

39  
2 EJ

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ACATLÁN

FALLA DE ORIGEN

INTERPRETACIÓN PRELIMINAR DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL  
DE LA CATEDRAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO, OBSERVADO AL INICIO  
DEL PROCESO DE RESTAURACIÓN.

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

RENÉ SERRANO MÁRQUEZ

DIRECTOR DE TESIS: ING. A. ROBERTO SÁNCHEZ RAMÍREZ

MÉXICO, D.F.

1995



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL.

SR. RENE SERRANO MARQUEZ  
ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL.  
P R E S E N T E :

DE ACUERDO A SU SOLICITUD PRESENTADA CON FECHA 11 DE AGOSTO DE 1993. ME COMPLACE NOTIFICARLE QUE ESTA JEFATURA DEL PROGRAMA TUVO A BIEN ASIGNARLE EL SIGUIENTE TEMA DE TESIS: "INTERPRETACION PRELIMINAR DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA CATEDRAL DE LA CIUDAD DE MEXICO. OBSERVADO AL INICIO DEL PROCESO DE RESTAURACION".

- INTRODUCCION.
- I.- ANTECEDENTES.
- II.- SISTEMA UTILIZADO PARA MONITOREAR LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE LA CATEDRAL DE LA CIUDAD DE MEXICO.
- III.- DESCRIPCION DEL PROCESO DE LA INFORMACION DERIVADA DEL SISTEMA DE MONITOREO.
- IV.- EVALUACION PRELIMINAR DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL.
  - CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.
  - REFERENCIAS.

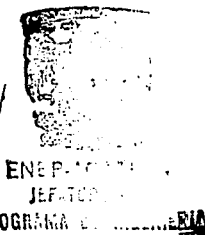
ASI MISMO FUE DESIGNADO COMO ASESOR DE TESIS EL SR. ING. ABRAHAM ROBERTO SANCHEZ RAMIREZ.

PIDO A USTED TOMAR NOTA QUE EN CUMPLIMIENTO DE LO ESPECIFICADO EN LA LEY DE PROFESIONES. DEBERA PRESTAR SERVICIO SOCIAL DURANTE UN TIEMPO MINIMO DE SEIS MESES COMO REQUISITO BASICO PARA SUSTENTAR EXAMEN PROFESIONAL, ASI COMO DE LA DISPOSICION DE LA DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES EN EL SENTIDO DE QUE SE IMPRIMA EN LUGAR VISIBLE DE LOS EJEMPLARES DE LA TESIS, EL TITULO DE TRABAJO REALIZADO. ESTA COMUNICACION DEBERA IMPRIMIRSE EN EL INTERIOR DE LA TESIS.

SIN MAS POR EL MOMENTO. RECIBA UN CORDIAL SALUDO.

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
ACATLAN, EDO. DE MEX., A 01 DE JUNIO DE 1995

ING. CARLOS ROSALES AGUILAR  
JEFE DEL PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL



**A ti que me diste tu vida, tu amor y tu espacio.**

**A ti que cargaste en tu vientre dolor y cansancio.**

**A ti que peleaste con uñas y dientes; valiente en tu casa  
y en cualquier lugar.**

**A ti rosa fresca de abril.**

**A ti mi fiel querubín.**

**A ti te dedico mis versos, mi ser, mis victorias.**

**A ti mis respetos Señora, Señora, Señora.**

**Y para no hacer tanto alarde, esta mujer de quien hablo, es linda, mi amiga gaviota  
su nombre es... mi Madre.**

# INDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1: ANTECEDENTES.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Prehábulo histórico.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Descripción de la estructuración.....</b>	<b>6</b>
1.2.1 Geometría.....	6
1.2.2 Cimentación original.....	8
<b>1.3 El problema de los hundimientos diferenciales.....</b>	<b>8</b>
1.3.1 Causas principales.....	8
1.3.2 Artificios utilizados durante la construcción para disimular los efectos de los hundimientos diferenciales.....	9
1.3.3 Monitoreo de la Catedral previo al proceso de renivelación.....	9
Configuraciones a nivel de piso.....	9
Seguimiento de movimientos de columnas y muros ante los hundimientos diferenciales.....	12
<b>1.4 Esquema general del estado estructural del templo previo al         inicio de la rehabilitación actual.....</b>	<b>12</b>
1.4.1 Asentamientos registrados en 1989 a nivel de feligresía...	12
1.4.2 Desplomo de columnas registrado entre 1989 y 1990.....	13
1.4.3 Estado de agrietamiento de la estructura.....	14
<b>1.5 Descripción del proceso de rehabilitación.....</b>	<b>14</b>
1.5.1 Recimentaciones.....	14
1.5.2 Descripción del proceso de subexcavación.....	14

<b>CAPITULO 2: SISTEMA UTILIZADO PARA MONITOREAR LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE LA CATEDRAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Sistema de monitoreo discreto.....</b>	<b>16</b>
2.1.1 Mediciones topográficas.....	17
2.1.2 Mediciones de los cambios de los desplomos de columnas y muros.....	18
2.1.3 Mediciones de convergencias en arcos.....	19
2.1.4 Mediciones de la variación de la inclinación de las columnas y muros.....	19
2.1.5 Mediciones del comportamiento de grietas.....	20
<b>2.2 Sistema de monitoreo electrónico.....</b>	<b>21</b>
2.2.1 Inclínómetros.....	21
2.2.2 Sistema automático de monitoreo.....	21
2.2.3 Extensómetros eléctricos (Strain gages).....	22
 <b>CAPITULO 3: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LA INFORMACIÓN DERIVADA DEL SISTEMA DE MONITOREO.....</b>	 <b>23</b>
<b>3.1 Perfiles de los ejes a nivel de bóvedas y a nivel de plintos.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 Trayectoria de las plomadas.....</b>	<b>27</b>
<b>3.3 Comparación de cambios de pendientes entre columnas y piso.....</b>	<b>28</b>
<b>3.4 Representación gráfica de los desplazamientos registrados en                 losejes de la zona del crucero.....</b>	<b>29</b>
 <b>CAPITULO 4: EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL.....</b>	 <b>32</b>
<b>4.1 Trabajos realizados hasta agosto de 1994.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 Hundimientos provocados a nivel de piso.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3 Respuesta estructural en el primer                 año de subexcavación.....</b>	<b>37</b>
<b>4.3.1 Comparación de hundimientos a nivel de bóvedas                         y a nivel de piso.....</b>	<b>37</b>

4.3.2	Convergencias en arcos.....	38
4.3.3	Seguimiento de plomadas.....	38
4.3.4	Análisis del movimiento registrado en columnas y el giro del piso en los tres primeros trimestres de subexcavación.....	39
	Cambios de pendiente a nivel de feligresía y en columnas.....	39
	Análisis de la representación gráfica de los desplazamientos registrados en los ejes de la zona del crucero.....	39
4.3.5	Análisis del movimiento registrado en columnas y el giro del piso durante el último trimestre del primer año de subexcavación.....	40
	Cambios de pendiente a nivel de feligresía y en columnas.....	40
4.3.6	Estado de agrietamiento.....	41
4.4	Imprevistos presentados en el primer año de subexcavación.....	42
CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....		43
RECONOCIMIENTOS.....		47
REFERENCIAS.....		49
TABLAS.....		52
FIGURAS.....		55
PROGRAMAS.....		113

# INTRODUCCIÓN

El problema de los hundimientos diferenciales se ha presentado en la Catedral de la Ciudad de México desde el inicio de su construcción. Los hundimientos se han generado básicamente por la diferencia de compresibilidad del suelo sobre el que se desplanta el templo. Esta diferencia de compresibilidad es producto de la presencia de los monumentos prehispánicos en esa zona, los cuales provocaron preconsolidación en el terreno.

Para resolver el problema de los hundimientos diferenciales, que al transcurrir el tiempo se siguieron incrementando, se llegó a la determinación de tratar de frenar su avance. Durante el presente siglo se habían realizado ya dos recimentaciones las cuales no dieron los resultados esperados. Por tal motivo se llegó a la determinación de intervenir nuevamente al templo. La intervención geotécnica actual, adoptó la técnica de subexcavación, ésta se aplica con el fin de disminuir la magnitud de los hundimientos diferenciales y dar una estabilidad estructural al templo.

Como asesores estructurales del proyecto se cuenta con la participación de la Facultad



de Arquitectura y el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., éste último, desarrollando diversos estudios estructurales al respecto, uno de los más importantes ha sido el de la interpretación de la respuesta estructural de la Catedral, basándose en el método observacional. Este método se basa fundamentalmente en el movimiento que presentan los elementos estructurales.

El programa para poder monitorear los movimientos estructurales cuenta con 3126 puntos instalados en el conjunto religioso (Catedral, Sagrario, Museo y Capilla de Ánimas), distribuidos en distintas mediciones.

Para poder explicar el comportamiento estructural se requiere procesar la información que resulta del monitoreo, obteniendo representaciones gráficas que facilitan la interpretación de los movimientos registrados.

En este trabajo se presentará una semblanza histórica sobre el proceso constructivo del conjunto religioso del que forma parte Catedral; así como una descripción breve de las mediciones efectuadas en el templo previas al proceso de rehabilitación; también se explicará cómo está constituido el programa de mediciones que se lleva a cabo para registrar la respuesta estructural del templo durante la subexcavación; y se describirá el proceso a que se somete gran parte de la información obtenida del sistema de monitoreo, por último, se harán algunos comentarios finales sobre el comportamiento observado durante el primer año del proceso de rehabilitación.

Es preciso señalar que aunque a un costado de la Catedral se localizan otras estructuras que interactúan de cierta forma con ella y cuya problemática es similar, en este trabajo se tratará específicamente el caso de la Catedral.

Los objetivos que se pretenden alcanzar en este trabajo son:

Hacer una reseña histórica tratando de hacer énfasis en las mediciones de la geometría de la estructura del templo previas al proceso de rehabilitación,

tener un panorama sobre el comportamiento de la estructura.

Desarrollar y adecuar programas de cómputo para generar de una forma automatizada representaciones gráficas que muestren con claridad el movimiento estructural.

Hacer una interpretación preliminar desde el punto de vista estructural de los resultados del proceso de la información para evaluar el avance del proyecto.

Se debe destacar que el proceso de la información de la cual surge este trabajo, fue utilizado también para realizar cuatro informes trimestrales y un informe anual durante el primer año de subexcavación. Éste proceso de información es muy importante en el proyecto, ya que de cierta forma otorga los fundamentos para guiar las distintas etapas del mismo.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

### **1.1 Preámbulo histórico.**

En 1528, Fray Juan de Zumárraga llegó a la Ciudad de México como primer obispo de la nueva diócesis, encontró un templo aún no terminado que le serviría de Catedral. Esta edificación que ocupaba una parte del recinto del templo mayor de Tenochtitlán, la había iniciado Hernán Cortés en 1524. La construcción la terminó el propio Zumárraga en 1532. Esta primitiva edificación se levantaba en lo que hoy es el frente del actual templo, orientada de este a oeste. Manuel Toussaint da una descripción de esa primera Catedral (Ref 1), la que, resumida, es la siguiente: tenía tres naves, siendo la central más elevada que las laterales; esas naves se dividían por dos filas de pilares de sección octogonal. Su extensión aproximadamente era del ancho del frente de la actual Catedral. Los techos eran de dos aguas el de la nave principal, y de viguería horizontal los de las laterales. La puerta mayor abría al occidente. Este templo que desde un principio se consideró provisional, duró escasamente un siglo.

A solicitud del señor Montúfar, se logró finalmente el permiso para edificar la Catedral definitiva, la que se pensó fuese de siete naves y con la puerta principal al poniente.

Lo costoso de la obra, el alterar la traza de la ciudad y lo falso del subsuelo, hicieron modificar la primitiva concepción de la construcción, por lo que se decidió que fuera esta de tres naves con dos más de capillas y que la fachada principal diera al sur, quedando el templo orientado de sur a norte.

Aprobado el proyecto, se iniciaron los trabajos de cimentación en 1562. En 1573 se comienza a desplantar el edificio, por lo que en este año se pone la segunda "primera piedra", lógicamente sobre la cimentación que se había iniciado 11 años antes.

Para 1615 estaban concluidas las portadas del lado norte, o sea las que dan a la actual calle de Guatemala. También, durante ese año los muros exteriores se habían levantado.

En 1623 se cerraron las bóvedas de la sacristía y en 1626, se ordenó la demolición de la Catedral vieja, con lo cual quedó completamente liberado el atrio de la nueva. Las obras avanzaban, aunque con cierta lentitud.

En el año 1629, la gran inundación que sufrió la ciudad de México, hizo que se suspendieran los trabajos y las ceremonias del culto las cuales parece que se reanudaron en 1635. Las obras continuaron y en los cinco años siguientes, se cerraron las bóvedas de la capilla de los reyes y cinco más de las naves procesionales.

El 22 de junio de 1667 se cerró la última bóveda. La segunda dedicación del templo se llevó a cabo el 22 de diciembre del mismo año.

Los trabajos continuaron en el exterior. Entre 1672 y 1689 se labran y concluyen las portadas de la fachada sur y las que dan al oriente y poniente. Las torres se comienzan a fabricar también en el siglo XVII.

Casi al finalizar el siglo XVIII, la Catedral no estaba aún terminada; se convocó

entonces a un concurso al que se presentaron tres proyectos respectivamente de Isidoro Vicente de Balbás, Joaquín García de Torres y José Damián Ortiz de Castro; el de este último se adoptó, y fue el que en forma genial desplantó los segundos cuerpos de las torres.

Por el año 1792, Manuel Toisá, arquitecto y escultor valenciano fue comisionado para terminar la obra. Su participación consistió en modificar la linternilla de la cúpula y el casquete de ésta, con objeto de proporcionarla más con la altura de las torres. Recorrió con balaustradas los muros y lugares que consideró convenientes; levantó un frontón semicircular al frente, en la sección que corresponde a la nave mayor y para darle aún más altura, colocó ahí el cubo del reloj al que coronó con las estatuas de la Fe, Esperanza y Caridad.

En resumen, la construcción de la Catedral Metropolitana se inició en 1573, por el ábside, siguieron la bóvedas, las que se concluyeron hacia 1667, la portada del lado sur se terminó en 1672, y finalmente las torres, en 1792; las modificaciones que se hicieron, básicamente a la cúpula y la adaptación de ornamentos, se concluyeron hasta 1813. Las estructuras adyacentes a la Catedral, fueron construidas en diversas etapas, aún estando esta en construcción. En la Fig 1 aparece la cronología de la construcción del conjunto religioso.

## **1.2 Descripción de la estructuración.**

Existen varios estudios interesantes sobre la arquitectura de la Catedral, como son los que se presentan en las Refs 1 y 2. En esta sección se anotarán sólo algunos aspectos esenciales para la comprensión de los resultados del monitoreo del templo sometido al proceso de rehabilitación.

### **1.2.1 Geometría.**

La Catedral tiene forma de cruz latina. Sus dimensiones, incluyendo muros, son aproximadamente de 127 metros de largo por 58 metros de ancho y 61 metros de

altura, esta última desde el nivel de plintos hasta la punta de las cruces de las torres.

El templo se divide en cinco naves: una mayor o central, dos procesionales o de tránsito y dos cerradas y divididas por capillas que circundan y terminan el edificio por los costados. La cubierta de la nave principal está constituida por una bóveda cilíndrica longitudinal que descansa sobre arcos torales, y que está intersectada por bóvedas cónicas transversales para formar los llamados lunetos. Las naves procesionales y las de capillas están cubiertas por bóvedas semiesféricas.

Sobre el medio crucero se levantan cuatro arcos torales estriados, sobre las cuales se forma una trabe octogonal de 64 metros de perímetro. La elevación de este elemento es de 36.5 metros, y sobre él se apoya el tambor compuesto de muros macizos con ocho ventanas. En el remate arranca la cúpula principal cuya base es similar a la anterior. Finalmente sobre ella se ubica la linternilla, compuesta de ocho ventanas de punto y ocho circulares, cubriéndola un pequeño cupulín.

De su planta se levantan 36 columnas robustas. 20 están adosadas a muros, constituyendo semi-columnas. 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. Sobre estas columnas se apoyan, en las cuatro direcciones, 42 arcos estriados sobre los cuales descansan bóvedas cilíndricas y cúpulas de geometría semiesférica sostenidas por las pechinas de las naves procesionales.

En la fachada del lado norte, hay dos puertas que dan paso a las naves de tránsito y que están separadas por dos gruesos contrafuertes empotrados a los muros que resisten el empuje de las bóvedas. La fachada sur cuenta con tres puertas en forma de arco, además de sus dos torres elevadas. En esta fachada resaltan seis contrafuertes que sirven de cabeceras a las divisiones del templo. Las torres están asentadas en los dos últimos contrafuertes de cada lado.

### **1.2.2 Cimentación original.**

Catedral se desplanta sobre un basamento constituido por una retícula de contratraves de mampostería de 3.6 metros de peralte, que se apoya sobre un pedraplén de mampostería de aproximadamente un metro de espesor. El pedraplén descansa sobre una plantilla de 20 centímetros de espesor la cual sirve de cabezal a una retícula de estacones de madera de 20 centímetros de diámetro y de dos a tres metros de longitud, espaciados entre cada uno de ellos 60 centímetros. Las contratraves y el pedraplén sobresalen de la periferia del templo.

En la Fig 2 se pueden ver las plantas a nivel de feligresía y a nivel de bóvedas así como un detalle de la cimentación y la geometría de la bóveda de la nave principal de Catedral.

En la Fig 3 se observa la fachada sur y la fachada poniente así como un corte transversal y otro longitudinal del templo.

Para obtener mayores detalles de aspectos estructurales de Catedral, se pueden consultar algunos estudios realizados al respecto por parte del Instituto de Ingeniería, tal es el caso del documento que se especifica en la Ref 3.

## **1.3 El problema de los hundimientos diferenciales.**

### **1.3.1 Causas principales.**

Los hundimientos diferenciales han afectado al templo prácticamente desde el inicio de su construcción. Estos hundimientos se atribuyen a las diferencias de compresibilidad en las arcillas blandas subyacentes provocadas por la preconsolidación que indujeron las construcciones prehispánicas (Fig 4), según se indica en la Ref 4.

Estos hundimientos se han incrementado de manera considerable en los últimos años debido al bombeo creciente de agua del subsuelo. Otro factor que ha provocado estos hundimientos es el peso propio de la estructura y su distribución en planta a cuya

fachada sur se le atribuyen las cargas más fuertes debido a la presencia de las torres.

En la Fig 5 se muestra la evolución de los asentamientos diferenciales entre las pilastras de la esquina surponiente y el presbiterio, comparado con el asentamiento total de la torre poniente según un estudio realizado y descrito en la Ref 4.

### **1.3.2 Artificios utilizados durante la construcción para disimular los efectos de los hundimientos diferenciales.**

Para corregir los efectos de los hundimientos en la estructura que se produjeron durante la construcción, se recurrió a la utilización de ciertas medidas tales como la variación del peralte del pedraplén sobre el cual se desplantan las contratraves de la cimentación, así como el incremento en las alturas de los muros y fustes de las columnas, para dejar aproximadamente a nivel los arranques de los arcos, en la Fig 6 se aprecia que la mayor corrección se realizó en la zona sur y esta se fue reduciendo hacia el norte, donde los hundimientos presentaron menor magnitud.

Existe otra prueba del intento por corregir los hundimientos presentados durante la etapa de construcción y son los ajustes realizados en la fachada principal. En la Fig 7 se muestra cómo los desniveles que se tienen en las parte inferior del templo, van disminuyendo con la altura, evidenciándose las correcciones hechas en etapas distintas de la construcción. No se puede afirmar que en cada caso se haya atacado el desnivel total.

Al medir las alturas de cada uno de los cuerpos componentes de las torres de Catedral se obtuvieron los resultados que se muestran en la Fig 8 que comprueban los desniveles que presentó el templo desde su origen. Se observa que la torre del lado poniente tiene aproximadamente 80 cm más de altura que la del lado oriente.

### **1.3.3 Monitoreo de la Catedral previo al proceso de renivelación.**

**Configuraciones a nivel de piso.** Los estudios sobre la evolución de los hundimientos



diferenciales que han afectado a la Catedral, son relativamente escasos. Aunque existen algunos registros de nivelaciones del piso de feligresía desde 1907, los cuales, en general, siempre están referidas al punto en el cual se intersectan los ejes C y 3 que históricamente se ha considerado el punto de referencia para medir el hundimiento diferencial del templo, ver Fig 9 y Fig 10.

En algunos de estos registros, se aprecian perfiles medidos a nivel de feligresía que muestran perfiles reales del año de 1934 comparados con los del año 1973. Estos presentan cierta ambigüedad en lo que respecta al hundimiento total. Esta ambigüedad se detectó al analizar los ejes C, D, 6 y 7 de la Catedral, por ser éstos los que fueron medidos con mayor detalle dado que el número de puntos de control registrados era mayor que en el resto de los ejes. A continuación se presentan los resultados del análisis de los ejes mencionados:

En la parte superior de la Fig 11 se presentan los perfiles del piso del eje C existentes en los años 1934 y 1973; comparados con el perfil registrado en 1991. En la parte inferior de la misma figura se observa el perfil de hundimiento presentado entre 1934 y 1973; y el hundimiento que experimentó dicho eje entre 1973 y 1991.

En las Figs 12, 13, y 14 también se comparan los perfiles de los ejes D, 6, y 7 de Catedral, respectivamente. Se aprecia en las Figs 11 y 12 que el hundimiento presentado en la zona sur correspondiente al periodo 1973-1991 es de aproximadamente 10 cm; sin embargo esto no concuerda con la velocidad promedio del hundimiento total en la esquina surponiente que muestra la Fig 5, dado que de 1973 en adelante dicha velocidad es de 4.9 mm/mes, lo cual implica que entre 1973 y 1991 el hundimiento debió haber sido de aproximadamente 1.05 m, por lo tanto esto demuestra que la elevación no está relacionada a un mismo sistema de referencia, incluso entre 1934 y 1973 se presenta una situación similar, ya que en la Fig 5, tomada de la Ref 4, se aprecia que la torre poniente, en ese mismo periodo, debió haber descendido aproximadamente 5 metros, los cuales no se reflejan en el perfil de

hundimiento del eje C presentado en la Fig 11 . Por esta razón, en lo que respecta al hundimiento total, los registros de 1934 y 1973, deben ser tomados con cierta reserva. En cuanto al hundimiento diferencial, estos registros son coherentes con las nivelaciones mostradas en la Fig 9 y la Fig 10 y de ellas se pueden obtener algunos datos importantes desde el punto de vista cualitativo.

En la Fig 11 que corresponde al eje C de Catedral, se observa que entre 1934 y 1973 el eje gira en todo su conjunto hacia el sur con un quiebre en el eje 7, en tanto que el hundimiento que experimentó entre 1973 y 1991 manifiesta que el giro siguió dándose hacia el sur pero ahora con un número mayor de quiebres, los cuales se presentaron en los ejes 6, 7 y 10, siendo la zona del crucero la más afectada.

En el eje D cuyos perfiles se presentan en la Fig 12, se aprecia que entre 1934 y 1973, el eje giró hacia el sur, presentando tres quiebres francos en los ejes 6 y 10, mientras que en el periodo que va desde 1973 hasta 1991 se aprecian los quiebres antes mencionados, pero el tramo comprendido entre los ejes 6 y 10 no tiene un cambio de pendiente tan drástico como en el primer periodo.

El eje 6 aparece en la Fig 13, ahí se observa que entre 1934 y 1973, la configuración de hundimientos sufrió cambios fuertes de pendientes, uno en el eje D y otro en el eje C, y en el tramo comprendido entre los ejes B y C se aprecia un descenso casi plano; pero en el período de 1973 a 1991 se ve un comportamiento distinto al descrito previamente, ya que ahora se nota un quiebre en el perfil en el eje C que marca claramente que la zona al poniente del mismo eje gira hacia el oeste.

En la Fig 14 se observan los hundimientos totales y diferenciales del eje 7; respecto a estos últimos, destaca un cambio notable, en la pendiente entre 1934 y 1973 ya que la zona localizada al este de la nave central giró hacia el oriente, y entre 1973 y 1991 esa misma zona giró en dirección contraria, es decir hacia el poniente.

De lo anterior, se establece que existió un cambio en el comportamiento de los hundimientos, pero este cambio no se da en la dirección que contrarrestara la inestabilidad de la estructura, incluso se debe hacer notar que la no uniformidad en los hundimientos sometió a la estructura a un estado de distorsión que provocó esfuerzos de magnitud considerable.

**Seguimiento de movimientos de columnas y muros ante los hundimientos diferenciales.** El monitoreo del comportamiento de la estructura a lo largo del tiempo, no ha sido objeto realmente de estudio, ya que sólo se encontró un plano referente a desplomos medidos en el año de 1973, con el inconveniente de que no se dan indicaciones acerca del procedimiento y altura a la que fueron registrados dichos desplomos. En la Fig 15 se muestran los datos que se obtuvieron del plano de desplomos registrados en 1973.

Debido a la falta de datos, las posibilidades de sacar conclusiones con detalle se ve ampliamente restringida.

**1.4 Esquema general del estado estructural del templo previo al inicio de la rehabilitación actual.**

**1.4.1 Asentamientos registrados en 1989 a nivel de feligresía.**

Una configuración de asentamientos en relación a la columna C-3 realizada en diciembre de 1989 se presenta en la Fig 16 donde se observa que entre las columnas C-3 y C-9 hay un desnivel de 1.9 m, lo cual indica, si lo comparamos con el desnivel entre esos dos puntos que surgió entre 1573 y 1667 (Fig 6), de 0.85 m, que el 45% de ese hundimiento diferencial ocurrió antes del cierre de bóvedas.

Una visión más amplia y directa de la configuración deformada del piso que se encontró en 1989 se tiene en la representación tridimensional que se ve en la Fig 17. En esta figura, se pueden distinguir algunas tendencias: la primera, es una inclinación muy marcada en la zona centro-sur del piso de Catedral hacia la esquina surponiente,

y la segunda, es la tendencia de la zona norte a girar hacia el poniente y a hundirse más en las fachadas laterales que en la parte central.

Como se aprecia en la Fig 16, en diciembre de 1989 el desnivel existente entre el punto C-3 y el punto B-12, es de aproximadamente 2.40 m, pero dada la variación de la velocidad de hundimiento que a lo largo del tiempo ha sufrido el templo, se consideró útil hacer el estudio de la velocidad con que progresaban los asentamientos antes del inicio de los trabajos de nivelación. El resultado de estos estudios, se muestra en la Fig 18, en ella aparece la configuración de velocidades anuales que se obtuvieron con mediciones que se realizaron desde el 7 de enero de 1991 hasta el 2 de septiembre del mismo año.

#### **1.4.2 Desplomo de columnas registrado entre 1989 y 1990.**

Fue durante el periodo comprendido entre octubre de 1989 y febrero de 1990 cuando se midieron los desplomos de las columnas de una forma detallada. Los resultados de esa medición aparecen en la Fig 19.

Para comparar los desplomos obtenidos en 1973 (Fig 15) con los medidos entre 1989 y 1990, se consideró de manera tentativa que en 1973 los desplomos se midieron a 14 metros en las columnas localizadas fuera de la zona del crucero de Catedral y a 20 metros en las que se encuentran en dicha zona, los 14 y 20 metros representan la altura promedio de las impostas en la nave procesional y central respectivamente, se obtuvo que a 14 metros el desplomo se incrementó desde 1973 hasta el periodo 1989-1990 en un promedio de 39% mientras que a 20 metros el incremento representó 72% aproximadamente, cantidades muy elevadas, tomando en cuenta que de ser ciertas los daños presentados en la estructura durante ese periodo serían considerables, por lo tanto se deduce que los desplomos de las columnas registrados en 1973 se midieron en alturas menores que los 14 metros. Este punto de vista se complementa al comparar los cambios de pendientes de los perfiles de hundimiento del piso entre 1973 y 1991 obteniendo datos que indicaron que si la

lectura de desplomos en 1973 se realizó a 14 m, entonces la relación entre los cambios de pendiente de la plomada con respecto al piso representa en promedio ser 3.37 veces, y en el caso de haberla realizado a 20 metros, dicha relación resulta ser de hasta 5.45 veces.

#### **1.4.3 Estado de agrietamiento de la estructura.**

Un efecto claro de los hundimientos diferenciales es el estado de agrietamiento de la estructura; por ejemplo un patrón de agrietamientos aparece en la Fig 20, este patrón está ligado con los hundimientos presentados; se trata de una grieta que corre a lo largo del eje C a nivel de piso de feligresía. Esta grieta afecta las bases de las columnas y se manifiesta también en las contratraves de la cimentación. Otras grietas presentes en las fachadas y cubierta de Catedral, se muestran en la Fig 21.

### **1.5 Descripción del proceso de rehabilitación.**

#### **1.5.1 Recimentaciones.**

Cabe hacer mención de las dos recimentaciones realizadas en este siglo para intentar corregir el comportamiento de los hundimientos diferenciales que afectaban al templo, la primera, se llevó a cabo en los principios de los años cuarenta y en la cual a grandes rasgos se intentó quitar presión al subsuelo, rigidizar y dar continuidad a las contratraves de mampostería forrándolas con concreto reforzado, la segunda recimentación, fue a principios de los años setentas y se intentó, por medio de pilotes de control, atacar los hundimientos diferenciales. En ambos casos no se tuvieron los resultados esperados. El estudio a detalle de esas recimentaciones se encuentra en la Ref 4.

#### **1.5.2 Descripción del proceso de subexcavación.**

Para evitar que los asentamientos diferenciales siguieran acumulándose, con el consecuente incremento de desplomos y desarrollo de grietas, fue necesario modificar el comportamiento de la cimentación de la Catedral y se adoptó para este propósito la técnica de subexcavación; la cual tiene como objetivo corregir los desniveles y

desplomos de edificios que han sufrido hundimientos diferenciales, mediante el procedimiento de hacer descender las partes altas respecto a las bajas, por medio de la extracción lenta y controlada del suelo en el que se apoya la cimentación. Este objetivo se alcanza realizando perforaciones horizontales de diámetro pequeño, hechas desde lumbreras o pozos que permiten el acceso a los estratos del subsuelo, de los cuales se extrae el material.

