y	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6
				25-Oct-91	07-Nov-91	25-Nov-91	07-Dic-91	10-Ene-92	25-Ene-92
1				32.868	32.865	32.865	32.862	32.857	32.854
2				32.539	32.540	32.540	32.532	32.527	32.525
3				32.092	32.088	32.088	32.085	32.079	32.075

**Hoja de Actualización.** Actualiza la base de datos a partir de una nivelación dada por el usuario

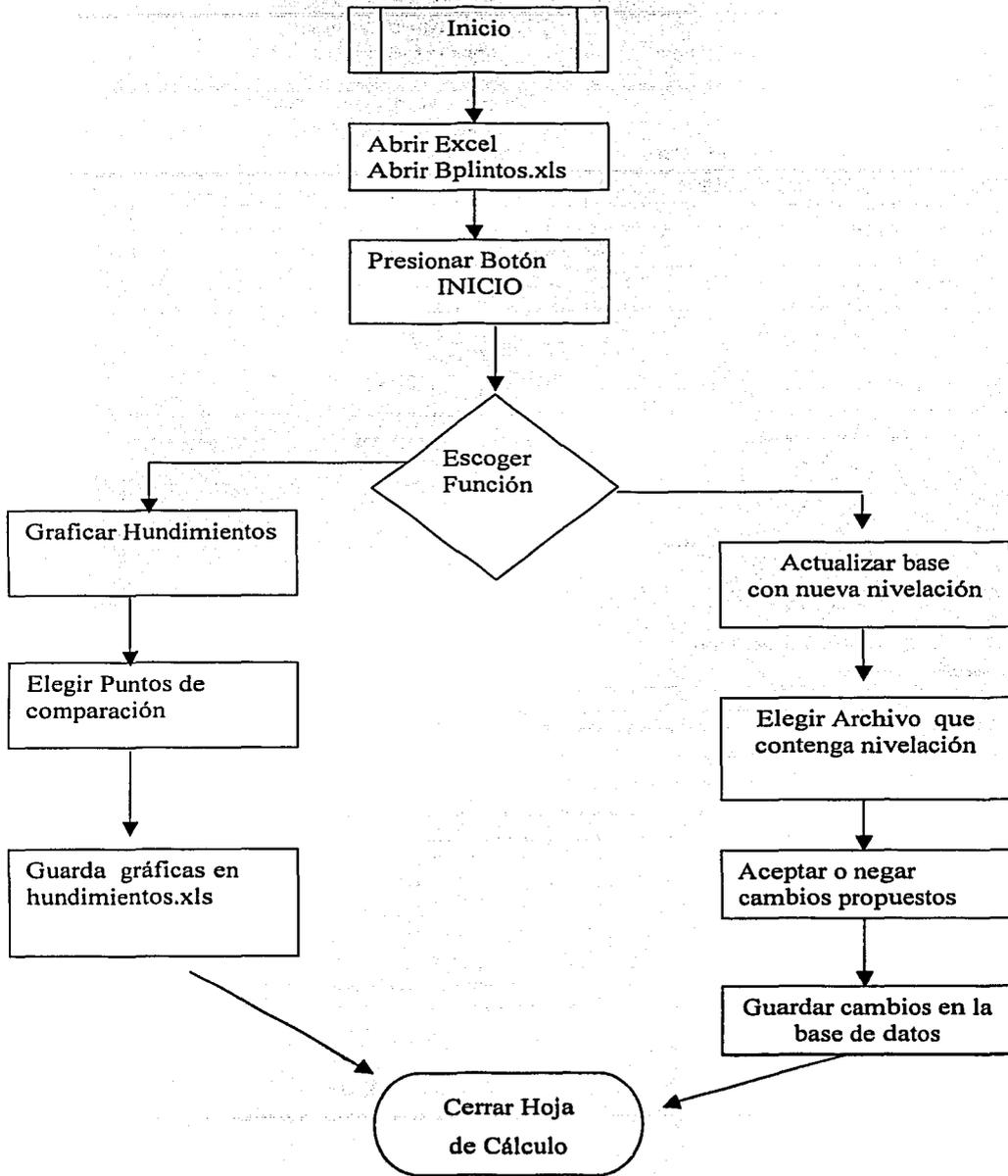


**Hoja de graficación.** Permite elegir los puntos a los que se les calculara el hundimiento así como la diferencia con un punto base Diagrama de flujo del programa.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



