



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica

ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE
LA CATEDRAL METROPOLITANA PREVIOS AL
PROCESO DE RESTAURACION

T E S I S

Que para obtener el título de :

INGENIERO CIVIL

p r e s e n t a

PEDRO GARCÍA RODRÍGUEZ



MÉXICO, D. F.

JUNIO 1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

INDICE

I INTRODUCCION

<i>I.1 Introducción</i>	1
<i>I.2 Objetivos</i>	2

II ANTECEDENTES

<i>II.1 Bosquejo Histórico</i>	4
<i>II.2 Descripción de la Estructura</i>	5
<i>II.3 Primera Recimentación</i>	7
<i>II.4 Segunda Recimentación</i>	7

III PROYECTO DE RECIMENTACION

<i>III.1 Aspectos Generales</i>	9
<i>III.2 Alternativas de Recimentación</i>	10
<i>III.3 Proyecto Definitivo</i>	11

IV COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE EJES TIPICOS

<i>IV.1 Aspectos Generales</i>	13
<i>IV.1.1 Programa de Cómputo para el Análisis Estructural</i>	14
<i>IV.2 Descripción de Ejes y Modelos</i>	16
<i>IV.2.2 Modelos de elementos finito</i>	18
<i>IV.3 Resultados de análisis</i>	19
<i>IV.3.1 Análisis por carga gravitacional</i>	20
<i>IV.3.2 Análisis por hundimientos diferenciales</i>	24

V	COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA CIMENTACION	
V.1	<i>Aspectos Generales</i>	26
V.2	<i>Resultados en Base a Modelos de ejes típicos</i>	27
V.2.1	<i>Análisis por carga gravitacional</i>	27
V.2.2	<i>Análisis por hundimientos diferenciales</i>	29
V.3	<i>Modelo tridimensional de la cimentación</i>	29
V.3.1	<i>Descripción del modelo</i>	29
V.4	<i>Análisis por hundimientos diferenciales</i>	30
V.4.1	<i>Resultados del análisis</i>	30
VI	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
	AGRADECIMIENTOS	36
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	37
	REFERENCIAS DE PLANOS	39
	TABLAS	40
	FIGURAS	42

I INTRODUCCION

La ciudad de México es una de las ciudades de América Latina que cuentan con el mayor número de obras construidas durante la Colonia. Actualmente, las obras de esa época que aún subsisten son consideradas como monumentos históricos.

Dentro de este tipo de estructuras se pueden mencionar edificios públicos, casas habitación, teatros, iglesias, escuelas, museos, etc. Estas construcciones constituyen una parte muy importante del patrimonio cultural e histórico de la ciudad, por su contenido simbólico y su gran relevancia estética, es por ello que su conservación resulta de vital importancia.

Dentro de estas edificaciones, la Catedral Metropolitana sobresale de las demás por su gran magnitud, contenido simbólico y belleza, y se considera, con justa razón, la obra más valiosa e importante de América construida durante la época de la colonia; sin embargo, presenta una gran problemática por las condiciones en que se encuentra actualmente.

Desde el año de 1524 en que se iniciaron las obras de la primera Iglesia Mayor, posteriormente la construcción del edificio definitivo en 1573 y hasta su conclusión, fue una larga, costosa y sostenida labor de ilustres arquitectos, artistas, artesanos e indígenas que pusieron su mejor esfuerzo en la erección de este bello conjunto religioso que, paradójicamente a su arquitectura de gran estabilidad y solidez, contrasta con la deformabilidad y baja capacidad de resistencia

del suelo donde se desplanta. Es por ello, que desde el inicio de su construcción y hasta nuestros días, no se ha interrumpido la larga secuela de reparaciones de toda índole que se han llevado a cabo, tratando de remediar los deterioros ocasionados no tanto por el paso del tiempo, sino por el hecho que afecta a todas las construcciones del Centro Histórico de la Ciudad de México, y que no es otro más que el hundimiento del Valle de México provocado por la explotación de los acuíferos para abastecer a la población, que junto con la baja capacidad de carga del suelo, las obras del metro, las del drenaje profundo y la exposición del Templo Mayor, han contribuido en mayor o menor medida a acelerar los efectos dañinos en la Catedral y demás monumentos del Centro Histórico.