En las zonas altas de Catedral y Sagrario se excavaron lumbreras circulares, en cuyo fondo se hicieron las perforaciones horizontales en direcciones radiales. La geometría de las lumbreras es de forma cilíndrica con un diámetro externo de 3.4 metros, alcanzando una profundidad media de 20.0 metros, medidos desde el nivel de piso de criptas.

El procedimiento de subexcavación, es congruente con los pilotes de control instalados, pero considerando que la implantación de este proceso tomó varios meses, se recomendó instalar pilotes en el exterior del perímetro norte de la Catedral (en las fachadas oriente y poniente, desde el eje 2 hasta la zona del crucero), y en los lados sur, oriente y norte del Sagrario a fin de frenar temporalmente la velocidad de hundimiento de esos sectores. Actualmente, se cuenta con 30 lumbreras distribuidas en los templos como se aprecia en la Fig 22. Todo lo relacionado con el estudio geotécnico de la subexcavación se trata a fondo en la Ref 4 y en la Ref 5.

Los movimientos que se intentan dar a la Catedral por medio de la subexcavación, a grandes pasos, son los de hacerla girar alrededor del eje A y alrededor del eje 12, para lograr un movimiento uniforme hacia el noreste tratando de producir, además, dos movimientos locales. El desarrollo y explicación a detalle de este movimiento, se presenta en la Ref 6.

## **CAPÍTULO 2**

# **SISTEMA UTILIZADO PARA MONITOREAR LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE LA CATEDRAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

Se debe señalar que este sistema se fue definiendo por las peticiones realizadas por el grupo asesor del proyecto, éste, con la finalidad de llevar un registro de los aspectos más importantes del movimiento del templo durante la etapa de rehabilitación del mismo. Para establecerlo, se estudiaron las ventajas y las desventajas que presentaban varios sistemas, desde los más simples como las plomadas hasta algunos sistemas electrónicos de monitoreo continuo.

### **2.1 Sistema de monitoreo discreto.**

Tomando en cuenta los conceptos antes mencionados, se llegó a la conclusión de que la instrumentación más adecuada debería tener la capacidad de establecer el control del mayor número de aspectos relacionados con la respuesta estructural ante el proceso de subexcavación, de la forma más simple y directa posible y que cumpliera con la precisión y la permanencia requeridos para el proyecto. Así, se optó por incluir en el sistema de monitoreo los conceptos que aparecen en la Tabla 1 en la cual se

observa el número de puntos instalados en Catedral, Sagrario y Museo, así como la precisión de cada medición y la periodicidad de las lecturas.

En la Ref 7, se puede encontrar una información más detallada acerca de los conceptos mencionados y a continuación se presenta un resumen de cada uno de ellos:

### **2.1.1.- Mediciones topográficas.**

El objetivo que se busca en este concepto, es conocer las elevaciones y el cambio de las mismas de los puntos de control situados a nivel de plintos y a nivel de bóvedas, así como conocer los desplazamientos de los puntos de control instalados en la fachada sur y las torres, ésto con la finalidad de llevar un control de los movimientos que se inducen por medio de la subexcavación en la estructura.

Para llevar a cabo estas mediciones, se necesitó un sistema de referencia fijo en relación a la zona de afectación de la obra que permitiera llevar el control de los desplazamientos de los puntos de apoyo topográfico para el levantamiento de coordenadas y nivelaciones de las estructuras.

El sistema de referencia está formado por un banco de nivel instalado a 100 metros de profundidad (BN-100) cuya cota estará siempre referida al banco de nivel Atzacolco y una cuadrícula de puntos de referencia fijos en el piso de la Plaza de la Constitución como se observa en la Fig 23.

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 Torre poniente de Catedral y a 188 metros de su paño sur. (ver Fig 23).

Por medio de nivelaciones que tienen una precisión de 5 milímetros y levantamiento



de coordenadas de los puntos de control instalados en la Plaza de la Constitución, se determinan los desplazamientos que presentan los puntos de medición instalados en la estructura.

La distribución y la identificación de los puntos de control o fichas instalados en las bóvedas se observa en la Fig 24. Cada punto de control, está formado por una varilla de acero empotrada en la estructura mediante resina, está protegida con tubo galvanizado. Un detalle de este arreglo, se aprecia en la misma figura.

La localización de las fichas instaladas como puntos de control a nivel de plintos y otros a nivel de piso de feligresía se aprecia en la Fig 25, que a diferencia de los puntos instalados en las bóvedas, no están protegidos con tubo galvanizado; en este caso se utilizan pernos que se introducen totalmente en la estructura.

La localización de los puntos instalados en la fachada sur, torres y cúpulas utilizados para registrar el desplazamiento horizontal de estos elementos, aparece en la Fig 26. En este caso los puntos de control están formados con placas de aluminio provistas de una caja que permite colocar un prisma reflejante portátil siempre en la misma posición. En el caso particular de los muros de las fachadas se utilizan placas reflejantes en lugar de prismas.

### **2.1.2.- Mediciones de los cambios de los desplomos de columnas y muros.**

El objetivo es conocer los desplazamientos de cada una de las plomadas instaladas en los muros y columnas para evaluar su cambio de verticalidad. Se debe establecer que para este propósito se han instalado en las columnas y muros una serie de plomadas, es decir, en una misma columna o muro puede haber más de una plomada, colocadas a diferentes alturas y con orientaciones diferentes. Las plomadas se instalan donde arrancan los arcos de naves procesionales y en los arranques de los arcos de la nave central.

La precisión de este sistema es de 1 milímetro. Para dar seguimiento a las plomadas, se tuvieron que instalar ménsulas en las cornisas de los muros y columnas, de las cuales penden alambres que en el extremo llevan una argolla, de la cual por medio de un gancho se suspende la plomada.

En octubre de 1992 se definió la posición inicial o de partida, para ello, se colocó la plomada y se dejó estabilizar, cuando ésto sucedió se marcó el punto de partida en el piso; posteriormente se instalaron cuatro pernos que se utilizan como base para colocar siempre en la misma posición un marco de referencia portátil. En la Fig 27 se muestra el equipo utilizado para llevar a cabo la medición del cambio de desplomos.

Para medir el cambio de verticalidad de las columnas se repite de manera periódica la secuencia indicada en el párrafo anterior, es decir, se coloca la plomada en cada una de las argollas ya instaladas y se toma la lectura de la posición respecto a las direcciones N-S y E-W, mediante el marco de referencia portátil instalado en los puntos fijos en el piso.

### **2.1.3.- Medición de convergencias en arcos.**

El objetivo de medir las convergencias, es conocer la variación de la distancia de los claros de los arcos para determinar cierres o aberturas. Las mediciones se realizan a distintas alturas, incluyendo el extradós de la bóveda de la nave central.

Para hacer el registro se utiliza un extensómetro de cinta entre puntos fijos instalados en las columnas de las secciones de las naves central y procesional y la zona de crucero, así como en los remates de los muros por extradós de la nave central y sector del crucero. La precisión de la medición es de 1 milímetro. Un esquema de la medición de convergencias se observa en la Fig 28.

### **2.1.4.- Mediciones de la variación de la inclinación de las columnas y muros.**

El objetivo es conocer el giro a distintas alturas de los elementos para registrar los movimientos locales o problemas que se presenten.

La medición, se lleva a cabo con una plomada electrónica (tiltmeter), con una precisión práctica de un minuto de arco. Se instala una placa base en un juego de pernos fijos instalados en los puntos de control que para este concepto se tienen considerados y se coloca el sensor sobre ella, se toma la lectura del indicador y se repite la operación en los dos sentidos y en dos direcciones, en la Fig 29 se puede ver un esquema del equipo utilizado para medir el giro de los elementos estructurales.

#### **2.1.5.- Mediciones del comportamiento de grietas.**

Tomando en cuenta que el agrietamiento es una consecuencia inevitable de los movimientos a que se somete a la estructura, el objetivo de este tipo de mediciones, es llevar a cabo un control del comportamiento que presentan las grietas existentes, así como conocer la aparición de nuevas grietas para detectar posibles situaciones de inestabilidad estructural.

La precisión que se tiene en este tipo de lecturas, es de 0.1 milímetros. La medición se lleva a cabo con un vernier electrónico cuyas puntas se apoyan en las marcas de los testigos, los cuales están constituidos por pernos colocados a cada lado de la grieta en estudio, ubicados en grupos de dos y de cuatro en puntos sobre la trayectoria de las grietas; una vez colocado el vernier, se registra la distancia que hay entre los testigos.

Inicialmente todas las mediciones anteriores estaban programadas para realizarse con la frecuencia que aparece en la Tabla 1, o en caso de algún suceso extraordinario llevar a cabo mediciones de monitoreo rápido para detectar algún problema ocasionado sobre la estructura. Conforme el proyecto avanzó, se observó que algunas mediciones

se deberían realizar con una frecuencia mayor dado que la precisión de algunas de ellas resultaba insuficiente para poder dar un seguimiento adecuado.

## **2.2 Sistema de monitoreo electrónico.**

El motivo por el cual se instaló este tipo de sistema, fue para poder obtener registros continuos de alguna situación peculiar que se pudiera presentar en el templo. Está compuesto por los conceptos que a continuación se explican:

### **2.2.1 Inclinómetros.**

Se trata de un sistema de monitoreo continuo integrado por catorce inclinómetros o dispositivos que miden el cambio de inclinación de un punto determinado, se localizan en siete puntos de la Catedral: tres puntos en la zona de criptas, dos en los contrafuertes centrales del eje 5 y dos en la base de la cúpula principal. En la Fig 30 se aprecia la localización de los dispositivos.

Los inclinómetros, miden el cambio de inclinación, en una sola dirección, por lo que fue necesario que en cada punto, se colocaran dos aparatos, uno que realizara la medición en la dirección N-S y otro que la llevara a cabo en la dirección E-W.

Para una información más detallada acerca del funcionamiento de estos dispositivos, se puede consultar la Ref 8.

### **2.2.2 Sistema automático de monitoreo.**

Este sistema de monitoreo continuo, consta de 19 sensores automáticos: cuatro telecoordinómetros para medir el cambio de desplomo en las cuatro columnas del crucero de catedral; diez extensómetros de hilo para medir la variación de la longitud de los arcos, de los cuales tres están en la zona de crucero del Sagrario y siete en la Nave central de Catedral; un radiómetro para medir la radiación solar, este último

localizado en la parte externa de la zona de arranque de la cúpula principal de Catedral y cuatro termómetros. La Fig 31 muestra la distribución de los 19 sensores.

### 2.2.3 Extensómetros eléctricos (Strain gages).

Para garantizar la estabilidad de la estructura durante el proceso de renivelación, se juzgó conveniente colocar torres de apuntalamiento, cuya finalidad es aliviar una parte de la carga que actúa en los elementos estructurales y absorber la sobrecarga que se pudiera generar durante la etapa correctiva.

Dada la complejidad del proyecto, se consideró necesario llevar un control de las cargas actuantes en las torres de apuntalamiento, esto, con la ayuda de extensómetros eléctricos (strain gages) y un puente de Wheaston, con los cuales se miden las deformaciones en los tubos. La carga se obtiene por medio de la relación

$$P = E A \epsilon$$

DONDE:

P es la carga actuante

E es el módulo de elasticidad

A es el área de la sección transversal del tubo

$\epsilon$  es la deformación unitaria que produce la carga P

La distribución del sistema de apuntalamiento y los elementos instrumentados se aprecia en la Fig 32. Para mayor información acerca de los extensómetros colocados en el sistema de apuntalamiento, se puede consultar la Ref 9.

Este tipo de registros permiten también verificar el programa de mantenimiento de apriete del sistema de apuntalamiento que se realiza de forma periódica.

## **CAPÍTULO 3**

### **DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LA INFORMACIÓN DERIVADA DEL SISTEMA DE MONITOREO**

En este capítulo se dará la explicación del proceso a que es sometida una parte importante de la información que surge de los registros del monitoreo.

Se consideró necesario crear y perfeccionar programas de cómputo para lograr procesar la información aportada por las empresas encargadas de realizar las mediciones, estos programas dan como resultado una serie de archivos de datos que se pueden graficar para crear representaciones específicas del movimiento de la estructura.

A continuación se explican los conceptos de los cuales se obtuvieron representaciones gráficas y el procedimiento para obtenerlas.

### **3.1 Perfiles de los ejes a nivel de bóvedas y a nivel de plintos.**

El objetivo es generar una representación gráfica que permita comparar el descenso que se presenta en cada uno de los ejes de la estructura a nivel de bóvedas y a nivel de plintos.

La metodología y las consideraciones que se juzgaron convenientes para procesar la información derivada de las nivelaciones topográficas fueron las siguientes:

Dada la cantidad considerable de fichas instaladas tanto a nivel de bóvedas (640) como a nivel de plintos (277), se consideró necesario establecer en relación a los ejes del templo un sistema de líneas tanto en el sentido longitudinal como en el transversal, quedando establecidas 29 líneas a nivel de bóvedas y 18 a nivel de plintos. Las líneas componentes del sistema se integran por fichas colocadas a lo largo de los ejes respectivos. Así, a nivel de bóvedas, existen ejes que son representados por dos líneas de fichas (una línea a cada lado del eje). En tanto que a nivel de plintos se establecieron sendas líneas a los ejes correspondientes.

El proceso de la información, comienza con la colocación de los registros en dos archivos, uno que contiene todos los registros de las fichas componentes del sistema de líneas que representan a los ejes a nivel de plintos y otro que contiene todos los registros de las fichas del sistema a nivel de bóvedas, a estos archivos se les nombró archivos generales.

Una vez establecidos los archivos generales se procede, con la ayuda de una hoja de cálculo, a realizar en cada uno de ellos la diferencia entre dos fechas de interés, es decir, a las lecturas de la fecha más reciente dentro de ese periodo de estudio, se le restan las lecturas asociadas al inicio de éste, la diferencia representa el hundimiento que experimentó la estructura durante ese lapso. Con los resultados de la diferencia, se forman los denominados archivos de diferencias. Es importante señalar que debido a las diversas actividades que se desarrollan en la estructura por

las necesidades propias del proyecto, algunas fichas se pierden o se obstruyen temporalmente, quedando su registro suspendido durante cierto periodo. Cuando una ficha se obstruye, ésto queda indicado dentro de los archivos que se obtienen de las lecturas de campo. El tratamiento numérico seguido es el de tomar en cuenta en los archivos de diferencias a las fichas con lecturas obstruidas ya sea en el nivel de bóvedas o en plintos la siguiente consideración; si la ficha faltante está en bóvedas y se localiza en la parte intermedia de la línea que representa un eje determinado, entonces la ficha toma la lectura promedio de los registros de las fichas que se encuentran franqueándola, si la ficha se encuentra en uno de los extremos de la línea no se extrapola y entonces el espacio se deja vacío. De forma similar, si la situación se presenta en una ficha a nivel de plintos, y se encuentra en la parte media de una línea, entonces la elevación de la ficha tomará el promedio de las lecturas de las fichas que están adyacentes a ella, si la ficha está en uno de los extremos de la línea, entonces el espacio se deja vacío, ya que no se juzgó conveniente extrapolar los registros. Estas consideraciones de complementar las lecturas obstruidas, se llevó a cabo para evitar discontinuidades en la representación gráfica de los perfiles.

Una vez obtenidos los archivos de diferencias, uno para bóvedas y otro para plintos, se procede a unir, por medio de una hoja de cálculo, esos archivos de diferencias con los archivos que tienen los siguientes datos: identificación de la ficha, coordenada en el sentido transversal (X) , y coordenada en el sentido longitudinal (Y), y que corresponden uno por separado para cada nivel; de tal manera que al unir ambos archivos, se obtiene un archivo llamado acoplado, el cual contiene los siguientes datos: identificación de la ficha, coordenada X, coordenada Y, y el cambio de elevación respectiva.

se

El archivo acoplado correspondiente a nivel de bóvedas y a nivel de plintos, se procesa por medio de los programas 1 y 2 respectivamente. El listado de estos programas aparece en el apéndice de programas. Como resultado de este proceso se obtienen archivos que contienen los mismos datos que el archivo acoplado, pero ahora, con un



orden específico para graficar los hundimientos que sufren los diversos ejes de la estructura.

Como un ejemplo del resultado final de este proceso, se tiene la Fig 45 que muestra el hundimiento que experimentaron los ejes C y D entre agosto de 1993 y agosto de 1994, comparado con el hundimiento del centro de la nave principal en el mismo periodo. Otros ejemplos del resultado de este proceso, se aprecian en las Figs 58 y 59 en las que se compara el hundimiento registrado entre noviembre de 1992 y agosto de 1994 con las grietas presentes en la fachada sur y poniente, respectivamente. Un detalle que se hace notar con este tipo de representaciones, son las pequeñas discontinuidades o escalones en la línea que representa el perfil del eje a nivel de plintos, esto se debe a que en la intersección de dos ejes, algunas fichas tienen las mismas coordenadas, pero sus cambios de elevación son distintos y ese fenómeno hace que se produzcan cambios repentinos de pendiente, claramente perceptibles en las gráficas.

Otra representación de interés acerca de los perfiles se lleva a cabo con los registro de cambio de elevación de las fichas que se localizan a nivel de plintos, y que consiste en representar la configuración real del eje en dos fechas distintas comparadas con la diferencia existente entre ellas. Los archivos son sometidos a un proceso similar al explicado anteriormente, sólo que en el que se explicará a continuación habrá algunas variantes dentro del procesamiento.

Así, del archivo general de plintos, se toman lecturas de una fecha arbitraria y en lugar de un archivo de diferencias, se define un archivo de lecturas. Este archivo de lecturas se somete al mismo procesamiento que se explicó en los párrafos anteriores. El archivo de resultados, producto del programa 2 (este programa es el que procesa los registros referentes a plintos), se procesa ahora con el programa 3 cuyo listado aparece en el apéndice de programas, el programa realiza la eliminación de las discontinuidades o escalones que se mencionaron en el proceso previamente descrito,

por medio de la realización de los promedios de fichas con coordenadas similares. Los archivos que resultan del procesamiento con el programa 3, se manejan con una hoja de cálculo para graficar los perfiles físicos registrados a nivel de plintos en fechas distintas de un periodo de interés. Dentro de esa misma hoja de cálculo, se realiza la diferencia entre esos registros para obtener el perfil de hundimientos correspondiente, el cual se grafica junto con los perfiles físicos. Como ejemplo se tiene las Figs 39 y 40.

### **3.2 Trayectoria de las plomadas.**

El objetivo es conocer el recorrido que siguen las 122 plomadas instaladas en muros y columnas del templo cuando este se somete a movimientos inducidos en su base. El registro de las trayectorias se lleva a cabo para cada una de las unidades colocadas en campo.

A continuación se explican las situaciones presentadas en campo para llevar a cabo este tipo de procesamiento.

Se obtienen los archivos de registros correspondientes a los desplazamientos que presentan cada una de las plomadas, tanto en dirección E-W (X) como en la N-S (Y), a partir de esto y con la ayuda de una hoja de cálculo se hace la diferencia entre dos registros consecutivos, restándole a la más reciente la inmediata anterior, con la finalidad de obtener el desplazamiento parcial presentado entre las lecturas correspondientes. Este procedimiento se realiza con todos y cada uno de los registros hasta la fecha más reciente que se tenga registrada, para obtener los registros relativos a cada periodo que contienen los desplazamientos parciales que experimentan las 122 plomadas, tanto en la dirección X como en la dirección Y.

Una vez establecidos los archivos de los desplazamientos parciales, todos estos archivos se someten a un procesamiento por medio del programa 4 que aparece en el apéndice de programas, cuya tarea es la de sumar las lecturas parciales de tal forma

que de un punto de partida se vayan obteniendo puntos subsecuentes habiéndoles sumado el desplazamiento parcial calculado, estos resultados se obtienen en arreglos matriciales.

A cada matriz se le asigna un número para su identificación, además se cuenta con un expediente en el que se indica las dos columnas que representan el desplazamiento en X y en Y respectivamente, de la matriz indicada, asociadas a una plomada determinada. Cada una de las matrices contienen los datos para graficar la trayectoria de seis plomadas. Estas matrices se manejan por medio de una hoja de cálculo o con programas graficadores con los cuales se puede obtener por ejemplo la representación gráfica mostrada en la Fig 48, en la cual se indica el desplomo de las columnas del crucero de Catedral, registrados a escala 1:10 junto con el movimiento correctivo provocado entre octubre de 1992 y agosto de 1994.

Algunas de las plomadas se ven obstruidas por las actividades que se realizan dentro de la obra, esto impide medir el cambio de posición que sufren, en esa situación, se consideró conveniente seguir registrando la última lectura obtenida hasta que se pudiera efectuar nuevamente la medición de la plomada correspondiente.

### **3.3 Comparación de cambios de pendientes entre columnas y piso.**

Este concepto se desarrolló con el objetivo de comparar cuantitativamente el movimiento que se presentó en la estructura registrado a nivel de piso y el registrado en las columnas.

Una vez conocidos los desplazamientos tanto de plomadas como de piso, es relativamente sencillo establecer la pendiente con la que se mueven; ya que se conocen tanto la altura a la que se encuentran todas las plomadas como la distancia que existe entre cada eje.

Para obtener la pendiente del movimiento de una columna que presenta más de una

plomada instalada en ella, se promedia el movimiento de todas las plomadas instaladas en la misma columna, se excluyeron del promedio todas aquellas que presentaban registros ambiguos, es decir, aquellas plomadas cuyo registro se veía alterado o las que sus alturas no concordaban con las establecidas en campo. En el caso del piso, la pendiente se determina con la relación que existe entre el hundimiento diferencial en cada tramo comprendido entre dos ejes y la distancia existente entre ellos.

Una representación gráfica del análisis anterior se muestra en la Fig 51 para el periodo que abarcan los tres primeros trimestres de subexcavación, y en la Fig 56 se presentan los resultados del mismo estudio para el cuarto y último trimestre del primer año de trabajos de renivelación.

### **3.4 Representación gráfica de los desplazamientos registrados en los ejes de la zona del crucero.**

El objetivo de este tipo de representación, es el de complementar la interpretación de las mediciones que se llevan a cabo en campo y relacionarlas por medio de una representación gráfica conjunta de las mismas. Para ello se realizó el análisis estructural de cuatro modelos analíticos de los ejes de la zona del crucero, por ser estos los de mayor interés.

Cada uno de los modelos está formado con barras; se representan exclusivamente elementos verticales y el piso de feligresía. Las propiedades geométricas y las características mecánicas se consideraron de valor unitario. El modelo incluye nudos intermedios en los que se ubican puntos de monitoreo; es decir, donde se encuentra ya sea un punto de nivelación, un punto donde se mide el giro, un punto donde se mide el cambio del desplomo, o un punto donde se mide la variación del claro. En resumen, el modelo del eje 6 consta de 52 nudos unidos con 51 elementos barra, el eje 7 consta de 54 nudos y 53 elementos barra, y los ejes C y D utilizaron 121 nudos y 120 elementos barra.

Es importante destacar que el propósito de este análisis fue el de contar con una representación del movimiento de la estructura y no el de evaluar las fuerzas internas que se generan en ella, dado que para este propósito se lleva a cabo el estudio que se cita en la Ref 10.

Una vez constituidos los modelos, éstos fueron analizados ante los desplazamientos registrados en campo.

Para que el modelo representara las condiciones obtenidas en campo, se juzgó conveniente fijar el nudo a nivel de feligresía en el cual se registró el hundimiento de menor magnitud de cada uno de los modelos y dejar libres los nudos restantes.

Los modelos se analizaron con el programa SAP-90. Los resultados indicaron la existencia de algunas irregularidades: En cuanto a los giros medidos con el tiltmeter se llegó a la conclusión de que la convención utilizada en campo para el sentido de los giros registrados estaba invertida, para corregir esta anomalía, se reportó la ambigüedad a la compañía correspondiente y se optó por eliminar esta información en los análisis. Otro detalle que se notó al revisar la configuración deformada resultado del análisis se detectó al considerar plomadas a alturas similares; cuando existían dos plomadas a nivel de los arranques de los arcos de las naves procesionales o de la nave central, se generaba una deformación brusca a partir de esa zona del modelo; entonces se optó por eliminar el desplazamiento del nudo de menor elevación, o en su defecto de cualquier desplazamiento asociado a una plomada defectuosa.

Hechas las correcciones anteriores, los modelos se analizaron con datos de plomadas confiables y con desplazamientos verticales registrados a nivel de piso. Las deformadas obtenidas se compararon con el mismo modelo, pero analizado exclusivamente ante los hundimientos inducidos a nivel de piso.

Se debe establecer que los datos con los que se analizaron estos modelos,

corresponden al periodo comprendido entre agosto de 1993 y mayo de 1994.

Los modelos analíticos y la comparación de los resultados aparecen en las Figs 52, 53, 54 y 55.

## **CAPÍTULO 4**

# **EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL**

El proceso de la información que se ha realizado en este trabajo ha sido de utilidad para interpretar el comportamiento estructural del templo durante el primer año de los trabajos de subexcavación; el cual se encuentra documentado en cuatro informes trimestrales y un informe anual acerca de los avances del proyecto. De las recomendaciones que se hacen en estos informes ha dependido de cierta forma el desarrollo del proceso. Los aspectos más relevantes de la interpretación del monitoreo, se presentan en este capítulo. Una descripción más amplia de éstos se trata en la Ref 11.

Es necesario recordar que el objetivo del proyecto de rehabilitación no es solamente eliminar parte de los hundimientos diferenciales que afectan a la Catedral Metropolitana sino también el de mejorar las condiciones de estabilidad de la estructura.

Dentro de los movimientos que se contemplaban en el proyecto de rehabilitación, se

encuentran los de corregir el desplomo de las columnas, básicamente de la nave central (ejes C y D) de la Catedral, dar verticalidad a sus torres, cerrar las convergencias de los arcos de la zona norte de la nave central, cerrar las grietas importantes y evitar en la mayor medida posible distorsiones en los elementos de la estructura. Fundamentalmente se requiere que la Catedral sea suficientemente estable tanto para condiciones de peso propio como para efectos de sismo. Hay que mencionar, sin embargo, la oposición natural de la estructura a someterse a los movimientos que se intentan inducir.

#### **4.1 Trabajos realizados hasta agosto de 1994.**

Es necesario aclarar que si bien la subexcavación comenzó propiamente el 23 de agosto de 1993, los trabajos de preparación se iniciaron desde octubre de 1991. Por lo tanto, los movimientos generados se deben atribuir a ciertas causas primordiales:

- a) La extracción de suelo y agua durante la etapa constructiva de las lumbreras, así como también debe considerarse la extracción de agua para mantenerlas secas.
- b) Manejo y colocación de pilotes.
- c) Subexcavación propiamente dicha.

El grupo geotécnico ha preparado un informe técnico en el que da a conocer cuantitativamente la intervención de cada uno de los factores antes mencionados.

El proceso propiamente de subexcavación comenzó activando las lumbreras de la parte norte de Catedral (6, 7, 8, 10, 11, 1, 2, 3 y 4) para hacer descender el eje C y en general, a toda la nave central en esa zona que es la más elevada. Progresivamente se fueron activando algunas otras lumbreras para producirle al templo un giro al nororiente y al Sagrario un giro al norponiente. La cantidad de volumen subexcavado



fue en aumento los tres primeros trimestres del año de trabajos, pero fue graduándose para producir movimientos cada vez más parecidos a los esperados.

En el tercer trimestre de subexcavación, se alcanzó un máximo de volumen extraído. Posteriormente la velocidad de subexcavación se redujo en la mayor parte de las lumbreras activadas, sólo en las identificadas como 1, 2 y 3 el proceso aumentó, para producir un descenso en el sector norte del crucero, la cual se estaba quedando rezagada.

Para complementar las acciones correctivas del tercer trimestre, durante el cuarto trimestre del primer año de subexcavación, se realizaron modificaciones al volumen extraído de las lumbreras 4 y 6, incrementando un 60% el mismo, buscando con ello un cambio de pendiente sobre el eje C y mejorar la respuesta de la estructura. También se comenzaron durante el último trimestre de estudio, una serie de actividades enfocadas a provocar una zona de discontinuidad en el suelo en el sector norte de la Catedral, lo anterior, para provocar que esa zona girara hacia el norte ya que durante los primeros meses se observó una oposición a ese movimiento. Los trabajos consistieron en hacer 34 barrenos verticales de los cuales 30 se realizaron en el periodo comprendido entre mayo y agosto de 1994, se encuentran alineados de oriente a poniente junto al muro norte de la Capilla de Ánimas.

La Fig 33 muestra la activación de las lumbreras en las distintas fases del proceso, hasta agosto de 1994.

Se debe mencionar que la lumbrera 14 se activó durante la tercera etapa de subexcavación, pero se suspendieron los trabajos en ella el 21 de abril de 1994.

En la Fig 34 se presenta el total de material extraído por cada lumbrera durante el primer año de trabajos, y se obtiene de aquí, que el volumen promedio de las lumbreras de la parte norte (incluso la 11) es 2.4 veces mayor que el promedio de las

lumbreras de la zona sur.

En la Fig 35 se presenta la cantidad de material subexcavado por trimestre, donde se aprecia que el tercer trimestre es, en efecto, el de mayor volumen de material. Durante el primer año de trabajos, se subexcavaron 422 m<sup>3</sup> de material.

#### **4.2 Hundimientos provocados a nivel de piso.**

Las nivelaciones de feligresía, han permitido obtener configuraciones del terreno en los distintos periodos de interés. Así, en la Fig 36 se muestra la configuración de hundimientos provocados durante el periodo que va de octubre de 1991 hasta agosto de 1994 y la que corresponde sólo al primer año de subexcavación. En la Fig 37 se aprecia el comportamiento del piso a nivel de feligresía en cada uno de los cuatro trimestres que involucran el primer año de estudio.