En la siguiente hoja se muestra el diagrama de flujo y en las siguientes el listado del programa



## Listado del programa

```

Dim numcolu, numfila, numpuntos, renglon As Integer
Dim nomarchivo As String
Dim direc As Variant
Private Sub cmd_abrirarch_Click()
'ABRE EL ARCHIVO QUE SE QUIERA EN EXCEL
'actualiza los valores de columna,puntos,y renglon
' donde será colocada la nivelación
'Dim numcolu As Integer
numcolu = Range("A1").Value
numfila = Range("a2").Value
numpuntos = Range("a3").Value
'Pregunta el nombre del archivo, lo busca primero en
nuevaniv = Application _
.GetOpenFilename("lotus (*.wk1), *.txt,excel (*.xls),*.xls")
If nuevaniv <> False Then
Workbooks.Open Filename:=nuevaniv
MsgBox "Abierto " & nuevaniv
nomarchivo = ActiveWorkbook.Name
End If
MsgBox "localizar la columna y situarse en la celda
elevación"
Range("k10").Select
renglon = 10
'Activa los botones de desplazaminto en el libro
cmd_copiar.Enabled = True
cmd_celabajo.Enabled = True
cmd_celarriba.Enabled = True
cmd_celderecha.Enabled = True
cmd_celizquierda.Enabled = True
cmd_abrirarch.Enabled = False
End Sub
Private Sub cmd_celarriba_Click()
'mueve la celda activa a una arriba
ActiveCell.Offset(-1, 0).Select
renglon = renglon - 1
End Sub
Private Sub cmd_celderecha_Click()
'mueve la celda activa a una a la derecha
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
End Sub
Private Sub cmd_celizquierda_Click()
'mueve la celda activa a una a la izquierda
ActiveCell.Offset(0, -1).Select
End Sub

```

```

Private Sub cmd_celabajo_Click()
'mueve la celda activa abajo una
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
renglon = renglon + 1
End Sub
Private Sub cmd_clasicos_Click()
Dim lista(14) As Variant
For i = 1 To 14
Select Case i
Case 1
lista(i) = 5
Case 2
lista(i) = 12
Case 3
lista(i) = 17
Case 4
lista(i) = 20
Case 5
lista(i) = 24
Case 6
lista(i) = 27
Case 7
lista(i) = 35
Case 8
lista(i) = 39
Case 9
lista(i) = 47
Case 10
lista(i) = 56
Case 11
lista(i) = 100
Case 12
lista(i) = 113
Case 13
lista(i) = 120
Case 14
lista(i) = 140
End Select
Next i
f = hundbuenos(14, lista(), "hundi.xls")
MsgBox f(0)
a = graficadora(14, f)
End Sub
Private Sub cmd_copiar_Click()
' copia los datos de la columna elegida
cmd_abrirarch.Enabled = False
'selecciona la celda y se lleva toda la columna

```

```

ActiveCell.Range("a1:a" & numpuntos).Select
Selection.Copy
Windows("baseplintos.xls").Activate
Range("a1").Select
ActiveCell.Offset(numfila - 1, numcolu - 1).Select
ActiveSheet.Paste
'se lleva la columna de puntos a comparar
Windows(nomarchivo).Activate
Range("a" & renglon & "a" & numpuntos + renglon).Select
Selection.Copy
'coloca los datos en la base de datos
Windows("baseplintos.xls").Activate
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
ActiveSheet.Paste
Windows(nomarchivo).Activate
Application.CutCopyMode = False
Windows(nomarchivo).Close savechanges:=False
Windows("baseplintos.xls").Activate
ActiveCell.Offset(0, 8).Select
ActiveCell.Offset(0, -8).Select
'Procedimiento de comparacion de puntos
ActiveCell.Offset(4, 1).Select
a = compara()
End Sub

Private Sub cmd_cualquiera_Click()
Load frmculapunto
frmculapunto.Show
End Sub

Private Sub cmd_pruebas_Click()
Windows(nomarchivo).Activate
numcolu = Range("A1").Value
numfila = Range("a2").Value
numpuntos = Range("a3").Value
Range(.Cells(numfila - 1, numcol - 1)).Select
ActiveSheet.cell(numfila - 1, numcol - 1).Select
End Sub

Private Sub cmd_agregar_Click()
'a = compara()
'desplaza las celdas
ActiveCell.Offset(0, -2).Select
ActiveCell.Range("C1:A1").Select
'Selection.Interior.ColorIndex = 43

Selection.Insert Shift:=xlDown
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "=rc1"