Desde su origen, esta iglesia ha experimentado hundimientos diferenciales que han aumentado de forma continua. Actualmente, estos hundimientos alcanzan una magnitud superior a 2.4 m entre el altar principal y la torre poniente. Existen estudios que predicen que esta magnitud se puede incrementar entre 1.8 y 2.4 m más en los próximos 60 años.

La Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL, preocupada por esta situación ha iniciado un proyecto complejo y delicado para restaurar este monumento. En este proyecto se tiene contemplado inducir movimientos importantes en la estructura para corregir las distorsiones actuales. Esta situación ha despertado gran interés por conocer la respuesta de la estructura al ser sometida a dicho proceso.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM apoya la realización del proyecto mediante el desarrollo de diversos estudios estructurales. El trabajo presente forma parte del programa de investigación que dicho Instituto lleva a cabo.

OBJETIVOS

Desarrollar modelos analíticos de elemento finito de subestructuras, que sirvan como herramienta para estudiar el comportamiento estructural de la Catedral durante el proceso de restauración.

Evaluar la respuesta de ejes típicos, ante la acción del peso propio y hundimientos diferenciales, así como para determinar la trayectoria de fuerzas en cada caso.

Elaborar un modelo en tres dimensiones de la cimentación, para incorporarlo a un modelo tridimensional de la estructura que se desarrolla en forma paralela, así como para estudiar en forma individual el comportamiento de la cimentación, sin tomar en cuenta la influencia de la superestructura, ante los hundimientos diferenciales.

Verificar la bondad de los modelos, comparando los resultados analíticos con los daños y distorsiones que presenta la estructura.

II ANTECEDENTES

II.1 BOSQUEJO HISTORICO DE LA CATEDRAL METROPOLITANA

La primera iglesia importante construida en la ciudad de México, se ubicó en el lado suroeste del atrio de la actual Catedral y parte de la gran plaza. Su orientación era de Oriente a Poniente y estaba compuesta por tres naves; dos laterales con techos planos de vigas, y una central con techumbre de dos aguas. Para la cimentación se utilizaron algunas de las piedras que provenían de los escombros del Templo Mayor Azteca [ref 1]. Pero debido a su pequeñez y pobreza fue considerada impropia para ser cabeza y centro de un extenso país en el que se implantaba el cristianismo con esplendor inusitado.

La construcción de la nueva Catedral se comenzó en el año de 1573, desplantándose los cimientos de la estructura en el islote que ocupó el Templo Mayor (fig 2.1). A continuación con gran lentitud fueron levantándose los muros que limitan el edificio y los que dividen las capillas, se comenzaron a construir las columnas, se concluyó la sala capitular, la sacristía y las primeras cuatro capillas, todo esto para el año de 1625. En 1626 se comenzó a derribar la iglesia antigua, tomándose como iglesia provisional la actual sacristía. Y en 1629 se detuvieron los trabajos debido a la gran inundación.

En el período que comprende los años de 1635 a 1640, tanto los virreyes como los arzobispos procuraron acelerar la edificación y quedaron concluidas las bóvedas de las capillas y naves laterales. En 1640 la nave central fue techada provisionalmente con madera. Para el año de 1656 se había concluido el primer cuerpo de la torre oriente y para 1660 se había concluido la bóveda de la nave principal, desde el ábside hasta el crucero, quedando para 1667 todo el interior concluido, las bóvedas centrales y la cúpula. Fue hasta 1778 cuando se dio terminación total de la obra, sobre todo la parte exterior. Y hasta 1813 la Catedral quedó inaugurada [ref 2]. Este proceso se muestra gráficamente en la fig 2.2.