Si se toma como referencia la configuración de los asentamientos a nivel de piso que se obtuvo en diciembre de 1989 que se presentó en la Fig 16, se puede decir que los movimientos generados hasta agosto de 1994 son correctivos.

La corrección del hundimiento diferencial máximo de 2.40 m obtenido de la Fig 16, entre el punto de la columna C-3 y la esquina surponiente, ha sido aproximadamente de 29 cm, de los cuales 19 cm han correspondido a la etapa de subexcavación propiamente dicha y sólo 10 cm durante los trabajos de preparación.

Si se observa con detenimiento la configuración de hundimientos obtenida durante la etapa de subexcavación, se aprecia que la zona al norte del crucero en su sector central descendió y además, las fachadas oriente y poniente giraron hacia adentro. Lo anterior es favorable para provocar el cierre de la nave central para corregir los desplomos en esa zona.

También se debe notar en las configuraciones de asentamientos registrados a nivel de plintos presentadas en la Fig 36, así como en los tres primeros trimestres de la Fig 37, que en la zona sur de Catedral, el giro hacia el norte es más rápido que el de la zona norte, pero con los ajustes hechos durante el proceso se logró que en el último trimestre del periodo en estudio (Fig 37) se obtuviera una configuración más uniforme que produce como consecuencia menores distorsiones en la estructura.

Haciendo un estudio de los hundimientos diferenciales entre la columna C-3 y la esquina surponiente de Catedral, se obtuvo que la velocidad promedio de corrección entre ambos puntos a lo largo del año fue de 1.8 cm/mes. La Fig 38 muestra las velocidades de corrección entre los dos puntos por cada trimestre, donde se ve que en el último trimestre se tuvo una reducción considerable de casi un 55% con respecto a la del trimestre anterior.

Un aspecto más detallado lo presenta la Fig 39, la cual muestra el perfil real en octubre de 1991 junto con el perfil de agosto de 1994 y compara con ambos (a otra escala) el perfil del hundimiento existente entre ambas fechas para los ejes C y D de Catedral.

La Fig 40 es similar a la anterior, sólo que para los perfiles transversales de la zona del crucero (ejes 6 y 7), de éstos, se observa que la zona oriente ha descendido casi sin girar, mientras que la zona poniente lo ha hecho fuertemente hacia el centro, lo cual presenta concordancia con los movimientos esperados.

En la Fig 41 se puede ver la evolución de hundimientos de algunos puntos colocados en el perímetro de Catedral a nivel de piso de feligresía, y en ella se detecta que posteriormente a la segunda lectura del mes de agosto de 1994 (inicio de la subexcavación), se aumenta la velocidad de hundimiento de estos puntos aunque en las últimas lecturas dicha velocidad se vuelve a reducir.

### **4.3 Respuesta estructural en el primer año de subexcavación.**

Los movimientos provocados en la base del templo, han producido una respuesta estructural durante el periodo en estudio. A continuación se analizan los principales aspectos de esa respuesta.

#### **4.3.1 Comparación de hundimientos a nivel de bóvedas y a nivel de piso.**

Uno de los aspectos interesantes, es el de comparar los hundimientos registrados a nivel de feligresía contra los que se registran a nivel de bóvedas. En la Fig 42 se muestra la configuración de los hundimientos a nivel de bóvedas correspondientes al periodo comprendido entre agosto de 1993 y agosto de 1994, cualitativamente se puede decir que es similar a la configuración registrada a nivel de feligresía del mismo periodo. La Fig 43 presenta las configuraciones de los hundimientos provocados a nivel de cubierta en cada uno de los trimestres del periodo estudiado.

Al comparar cada uno de los trimestres en cuanto a su configuración correspondiente a nivel de feligresía y a nivel de bóvedas, se detecta la similitud de las curvas de nivel presentadas, pero cuantitativamente, se hace notar que en los tres primeros trimestres el nivel de feligresía descendía más rápido que el nivel de bóvedas. Una visión más amplia se observa en la Fig 44 en la que se compara la velocidad de hundimiento presentada en los dos niveles, en el tercer trimestre, la velocidad de hundimiento del nivel de feligresía llegó a ser de 1.3 veces la de bóvedas, aunque también en el cuarto trimestre se aprecia que las velocidades son casi iguales.

Es preciso señalar que las diferencias en las velocidades de hundimiento eran provocadas por un probable efecto de arqueo en la estructura. Ésto se reflejó en algunas pequeñas separaciones entre las bóvedas y los elementos de soporte y en la disminución de carga registrada en las torres de apuntalamiento.

En este aspecto, es preciso hacer notar que, como se observa en la Fig 45, al comparar los hundimientos en piso y bóvedas en el eje D durante el primer año de

subexcavación, y éstos, con el descenso de la clave de la nave central, se observa claramente el levantamiento de la clave al norte y al sur de la zona del crucero, sin embargo, este efecto no se manifiesta en la zona del crucero; entre los ejes 6 y 7, seguramente por el peso y la rigidez de esa zona.

#### **4.3.2 Convergencias en arcos.**

El efecto de arqueo mencionado, es coherente con las lecturas de las convergencias, las cuales muestran, en general, un movimiento de cierre tal y como aparece en la Fig 46. En la misma figura se aprecia que entre los ejes 9 y 12 se tuvieron movimientos de apertura en los arcos de los ejes longitudinales, ésto es debido a que la fachada sur no sigue al resto del movimiento de la estructura como fuera deseable.

#### **4.3.3 Seguimiento de plomadas.**

Un aspecto esencial, como se ha comentado, lo determinan los desplomos de las columnas, de las cuales en la Fig 47 se observa el vector que representa la corrección observada hasta agosto de 1994, comparado con los desplomos de columnas y muros, se aprecia que en general, todos lo movimientos se dan en la dirección adecuada, pero su magnitud es todavía pequeña en relación al desplomo que se quiere corregir. Una visión más clara se encuentra en la Fig 48 en la que se presenta el desplomo de la columna (a escala 1:10) junto con la trayectoria seguida a partir de octubre de 1992, para las cuatro columnas del crucero.

Podemos decir entonces, que aunque el movimiento es correcto, sólo representa en el mejor de los casos cerca de un 8% del desplomo, esto, obtenido de la columna C-7.

La Fig 49 muestra una representación de las plomadas en la posición que alcanzaron hasta agosto de 1994.

Otro aspecto se presenta en la Fig 50, en la que se compara el movimiento de las plomadas del crucero con respecto al tiempo, en ella se aprecia que las columnas del

sur se han movido más rápido hacia el norte que las de ese mismo lado y de forma similar, las columnas del sector poniente se mueven más rápido hacia el oriente lo que provoca el cierre de los claros en la zona de crucero como se puede verificar en las mediciones de las convergencias en los arcos localizados en esa zona.

#### **4.3.4 Análisis del movimiento registrado en columnas y el giro del piso en los tres primeros trimestres de subexcavación.**

**Cambios de pendiente a nivel de feligresía y en columnas.** En el periodo comprendido entre agosto de 1993 y mayo de 1994, los desniveles del piso se habían corregido más que los desplomos en las columnas y muros, debido a que estas no seguían como cuerpos rígidos al movimiento del piso. La Fig 51 compara la pendiente con que giró el piso y la pendiente con la que giraron las columnas; en el piso, se aprecia una mayor magnitud en sus pendientes de movimiento que el movimiento de las columnas. Así, en la dirección E-W el giro de las columnas representa el 62.5% del giro del piso en esa misma dirección, mientras que en la dirección N-S el giro de las columnas es el 44.4% del giro del piso, esa diferencia de pendientes es más notoria en la zona al sur del crucero, situación que se puede apreciar con más detalle en las estadísticas mostradas en la Tabla 2 que presenta el valor máximo, el mínimo, la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las pendientes obtenidas en la Fig 51, se establece que estos valores de plomadas y piso entre direcciones correspondientes es considerablemente distinta, y esto, se verifica al obtener las medidas de dispersión de las lecturas de pendientes que denotan una variación importante de los datos. En otras palabras, lo anterior refleja que los movimientos no eran uniformes ni a nivel de estructura ni a nivel de piso de feligresía. Esta dispersión en las pendientes se acentuaba en la zona sur de Catedral por que la fachada principal no seguía de manera uniforme al resto del conjunto.

**Análisis de la representación gráfica de los desplazamientos registrados en los ejes de la zona del crucero.** En las Figs 52, 53, 54 y 55 aparecen las configuraciones deformadas de los ejes C, D, 6 y 7 los cuales definen la zona del crucero, estas

configuraciones son las obtenidas del análisis estructural de los modelos simplificados, sometidos a dos situaciones; en la primera, cada modelo se analiza ante la acción de hundimientos diferenciales y desplazamientos en las columnas, la segunda, consistió en el análisis ante la acción exclusiva de los hundimientos diferenciales.

En general, al comparar las configuraciones obtenidas para cada eje, se deriva que los desplazamientos en las columnas, obtenidos en el análisis del modelo que sólo considera el hundimiento a nivel de piso y deja desplazarse libremente las columnas, son mayores que los desplazamientos medidos en la estructura, y en algunos casos, incluso, el movimiento es de sentido opuesto.

Otro detalle en relación a esta comparación, es que en la configuración obtenida en campo correspondiente al eje 6 y al eje 7 que se muestran en las Figs 54 y 55, respectivamente, se aprecia la distorsión a la que se ven sujetas algunas columnas con el hundimiento provocado en su base.

#### **4.3.5 Análisis del movimiento registrado en columnas y el giro del piso durante el último trimestre del primer año de subexcavación.**

**Cambios de pendiente a nivel de feligresía y en columnas.** Para el último trimestre del primer año de trabajos de subexcavación se volvieron a comparar las pendientes de movimientos presentados en piso y en columnas y se encontró como lo muestra la Fig 56 que ahora las pendientes son más parecidas; en esta ocasión, se encontró que el giro de las columnas en el sentido E-W es 1.5 veces el giro del piso, y en la dirección N-S, los giros son aproximadamente iguales. Lo anterior, se puede corroborar con las estadísticas obtenidas y mostradas en la Tabla 3, en la que se aprecia una mejor correspondencia entre el movimiento del piso y la respuesta estructural, así, se distingue que el valor medio de las pendientes es muy similar en ambas direcciones, al igual que se observa una reducción notable en la dispersión de la información en comparación con la obtenida en los tres primeros trimestres. En resumen, el giro del piso presentó mayor semejanza al giro de las columnas, ésto hace

suponer que los movimientos son más uniformes y como consecuencia, no se inducen cambios significativos de esfuerzos en la estructura.

#### **4.3.6 Estado de agrietamiento.**

Durante el proceso de subexcavación se han provocado algunas grietas, pero se debe hacer notar que la magnitud de las mismas no ha provocado problemas de inestabilidad en el templo. Además, se han logrado cierres de algunas grietas ya existentes.

En la Fig 57 se muestra el estado de agrietamiento en las bóvedas durante el periodo de subexcavación, se puede observar que las grietas que muestran un movimiento de abertura se encuentran entre los ejes 9 y 11, comportamiento que indica, como ya se ha señalado, el retraso de la fachada sur.

Una representación gráfica interesante, es la que resulta de comparar el agrietamiento de los muros, contra los perfiles de hundimiento diferencial a nivel de feligresía y a nivel de bóvedas. Así, se tiene como ejemplo la Fig 58 que representa la fachada principal de Catedral y Sagrario junto con los hundimientos que se presentaron en esa zona. Se observa que el comportamiento de las grietas está ligado con los hundimientos presentados, de esa manera, la grieta que se presenta en el eje C con un movimiento de abertura, es coherente con un quiebre ubicado en el perfil de hundimientos con frontera en ese mismo eje, de forma similar se tiene que el cierre de las grietas en la fachada de Sagrario localizadas entre los ejes G y H se deben a la forma cóncava del perfil con el punto mínimo justo en el eje H. En la Fig 59 se muestra una representación similar para la fachada poniente de la Catedral. La curvatura convexa entre los ejes 9 y 10 corresponde a la abertura de la grieta vertical presente en esa zona. Mientras que la curvatura cóncava cercana al eje 7 ha provocado un efecto de compresión longitudinal en el muro de esa fachada lo que generó un ligero pandeo hacia el exterior en la parte superior del mismo. Por tal motivo se recomendó colocar tirantes para amarrar el muro y ligarlo con el de la fachada opuesta para



impedir que el pandeo continuara (Ref 13).

#### **4.4 Imprevistos presentados en el primer año de subexcavación.**

Mención aparte merecen algunos imprevistos presentados durante el primer año, como fueron:

El levantamiento del piso de mármol en las naves procesionales entre los ejes 4 y 7 de Catedral, dicho levantamiento fue producto de la curvatura a que se ve sometido ese sector del templo en la dirección longitudinal, básicamente consecuencia de las distorsiones provocadas en la estructura por la no uniformidad en el giro provocado. Este imprevisto se analizó en la Ref 12.

Los caídos provocados por las grietas, han sido en general de dimensiones pequeñas y como protección para los feligreses ante estos caídos, se colocó una malla abajo de la cubierta. En relación a los caídos, un aspecto delicado, lo provocan las grietas en los dinteles de puertas, ventanas y de arcos ya que aunque se tomaron medidas como el apuntalamiento de esas zonas, se sufrió la caída de un sillar de grandes dimensiones en el eje 7 de Catedral en el tramo comprendido entre los ejes A y B, debido a una grieta presentada en el muro y a la unión defectuosa del sillar al resto del mamposteo. La explicación del problema a detalle, se encuentra en la Ref 13.

Durante el cuarto trimestre del primer año de subexcavación, se reemplazó en la lumbrera 1 el brocal de tabique por uno de concreto.

En el segundo trimestre de los trabajos, se inundó la lumbrera 25 con la subsecuente suspensión temporal de actividades en esa lumbrera.

## **CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**

**Del proceso e interpretación de la información que se realizó en este trabajo, se derivan los siguientes comentarios y conclusiones.**

**En lo que respecta al proceso de la información:**

**El esquema bajo el cual se desarrollaron los programas para el procesamiento de información, permitirá seguir procesándola durante el desarrollo del proyecto.**

**Las diversas representaciones gráficas desarrolladas, constituyen una herramienta útil para visualizar y entender la respuesta estructural; permiten, por ejemplo, establecer una relación entre el hundimiento y el agrietamiento que se producen en el templo, obtener un panorama del avance en la corrección de la verticalidad de muros y columnas, así como de la variación de los claros. Por otra parte, permiten comparar el hundimiento que se presenta a nivel de bóvedas con el que se presenta a**

nivel de feligresía para comparar el comportamiento estructural tanto de la Catedral como del sistema de apuntalamiento.

Se ha logrado detectar y corregir algunos errores involuntarios en las mediciones, por ejemplo; el caso de algunos puntos de control instalados tanto a nivel de bóvedas como a nivel de feligresía que tenían una localización equivocada. Otro ejemplo, lo constituye el de la medición del giro con tiltmeter, en el que se detectó que la interpretación de estos giros se daba con signos opuestos. Para terminar, otro de los errores fue el referente a la medición del cambio de desplomo, en el cual se detectó que la altura a la que se median las plomadas difería de las que se tenían registradas.

Para obtener una información más completa sobre el movimiento de muros y columnas se recomienda medir el giro a través del tiltmeter en el mismo punto donde se mide el cambio de desplomo. Además, sería deseable que cada punto de nivelación localizado a nivel de feligresía contara con sus coordenadas correspondientes, para que de esa forma se obtuviera una mejor representación del movimiento de la estructura a este nivel, dado que en las condiciones en que se realizan estas mediciones, impiden evaluar giros en zonas locales, fundamentalmente, en las bases de las columnas.

En cuanto al sistema de referencia, se recomienda que aún terminado el proyecto, se conserve vigente el mismo sistema para futuras intervenciones, dándole un seguimiento adecuado, ésto, para llevar el control de los hundimientos que se presentarán en el futuro y así evitar confusiones como la que se presentó en la información obtenida de planos realizados años atrás en los cuales no se hace una serie de indicaciones que hicieran más aprovechable la información contenida en ellos.

Por otro lado, en relación a la respuesta estructural, se tiene:

Se han provocado ya hundimientos favorables en la Catedral. El hundimiento corregido entre los puntos de referencia C-3 y la esquina surponiente del templo, es de aproximadamente el 12% del desnivel de 2.40 m que se encontró en 1989.

La activación de las lumbreras se ha ido ajustando y como se pudo apreciar, en el último trimestre del periodo estudiado, se logró una configuración satisfactoria para provocar las menores distorsiones en el edificio.

Los movimientos que se están generando en la Catedral con el proceso de nivelación, son favorables y por lo tanto propician la estabilidad de la estructura.

Las columnas se han movido en la dirección opuesta a la del desplomo y aunque este movimiento es en el mejor de los casos un 8%, se ha producido, además, el cierre de los claros en la nave central, provocando que el nivel de estabilidad se esté incrementando.

En cuanto al estado de agrietamiento de la estructura, se deberá tener un cuidado especial en las grietas que se presenten transversalmente entre los ejes 10 y 12 de Catedral, ya que la presencia de la fachada sur, la cual es muy pesada, se opone por su naturaleza a seguir el movimiento del conjunto. Así mismo se deberá llevar una vigilancia estrecha en cuanto a la estructura, para evitar en el mayor número de casos posibles imprevistos como los que en este trabajo se mencionaron. Además, se deben considerar zonas críticas las fachadas norte y sur de Catedral, por que en el periodo de análisis se observó un retraso de ambas fachadas con

relación al movimiento del resto de la estructura.

Por último, hay que destacar también que algunos movimientos se han logrado a base de la combinación en el manejo de pilotes junto con el proceso propiamente de subexcavación y por lo tanto deben seguirse operando a manera de apoyo para mejores resultados de la renivelación.

## RECONOCIMIENTOS

Agradezco muy especialmente al Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., todas las facilidades y apoyo necesario para la elaboración de este trabajo.

Un reconocimiento al Ing. A. Roberto Sánchez R., cuyas ideas dieron forma al contenido de esta tesis, y por el tiempo dedicado a la revisión de la misma.

Un reconocimiento a la compañía CCM por la colaboración prestada de su grupo técnico, encabezado por la Ing. Evangelina Gutiérrez.

Un reconocimiento a la compañía TGC por la colaboración aportada por parte de su grupo técnico.

**Un reconocimiento a la Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural de la SEDESOL, que a través de su taller instalado en la Catedral, colaboró en el proporcionamiento de información para realizar este trabajo.**

## REFERENCIAS

**Ref 1** Toussaint, M. "La Catedral de México y el Sagrario Metropolitano", Ed. Porrúa, México, 1920.

**Ref 2** Sandoval, P. de J. "La Catedral Metropolitana de México", Ed. Victoria, México, 1938.

**Ref 3** Meli, Roberto y A. R. Sánchez. "Rehabilitación de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México; aspectos estructurales." Informe elaborado por el Instituto de Ingeniería, U.N.A.M. para la SEDESOL, julio de 1993.

**Ref 4** Tamez E., E. Santoyo y A. Cuevas. "La Catedral Metropolitana y el Sagrario de la Ciudad de México. Corrección del comportamiento de sus cimentaciones". Volumen Raúl J. Marshal, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., agosto 1992.

**Ref 5** Tamez E., E. Santoyo, R. Meli, R. Sánchez, F. López C., E. Gutiérrez, H. Prieto, J. Díaz P., S. Zaldivar. "Catedral Metropolitana: corrección geométrica, informe

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



técnico". Espejo de obsidiana Ediciones. México, 1995. p. 202.

**Ref 6** Sánchez Ramírez, A.R. y R. Meli. "Bases para definir el programa de subexcavación de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos. "Informe técnico 93/08 elaborado por el Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., para la SEDESOL, julio de 1993.

**Ref 7** "Resumen de las mediciones de control de desplazamientos en Catedral y Sagrario Metropolitanos". Informe de Control de Calidad y Mediciones S.A. de C.V. para SEDESOL, mayo 1994.

**Ref 8** Sánchez A. R. y F. Peña, "Evaluación de resultados del sistema de monitoreo continuo con inclinómetros". Informe técnico 93/14, Informe del I. de I. para SEDESOL, diciembre 1993.

**Ref 9** Sánchez A. R. y V. Magaña, "Medición de esfuerzos en las torres de apuntalamiento. Diseño, instrumentación y primeros resultados". Informe técnico 93/13, Informe del I. de I. para SEDESOL, diciembre 1993.

**Ref 10** Peña Mondragón, Fernando. "Comportamiento estructural de la Catedral de la Ciudad de México, ante hundimientos diferenciales". Tesis de licenciatura. E.N.E.P Acatlán, U.N.A.M. 1995.

**Ref 11** Sánchez Ramírez, A.R. y R. Meli. "Catedral y Sagrario Metropolitanos de la Ciudad de México". Informe técnico 94/09, elaborado por el Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., para la SEDESOL, octubre 1994.

**Ref 12** Sánchez Ramírez, A.R. y R. Meli "Comentarios sobre el levantamiento de placas de mármol en el piso de feligresía." Informe técnico 94/02, elaborado por el Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., para la SEDESOL, febrero de 1994.

**Ref 13** Sánchez Ramírez, A.R. y R. Meli. "Comentarios y sugerencias sobre el desprendimiento del sillar de la ventana del eje 7 ocurrido el 30 de marzo de 1994." Informe técnico 94/05, elaborado por el Instituto de Ingeniería, U.N.A.M., para la SEDESOL, abril 1994.

**TESIS SIN PAGINACION**

**COMPLETA LA INFORMACION**

## TABLAS

Tabla 1 Mediciones que integran el programa de monitoreo.

MEDICION	PUNTOS				PRECISION	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
Convergencias 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
Totales	3126	2317	685	124		

\* 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 Estadísticas de la comparación de pendientes de movimiento entre piso y columnas durante el período comprendido entre agosto de 1993 y mayo de 1994.**

PENDIENTE	PLOMADAS DIRECCION (E-W)	PLOMADAS DIRECCION (N-S)	PISO DIRECCION (E-W)	PISO DIRECCION (N-S)
MINIMA	-0.0005	-0.0011	-0.0024	-0.0007
MAXIMA	0.0020	0.0019	0.0080	0.0028
MEDIA	0.0005	0.0004	0.0008	0.0009
DESVIACION ESTANDAR	0.0006	0.0006	0.0015	0.0010
COEFICIENTE DE VARIACION (%)	121.5985	156.8390	178.5837	112.7258

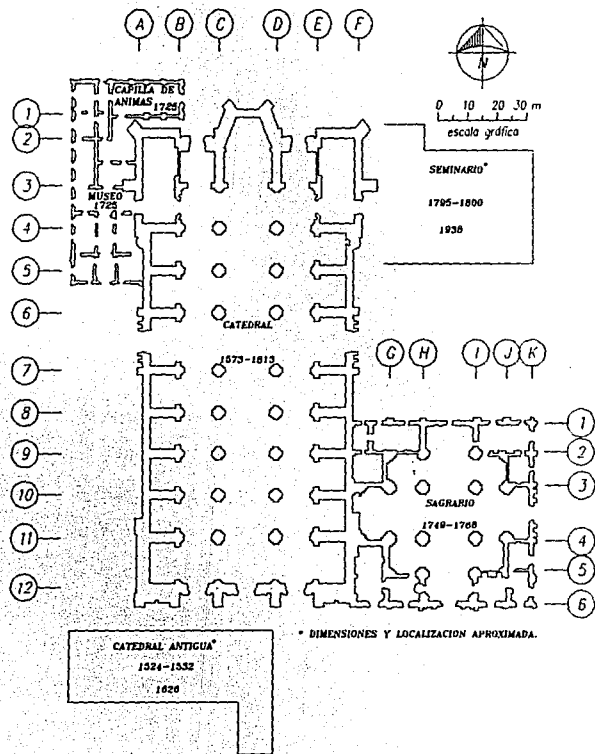
**Tabla 3 Estadísticas de la comparación de pendientes de movimiento entre piso y columnas durante el período comprendido entre mayo y agosto de 1994.**

PENDIENTE	PLOMADAS DIRECCION (E-W)	PLOMADAS DIRECCION (N-S)	PISO DIRECCION (E-W)	PISO DIRECCION (N-S)
MINIMA	7.4 E-5	7.4 E-5	-0.0004	-0.0006
MAXIMA	0.0006	0.0008	0.0010	0.0011
MEDIA	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
DESVIACION ESTANDAR	0.0001	0.0001	0.0003	0.0002
COEFICIENTE DE VARIACION (%)	38.7053	47.5910	129.5538	78.2347

## FIGURAS

## FIGURAS





**CATEDRAL:**

- 1562: INICIO DE LOS TRABAJOS DE CIMENTACION.
- 1573: INICIO DE LOS TRABAJOS DE CONSTRUCCION.
- 1615: COCLUSION DE LA PORTADA DEL LADO NORTE.
- 1667: CIERRE DE LA ULTIMA BOVEDA.
- 1672: CONCLUSION DE LA PORTADA SUR.
- 1689: CONCLUSION DE LAS PORTADAS ORIENTE Y PONIENTE.
- 1792: CONCLUSION DE LAS TORRES.
- 1813: CONCLUSION DE TRABAJOS DE ORNAMENTACION Y MODIFICACIONES EN LA CUPULA.

**SAGRARIO:**

- 1749-1768: PERIODO DE CONSTRUCCION.

**CAPILLA DE ANIMAS:**

- 1725: PERIODO DE CONSTRUCCION.

**MUSEO:**

- 1725: PERIODO DE CONSTRUCCION.

**CATEDRAL ANTIGUA:**

- 1524-1532: PERIODO DE CONSTRUCCION.

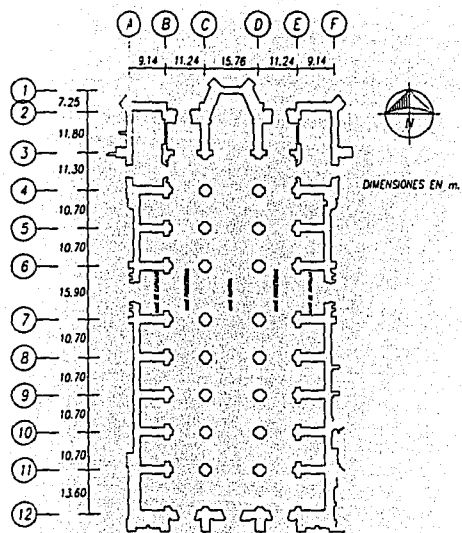
- 1626: DEMOLICION.

**SEMINARIO:**

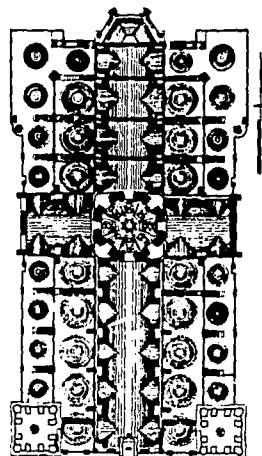
- 1795-1800: PERIODO DE CONSTRUCCION.

- 1938: DEMOLICION.

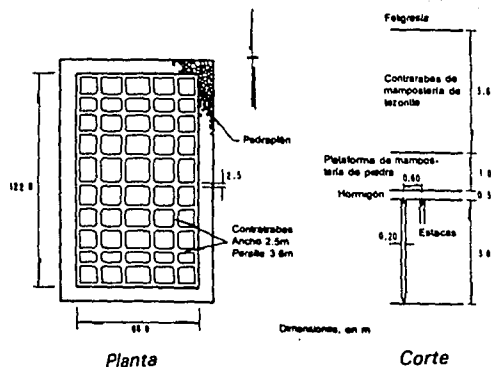
Fig 1 Etapas constructivas.