```

```

ActiveCell.Offset(0, 2).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 43
'actualiza los cambios
Range(direc).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=if(isblank(rc[-1])=false,if(rc[-1]=rc1,0,1),0)"
Selection.Copy
ActiveCell.Range("A1:A" & (numpuntos - 4)).Select
ActiveSheet.Paste
a = compara()
End Sub

Function compara()
direc = ActiveCell.Address
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=if(isblank(rc[-1])=false,if(rc[-1]=rc1,0,1),0)"
Selection.Copy
ActiveCell.Range("A1:A" & (numpuntos - 4)).Select
ActiveSheet.Paste
'opciones siguientes
cmd_agregar.Enabled = True
cmd_quitar.Enabled = True
cmd_copiar.Enabled = False
'corrección de los puntos por nivelación
n = 1
For i = 1 To numpuntos - 4 - 1
If ActiveCell.Value = 1 Then
i = numpuntos
MsgBox ("Algunos puntos no coinciden, insertar o
quitar celdas")
Else
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
n = n + 1
End If
If n >= numpuntos - 4 Then
cmd_terminar.Enabled = True
MsgBox ("todos los puntos coinciden")
cmd_agregar.Enabled = False
cmd_quitar.Enabled = False
a = terminar()
End If
Next i
cmd_celabajo.Enabled = False
cmd_celarriba.Enabled = False
cmd_celderccha.Enabled = False
cmd_celizquierda.Enabled = False
End Function

```

```

Function terminar()
'quita los renglones que se usaron de comparacion
res = MsgBox("Guardar los cambios hechos en la base de
datos", vbOKOnly + vbOKCancel)
r = numcol
If res = 1 Then
ActiveCell.Offset(0, -1).Select
ActiveCell.Range("a1:b1").Select
Selection.EntireColumn.Delete
Application.CutCopyMode = False
numcolu = numcolu + 1
Range("a1").Value = numcolu
Else
ActiveCell.Offset(0, -2).Select
ActiveCell.Range("a1:c1").Select
Selection.EntireColumn.Delete
Application.CutCopyMode = False
End If
Range(direc).Select
cmd_abrirarch.Enabled = True
cmd_terminar.Enabled = False
End Function
Function graficadora(cantidad As Integer, parcial As Variant)
As Integer
'funcion que define el rango de los puntos a graficar
Dim tipo As String, vvmx(2) As Date
Dim vmin(6) As Long
Dim puntos(2) As String
' MsgBox parcial(2) & " " & parcial(3)
ActiveWindow.WindowState = xlNormal
numero = 1
For n = 1 To (cantidad * 2) - 2
Sheets("hundimientos").Activate
Range("A3").Select
Range("A3").Select
If (n < cantidad) Then
rangol = parcial(0)
'rangol = "$A3:$A224"

i = n
numero = parcial(2)
tipo = "GT"
Else
rangol = parcial(1)
'rangol = "$A$161:$A$224"