No esta por demás añadir que debido a los problemas que se tuvieron que enfrentar durante todo el proceso de construcción, como las interrupciones, inundaciones y los hundimientos, se requirió hacer correcciones a algunos elementos estructurales como muros y columnas e incluso demoler y volver a edificar algunos elementos, para poder continuar con la construcción. En la fig 2.3 se presentan los incrementos de longitud que fueron necesarios realizar para corregir los desniveles que se presentaba la construcción.

En resumen, las obras de la Catedral duraron desde 1536 hasta 1813, y en estos 277 años trabajaron preladados, virreyes, arquitectos y brigadas de indios, teniéndose que resolver un sinnúmero de problemas, para levantar la hermosa Catedral considerada primera en su género en toda América y que según registros tuvo un costo aproximado de 4 millones de pesos [ref 3].

II.2 DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA

Esta construcción tiene 127 m de largo por 58 m de ancho y 61 m de altura, desde el nivel de plintos hasta la punta de las cruces colocadas en las torres. Su forma, en planta, es de cruz latina y está orientada de Norte a Sur. Cuenta con cinco naves; dos de capillas, dos procesionales o de tránsito y una central o principal. En las figs 2.4 y 2.5 se muestran la fachada lateral y principal del templo.

Las cubiertas son a base de bóvedas apoyadas sobre arcos de cantera; la de la nave principal se forma con una bóveda cilíndrica a lo largo, que se intersecta con varias transversales de forma cónica, mientras que las de capillas y las de las naves procesionales se forman con bóvedas de forma esférica. Sobre el crucero se encuentra la cúpula principal que se caracteriza por tener una superficie reglada.

Los elementos de sostén los constituyen treinta y seis columnas, veinte de las cuales están adosadas a los muros y las restantes están aisladas, además cuenta con muros robustos en el perímetro reforzados por contrafuertes robustos perpendiculares a su plano para resistir empujes laterales. En la nave de capillas estos contrafuertes se utilizan como divisiones de las mismas.

Por lo que respecta a la cimentación, ésta ha sufrido dos intervenciones importantes; en la ref 4 se describen las características generales de la cimentación original y su proceso constructivo, el cual se describe brevemente a continuación.

Para dar inicio a la construcción de la cimentación, primeramente se cavó hasta alcanzar el nivel freático (sin especificar la profundidad), después sobre toda la superficie que ocupa el edificio, se estacó una serie de pequeños pilotes de madera, de unos 20 cm de diámetro con 2.5 a 3.5 m de longitud, el incado se hizo en hileras ortogonales formando una cuadrícula de 60 cm de lado (fig 2.6 a).

Niveladas las cabezas de los pequeños pilotes, se colocó una plantilla a base de piedras pequeñas cementadas con cal y arena de 30 cm de espesor sobre la que se construyó una plataforma de mampostería de piedra brasa cementada con mortero de cal y arena, con espesor que varía entre 1.20 y 2 m. Debido a que se tenía como proyecto inicial una traza mayor a la que se construyó finalmente, la plataforma se extendió en forma irregular, quedando la parte superior de dicha plataforma al mismo nivel que tenía la plaza, teniéndose la probabilidad de que el espesor variable se debió a los problemas que presentaba el suelo, y a la configuración topográfica del mismo.

Sobre la plataforma se desplantaron contratraves de mampostería en dos direcciones ortogonales para conformar una retícula de cimentación, dichas contratraves reciben todos los muros de la Catedral y en sus cruzamientos interiores las columnas. Los pedestales que reciben las columnas de la Catedral tienen dimensiones mayores para poder repartir en forma más eficiente las cargas concentradas, de las columnas, al pedraplén (fig 2.6 c) y d).

Originalmente, la parte superior de las contratraves estaba a 3.5 m por arriba del nivel de la plaza, y actualmente están completamente por debajo del nivel de la misma, debido a los hundimientos acumulados.

II.3 PRIMERA RECIMENTACION

La primera recimentación se empezó en 1929 cuando la Comisión Técnica de la Catedral y el Sagrario Metropolitano, encargó al Arq Manuel Ortiz Monasterio estudiar la cimentación de la Catedral (ref 5), y después de una revisión en forma general, recomendó:

Retirar el piso de madera existente a nivel de feligresía.