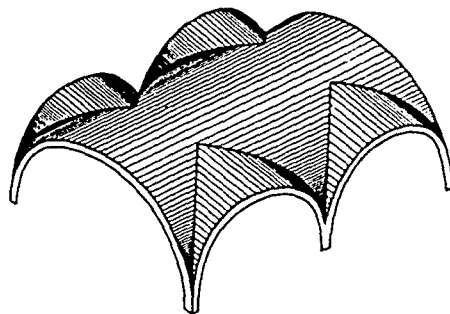
*Planta a nivel de feligresía.*



*Planta a nivel de bóvedas.*



*Detalle de la cimentación*

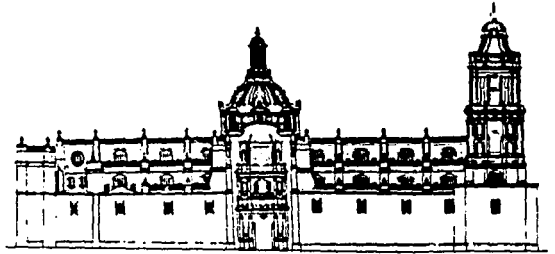


*Geometría de la bóveda de la nave principal.*

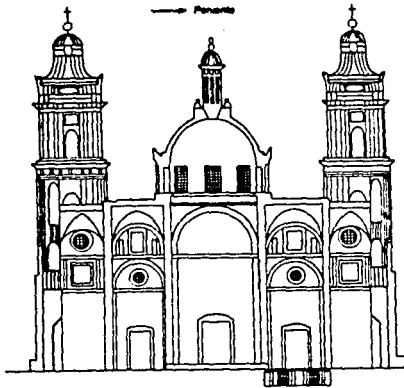
**Fig 2 Características generales de la estructuración de Catedral.**



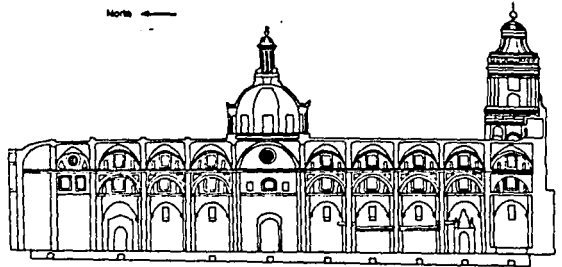
*Fachada sur*



*Fachada lateral (poniente)*



*Corte transversal*



*Corte longitudinal*

**Fig 3 Fachadas y cortes de Catedral.**

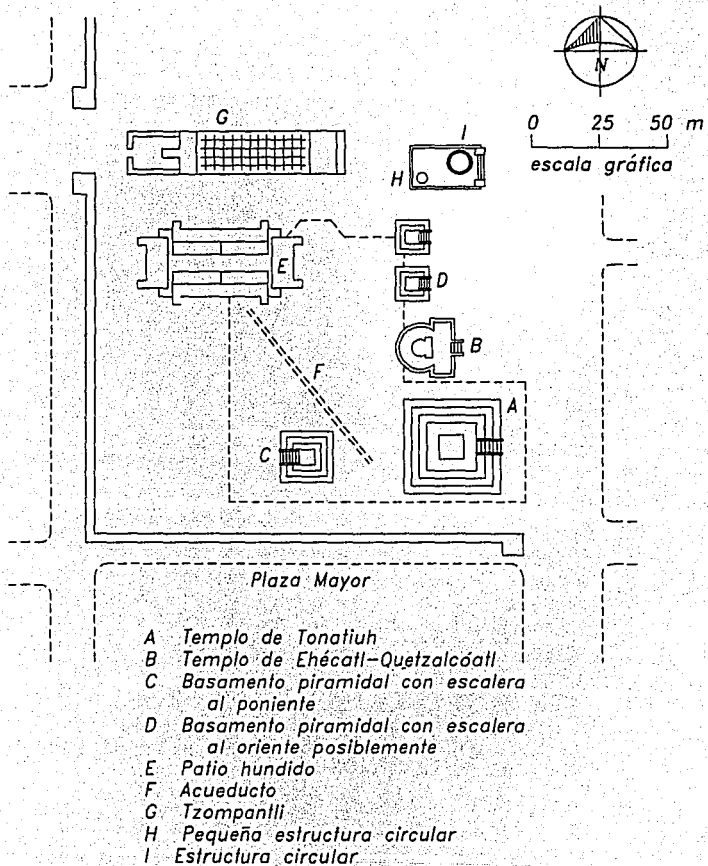
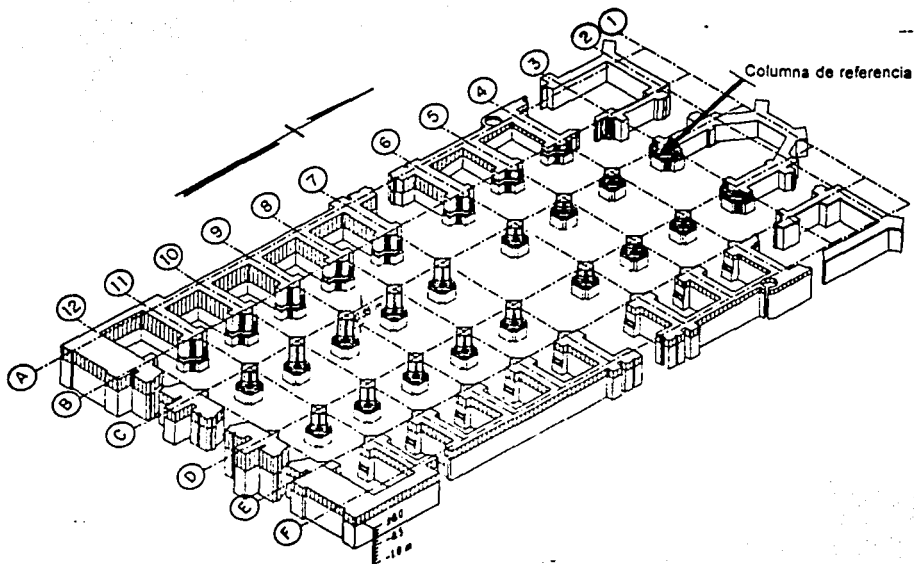
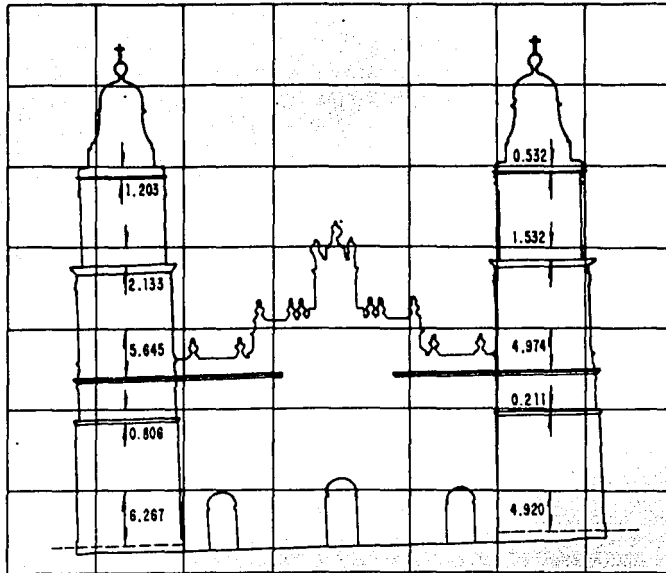


Fig 4 Localización de construcciones prehispánicas.





**Fig 6** Incremento en los muros y fustes de columnas durante el periodo 1573-1667.



Dimensiones, en m

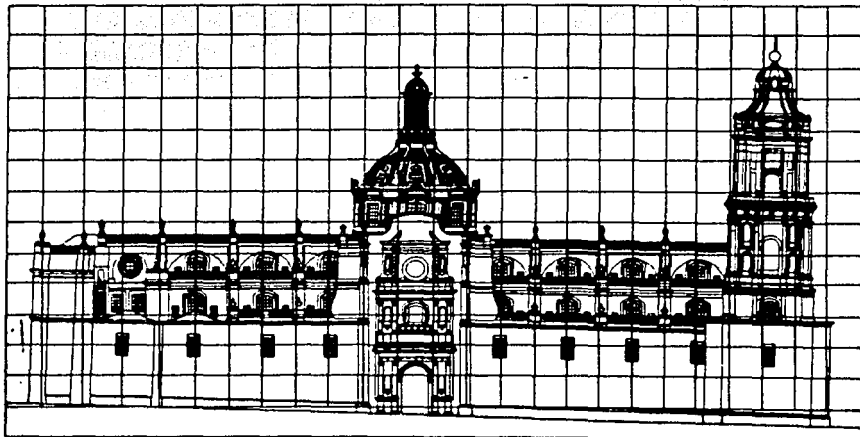
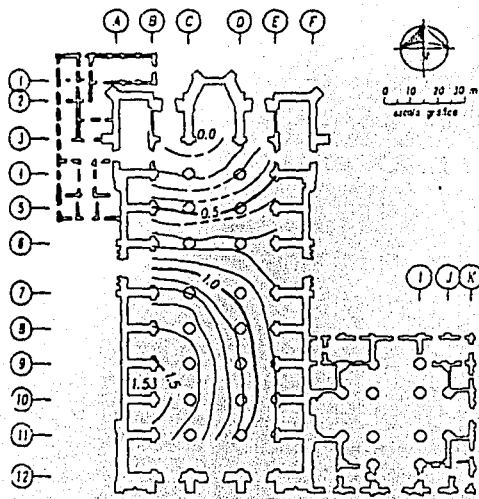


Fig 7 Ajuste de niveles en la fachada sur (torres) durante la etapa constructiva y vista de niveles en la fachada poniente de Catedral.

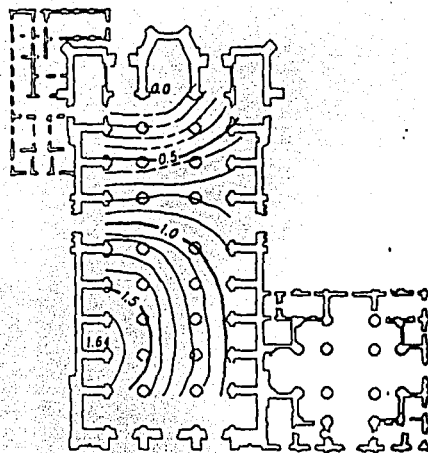






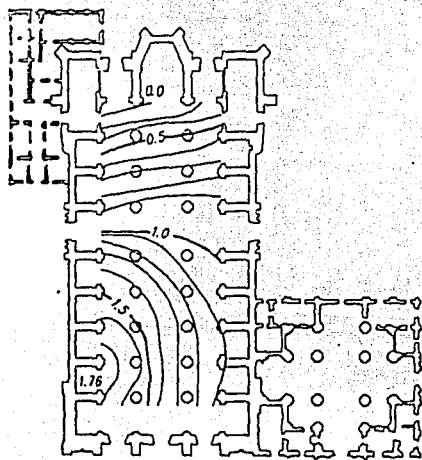
OCTUBRE 1907

Configuración elaborada con datos de la SPN



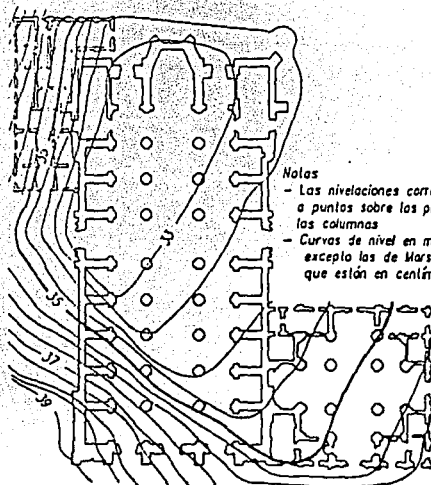
SEPTIEMBRE 1927

Configuración elaborada con datos de la SPN



JUNIO 1934

Configuración deducida con los perfiles de la SPN



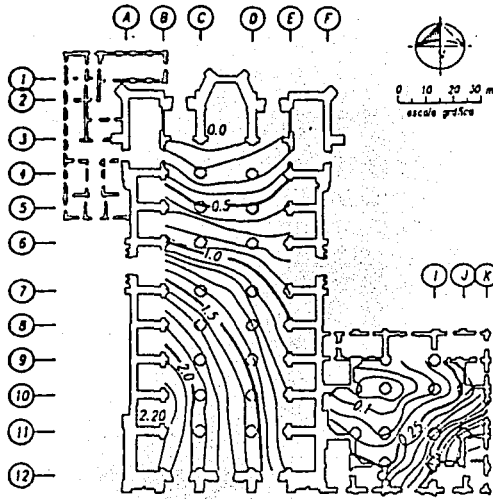
JUNIO 1953 - MAYO 1955

Información obtenida por Marsal y Mazarl

- Notas
- Las nivelaciones corresponden a puntos sobre los plintos de las columnas
  - Curvas de nivel en metros, excepto las de Marsal y Mazarl que están en centímetros

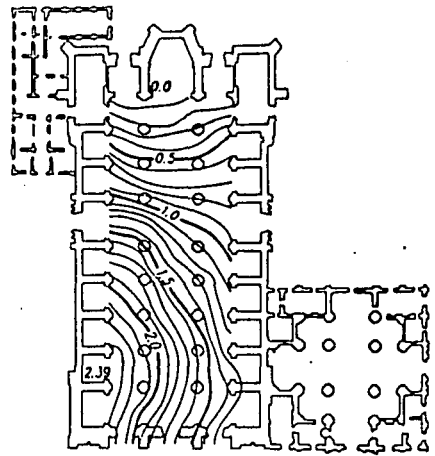
Fig 9 Configuraciones de los hundimientos diferenciales en Catedral.

FALLA DE ORIGEN



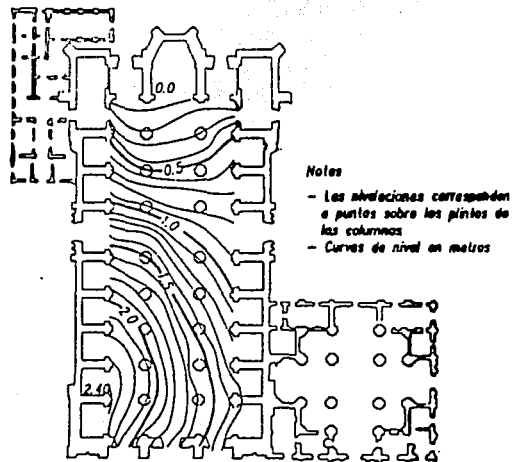
ENERO - 1972

Configuración elaborada con datos de Ingeniería Experimental



14 DICIEMBRE 1983

Configuración elaborada con datos de PICOSA



Notes

- Las elevaciones corresponden a puntos sobre los pínos de las columnas
- Curvas de nivel en metros

25 ENERO 1989

Configuración elaborada con datos de PICOSA

**Fig 10 Configuraciones de los hundimientos diferenciales en Catedral.**

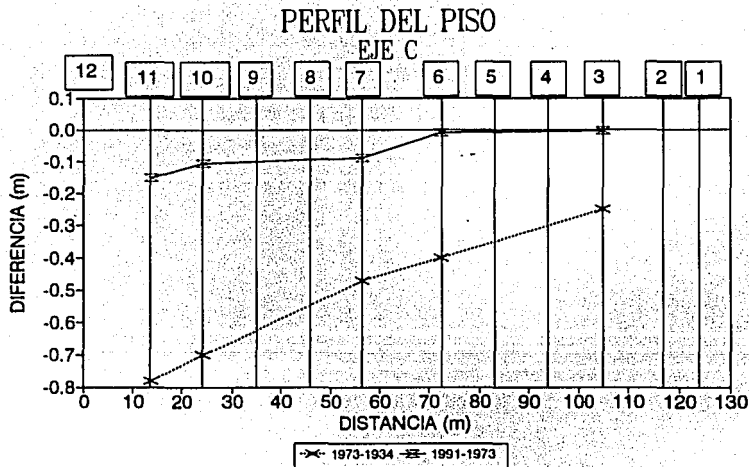
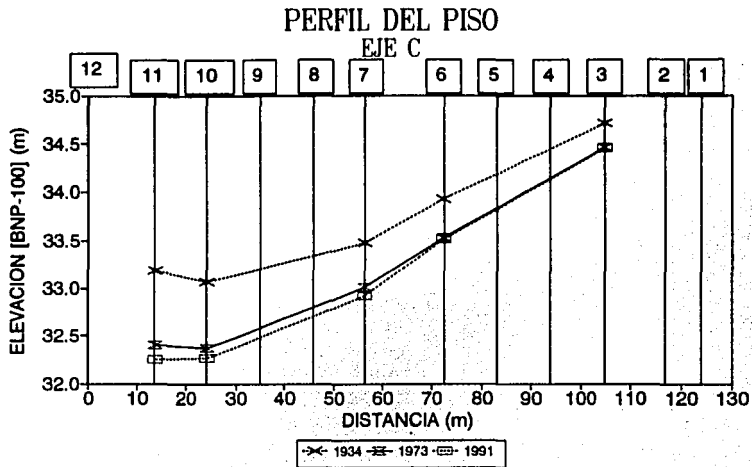


Fig 11 Perfiles de nivelación de 1934, 1973 y 1991 del eje C de Catedral y la diferencia entre las nivelaciones.

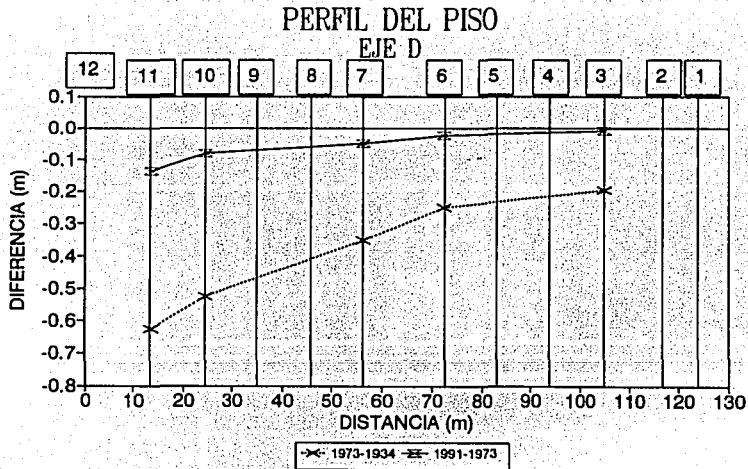
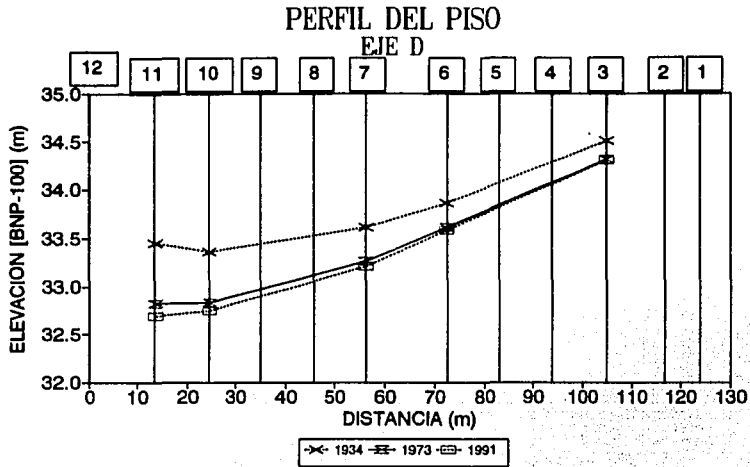


Fig 12 Perfiles de nivelación de 1934, 1973 y 1991 del eje D de Catedral y la diferencia entre las nivelaciones.

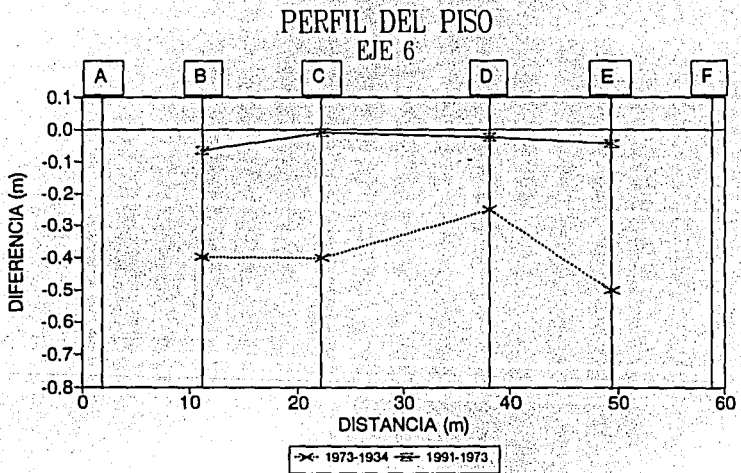
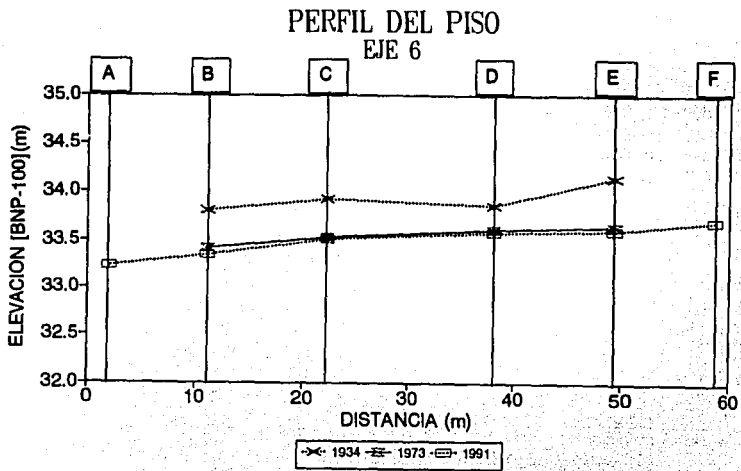


Fig 13 Perfiles de nivelación de 1934, 1973 y 1991 del eje 6 de Catedral y la diferencia entre las nivelaciones.

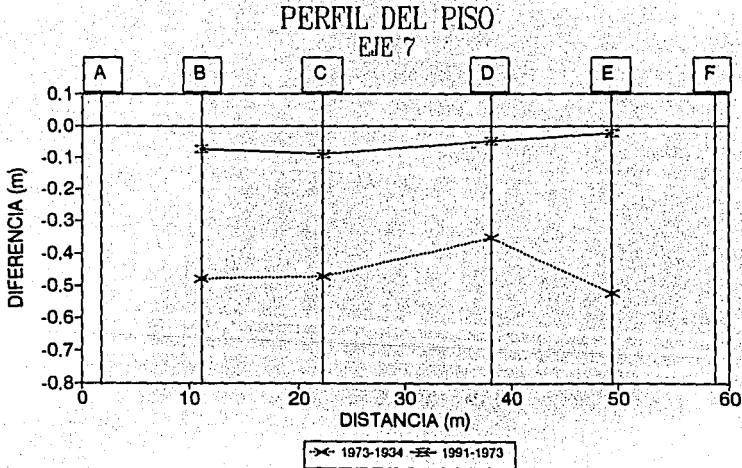
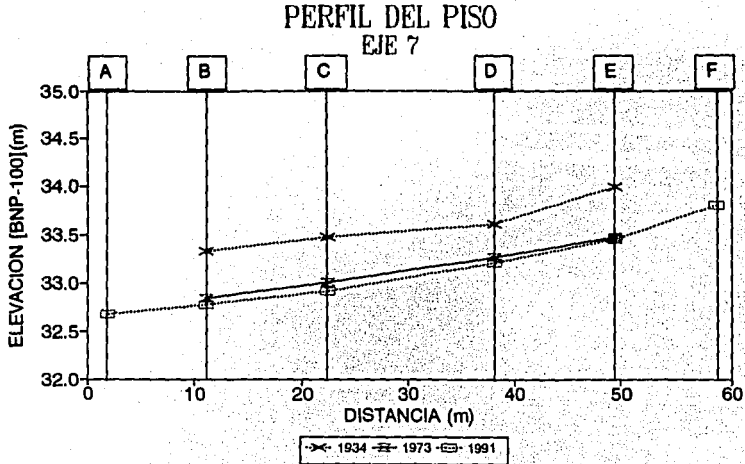


Fig 14 Perfiles de nivelación de 1934, 1973 y 1991 del eje 7 de Catedral y la diferencia entre las nivelaciones.

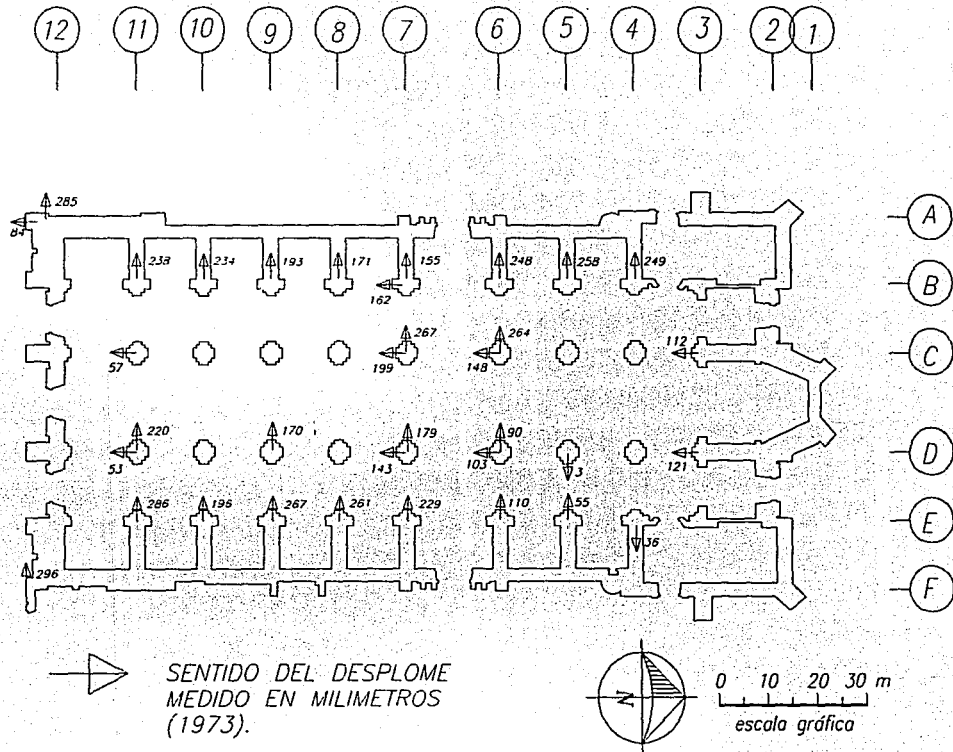


Fig 15 Desplomos medidos en 1973.

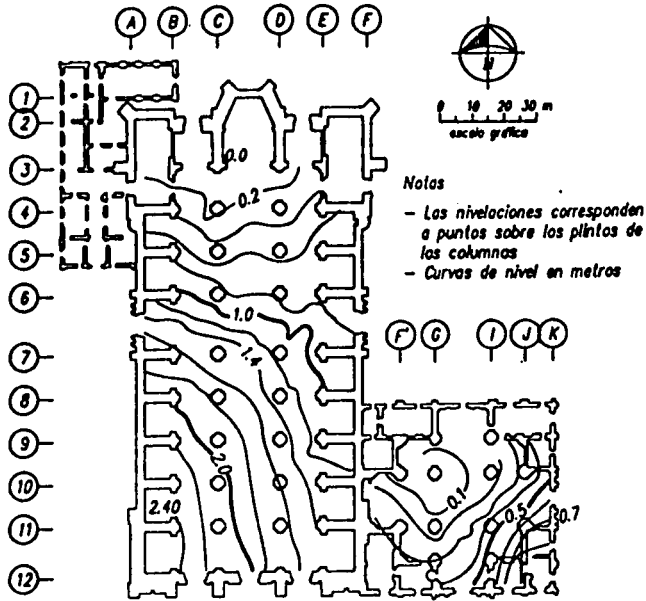


Fig 16 Curvas de igual asentamiento diferencial medido a nivel de piso de feligresía en diciembre de 1989.

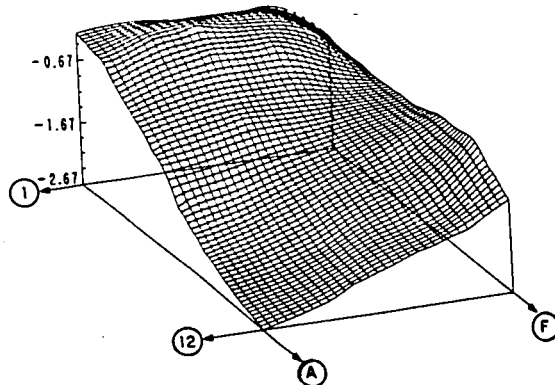
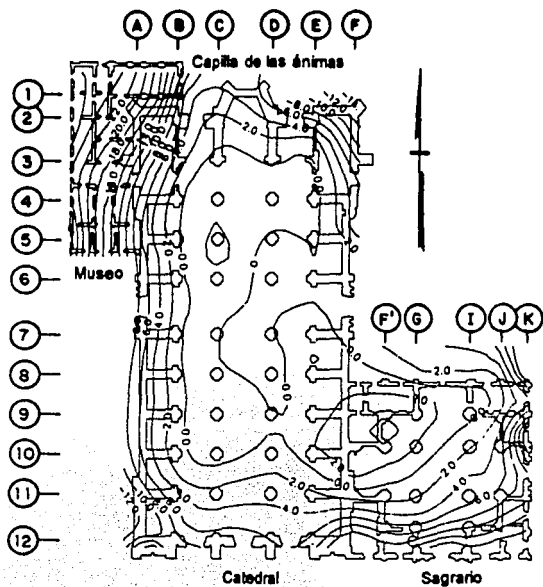
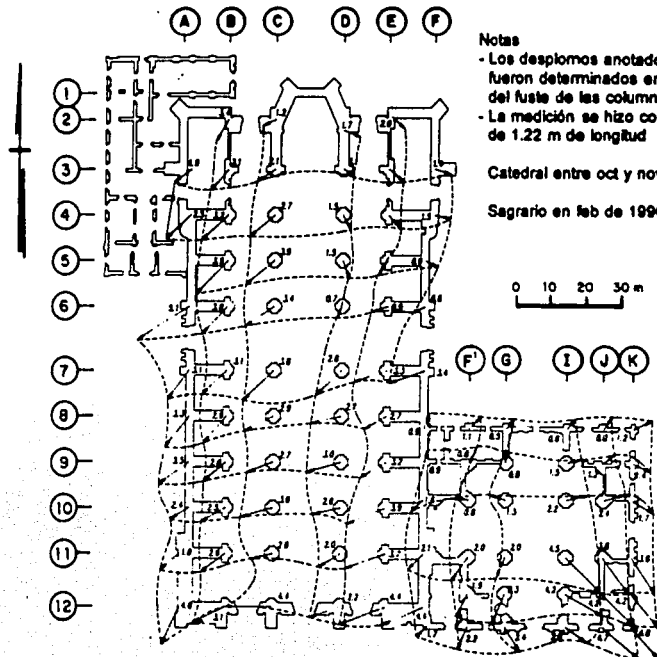


Fig 17 Vista tridimensional de la configuración deformada del piso de feligresía previa a los trabajos de renivelación (1989).





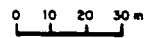
**Fig 18** Configuración de velocidades anuales, mm/año, medida entre enero y septiembre de 1991.