```

```

numero = parcial(2) - parcial(3) + 3
'numero = 221 - 224
'ActiveCell.(, cantidad * 2 + 2 * 2).Select
'ActiveCell.Offset(161 - 3, cantidad * 2 + 2 * 2).Select
ActiveCell.Offset(parcial(3) - 3, cantidad * 2 + 2 *
2).Select
i = n - cantidad + 1
tipo = "P"
End If

ActiveCell.Offset(1, cantidad + 2 + 1).Select
If tipo = "GT" Then
nombre1 = ActiveCell.Offset(-3, 0).Value
Else
'nombre1 = ActiveCell.Offset(-161 + 1, 0).Value
nombre1 = ActiveCell.Offset(-parcial(3), 0).Value
ActiveCell.Offset(-1, 0).Select
p = 1
End If
dir1 = ActiveCell.Address
vari = ActiveCell.Row
'activeCell.Offset(vari - 1, 0).Select
puntos(0) = ActiveCell.Offset(-vari + 1, 0).Value

ActiveCell.Offset(numero - 2 - 1 + p, 0).Select
dir1f = ActiveCell.Address
ActiveCell.Offset(-numero + 2 + 1 - p, 0).Select

ActiveCell.Offset(0, i).Select
If tipo = "GT" Then
nombre2 = ActiveCell.Offset(-3, 0).Value
Else
nombre2 = ActiveCell.Offset(-parcial(3) + 1, 0).Value
'ActiveCell.Offset(-1, 0).Select
End If
dir2 = ActiveCell.Address
vari = ActiveCell.Row
puntos(1) = ActiveCell.Offset(-(vari - 1), 0).Value
vari = ActiveCell.Column
vvmx(0) = ActiveCell.Offset(0, -(vari - 1)).Value
ActiveCell.Offset(numero - 2 - 1 + p, 0).Select
dir2f = ActiveCell.Address
columna = ActiveCell.Row
ActiveCell.Offset(-numero + 2 + 1 - p, 0).Select

ActiveCell.Offset(0, cantidad + 2).Select
dir3 = ActiveCell.Address

```

```

ActiveCell.Offset(numero - 2 - 1 + p, 0).Select
dir3f = ActiveCell.Address
ActiveCell.Offset(-numero + 2 + 1 - p, 0).Select

Range("A1").Select
ActiveCell.Formula = "=max(" & dir1 & ":" & dir1f & ")"
vminmax(0) = ActiveCell.Value
Range("A1").Select
ActiveCell.Formula = "=Min(" & dir1 & ":" & dir1f & ")"
vminmax(1) = ActiveCell.Value

Range("A1").Select
ActiveCell.Formula = "=max(" & dir2 & ":" & dir2f & ")"
vminmax(2) = ActiveCell.Value
Range("A1").Select
ActiveCell.Formula = "=Min(" & dir2 & ":" & dir2f & ")"
vminmax(3) = ActiveCell.Value

Range("A1").Select
ActiveCell.Formula = "=max(" & dir3 & ":" & dir3f & ")"
vminmax(4) = ActiveCell.Value
Range("A1").Select
ActiveCell.Formula = "=Min(" & dir3 & ":" & dir3f & ")"
vminmax(5) = ActiveCell.Value

vminmax(6) = Range("a" & columna).Value
vymax(1) = Range("a" & columna).Value

MsgBox vminmax(6)

rangos = rangol & "," & dir1 & ":" & dir1f & "," & dir2
& ":" & dir2f & "," & dir3 & ":" & dir3f
'
MsgBox rangos
a = grafica(3, rangos, tipo & nombre2 & "-" & nombre1,
tipo, vminmax(), vymax(), puntos())
Next n
End Function

Function hundbuenos(num As Integer, vector() As Variant,
nomnuevo As String) As Variant
Dim direcciones(3) As String
'funcion que calcula los hundimientos de un rango de datos
'nomnuevo = "hundi.xls"
'Problema con laruta
ruta = "C:\bernardo\archivo historico\"
Kill ("C:\bernardo\archivo historico\hundi.xls")
'Crea el archivo y le da nombre
Workbooks.Add
ActiveWorkbook.SaveAs
Filename:="C:\bernardo\archivo historico\hundi.xls"

'hundimientos clasicos
'procedimiento de busqueda de nivelaciones
ActiveWindow.WindowState = xlMinimized
n = 0
paso = 2
Windows("baseplintos.xls").Activate
numcolu = Range("A1").Value
numfila = Range("a2").Value
numpuntos = Range("a3").Value
numenca = Range("a4").Value
'arreglar y revisar
Range("b1").Select
numcoli = ActiveCell.Value
Range("b2").Select
numfilafecha = ActiveCell.Value

x = "A" & numfilafecha
Range(x).Select
ActiveCell.Offset(0, numcolu - 2).Select
r = ActiveCell.Address
Range(x & ":" & r).Select
Selection.Copy
Windows(nomnuevo).Activate
Sheets("hojal").Name = "hundimientos"
Sheets("hundimientos").Select
Range("a1").Select
ActiveCell.Offset(0, n).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlAll,
Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False _
, Transpose:=True

For i = 1 To num
x = puntoloc(vector(i))
' Windows("basedatos").Activate
Range(x).Select
ActiveCell.Offset(0, numcolu - 1).Select
r = ActiveCell.Address
Range(x & ":" & r).Select
Selection.Copy
Windows(nomnuevo).Activate
Sheets("hundimientos").Select
Range("b1").Select