Retirar el relleno de tierra existente entre las contratraves de cimentación.

Reforzar el pedraplén y contratraves de mampostería.

Colocar una losa de concreto reforzado para dar el piso de feligresía.

Esta recimentación se proyectó en 1929, pero su ejecución se llevó a cabo en el período comprendido entre 1930 y 1940.

Una vez vaciadas las celdas que definen la retícula de cimentación, el espacio remanente se aprovechó para construir pesados anaqueles de concreto formando los nichos de las criptas. Además se abrieron pasos en todas las contratraves de mampostería, para dar acceso a las celdas, constituyendo así los actuales pasillos de los sótanos de la Catedral.

De acuerdo con los análisis del Arq Manuel Ortiz Monasterio, al vaciar todas las celdas de cimentación, la presión media de contacto disminuyó de 14.33 ton/m² a 10.82 ton/m², con lo cual se tenía un decremento del 25 %, con lo que se estimaba reducir las deformaciones en la estructura. Sin embargo, el decremento estimado fue contrarrestado en gran medida por la construcción posterior de las criptas y el hundimiento diferencial regional.

II.4 SEGUNDA RECIMENTACION

Debido a que los hundimientos diferenciales se continuaban incrementando, en 1972 la Secretaría del Patrimonio Nacional (SPN), realizó estudios sobre el comportamiento estructural y geotécnico de la Catedral y Sagrario, los cuales arrojaron un nuevo proyecto de

recimentación. El nuevo proyecto consistía originalmente, en incar 280 pilotes, que serían de control, en el interior del templo. Teniendo como principales objetivos los siguientes:

- a) Reducir el trabajo de cimentación original, ya que los pilotes deberían de soportar el 30% del peso total de la estructura, 127344 ton y el 70% del peso que resta sería transmitido al terreno en forma directa (ref 4).
- b) Controlar el descenso de la estructura respecto al terreno circundante.
- c) Controlar los hundimientos diferenciales dentro de la misma estructura.

El proyecto se llevó a cabo en los años de 1975 y 1976, incándose finalmente un total de 387 pilotes. Al término de los trabajos, se instaló un sistema de niveles hidráulicos con la finalidad de tener una referencia de las variaciones de nivel. También se realizó una clasificación del total de pilotes debido a los diversos problemas que se presentaron en el hincado de los mismos. La clasificación se efectuó en base a la longitud de incado anotada en los registros de la obra.

Como resultado se obtuvo que de los 387 pilotes incados, 171 (47%) no alcanzaron la capa dura, 97 (26%) tienen una cota mayor que la de la capa dura y únicamente 103 (27%) se pueden considerar como pilotes de punta. Para mayores detalles sobre las recimentaciones se puede consultar la ref 5.

III PROYECTO DE RECIMENTACION

III.1 ASPECTOS GENERALES

Después de efectuada la segunda recimentación, los hundimientos han seguido acumulándose. Ahora, la zona con mayor asentamiento diferencial, es donde se ubica la torre poniente, con un desnivel de 2.45 m con respecto a la zona del ábside y de 1.40 m con respecto a la torre oriente (fig 3.1). Desde su origen, este proceso ha provocado cambios bruscos de pendientes en el piso, los cuales se manifiestan en fuertes agrietamientos en él mismo, así como en columnas, muros y bóvedas, además, se han generado desplomes fuertes en muros y columnas que llegan ser mayores al 3% (fig 3.2).

Debido a la complejidad del comportamiento del suelo donde se apoya la cimentación de Catedral, las obras de reforzamiento de ésta han sido insuficientes para impedir el progreso de los asentamientos diferenciales. Esta situación plantea la necesidad de modificar el comportamiento de la cimentación para evitar que se sigan acumulando dichos asentamientos, con el consecuente incremento de desplomes en elementos estructurales que pueden rebasar las condiciones de equilibrio, provocando daños que serían difíciles y costosos de reparar, por lo que actualmente se están efectuando nuevas acciones de recimentación.