Notas  
 - Los desplomos anotados en esta figura, fueron determinados en el primer tramo del fuste de las columnas y pilastras  
 - La medición se hizo con una niveleta de 1.22 m de longitud

Catedral entre oct y nov de 1989

Sagrario en feb de 1990



**Fig 19 Desplomo de las columnas medido en el primer tramo del fuste de las columnas entre octubre de 1989 y febrero de 1990.**



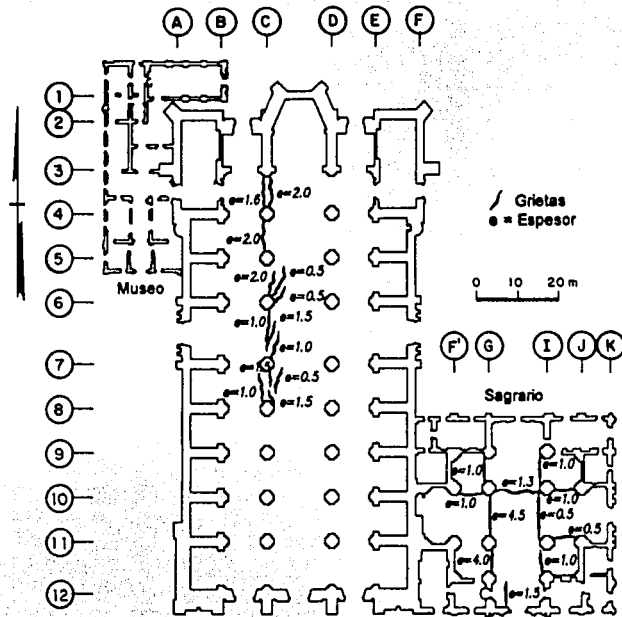
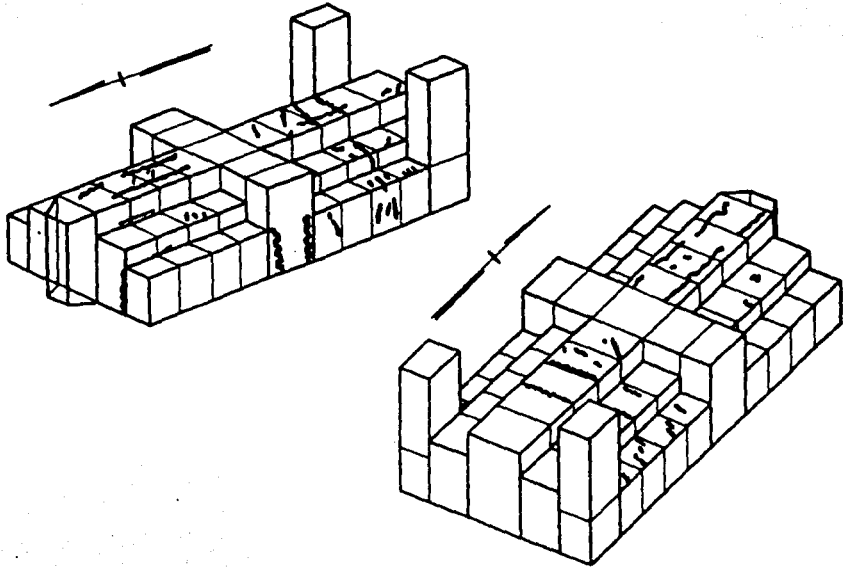


Fig 20 Grieta presentada en piso de feligresía a lo largo del eje C (espesor en cm).



*Fig 21 Esquema de grietas en fachadas y cubiertas.*

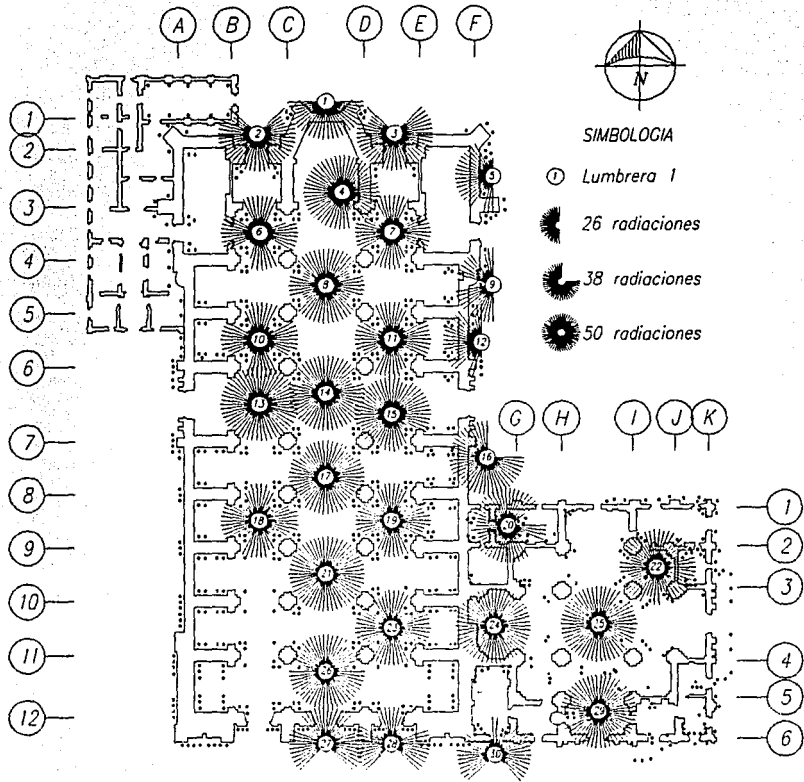


Fig 22 Localización de lumbreras.

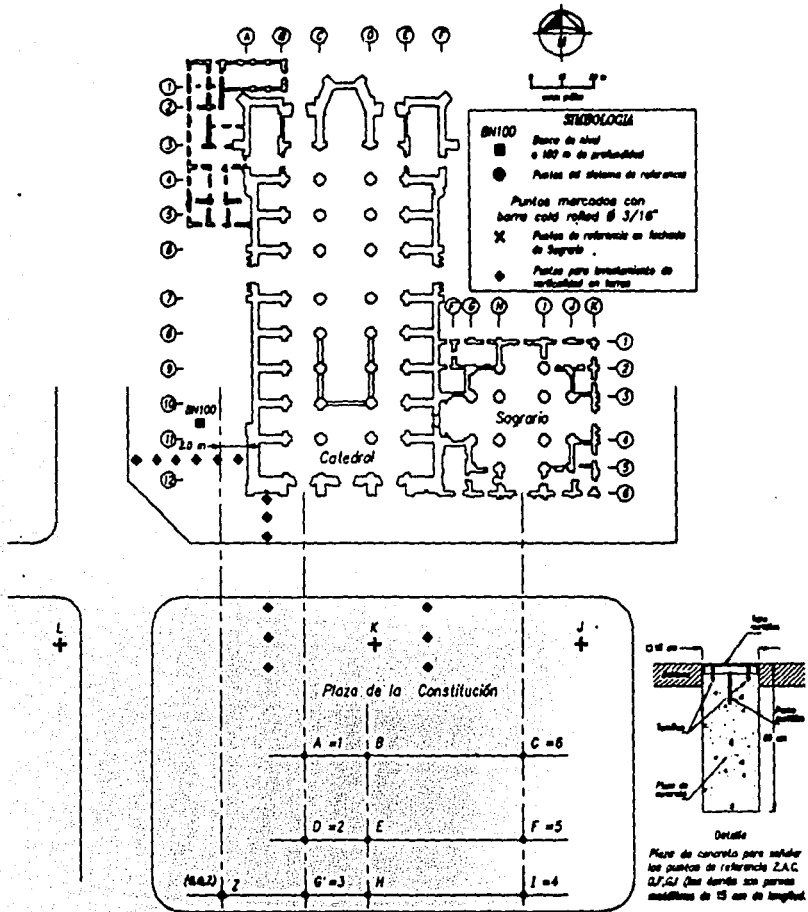


Fig 23 Puntos de referencia instalados en la Plaza de la Constitución.

FALLA DE ORIGEN

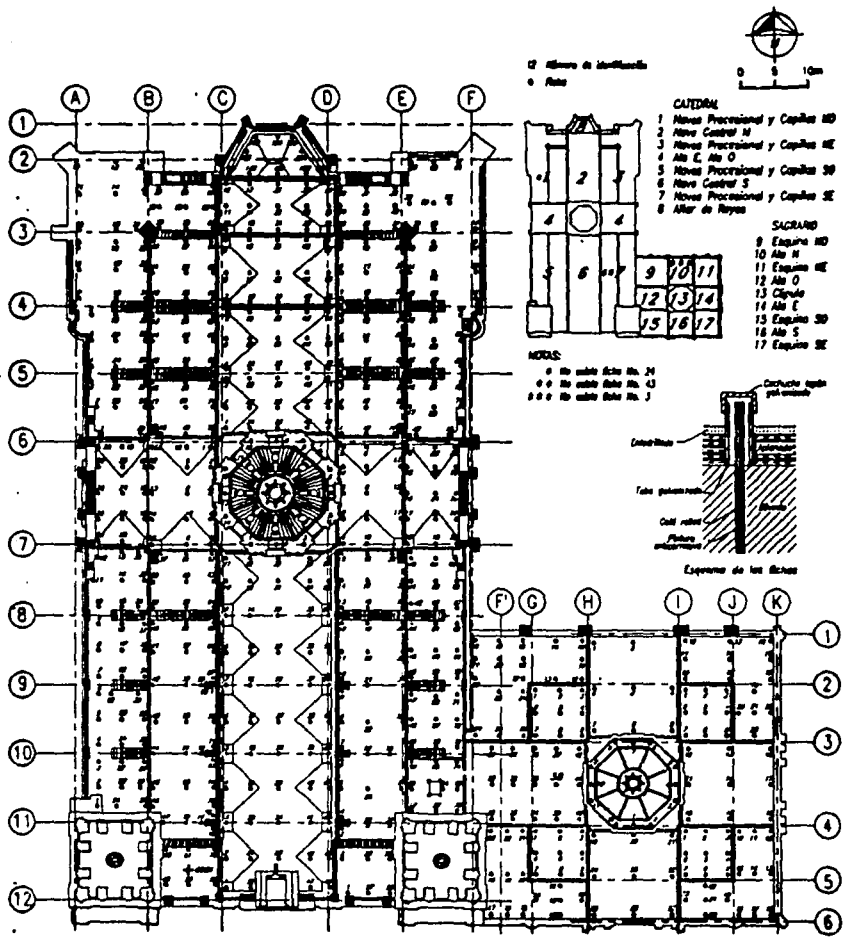


Fig 24 Puntos de control instalados en bóvedas.

FALLA DE ORIGEN



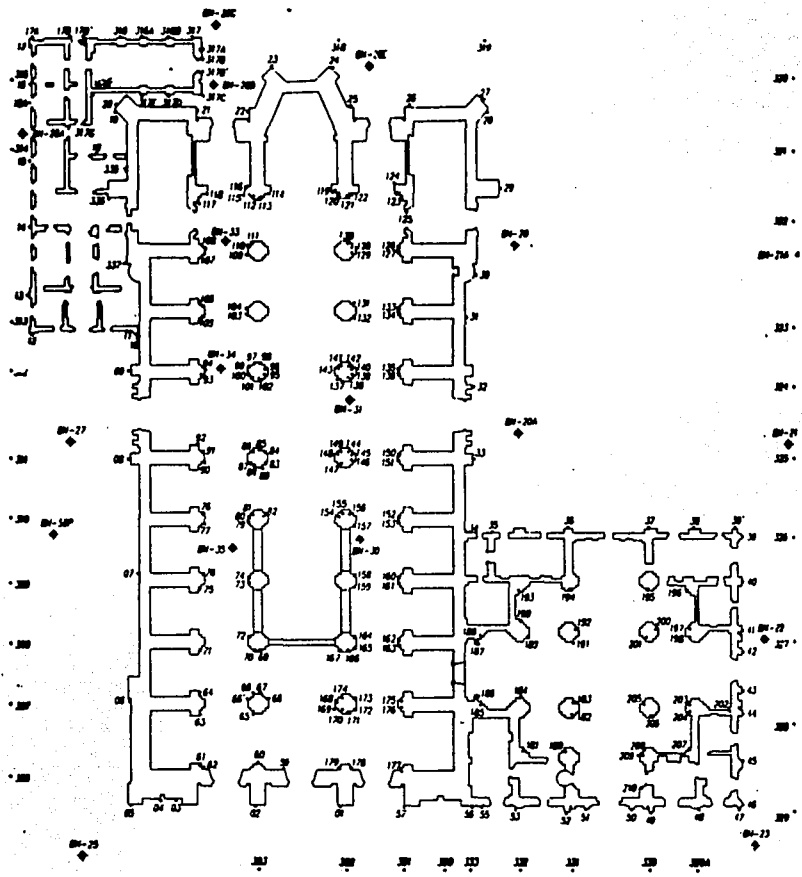


Fig 25 Puntos de control instalados en piso de feligresía o a nivel de plintos.

FALLA DE ORIGEN

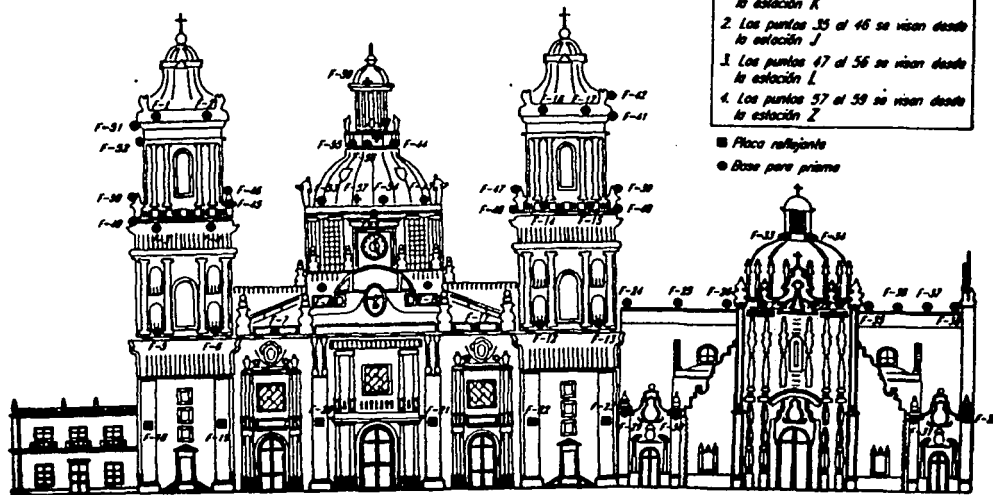


Fig 26 Puntos de control instalados en la fachada sur y cúpulas.

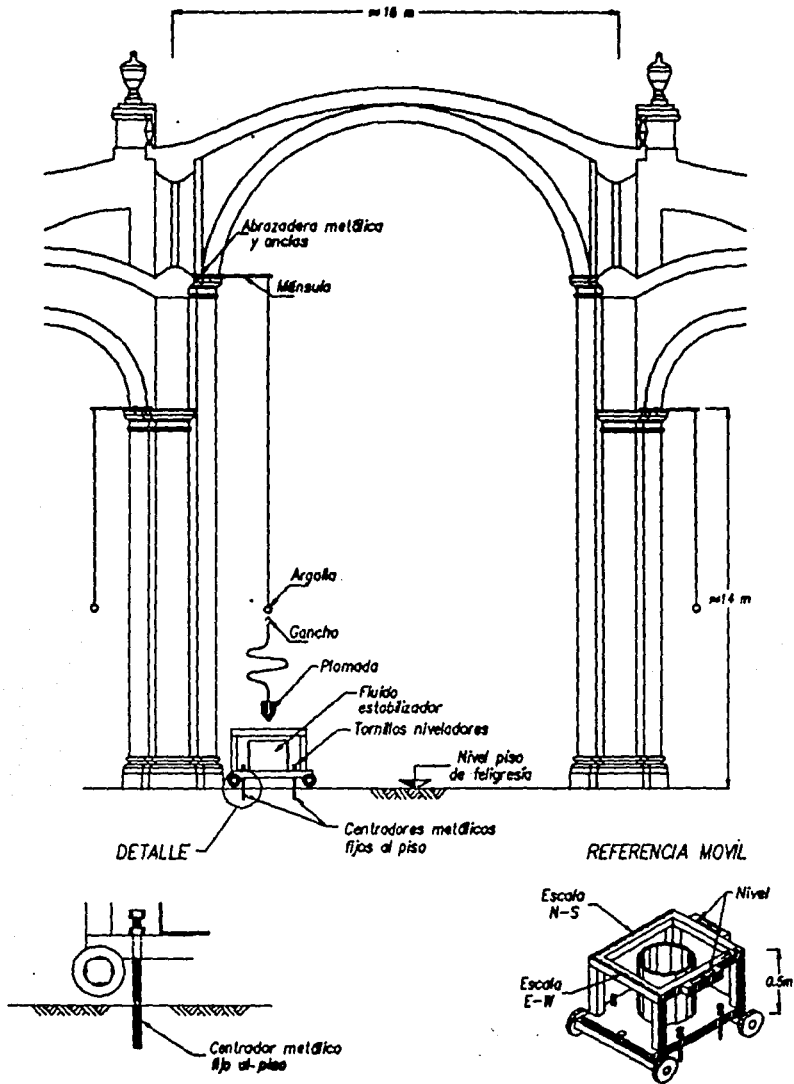
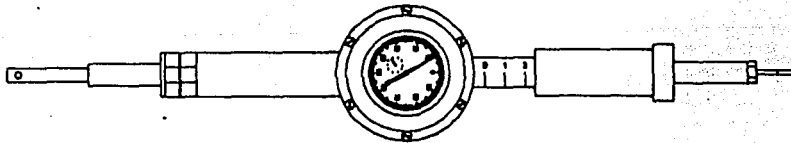
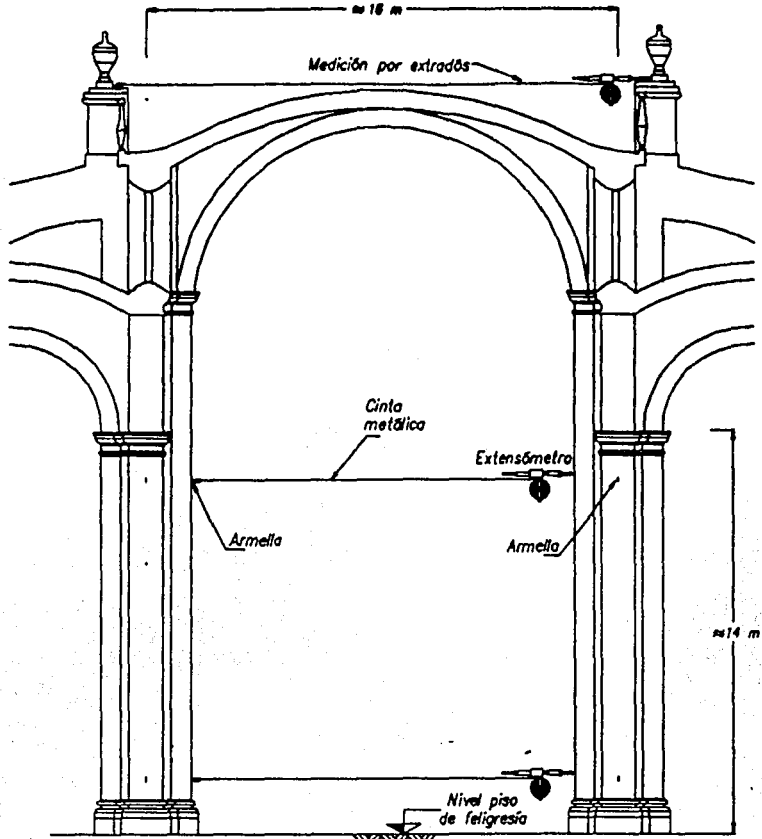


Fig 27 Equipo utilizado para la toma de lecturas de plomadas.



Vista superior  
de extensómetro

**Fig 28** Equipo utilizado para la toma de lecturas de convergencias en arcos con extensómetro.

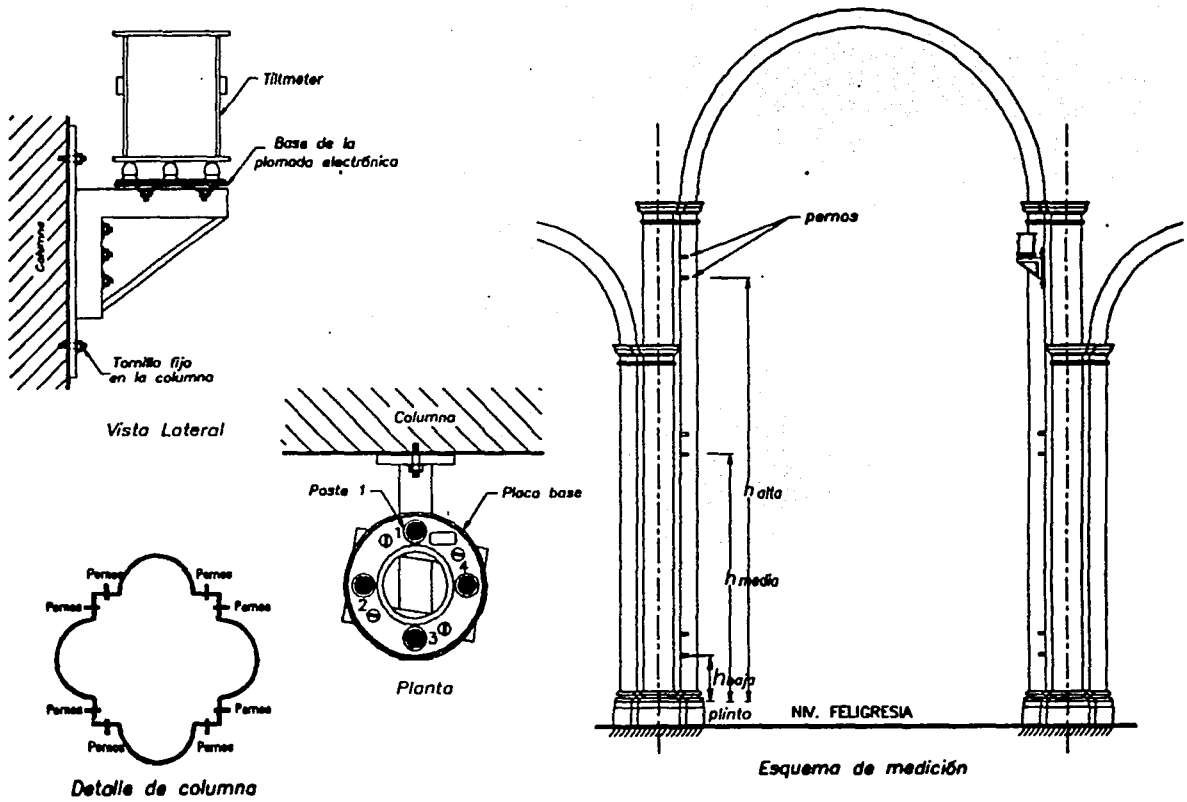


Fig 29 Equipo utilizado para medir el giro de las columnas con tiltmeter.

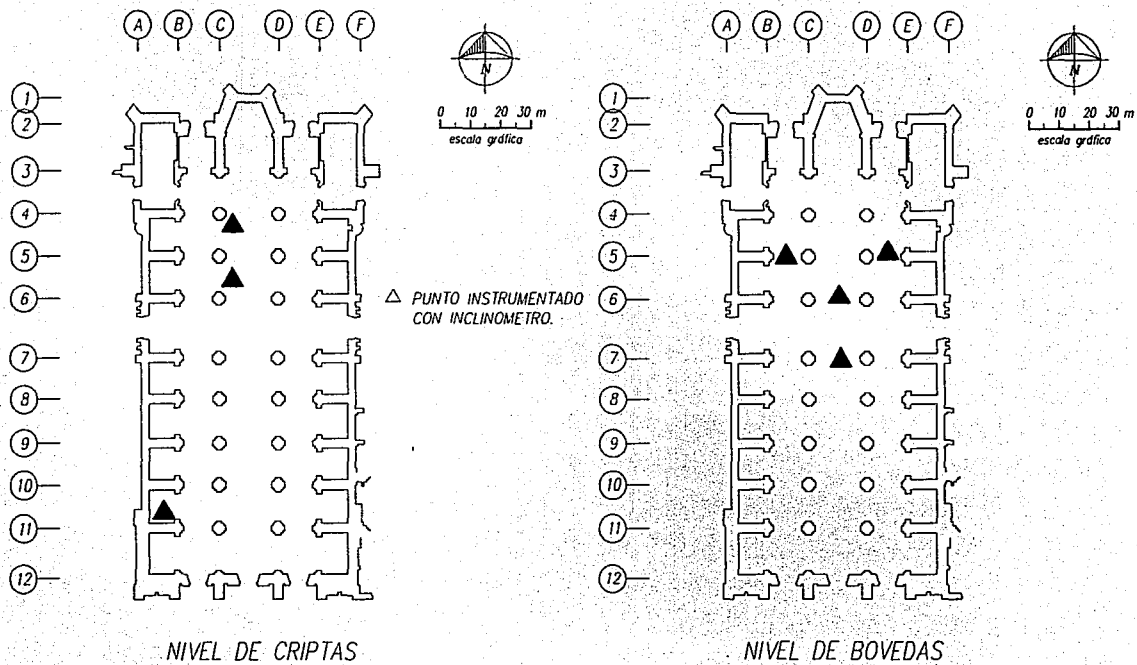
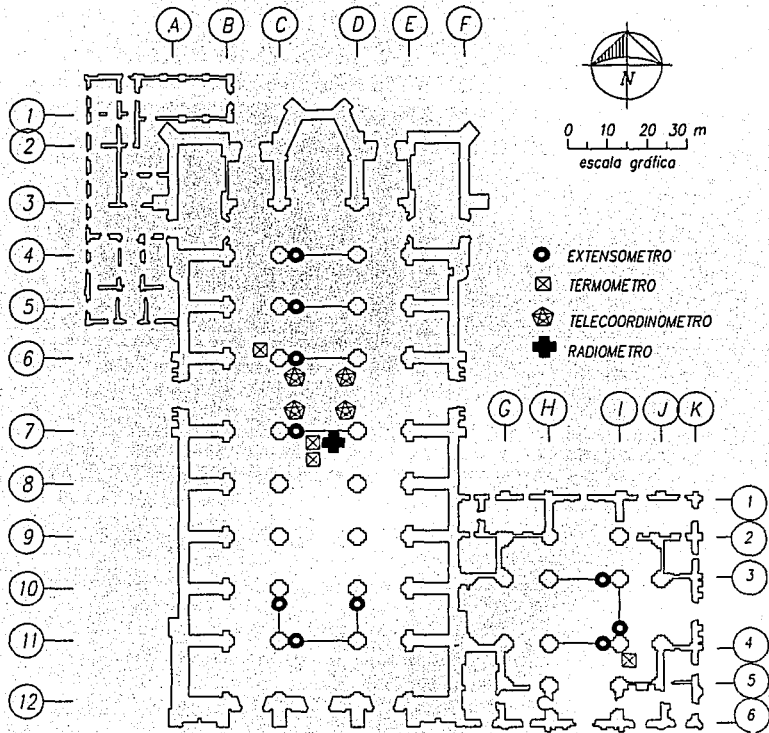
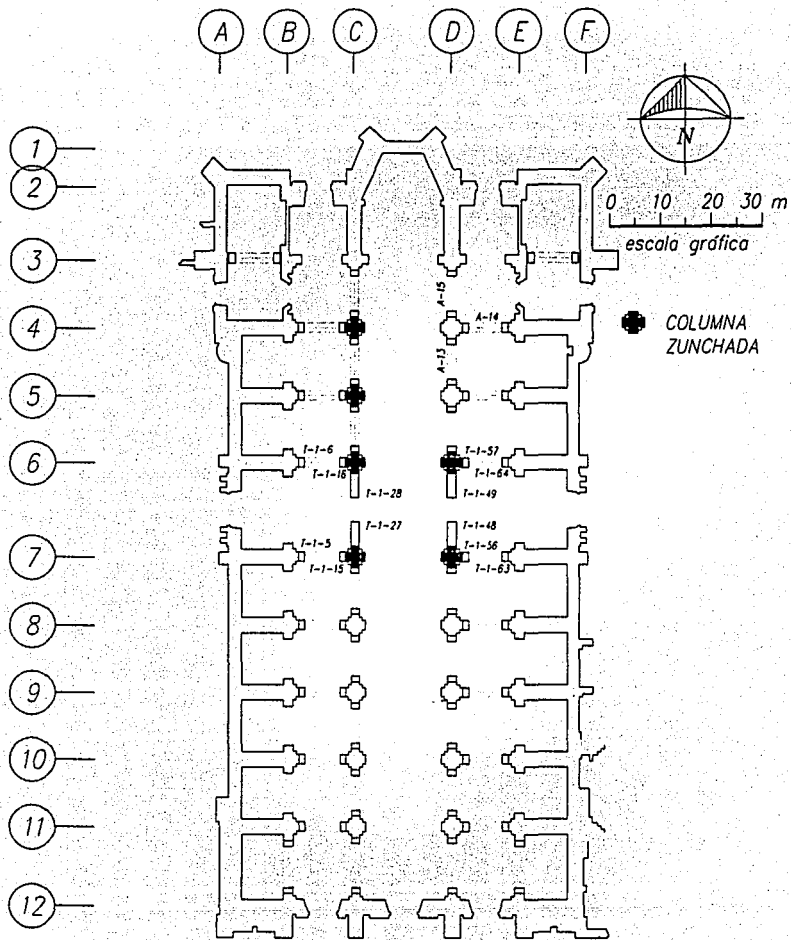


Fig 30 Localización de inclinómetros.