```

```

ActiveCell.Offset(0, n).Select
'ActiveWindow.WindowState = xlMaximized
Selection.PasteSpecial Paste:=xlAll,
Operation:=xlInNone, SkipBlanks:=False _
, Transpose:=True
n = n + 1
Next i

'copia las fechas especiales a la hoja 2
Windows("baseplintos").Activate
Sheets("fechas").Select
Range("a1").Select
numerodefechas = ActiveCell.Value
Range("a2").Select
filainicial = ActiveCell.Value
Range("a1").Select
ActiveCell.Offset(filainicial - 1, 0).Range("a1:f" &
numerodefechas * 2 + numerodefechas - 1).Select
Selection.Copy
Sheets("datos").Select
Windows(nomnuevo).Activate
Sheets("hoja2").Select
Range("b4").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlAll
Windows(nomnuevo).Activate
Sheets("hundimientos").Select

'For r = 1 To numerodefechas

ActiveWorkbook.Save
'ActiveWorkbook.Close
Application.CutCopyMode = False

'caclulo de los hundimientos desde 1991
Range("b1").Select
'ActiveCell.Offset(0, num + 2).Select
direi = ActiveCell.Address
ActiveCell.Offset(0, num - 1).Select
dired = ActiveCell.Address
Range(direi & ":" & dired).Select
Selection.Copy
ActiveCell.Offset(0, num + 2).Select
ActiveSheet.Paste
ActiveCell.Offset(3, 0).Select
dirp = ActiveCell.Address
ren = ActiveCell.Row

operacion = "=" & RC[-" & num + 2 & "]" & "R" & ren & "C[-
" & num + 2 & "]" & "1000"
ActiveCell.FormulaR1C1 = operacion
ActiveCell.Range("A1").Select
Selection.Copy
'MsgBox (ActiveCell.Address)
ActiveCell.Offset(numcolu - 5, num - 1).Select
'MsgBox (ActiveCell.Address)
r = ActiveCell.Address
Range(dirp & ":" & r).Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
'hundimientos comparados desde 1991
Range("b1").Select
ActiveCell.Offset(0, num + 2).Select
direi = ActiveCell.Address
ActiveCell.Offset(0, num - 1).Select
dired = ActiveCell.Address
Range(direi).Select
Range(direi & ":" & dired).Select
Selection.Copy
ActiveCell.Offset(0, num + 2).Select
ActiveSheet.Paste

ActiveCell.Offset(3, 0).Select
direhun = ActiveCell.Address
sep = num + paso
columna = ActiveCell.Offset(0, -(num + 2)).Column
cadformula = "=" & rc[-" & sep & "]" & "rc" & columna
ActiveCell.FormulaR1C1 = cadformula
ActiveCell.Copy
direi = ActiveCell.Address
ActiveCell.Offset(0, num - 1).Select
columna = ActiveCell.Column
numpunt = numcolu - 1

ActiveCell.Offset(numpunt - 2 - 1 - 1, 0).Select
dired = ActiveCell.Address
Range(direi & ":" & dired).Select
ActiveSheet.Paste
'hundimientos desde enero de 1998

renglonultimo = numcolu - 1
numero = num
Range("b1").Select