III.2 ALTERNATIVAS DE RECIMENTACION

Para llegar a definir las acciones a tomar dentro de este nuevo proyecto de restauración se contemplaron cuatro alternativas técnicamente viables, las cuales fueron analizadas cuidadosamente con la finalidad de optar por la más adecuada. En la ref 5 se describe con detalle cada una de ellas y a continuación se resumen.

SUBEXCAVACION

Esta técnica tiene como fin el corregir los desniveles y desplomes de edificios que han sufrido hundimientos diferenciales haciendo descender las partes altas con respecto a las bajas. Esto se logra mediante la extracción lenta y controlada del suelo de apoyo de la cimentación. Para ello, se hacen perforaciones horizontales de diámetro pequeño ejecutadas desde lumbreras o zanjas que permiten el acceso a los estratos blandos del subsuelo.

La ventaja principal que se consideró para este proceso, desde el punto de vista técnico, es que no se requiere ninguna modificación a la cimentación actual.

PILOTES DE FRICCIÓN NEGATIVA

Esta alternativa consiste en instalar un conjunto de pilotes adicionales a los existentes, apoyando su punta en la primera capa dura y permitiendo que las cabezas queden a 2 m por debajo de la losa del piso de criptas, desligadas por un colchón de arcilla blanda, permitiendo que el conjunto de pilotes sea capaz de formar un gran bloque de "suelo reforzado" que impidiera que la Catedral continúe hundiéndose. Se requerían aproximadamente unos 1500 pilotes adicionales según el diámetro de los mismos. A semejanza de la solución por subexcavación, no se modificaría la estructura de la cimentación actual, ni se requería la desocupación de las criptas, ya que los pilotes se ubicarían en los espacios libres disponibles.

PILAS AJUSTABLES A LA CAPA DURA

Esta solución consiste en la instalación de unas 240 pilas, con 1.5 m² de área transversal apoyadas en la primera capa dura, localizadas en la base de las columnas, pilastras y muros, que provistas de un puente ajustable, fijo a la cabeza de la pila y a la estructura de la cimentación, permitirían tomar la totalidad de la carga de la superestructura y cimentación, independizándose de los movimientos diferenciales del terreno. Los puentes ajustables

permitirían mover el edificio, para adaptarlo a los movimientos del suelo. Tiene como desventaja lo voluminoso del equipo y el área de maniobra, lo cual implicaría problemas en capillas y coro, aprovechando únicamente una pequeña parte de los pilotes existentes.

PILAS AJUSTABLES A LOS DEPOSITOS PROFUNDOS

La solución es semejante a la anterior, salvo que la profundidad de apoyo de la punta de las pilas sería de 52 m, con el fin de alcanzar una mayor resistencia en los materiales arenosos de los depósitos profundos, eliminado así los hundimientos en la formación arcillosa inferior. Tiene como principal desventaja, la interferencia con las criptas, y la necesidad de hacer un reforzamiento a la cimentación sin aprovechar los pilotes actuales.

III.3 PROYECTO DEFINITIVO

Como solución definitiva y técnicamente más adecuada, se decidió por una combinación de las dos primeras técnicas mencionadas y que consiste en incrementar el número de pilotes en la periferia norte de la Catedral, complementados con subexcavaciones de diámetro pequeño en las zonas de menor velocidad de asentamiento.

PILOTES COMPLEMENTARIOS

Los pilotes complementarios tienen como finalidad disminuir la velocidad del hundimiento diferencial de los muros laterales ubicados al Norte del crucero (fig 3.3).

SUBEXCAVACIONES

Por lo que respecta a las subexcavaciones, se requiere primeramente construir lumbreras de 3 m de diámetro distribuidas de acuerdo a la fig 3.4. Las paredes se recubren de concreto reforzado, dejándose las preparaciones requeridas para las subexcavaciones (fig 3.5). En las preparaciones dejadas en las lumbreras se incarán los tubos de perforación, el cual al ser retirado con el material contenido dentro de él, se formará un hueco, el cual por las presiones actuantes se reducirá hasta desaparecer, como se muestra en la fig 3.6, produciéndose un asentamiento en la superficie, donde su magnitud dependerá de la cantidad de material desalojado.