**Fig 31** Localización de los 19 sensores del sistema automático de monitoreo.



**Fig 32** Localización de los elementos de apuntalamiento en Catedral y las torres instrumentadas.

FALLA DE ORIGEN



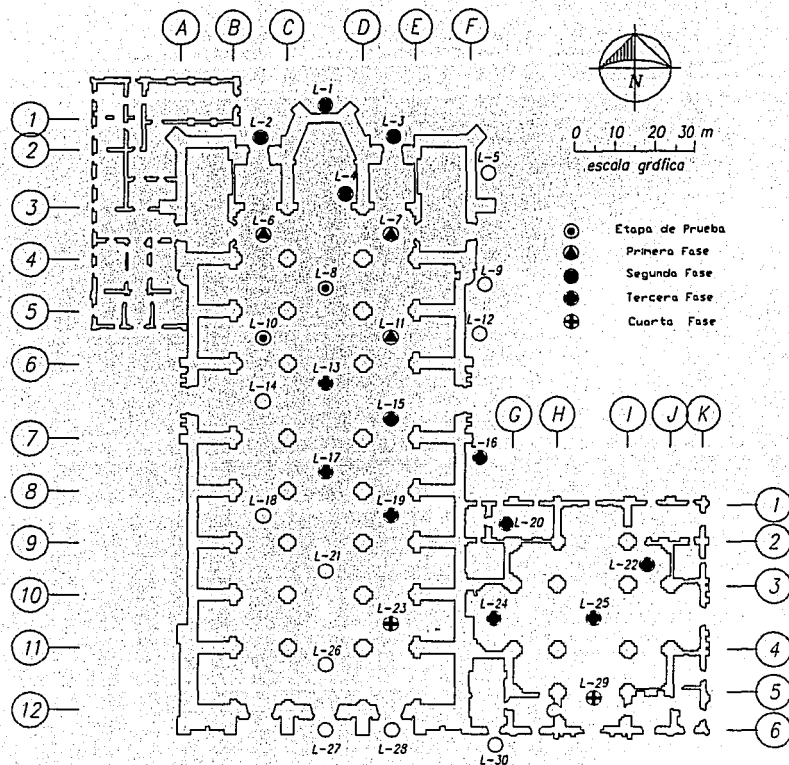


Fig 33 Secuencia en la activación de lumberras.

## ACUMULADO

(Hasta 31/agosto/1994)

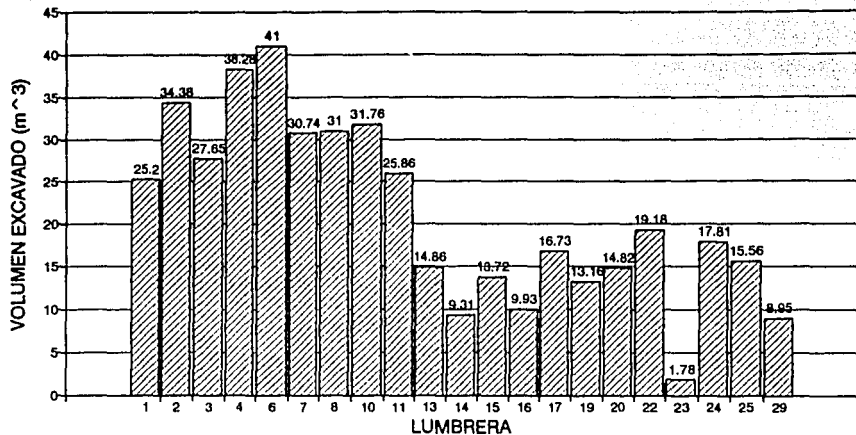


Fig 34 Volumen total subexcavado por lumbreira.

## PARCIAL

(Hasta 31/agosto/1994)

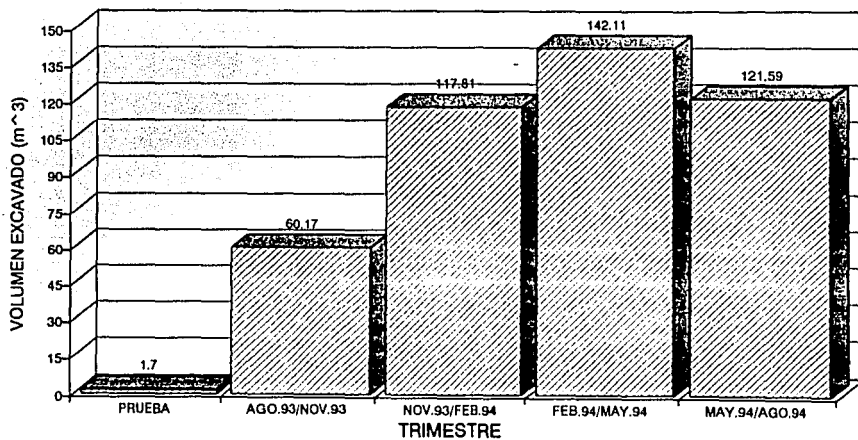


Fig 35 Variación del volumen subexcavado en cada trimestre.

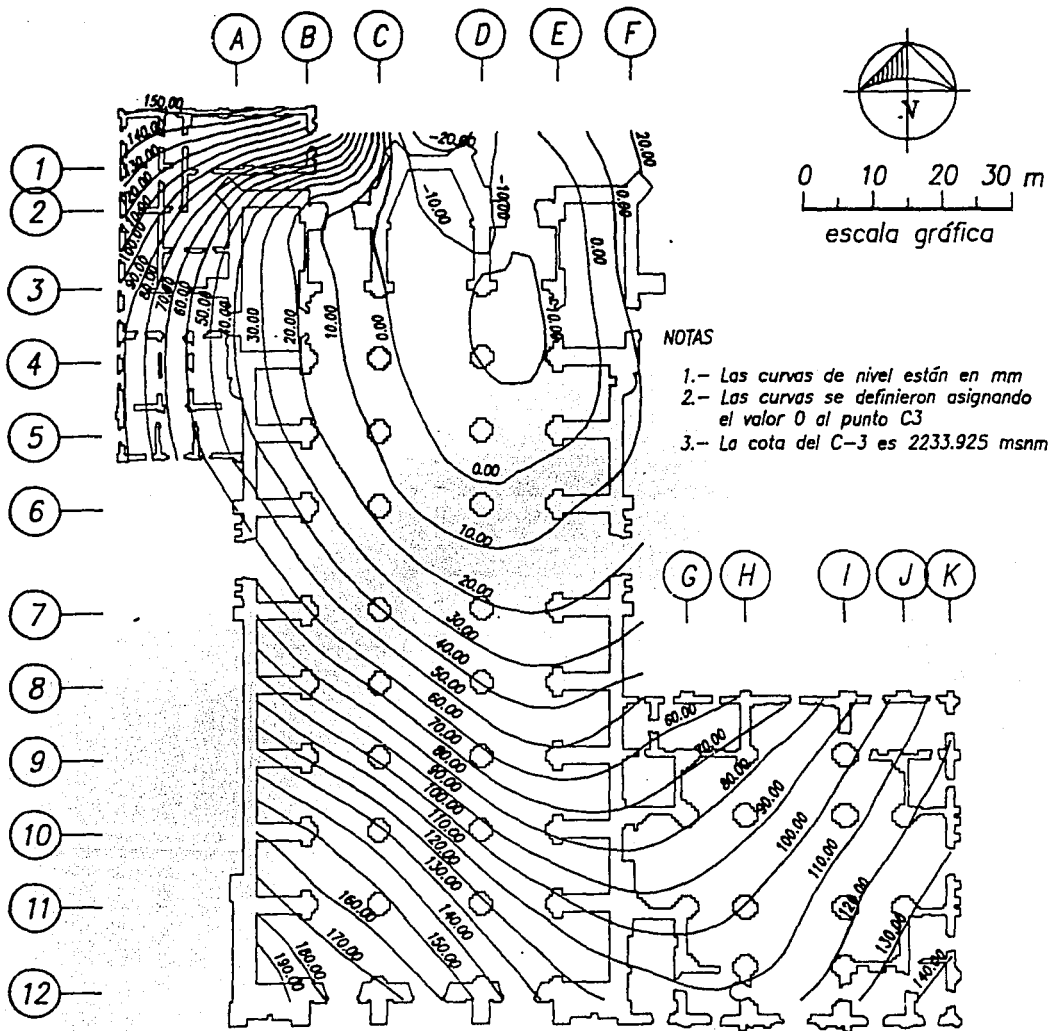
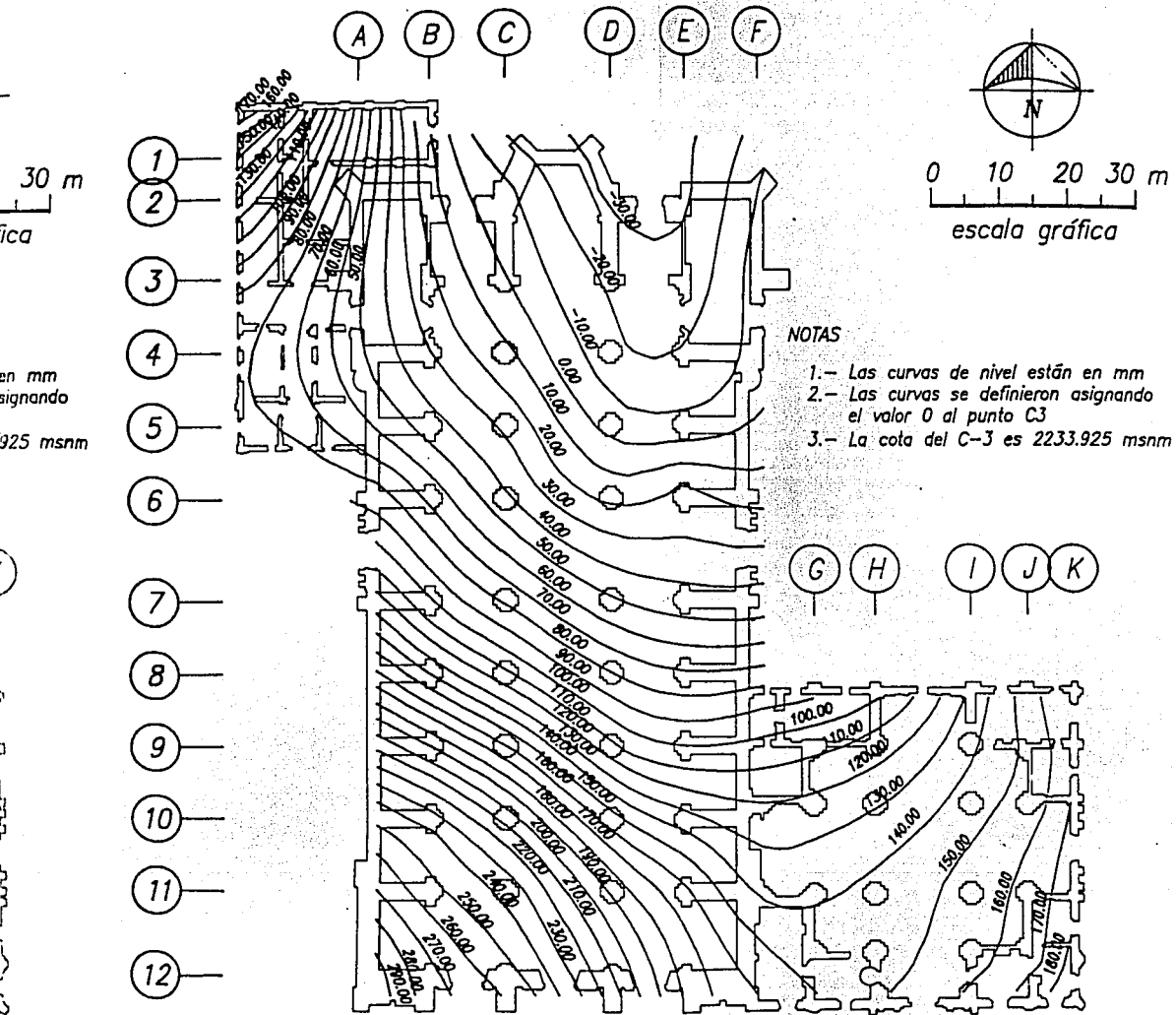
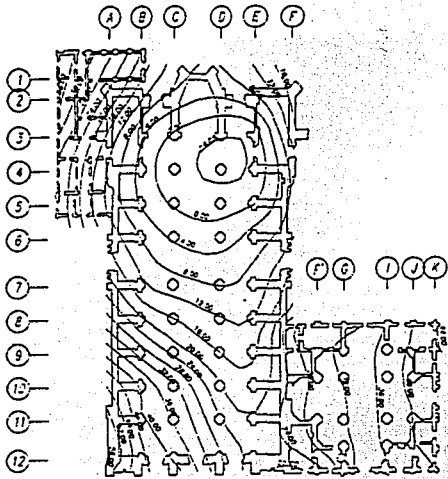


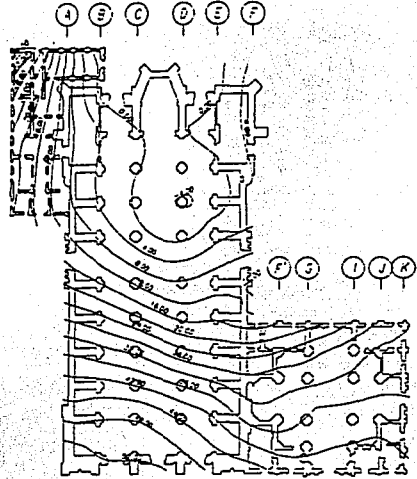
Fig 36 Curvas de igual hundimiento diferencial del piso desde e de la subexcavación (agosto/93).



piso desde el inicio de los trabajos (octubre/91) y desde el inicio

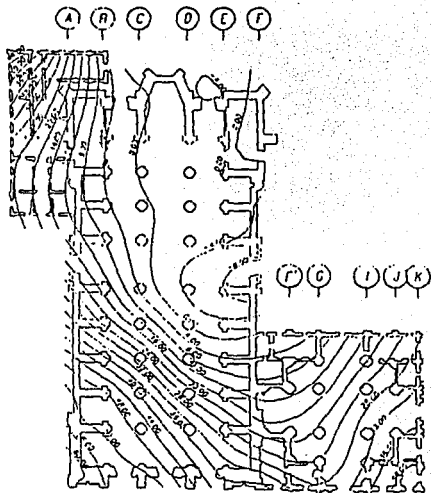


Diferencia entre 23/ago/93 y 29/nov/93.

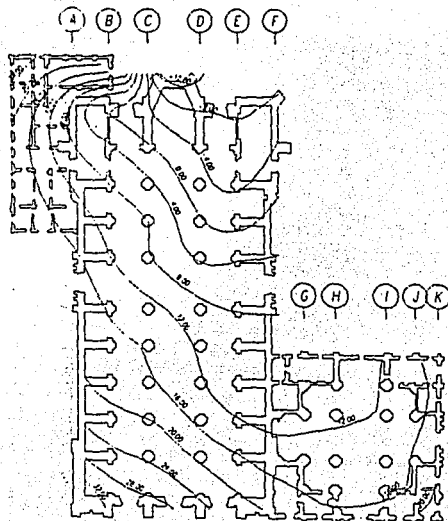


Diferencia entre 29/nov/93 y 21/feb/94.

Fig 37 Comparación de los hundimientos diferenciales d.



*Diferencia entre 21/feb/94 y 16/may/94.*



*Diferencia entre 30/may/94 y 22/ago/94.*

*nciales del piso en los cuatro trimestres.*

**FALLA DE ORIGEN**

## VARIACION POR TRIMESTRE DE LA VELOCIDAD DE HUNDIMIENTO DIFERENCIAL DEL PISO

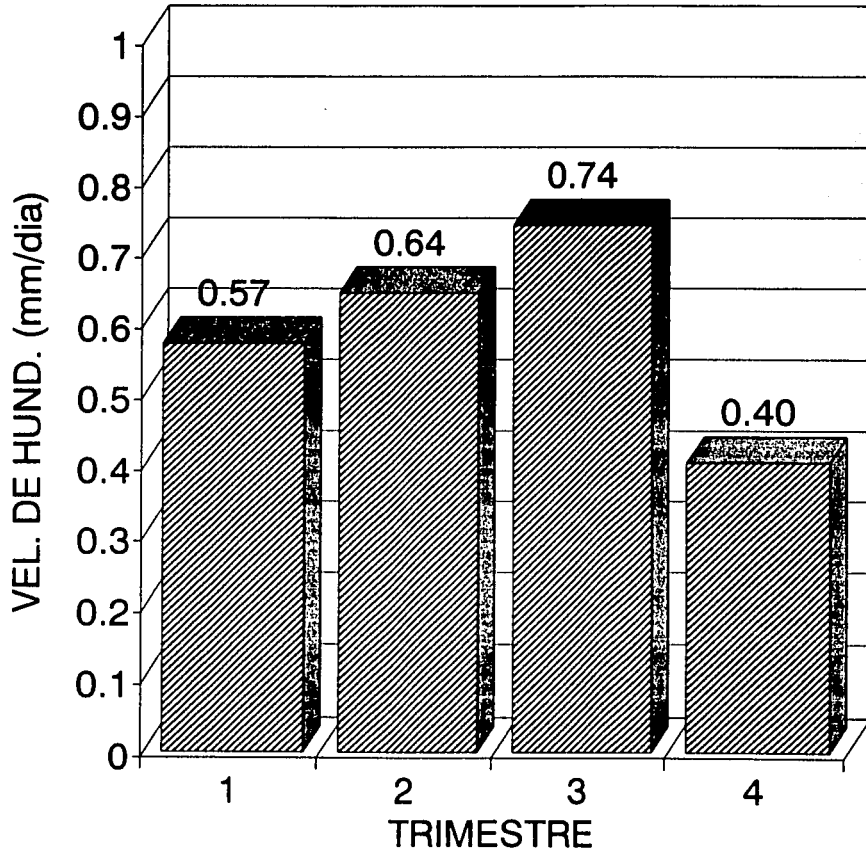


Fig 38 Variación por trimestre de la velocidad de hundimiento diferencial entre los puntos C-3 y la esquina surponiente.

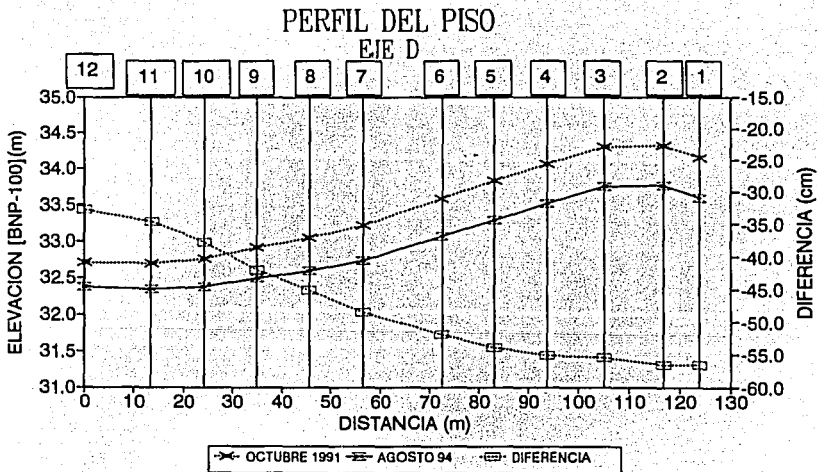
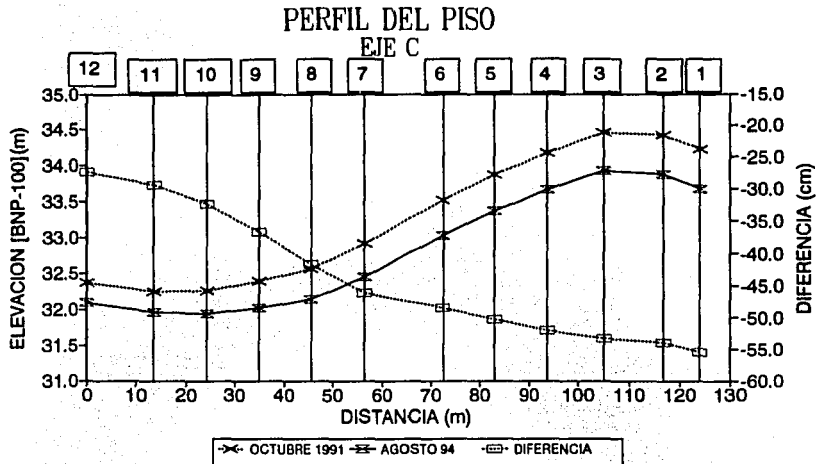


Fig 39 Perfiles de nivelación de octubre de 1991 y agosto de 1994 de dos ejes longitudinales y la diferencia entre las dos nivelaciones.



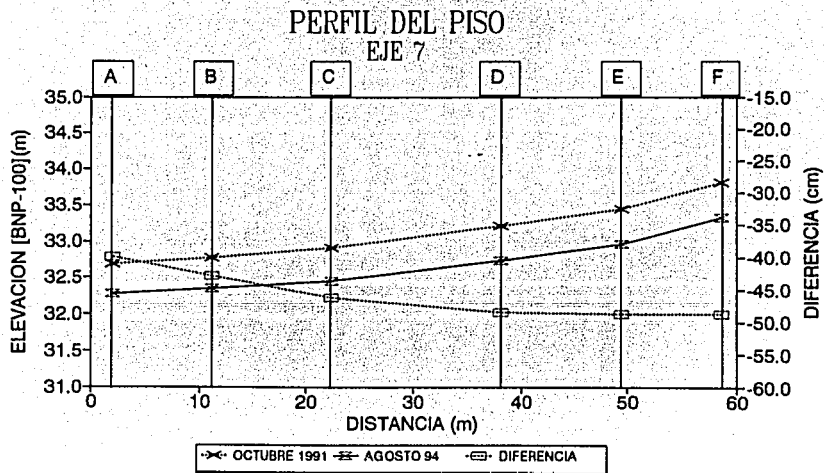
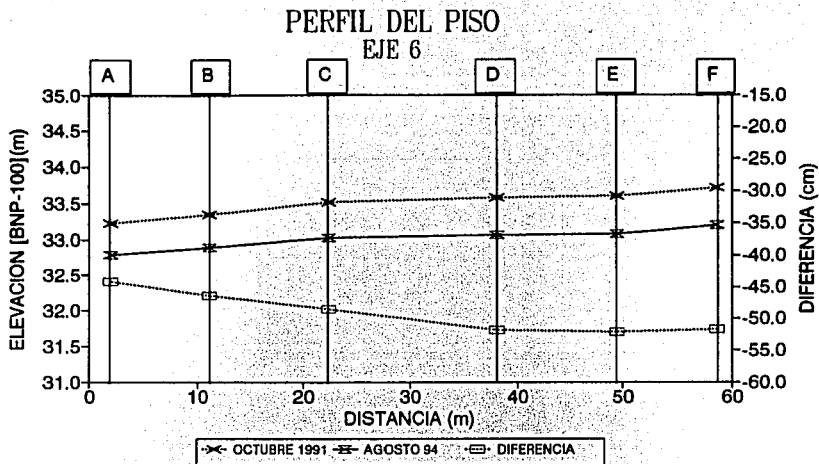
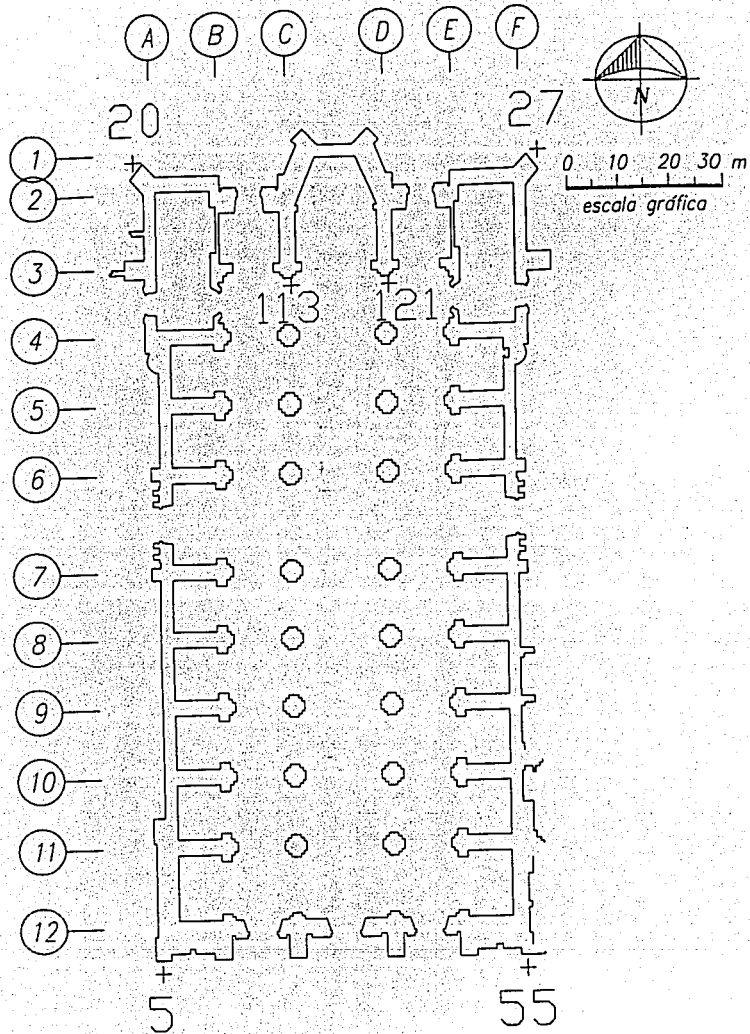
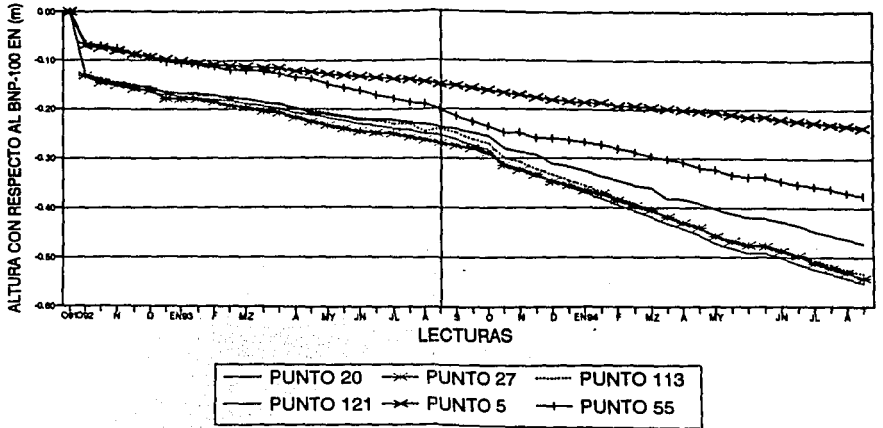


Fig 40 Perfiles de nivelación de octubre de 1991 y agosto de 1994 de dos ejes transversales y la diferencia entre las dos nivelaciones.