```

```

direi = ActiveCell.Address
ActiveCell.Offset(0, num - 1).Select
diref = ActiveCell.Address
Range(direi & ":" & diref).Select
Selection.Copy
ActiveCell.Offset(0, numero * 3 + 6).Select
ActiveSheet.Paste
ActiveCell.Offset(2, 0).Select

direcc = fechaloc("12/01/98")
Range(direcc).Select
renglon = ActiveCell.Row
diferencia = renglonultimo - renglon
ActiveCell.Offset(diferencia, 0).Select
direcc2 = ActiveCell.Address
Range("a1").Select
ActiveCell.Offset(renglon - 1, num * 3 + 6 + 1).Select
operacion = "(RC[-" & num * 3 + 6 & "]" - R" &
renglon & "C[-" & num * 3 + 6 & "]" * 1000"
ActiveCell.FormulaR1C1 = operacion
ActiveCell.Range("A1").Select
dirp = ActiveCell.Address
Selection.Copy
ActiveCell.Offset(diferencia, num - 1).Select
r = ActiveCell.Address
Range(dirp & ":" & r).Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
"hundimientos comparados desde 1998
Range("b1").Select
direi = ActiveCell.Address
ActiveCell.Offset(0, num - 1).Select
diref = ActiveCell.Address
Range(direi & ":" & diref).Select
Selection.Copy
ActiveCell.Offset(0, num * 4 + 8).Select
ActiveSheet.Paste
direhun = ActiveCell.Address
sep = num + paso
columna = ActiveCell.Offset(0, -(num + 2)).Column

Range("a1").Select
ActiveCell.Offset(renglon - 1, numero * 4 + 8 +
1).Select
cadformula = "rc[-" & sep & "]" - rc" & columna
ActiveCell.FormulaR1C1 = cadformula
ActiveCell.Copy

```

```

direi = ActiveCell.Address
ActiveCell.Offset(0, num - 1).Select
columna = ActiveCell.Column
numpunt = numcol
ActiveCell.Offset(diferencia, 0).Select
diref = ActiveCell.Address
Range(direi & ":" & diref).Select
ActiveSheet.Paste

ActiveWindow.WindowState = xlNormal
' MsgBox direcc & ":" & direcc2
direcciones(0) = fechaloc("25/10/91") & ":" & direcc2
direcciones(1) = direcc & ":" & direcc2
direcciones(2) = numcol - 2
direcciones(3) = renglon
hundbuenos = direcciones()

'hundbuenos = direcc & ":" & direcc2
End Function

Function textos(catmin As Variant, catmax As Variant, cati
As Variant, tipo As String, numer As Variant)

ActiveChart.Shapes.AddTextbox(msoTextOrientationHorizont
al, 5#, 1, _
20, 80).Select
Selection.Characters.Text = cati
Selection.AutoScaleFont = False
With Selection.Characters(Start:=1, Length:=17).Font
.Name = "Arial"
.FontStyle = "Normal"
.Size = 8
.Strikethrough = False
.Superscript = False
.Subscript = False
.OutlineFont = False
.Shadow = False
.Underline = xlUnderlineStyleNone
.ColorIndex = xlAutomatic
End With
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveChart.Axes(xlValue).Select
ActiveChart.Shapes("Text Box " & numer).Select
With Selection
.HorizontalAlignment = xlLeft
.VerticalAlignment = xlTop

```

```

.Orientation = xlUpward
.AutoSize = False
End With
'esquina superior izquierda = 45,35 en X
'esquina superior derecha 460-470 ,35
Selection.ShapeRange.IncrementLeft 45
Selection.ShapeRange.IncrementTop 75
'colocacion de mensajes
    valormin = 1
    valormax = 2
    valorfecha = 0.5
If tipo = "P" Then
    catmin = 35807
    'catmax = 45
    x1 = catmin
    x2 = catmax
    xi = cati
Else
    catmin = 33536
    'catmax = 45
    x1 = catmin
    x2 = catmax
    xi = cati
End If
y1 = 45
y2 = 465

    yi = ((y2 - y1) * (xi - x1) / (x2 - x1)) + y1
If tipo = "P" Then
Selection.ShapeRange.IncrementLeft yi - 15
Else
If numer = 1 Or numer = 2 Then
    Selection.ShapeRange.IncrementLeft yi - 10
Else
If numer = 3 Then
    Selection.ShapeRange.IncrementLeft yi - 3
Else
If numer = 5 Or numer = 6 Then
    Selection.ShapeRange.IncrementLeft yi - 10
Else
    Selection.ShapeRange.IncrementLeft yi - 25
End If
End If
End If
'MsgBox yi