ACCIONES COMPLEMENTARIAS

Para poder llevar a cabo el proceso de recimentación con mayor eficiencia se tienen contempladas una serie de acciones complementarias que ayuden a que los efectos colaterales sean lo menos significativos posibles, las acciones a tomar son:

- a) Debido a que se espera inducir giros en algunas columnas y muros, se provocarán fisuramientos en las bóvedas y arcos, como efecto del proceso y que no puede evitarse, por lo que solo se podrán disminuir instalando un sistema de apuntalamiento temporal.
- b) Contar con levantamientos topográficos, a fin de detectar el efecto de los asentamientos y desplomes producto de la subexcavación y determinar la prioridad de algunas zonas por subexcavar ó determinar una suspensión parcial o total de los trabajos.
- c) Una vez que se corrijan los desplomes a la magnitud que se considere admisible, se detendrán los trabajos y se taponarán los accesos a subexcavaciones y lumbreras con la finalidad de que se puedan volver a reutilizar en etapas posteriores de corrección en un plazo de varios años.

IV COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE EJES TIPICOS

IV.1 ASPECTOS GENERALES

Las grandes deformaciones que ha sufrido la Catedral, han originado cambios importantes de esfuerzos en sus elementos estructurales. Esta situación, aunada al proyecto actual de restauración que tiene como finalidad corregir la geometría de la estructura para llevarla a un estado de mayor seguridad, han creado la necesidad de contar con modelos analíticos que permitan evaluar la seguridad estructural del monumento en las condiciones actuales y a comprender la respuesta que pueda tener su estructura al ser sometida a dicho proceso de restauración.

Dada la magnitud de la Catedral, la complejidad de su geometría, su tipo de construcción, y el alcance tanto de programas de análisis como el de los equipos de cómputo actuales, se determinó desarrollar algunos modelos analíticos de subestructuras tanto en el plano como en el espacio que permitan estudiar la respuesta de la estructura ante las situaciones mencionadas. En la ref. 12 se trata el problema tridimensional de la zona central de la estructura, y en el trabajo presente se formulan tres modelos planos para estudiar el desempeño de ejes típicos que involucren a la cimentación.

De los ejes orientados en la dirección transversal se pueden distinguir tres tipos: el primero, incluye los ejes 4 y 5, que se localizan al Norte del crucero. Al Sur de esta zona, se encuentra un segundo tipo de ejes, del 8 al 11, éstos son muy parecidos a los primeros; sin embargo, se diferencian de ellos por carecer de arbotantes y por no tener el tímpano sobre la nave principal. Por último, los ejes 6 y 7 definen una tercera forma, ellos delimitan la zona del crucero. Los ejes restantes son los de fachadas y poseen características especiales por lo que no se incluyen dentro de los ejes típicos.

En la dirección longitudinal también se aprecian tres formas típicas: Los ejes de las fachadas Oriente y Poniente, A y F, respectivamente. Los ejes B y E que constituyen la frontera entre las naves de capillas y las naves procesionales. Por último, los ejes C y D, los cuales definen los límites entre la nave principal y las naves procesionales (fig 4.1). Durante el proceso de restauración se espera (ref 14) que los ejes transversales, en la zona de la nave principal experimenten la mayor deformación, lo mismo que los ejes longitudinales C y D.

De acuerdo con esto se decidió elaborar, para el desarrollo de este trabajo, los modelos analíticos para los ejes 5, 6 y D (fig 4.1). Con ellos, y algunas modificaciones mínimas, se podrán estudiar los ejes 4 a 11 así como los ejes C y D.

La geometría de los modelos que se presentan en este trabajo se basa en planos de proyecto los cuales no contemplan los ajustes realizados durante el proceso de construcción ni las deformaciones presentes en la estructura.