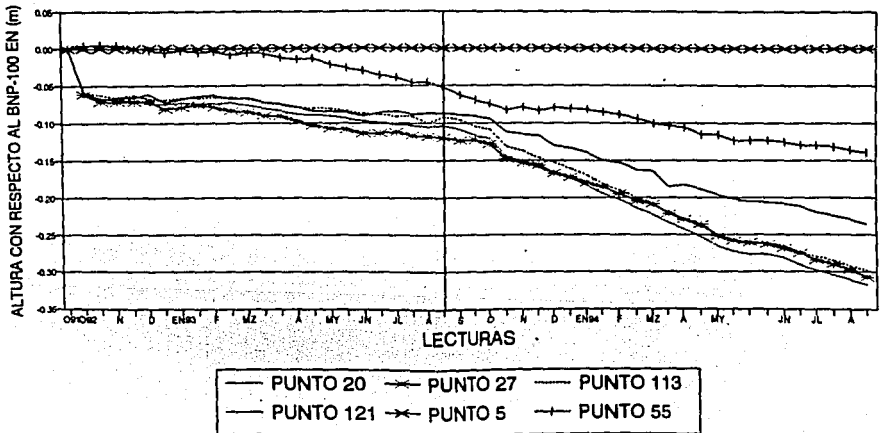


**Fig 41** Variación con el tiempo del hundimiento total y diferencial de Catedral.

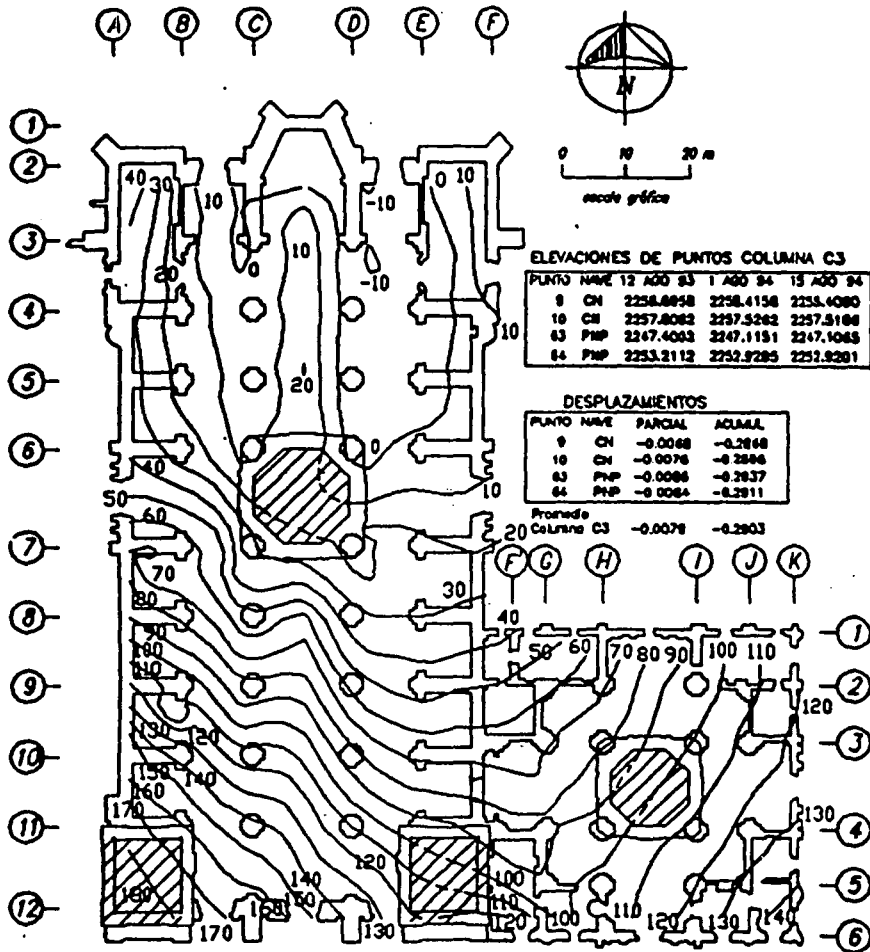
## HUNDIMIENTO TOTAL EN PUNTOS PERIMETRO DE CATEDRAL



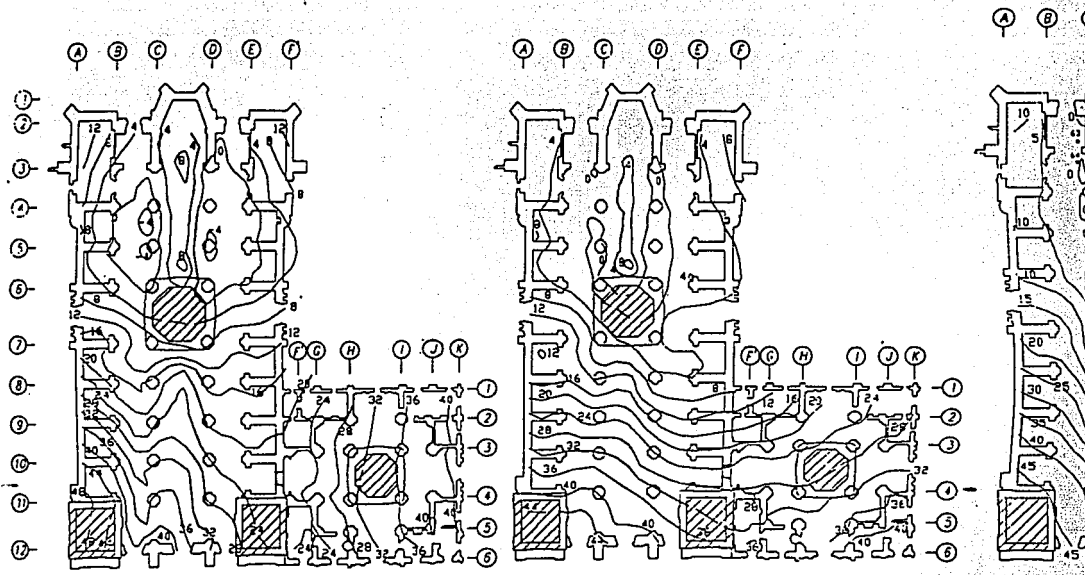
## HUNDIMIENTO RELATIVO A LA TORRE PTE. PERIMETRO DE CATEDRAL



*total y diferencial de algunos puntos instalados en el perímetro de*



**Fig 42** Asentamientos diferenciales en mm de la cubierta producidos entre agosto de 1993 y agosto de 1994.

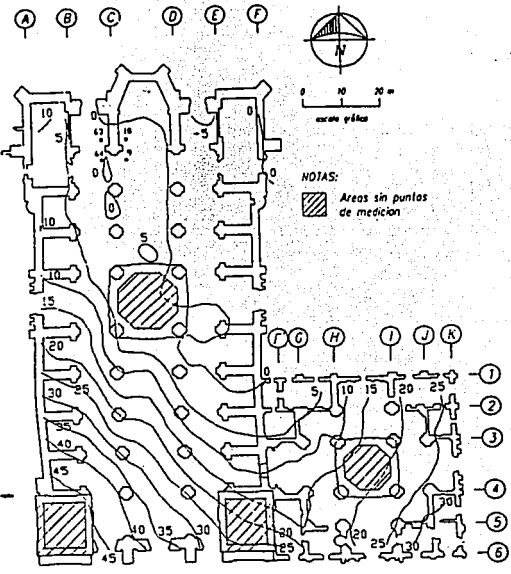


Curvas de igual desplazamiento vertical (mm) entre 12/ago/93 y 23/nov/93.

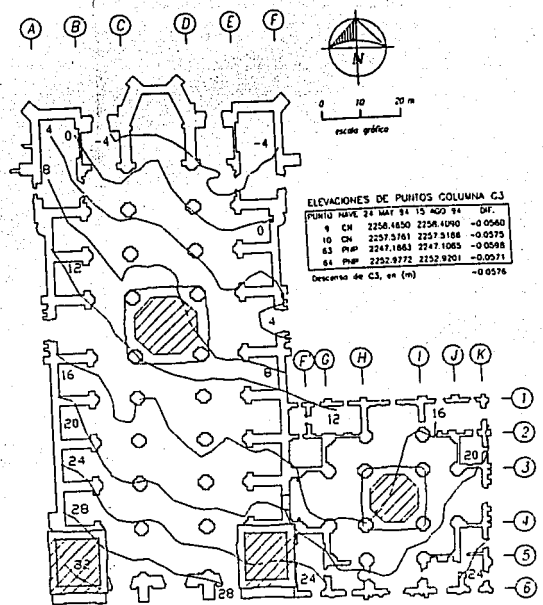
Curvas de igual desplazamiento vertical (mm) entre 23/nov/93 y 15/feb/94.

Curvas de 28/feb/94

Fig 43 Comparación de los hundimientos diferencia



Curvas de igual desplazamiento vertical (mm) entre 28/feb/94 y 24/may/94.



Curvas de igual desplazamiento vertical (mm) entre 24/may/94 y 15/ago/94.

s diferenciales de la cubierta en los cuatro trimestres.

FALLA DE ORIGEN

## COMPARACION DE LA VELOCIDAD DE HUNDIMIENTO ENTRE LA CUBIERTA Y PISO

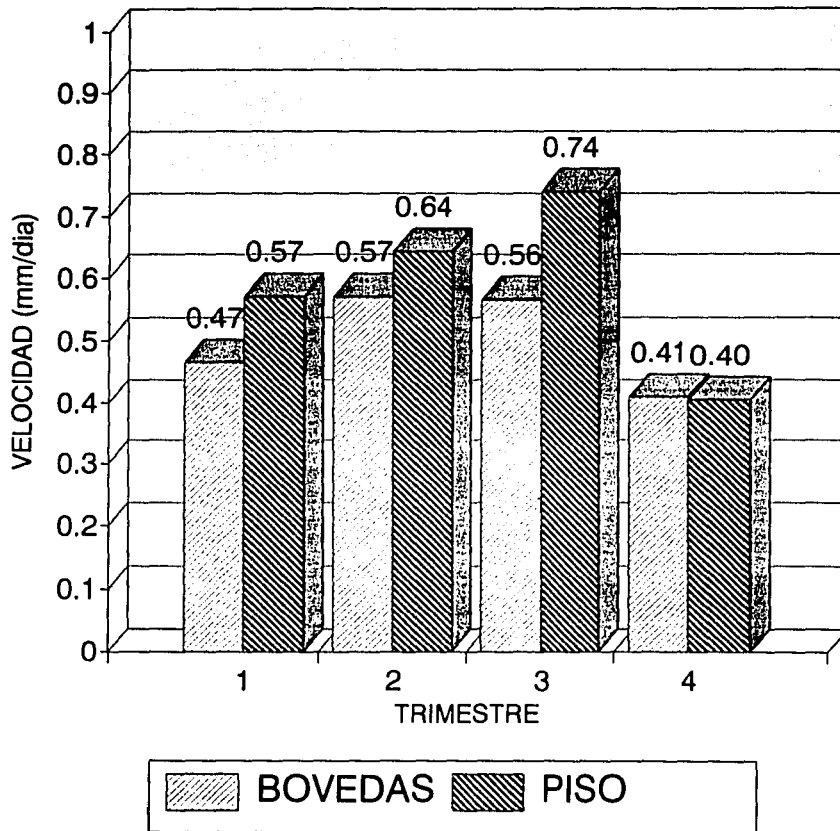


Fig 44 Comparación de la velocidad de hundimiento diferencial del piso y la cubierta.

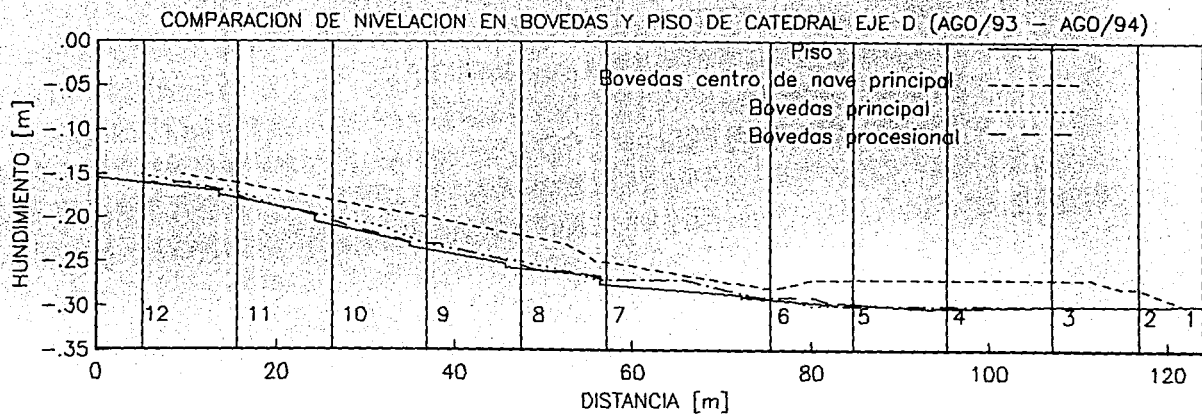
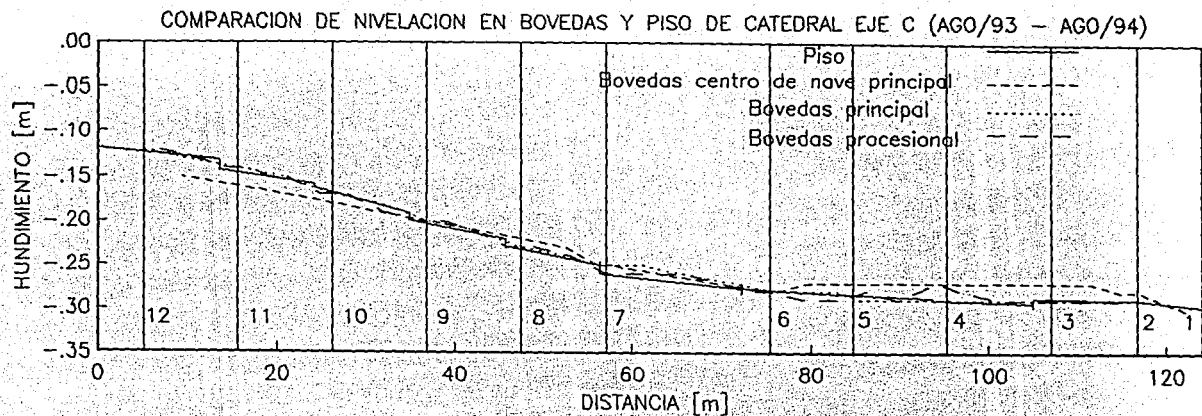
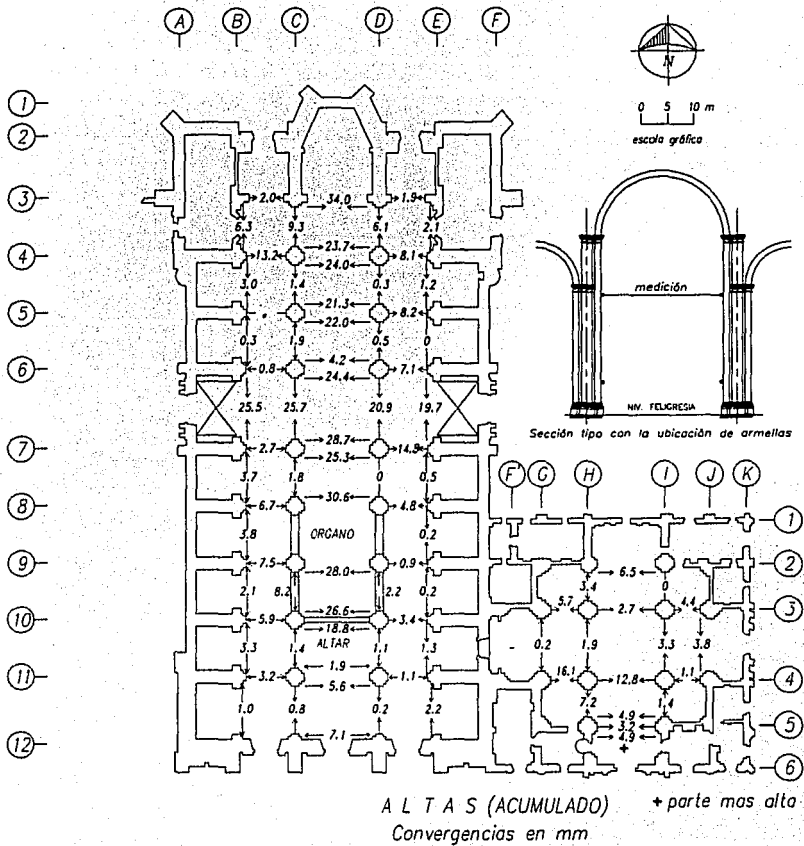
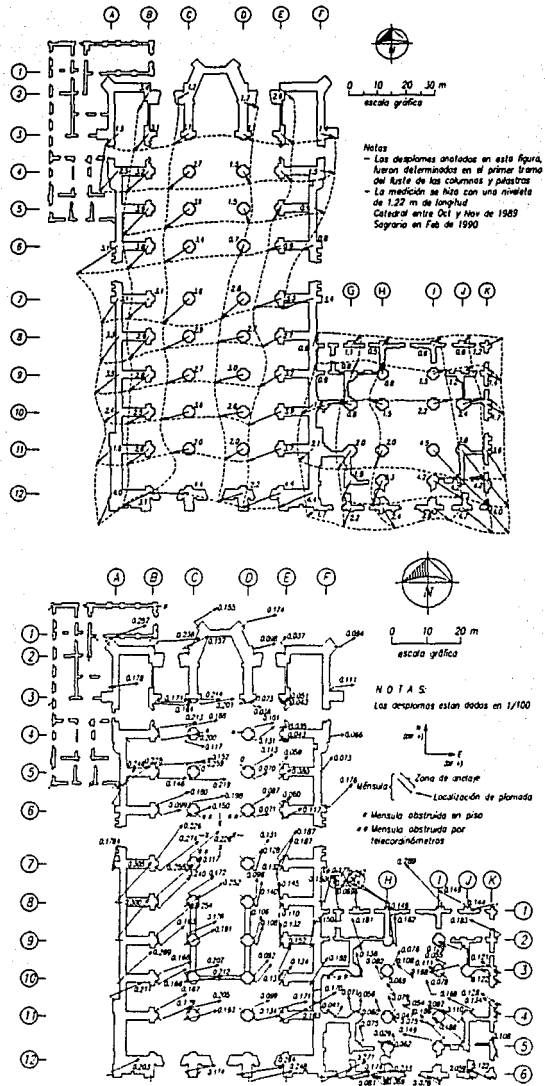


Fig 45 Comparación de perfiles de hundimiento de bóvedas y piso durante el primer año de subexcavación para los ejes C y D.

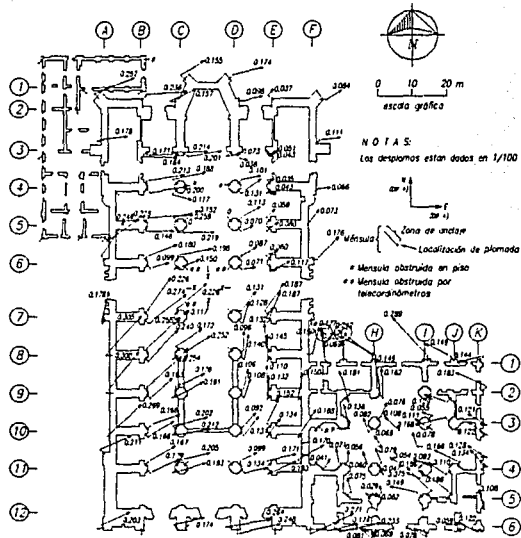
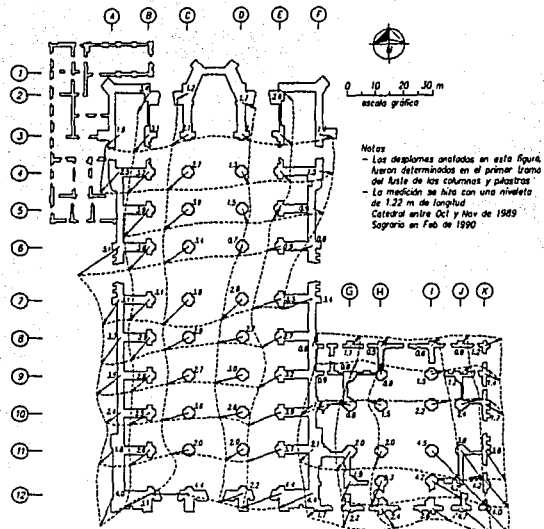




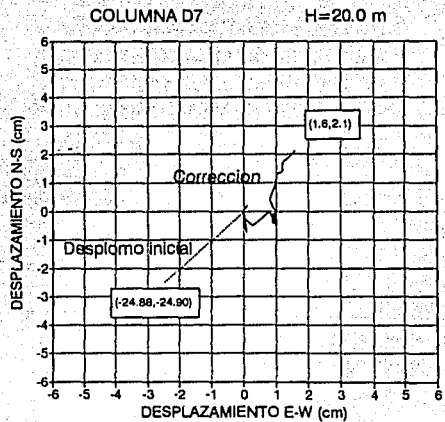
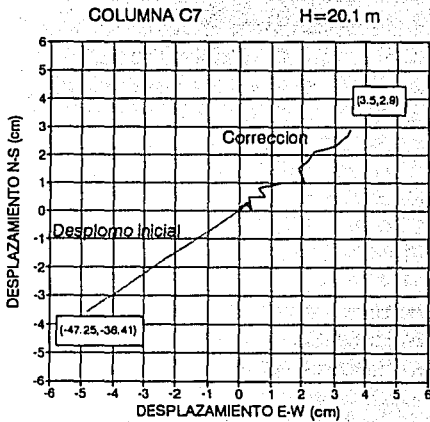
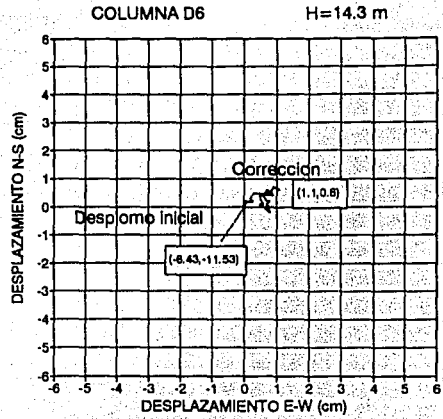
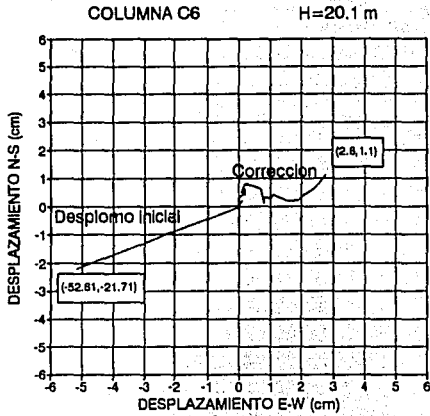
**Fig 46** *Modificación del claro de las naves producida en el primer año de subexcavación.*



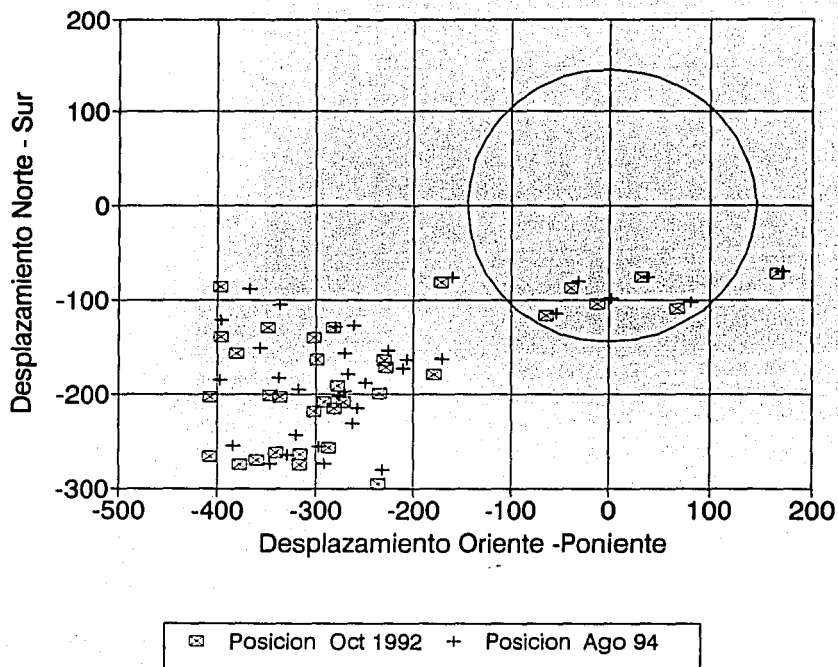
**Fig 47 Comparación del desplomo de las columnas y muros de Catedral con la corrección obtenida desde octubre de 1992 hasta agosto de 1994.**



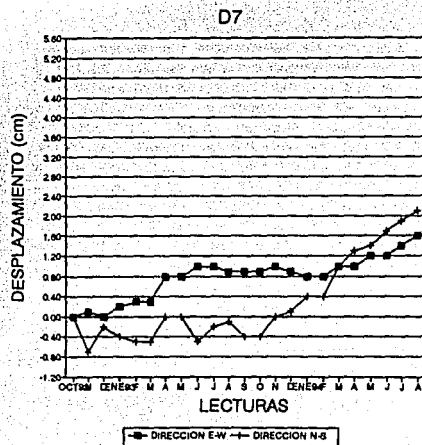
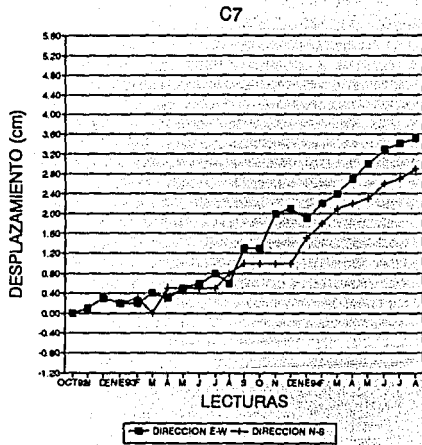
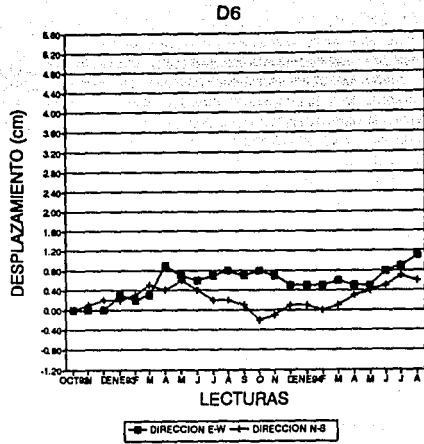
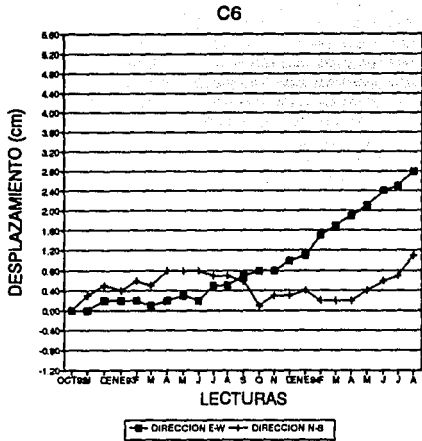
**Fig 47 Comparación del desplomo de las columnas y muros de Catedral con la corrección obtenida desde octubre de 1992 hasta agosto de 1994.**



**Fig 48** Desplomo inicial y movimiento producido desde octubre de 1992 hasta agosto de 1994 de las cuatro columnas del crucero de Catedral.



*Fig 49 Representación conjunta del movimiento de todas las plomadas hasta agosto de 1994.*



**Fig 50 Evolución con el tiempo del desplomo de las cuatro columnas del crucero de Catedral.**

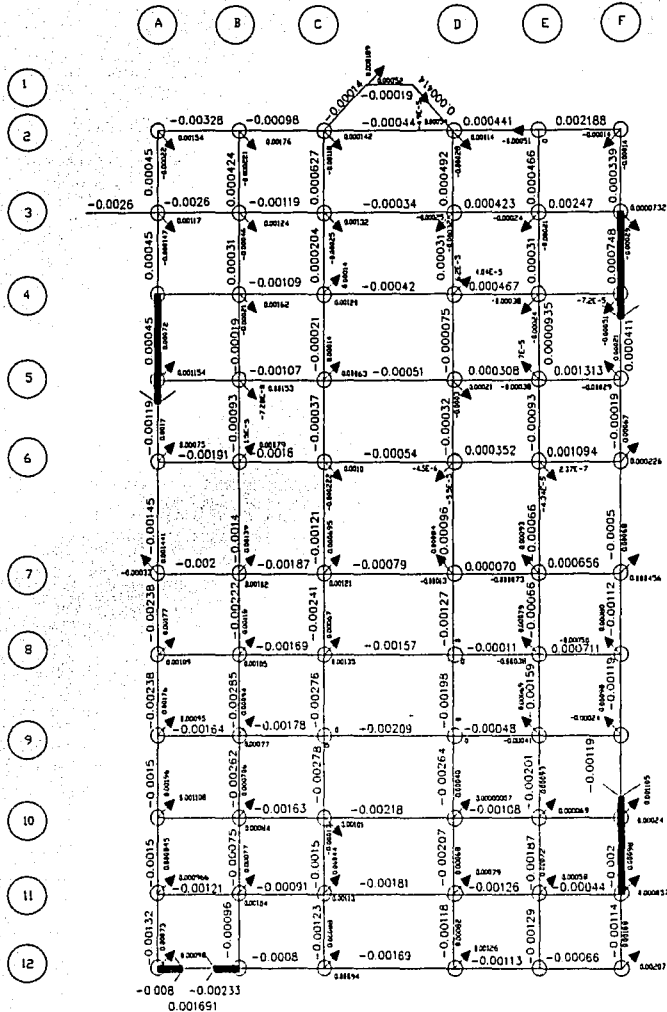
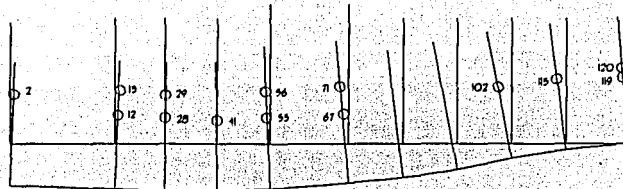


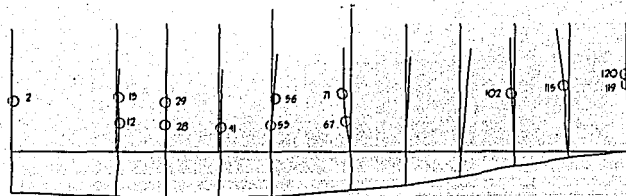
Fig 51 Comparación entre las pendientes del movimiento presentado en piso y columnas entre agosto de 1993 y mayo de 1994.



A) MOVIMIENTO DE COLUMNAS ACORDO A DESPLAZAMIENTO MEDIO DEL PISO

PUNTO	A)	B)
2	8.0	1.0
12	6.0	7.0
15	8.0	5.0
28	2.1	-1.0
29	2.7	-1.0
41	-2.6	5.0
55	-8.0	-2.0
56	-10.0	5.0
67	-16.0	-15.0
71	-22.0	-18.0
102	-56.0	-7.0
115	-25.0	-12.0
119	-17.5	-13.0
120	-17.8	-15.0

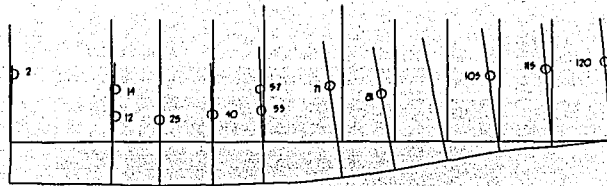
LOS DESPLAZAMIENTOS ESTÁN DADOS EN mm.



B) DESPLAZAMIENTO DE COLUMNAS ACORDO AL MOVIMIENTO MEDIO DEL PISO

Fig 52 Comparación de la corrección que hubieran tenido las columnas de haber seguido libremente al piso en su base, contra la deformada real obtenida de mediciones registradas en campo del eje C.

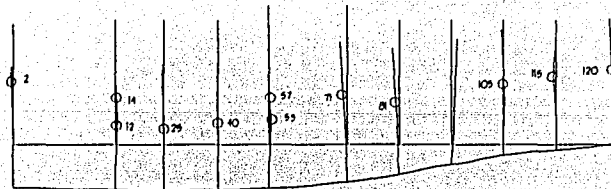




A) MOVIMIENTO DE COLUMNAS ASOCIADO AL DESPLAZAMIENTO MEDIDO DEL PISO

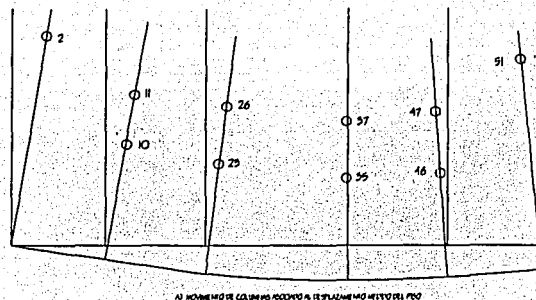
PUNTO	A)	B)
2	6.0	-4.0
12	4.0	5.0
14	6.0	5.0
25	0.2	-2.0
40	-4.0	-2.0
55	-8.0	6.0
57	-11.0	5.0
71	-53.0	-15.0
81	-58.0	-10.0
105	-51.0	5.0
115	-10.0	-8.0
120	-22.0	-14.0

LOS DESPLAZAMIENTOS ESTAN DADOS EN mm.