```

```

End Function

Function rectas(final As Integer, hist As String, nombres As
String, catemax As Variant) As Integer
'funcion que determina las rectas de las fechas importantes
Sheets("hoja2").Select
Range("c1").Select
nn = 0
For i = 1 To final
    Sheets("hoja2").Select
    Range("c1").Select
    If hist = "P" Then
        '35807 es el equivalente de enero de 98 en Excel
        If ActiveCell.Offset(3 * i, 0).Value > 35807 Then
            categi = ActiveCell.Offset(3 * i, 0).Value
            ActiveCell.Offset(3 * i, 0).Range("A1:B2").Select
        Else
            categi = 0
            nn = nn + 1
        End If
    Else
        categi = ActiveCell.Offset(3 * i, 0).Value
        ActiveCell.Offset(3 * i, 0).Range("A1:a2,C1:c2").Select
    End If
    Selection.Copy
    Sheets(nombres).Select

    ActiveChart.SeriesCollection.Paste Rowcol:=xlColumns,
SeriesLabels:=False, _
    CategoryLabels:=True, Replace:=False, NewSeries:=True
    If categi > 0 Then
        a = textos(1, catemax, categi, hist, i - nn)
    End If
Next i
End Function

Function grafica(numero As Integer, rango As Variant, nombre
As String, tiempo As String, minmax() As Long, vtmx() As
Date, puntos() As String) As String
'agrega un gráfico de hundimientos totales
'ActiveWindow.WindowState = xlMinimized
'Windows("hundi.xls").Activar
titgraf = "Historia comparada del punto "
final = "durante el periodo "
'MsgBox (" max1 min" & " " & minmax(0) & " " &
minmax(1) & " " & minmax(2) & " " & minmax(3) _
& " " & minmax(4) & " " & minmax(5))

```

```

If (tiempo = "P") Then
vmax = 50
vmin = -250
paso = 50
vmaxs = 25
vmins = -125
pasos = 25
catemin = 35807
pasofo = 365

Else
vmax = 200
vmin = -2000
paso = 200
vmaxs = 100
vmins = -1000
pasos = 100
catemin = 33530
pasofo = 365

If (minmax(1) And minmax(3) > -1000) Then
vmin = -1000
vmax = 100
paso = 100

End If
If (minmax(5) > -500) Then
vmaxs = 50
vmins = -500
End If
End If

For i = 0 To 30
If minmax(6) < catemin + pasofo * i Then
catemax = catemin + pasofo * i
i = 31
End If
Next
Charts.Add
ActiveChart.ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
' rango de datos
'ActiveChart.SetSourceData
Source:=Sheets("hundimientos").Range("a$4:a$163,r$4:r$163,
s$4:s$163,s4:s163"), PlotBy:= _
xlColumns
'localizacion
ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsNewSheet,
Name:=nombre
'titulo y ejes
With ActiveChart
.HasTitle = True
titulo = titgraf & puntos(1) & " contra el punto " &
puntos(0) & Chr(10) & final & vtmax(0) _
& " al " & vtmax(1)

.ChartTitle.Characters.Text = titulo
.Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = True
.Axes(xlCategory, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text =
"Fecha"
.Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True
.Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text =
"Hundimiento [mm]"
End With
' formato de grafico
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
.HasMajorGridlines = True
.MajorGridlines.Border.LineStyle = xlDot
.MajorGridlines.Border.ColorIndex = 57
.MajorGridlines.Border.Weight = xlHairline
.HasMinorGridlines = False
.TickLabels.Orientation = xlUpward
End With
With ActiveChart.Axes(xlValue)
.HasMajorGridlines = True
.MajorGridlines.Border.LineStyle = xlDot
.MajorGridlines.Border.ColorIndex = 57
.MajorGridlines.Border.Weight = xlHairline
.HasMinorGridlines = False
End With
'definicion de eje secundario
ActiveChart.SeriesCollection(3).Select
ActiveChart.SeriesCollection(3).AxisGroup = 2
'definicion de escala horizontal eje principal
With ActiveChart.Axes(xlValue)
.MinimumScale = vmin
.MaximumScale = vmax
.MinorUnitsAuto = True
.MajorUnit = paso
.CrossesAt = vmin