El método de análisis que se emplea se basa en las hipótesis de que el comportamiento de la estructura es elástico lineal, así como en el equilibrio de fuerzas actuantes y las reacciones en los apoyos; además de que debe existir equilibrio local a nivel de elementos aislados o de secciones.

Las condiciones de análisis para cada uno de los modelos son:

- Análisis por carga gravitacional, para determinar la transmisión de cargas, así como para evaluar los esfuerzos y las deformaciones que induce el peso propio de la estructura.

- Análisis por hundimientos diferenciales, para evaluar los esfuerzos y las deformaciones producidas por los hundimientos diferenciales sufridos desde el inicio de su construcción a la fecha.

IV.1.1 PROGRAMA DE COMPUTO PARA EL ANALISIS ESTRUCTURAL

Para estudiar el comportamiento estructural de los ejes seleccionados se utilizó el programa SAP90, ref 7. Dicho programa permite realizar análisis de tipo elástico lineal de estructuras planas y tridimensionales sometidas a solicitaciones estáticas o dinámicas. Su empleo requiere de un archivo de entrada, donde los datos se dan por bloques, algunos de ellos son obligatorios, como lo son el bloque SYSTEM o de control, el bloque JOINTS que contiene las coordenadas de las juntas, y el bloque RESTRAINTS donde se definen los grados de libertad para los nudos. También, es necesario proporcionar en bloques las características de los tipos de elementos que se requieren en la modelación. Para ello, el programa incluye los elementos FRAME, SHELL, ASOLID Y SOLID con ellos se puede modelar lo siguiente:

1.- Elementos FRAME. Se emplean para modelar sistemas estructurales en el plano o en el espacio a base de barras, tales como armaduras o marcos. En este caso, cada elemento se define con dos nudos.

2.- Elementos SHELL. Se utilizan para modelar estructuras en 2 y 3 dimensiones a base de placas o cascarones. Cada elemento se define con 4 nudos.

3.- Elementos (ASOLID). Permiten modelar estructuras sometidas a un estado de deformación plana o a estado plano de esfuerzos. Además, admiten representar estructuras axisimétricas. Una de sus cualidades principales es que cada elemento se puede representar con un número variable de nudos que puede ir de 3 a 9.

4.- Elementos (SOLID). Se emplean para modelar estructuras tridimensionales, definiéndose con elementos sólidos de 8 nudos.

Además, el programa cuenta con un posprocesador gráfico llamado SAPLOT que representa en pantalla o en impresión, gráficas del modelo con información de interés, algunas de las más relevantes son:

- Vistas del modelo desde ángulos distintos
- Configuración sin deformar del modelo
- Configuración deformada del modelo de acuerdo con las características de la solicitación
- Configuraciones modales

- Para elementos frame, proporciona diagramas de fuerzas internas (elementos mecánicos).
- Para elementos shell, asolid y solid, ilustra contornos con intensidades de esfuerzos.

IV.2 DESCRIPCION DE EJES Y MODELOS

Para el desarrollo de los modelos, la geometría de los ejes 5, 6 y D se basó en planos de proyecto 1, 2, 3 y 4. En general, se aprecia gran similitud en su estructuración; en sus extremos cuentan con muros robustos para contrarrestar los empujes que generan los arcos, transmitiéndolos a la cimentación de forma eficiente. En las zonas interiores, hay arquerías apoyadas sobre columnas que se encargan de transmitir los empujes y las cargas de las cubiertas a la cimentación.

A continuación, se describen las características de los ejes 5, 6 y D así como el modelo de cada uno de ellos:

EJE 5

Este eje es transversal a la traza de la Catedral. La parte correspondiente a la superestructura la integran 5 naves; 2 de capillas o laterales, 2 naves procesionales y la nave principal o central. La subestructura está definida por el pedraplén y las contratraves de cimentación. Las naves de capillas se forman con los muros de las fachadas laterales y los muros de contrarresto los cuales tienen en su extremo interior una columna adosada, sobre estos muros descansan una bóveda en forma esférica así como un arbotante y un contrafuerte. La nave procesional cuenta con un arco de medio punto que tiene sus arranques a nivel de las impostas de la columna adosada al muro lateral por un lado, y de la columna central testicular por el otro, sobre este arco descansa la bóveda de platillo que cubre la nave, así como un arbotantes y un contrafuerte. La nave principal incluye el arco formero central que tiene sus arranques en las columnas centrales sobre este arco se encuentra una gran bóveda cilíndrica con lunetos.