B) DESPLAZAMIENTOS CONTENIDOS EN CAMPO DE PISO Y COLUMNAS

Fig 53 Comparación de la corrección que hubieran tenido las columnas de haber seguido libremente al piso en su base, contra la deformada real obtenida de mediciones registradas en campo del eje D.



PLANTO	A)	B)
2	43.0	20.0
10	24.0	15.0
11	54.0	14.0
25	17.0	16.0
26	24.0	16.0
37	-0.4	-5.0
55	-0.6	4.0
46	-10.0	-5.0
47	-15.0	4.0
51	-28.0	6.0

LOS DESPLAZAMIENTOS ESTAN DADOS EN mm.

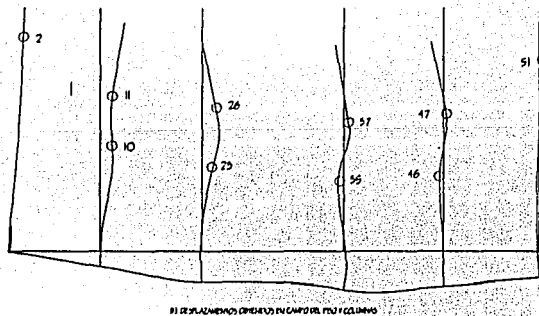
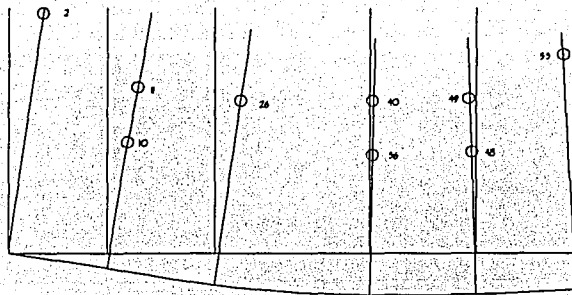


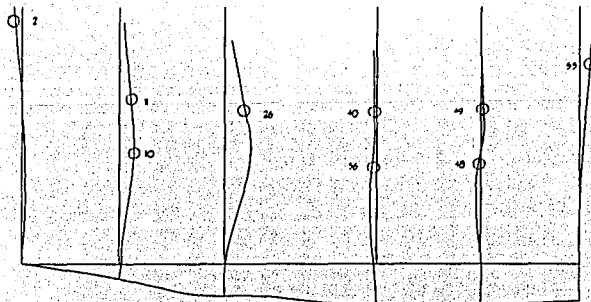
Fig 54 Comparación de la corrección que hubieran tenido las columnas de haber seguido libremente al piso en su base, contra la deformada real obtenida de mediciones registradas en campo del eje. 6.



A) MOVIMIENTO DE COLUMNAS ASOCIADO AL DESPLAZAMIENTO MEDIDO DEL PISO

FLEJO	A)	B)
2	44.9	-9.0
10	27.7	19.0
11	38.2	15.0
26	30.0	25.0
36	3.0	-6.0
40	4.2	-3.0
48	-5.3	-5.0
49	-7.4	4.0
55	-17.6	12.0

LOS DESPLAZAMIENTOS ESTAN DADOS EN mm.



B) DESPLAZAMIENTOS REALES EN CAMPO DE PISO Y COLUMNAS

Fig 55 Comparación de la corrección que hubieran tenido las columnas de haber seguido libremente al piso en su base, contra la deformada real obtenida de mediciones registradas en campo del eje 7.

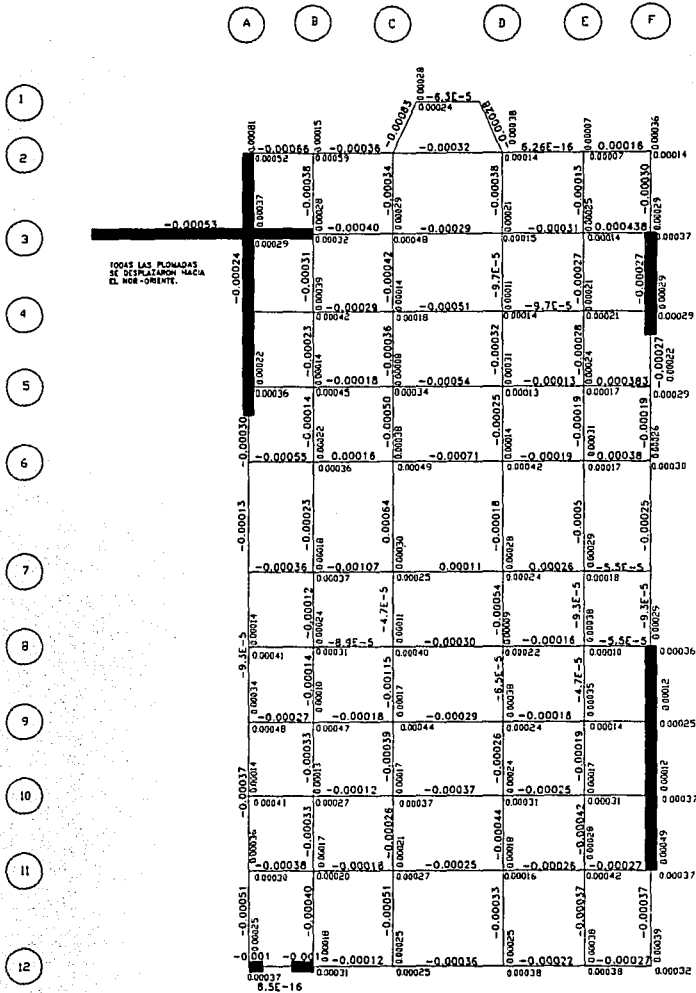
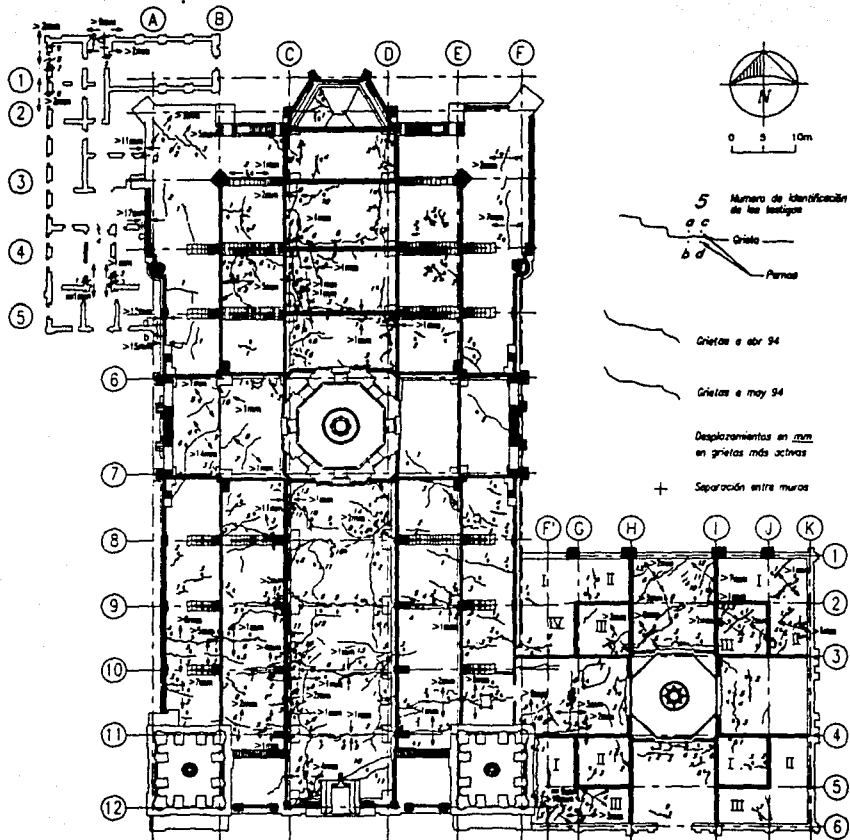


Fig 56 Comparación entre las pendientes del movimiento presentado en piso y columnas entre mayo y agosto de 1994.



(19 agosto 93-22 agosto 94)

**Fig 57 Configuración de grietas en la cubierta de Catedral hasta agosto de 1994.**

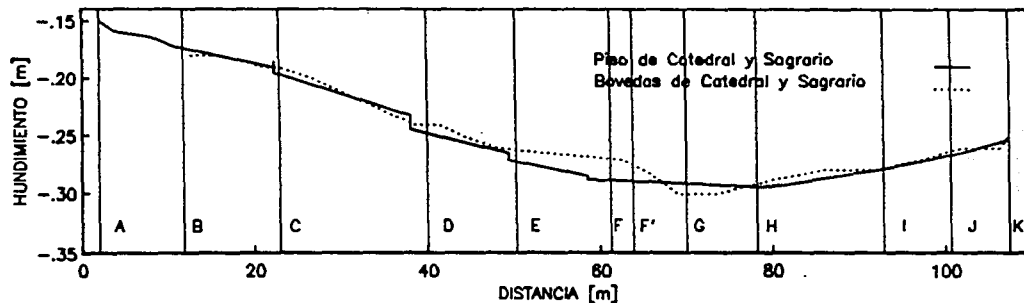
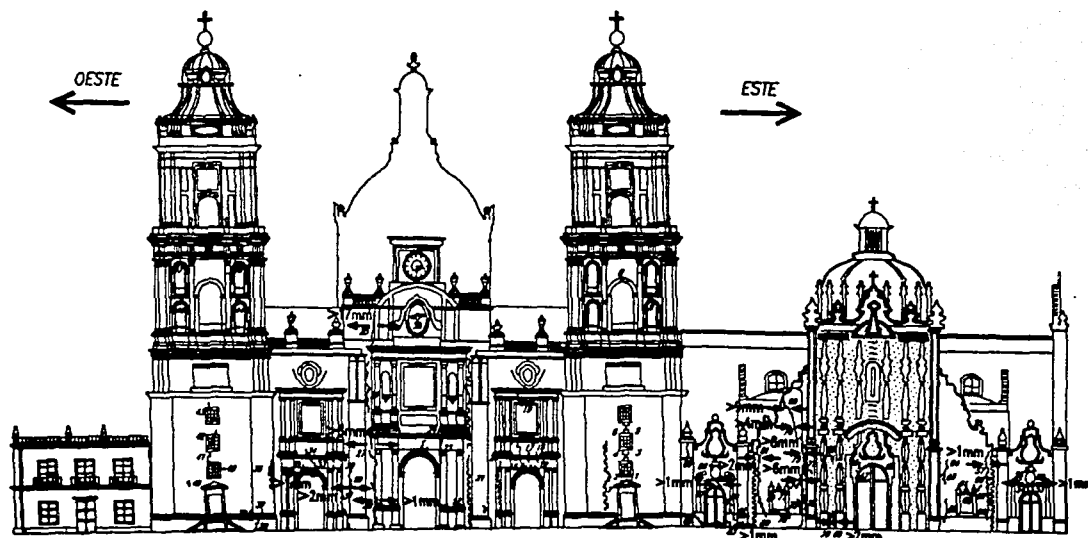
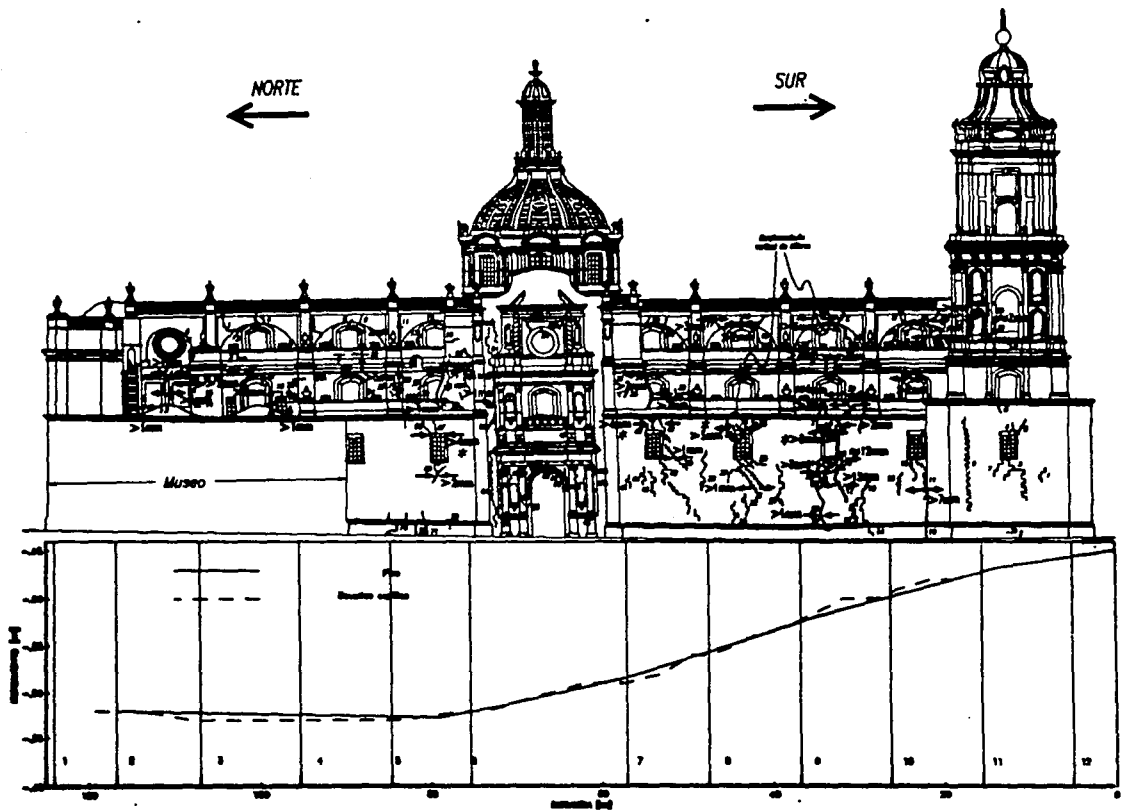


Fig 58 Comparación de hundimientos diferenciales y los agrietamientos presentados en la fachada sur de Catedral durante el periodo comprendido entre noviembre de 1992 y agosto de 1994.



**Fig 59** Comparación de hundimientos diferenciales y los agrietamientos presentados en la fachada poniente de Catedral durante el periodo comprendido entre noviembre de 1992 y agosto de 1994.

## PROGRAMAS



PROGRAMA 1  
CLS

114

```
*****  
'LECTURA DEL ARCHIVO QUE CONTIENE LA INFORMACION ACERCA DEL SISTEMA DE LINEAS Y FICHAS PRESENTES EN LAS  
'BOVEDAS DE CATEDRAL  
' "LINEBOV.BAS" ARCHIVO QUE CONTIENE EL NUMERO TOTAL DE LINEAS EXISTENTES A NIVEL DE BOVEDAS EN  
' CATEDRAL, EL NUMERO DE LINEA Y LAS FICHAS QUE CONTIENE Y LAS FICHAS  
' CORRESPONDIENTES A CADA LINEA  
' "NL" TOTAL DE LINEAS DEL SISTEMA  
' "LINEA" IDENTIFICACION DEL NUMERO DE LINEA  
' "NP" NUMERO DE FICHAS CONTENIDAS EN UNA LINEA  
' "PUNTO" FICHA UBICADA EN UNA LINEA DETERMINADA
```

OPEN "LINEBOV.BAS" FOR INPUT AS 1

```
INPUT #1, NL  
PRINT "NL = "; NL  
FOR I = 1 TO NL  
INPUT #1, LINEA(I), NP(I)  
NEXT I  
FOR I = 1 TO NL  
INPUT #1, T$  
PRINT T$  
FOR J = 1 TO NP(I)  
INPUT #1, PUNTO(J,I)  
PRINT PUNTO(J,I)  
NEXT J  
NEXT I  
CLOSE 1
```

```
*****  
'LECTURA DE DATOS DEL ARCHIVO QUE CONTIENE EL REGISTRO OBTENIDO EN CAMPO DE LAS 640 FICHAS EXISTENTES  
'EN BOVEDAS DE CATEDRAL.
```

```
' "BOVEDAS.DAT" ARCHIVO QUE CONTIENE EL NUMERO DE FICHA, SU COORDENADA EN DIRECCION E-  
' W (X), SU COORDENADA EN DIRECCION N-S (Y) Y EL HUNDIMIENTO REGISTRADO
```

OPEN "BOVEDAS.DAT" FOR INPUT AS 1

```
FOR I = 1 TO 640  
INPUT #1, LEC(I, 1), LEC(I, 2), LEC(I, 3), LEC(I, 4), LEC(I, 5)  
PRINT USING "#####.#### "; LEC(I, 1), LEC(I, 2), LEC(I, 3), LEC(I, 4), LEC(I, 5)  
NEXT I  
CLOSE 1
```

```
*****  
'SELECCIONA LOS PUNTOS Y GUARDA LOS RESULTADOS EN ARCHIVOS QUE CONTIENEN EL PERFIL DE CADA LINEA  
'PREESTABLECIDA Y PREPARADOS PARA GRAFICARSE CON PLOTXY
```

```
' "LINIBO.RES" ARCHIVO DE RESULTADOS QUE CONTIENE LA IDENTIFICACION DE LA FICHA, SU  
' COORDENADA EN (X), SU COORDENADA EN (Y) Y EL REGISTRO CORRESPONDIENTE  
' A ESA FICHA  
' "LINIBO.RX" ARCHIVO DE RESULTADOS QUE CONTIENE LA IDENTIFICACION DE LA FICHA, SU  
' COORDENADA EN (X), Y EL REGISTRO CORRESPONDIENTE A ESA FICHA  
' "LINIBO.RY" ARCHIVO DE RESULTADOS QUE CONTIENE LA IDENTIFICACION DE LA FICHA, SU  
' COORDENADA EN (Y) Y EL REGISTRO CORRESPONDIENTE A ESA FICHA
```

OPEN "LINIBO.RES" FOR OUTPUT AS 1

OPEN "LINIBO.RX" FOR OUTPUT AS 2

OPEN "LINIBO.RY" FOR OUTPUT AS 3

```
FOR I = 1 TO NL  
PRINT "NL = "; I  
FOR J = 1 TO NP(I)  
PRINT J, PUNTO(J, I)  
S = PUNTO(J, I)  
PRINT USING "#####.#### "; LEC(S, 1); LEC(S, 2); LEC(S, 3); LEC(S, 4); LEC(S, 5)  
PRINT #1, USING "#####.#### "; LEC(S, 1); LEC(S, 2); LEC(S, 3); LEC(S, 4); LEC(S, 5)  
PRINT #2, USING "#####.#### "; LEC(S, 3); LEC(S, 5)  
PRINT #3, USING "#####.#### "; LEC(S, 4); LEC(S, 5)  
NEXT J  
PRINT  
NEXT I  
CLOSE 1  
END
```

CLS

```

.....
*LECTURA DEL ARCHIVO QUE CONTIENE LA INFORMACION ACERCA DEL SISTEMA DE LINEAS Y FICHAS PRESENTES A NIVEL
*DE PLINTOS EN CATEDRAL
*
* "LINIPI.DAT" ARCHIVO QUE CONTIENE EL NUMERO TOTAL DE LINEAS EXISTENTES A NIVEL DE BOVEDAS EN
* CATEDRAL, EL NUMERO DE LINEA Y LAS FICHAS QUE CONTIENE Y LAS FICHAS
* CORRESPONDIENTES A CADA LINEA
*
* "NL" TOTAL DE LINEAS DEL SISTEMA
*
* "LINEA" IDENTIFICACION DEL NUMERO DE LINEA
*
* "NP" NUMERO DE FICHAS CONTENIDAS EN UNA LINEA
*
* "PUNTO" FICHA UBICADA EN UNA LINEA DETERMINADA

```

OPEN "LINIPI.DAT" FOR INPUT AS 1

```

INPUT #1, NL
PRINT "NL = "; NL
FOR I = 1 TO NL
INPUT #1, LINEA(I), NP(I)
NEXT I
FOR I = 1 TO NL
INPUT #1, T$
PRINT T$
FOR J = 1 TO NP(I)
INPUT #1, PUNTO(J,I)
PRINT PUNTO(J,I)
NEXT J
NEXT I
CLOSE 1

```

```

.....
*LECTURA DE DATOS DEL ARCHIVO QUE CONTIENE EL REGISTRO OBTENIDO EN CAMPO DE LAS 210 FICHAS EXISTENTES
*A NIVEL DE PLINTOS DE CATEDRAL

```

```

* "PISO.DAT" ARCHIVO QUE CONTIENE EL NUMERO DE FICHA, SU COORDENADA EN DIRECCION E-
* W (X), SU COORDENADA EN DIRECCION N-S (Y) Y EL HUNDIMIENTO REGISTRADO

```

OPEN "PISO.DAT" FOR INPUT AS 1

```

FOR I = 1 TO 210
INPUT #1, LEC(I, 1), LEC(I, 2), LEC(I,3),LECI(I,4)
PRINT USING "#####.### ";LECI(I, 1), LEC(I, 2), LEC(I,3),LECI(I,4)
NEXT I
CLOSE 1

```

```

.....
*SELECCIONA LOS PUNTOS Y GUARDA LOS RESULTADOS EN ARCHIVOS QUE CONTIENEN EL PERFIL DE CADA LINEA
*PREESTABLECIDA Y PREPARADOS PARA GRAFICARSE CON PLOTXY

```

```

* "LINIPI.RES" ARCHIVO DE RESULTADOS QUE CONTIENE LA IDENTIFICACION DE LA FICHA, SU
* COORDENADA EN (X), SU COORDENADA EN (Y) Y EL REGISTRO CORRESPONDIENTE
* A ESA FICHA
*
* "LINIPI.RX" ARCHIVO DE RESULTADOS QUE CONTIENE LA IDENTIFICACION DE LA FICHA, SU
* COORDENADA EN (X), Y EL REGISTRO CORRESPONDIENTE A ESA FICHA
*
* "LINIPI.RY" ARCHIVO DE RESULTADOS QUE CONTIENE LA IDENTIFICACION DE LA FICHA, SU
* COORDENADA EN (Y) Y EL REGISTRO CORRESPONDIENTE A ESA FICHA

```

OPEN "LINIPI.RES" FOR OUTPUT AS 1

OPEN "LINIPI.RX" FOR OUTPUT AS 2

OPEN "LINIPI.RY" FOR OUTPUT AS 3

```

FOR I = 1 TO NL
PRINT "NL = ";I
FOR J = 1 TO NP(I)
PRINT J,PUNTO(J,I)
S = PUNTO(J,I)
PRINT USING "#####.### ";LECI(S, 1); LEC(S, 2);LECI(S,3);LECI(S, 4)
PRINT #1, USING "#####.### ";LECI(S, 1); LEC(S,2);LECI(S,3);LECI(S,4)
PRINT #2, USING "#####.### ";LECI(S, 2); LEC(S, 4)
PRINT #3, USING "#####.### ";LECI(S, 3); LEC(S, 4)
NEXT J
PRINT
NEXT I
CLOSE 1
END

```

## PROGRAMA 3

CLS

'EJE C.....

' LECTURA DEL ARCHIVO LINIPI.RES QUE CONTIENE LOS DATOS ORDENADOS POR LINEAS CORRESPONDIENTES A LOS  
' EJES DE CATEDRAL A NIVEL DE PLINTOS

'	"P"	IDENTIFICACION DE CADA FICHA
'	"X"	COORDENADA EN SENTIDO E-W
'	"Y"	COORDENADA EN SENTIDO N-S
'	"L"	LECTURA CORRESPONDIENTE A CADA FICHA
'	"C"	CONSTANTE A LA QUE ESTAN LOS EJES DEL 1 AL 12 SOBRE EL EJE C
'	"LP"	LECTURA PROMEDIO DE FICHAS CON COORDENADAS IGUALES
'	"EJEC.Q"	ARCHIVO DE RESULTADOS QUE CONTIENE LAS COTAS DE CADA EJE A LO LARGO DEL EJE C Y LOS PROMEDIOS DE FICHAS CON COORDENADAS IGUALES.

OPEN "LINIPI.RES" FOR INPUT AS 1

FOR 1 TO 29

P(I) = 0

X(I) = 0

Y(I) = 0

L(I) = 0

NEXT I

FOR I = 1 TO 42

INPUT #1, P, X, Y(I), L(I)

NEXT I

C(1) = 0

C(2) = 13.6

C(3) = 24.3

C(4) = 35.0

C(5) = 45.7

C(6) = 56.4

C(7) = 72.3

C(8) = 83

C(9) = 93.7

C(10) = 105

C(11) = 116.8

C(12) = 124.05

FOR I = 1 TO 12

A(I) = 0

FOR K = 1 TO 42

IF C(I) = Y(K) THEN A(I) = A(I) + 1

PRINT, USING "####.#### "; C(I), Y(K)

NEXT K

PRINT, USING "####.#### "; A(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO 12

SUMA(I) = 0

FOR K = 1 TO 42

IF C(I) = Y(K) THEN SUMA(I) = SUMA(I) + L(K)

NEXT K

PRINT, USING "####.#### "; SUMA(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO 12

LP(I) = SUMA(I)/A(I)

PRINT, USING "####.#### "; LP(I)

NEXT I

CLOSE 1

OPEN "EJEC.Q" FOR OUTPUT AS 2

FOR I = 1 TO 12

PRINT #2, USING "####.#### "; C(I), LP(I)

NEXT I

CLOSE 2

' NOTA: EL LISTADO ANTERIOR CORRESPONDE SOLO A LA PARTE DEL PROGRAMA QUE ANALIZA EL EJE C DE  
' CATEDRAL, YA QUE EL PROGRAMA COMPLETO ANALIZA TODOS LOS EJES TANTO DE CATEDRAL COMO DE  
' SAGRARIO

## PROGRAMA 4

CLS

```

***** NOTA IMPORTANTE *****
*   LOS ARCHIVOS DE DATOS DEBEN ESTAR EN mm
*   EL PRESENTE PROGRAMA LOS TRANSFORMA EN cm
*****
* LECTURA DE DATOS DE LOS REGISTROS MENSUALES.
*   "PLOS.MOS.DAT"   ES EL ARCHIVO QUE CONTIENE EL NUMERO DE LECTURAS PARCIALES A LEER, Y EL
*                   NOMBRE DE LOS ARCHIVOS QUE CONTIENEN LOS REGISTROS MENSUALES.
*   "NN"             NUMERO DE ARCHIVOS CON LECTURAS PARCIALES
*   "N"              NUMERO DE PLOMADAS EXISTENTES EN CATEDRAL

```

```
OPEN "PLOS.MOS.DAT" FOR INPUT AS 1
```

```
INPUT #1, NN:PRINT NN
```

```
FOR I=1 TO NN
```

```
INPUT #1, N$
```

```
OPEN N$ FOR INPUT AS 2
```

```
N=122
```

```
FOR J=1 TO N
```

```
INPUT #2, X(J,I), Y(J,I)
```

```
PRINT N$:
```

```
PRINT USING "#### "; I, J, X(J,I), Y(J,I)
```

```
NEXT J
```

```
CLOSE 2
```

```
NEXT I
```

```
CLOSE 1
```

```
***** ACUMULADOR *****
```

```
FOR I=1 TO N
```

```
FOR J=1 TO NN
```

```
SUMAX=0
```

```
SUMAY=0
```

```
FOR K=1 TO J
```

```
SUMAX=SUMAX + X(I,K)
```

```
SUMAY=SUMAY + Y(I,K)
```

```
NEXT K
```

```
XA(I,J)=SUMAX
```

```
YA(I,J)=SUMAY
```

```
PRINT USING "#### "; I, J, XA(I,J), YA(I,J)
```

```
NEXT J
```

```
NEXT I
```

```
***** TRASPONER LAS MATRICES XA Y YA *****
```

```
FOR I=1 TO N
```

```
FOR J=1 TO NN
```

```
XT(J,I)=XA(I,J)
```

```
YT(J,I)=YA(I,J)
```

```
NEXT J
```

```
NEXT I
```

```
FOR I=1 TO NN
```

```
PRINT XT(I,1), YT(I,1)
```

```
NEXT I
```

```
***** ALMACENA LOS RESULTADOS EN MATRICES *****
```

```
*   "MG"
```

```
*   SON LAS MATRICES DONDE SE GUARDAN LOS RESULTADOS DE LAS SUMA DE IR
*   ACUMULANDO 'LOS REGISTROS MENSUALES DE CADA PLOMADA AGRUPADAS EN
*   6 DE ÉLLAS POR CADA MATRIZ.
```

```
OPEN "MATRICES.DAT" FOR INPUT AS 2
```

```
FOR J=1 TO 121 STEP 6
```

```
FOR I=1 TO NN
```

```
MG(I,1)=XT(I,J+0): MG(I,2)=YT(I,J+0)
```

```
MG(I,3)=XT(I,J+1): MG(I,4)=YT(I,J+1)
```

```
MG(I,5)=XT(I,J+2): MG(I,6)=YT(I,J+2)
```

```
MG(I,7)=XT(I,J+3): MG(I,8)=YT(I,J+3)
```

```
MG(I,9)=XT(I,J+4): MG(I,10)=YT(I,J+4)
```

```
MG(I,11)=XT(I,J+5): MG(I,12)=YT(I,J+5)
```

```
NEXT I
```

```
INPUT #2, NR$
```

```
PRINT NR$
```

```
OPEN NR$ FOR OUTPUT AS 1
FOR ii = 1 TO NN
  for jj = 1 to 12
  print using" ###.###":mg(ii,jj)/10;
  PRINT #1, USING" ###.###";MG(ii,JJ)/10;
  next jj
  print
  PRINT #1,
  next ii
CLOSE 1
NEXT J
CLOSE 2
END
```