```

```

.ReversePlotOrder = False
.ScaleType = xlLinear
End With
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
.MinimumScale = catemin
.MaximumScale = catemax
.MinorUnitsAuto = True
.MajorUnit = pasoho
.CrossesAt = vmin
.ReversePlotOrder = False
.ScaleType = xlLinear
End With

'definicion de escala vertical eje principal

'definicion de escala vertical eje secundario
With ActiveChart.Axes(xlValue, xlSecondary)
.MinimumScale = vmins
.MaximumScale = vmaxs
.MinorUnitsAuto = True
.MajorUnit = pasos

End With

'definicion de formato de la hoja
With ActiveChart.PageSetup
.LeftHeader = ""
.CenterHeader = ""
.RightHeader = ""
.LeftFooter = ""
.CenterFooter = ""
.RightFooter = ""
.LeftMargin =
Application.InchesToPoints(0.78740157480315)
.RightMargin =
Application.InchesToPoints(0.78740157480315)
.TopMargin =
Application.InchesToPoints(0.984251968503937)
.BottomMargin =
Application.InchesToPoints(0.984251968503937)
.HeaderMargin = Application.InchesToPoints(0)
.FooterMargin = Application.InchesToPoints(0)
.ChartSize = xlFullPage
.PrintQuality = 600
.CenterHorizontally = False
.CenterVertically = False
.Orientation = xlPortrait
.Draft = False

.PaperSize = xlPaperLetter
.FirstPageNumber = xlAutomatic
.BlackAndWhite = False
.Zoom = 50
End With
ActiveChart.Legend.Select
Selection.Delete
With ActiveChart.PageSetup

.Orientation = xlPortrait
.Zoom = 50

End With

ActiveChart.ApplyDataLabels
Type:=xlDataLabelsShowNone, LegendKey:=False
ActiveChart.PlotArea.Select
Selection.ClearFormats
ActiveChart.PlotArea.Select
a = rectas(7, tiempo, nombre, catemax)
a = textos()
ActiveWindow.Zoom = 75

End Function

Function fechaloc(fecha As Variant) As String
Range("a1").Select
numnivela = 220
For i = 1 To numnivela
y = Str(ActiveCell.Value)
If Str(ActiveCell.Value) = fecha Then
pir = ActiveCell.Address
'MsgBox ("encuentre la fecha" & fecha & ", " &
ActiveCell.Value & ", " & pir)
i = 220
Else
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
End If
Next i
fechaloc = pir
End Function

Function puntoloc(celda As Variant) As String
Dim w As Variant

'activa la hoja de base de datos y recoge la información
necesaria
'Windows("BASEDATOS").Activate

```

```
Hoja1.Activate
Range("a1").Select
numcol = ActiveCell.Value
Range("a2").Select
numfila = ActiveCell.Value
Range("a3").Select
numpuntos = ActiveCell.Value
'modulo de localización
Range("a1").Select
ActiveCell.Offset(numfila + 1, 0).Select
For i = 1 To numpuntos

'if (isnumber(activecell.Value)= false
,activecell.Value,str(activecell.Value))

    If (ActiveCell.Value) = (celda) Then

        puntoloc = ActiveCell.Address
        i = numpuntos + 1
    Else
        If i = numpuntos Then
            MsgBox ("El punto no existe o esta mal escrito")
        Else
            ActiveCell.Offset(1, 0).Select
        End If
    Next i
End Sub

'puntoloc = celda
End Function
'dim localizar as function as void
Private Sub localizar()
    x = numpuntos
    For i = 1 To x
        If ActiveCell.Value = 1 Then
            i = numpuntos
        Else
            ActiveCell.Offset(1, 0).Select
        End If
    Next i
End Sub
```