La cimentación esta dada por el pedraplén sobre el que descansan las contratraves, las cuales en las naves central y procesionales se encuentran cortadas para dar continuidad a los pasillos a nivel de criptas. También cuenta con la losa que sirve de piso a nivel de feligresía. La geometría de este eje aparece en la fig 4.2.

EJE 6

EJE 6

De manera análoga al eje 5 la superestructura esta definida por las mismas naves por estar ambos ejes en la dirección transversal. Algunas características que lo distinguen del eje 5 son: Las naves de capillas están dadas por los muros que definen el crucero y que alcanzan un nivel igual al de la nave principal para servir de base a la bóveda transversal. Dicho muro a media altura y en su extremo superior cuenta con ventanales que permiten la iluminación al crucero. Además, los extremos cuentan con dos robustos y pesados contrafuertes que contrarrestan los empujes de las bóvedas. La nave procesional se define de la misma forma, y al igual que en las naves de capillas el muro superior alcanza el nivel de nave principal y él también presenta ventanales para la iluminación. La nave principal con las columnas centrales como base y su arco formero reciben la base del tambor de la pesada cúpula principal.

De la misma manera que en el eje 5, la cimentación está dada por el pedraplén, contratrabes con sus vanos a nivel de criptas, y la losa del nivel de feligresía. La geometría de este eje se presenta en la fig 4.3.

EJE D

Es un eje longitudinal orientado de Norte a Sur, sirve en toda su longitud como base a la bóveda de la nave principal en su parte superior y en su parte media a las bóvedas de la nave procesional, y comprende desde el ábside hasta la fachada principal.

Su estructuración es: Al Norte, el muro de ábside, el cual a su vez cuenta con dos robustos contrafuertes. Hacia el Sur se encuentra una columna adosada al muro del ábside, 3 columnas centrales sobre las cuales descansan 3 arcos de medio punto los que a su vez sirven de base para recibir muros semejantes a los que se tienen en el eje 6 en la nave procesional, y que también cuentan con ventanales para la iluminación. A continuación, se tiene la nave de crucero en la que se ubica un arco formero que recibe la base del tambor de la cúpula principal. Posteriormente se tienen 5 columnas centrales y una columna adosada al muro de fachada, que reciben a otros 5 arcos de medio punto que al igual que los anteriores sirven de base a los muros con ventanales. Por último al extremo sur se tiene un contrafuerte pesado para contrarrestar los empujes que se generan en esta dirección.

La cimentación, de igual forma que en los dos ejes anteriores, está determinada por el pedraplén, las contratrabes con sus cortes para los pasillos de criptas y la losa de feligresía. En la fig 4.4 se puede observar su geometría.

IV.2.2 MODELOS DE ELEMENTO FINITO

Los modelos de los ejes 5, 6 y D se generaron con los elementos que consideran un estado plano de esfuerzos. En la fig 4.5 se presenta la manera en que fueron definidos estos elementos, empleándose para cada uno 4 nudos; así como la convención de signos para los esfuerzos positivos.

EQUIVALENCIAS

Durante la conformación de las mallas de elementos finitos de los modelos se trató de tomar en cuenta todos los detalles presentes en los ejes, tanto de materiales como de dimensiones, sin embargo se requirió hacer uso de secciones equivalentes en cimentación, columnas y arcos, debido a la complejidad de su geometría. Para la parte correspondiente a la cimentación, la sección de trabes se modeló con los espesores y peralte tomados de planos, también se incluyeron los huecos correspondientes a los pasillos de la zona de criptas. Para el ancho de pedraplén que participa en este eje se hizo la analogía con una viga T, donde la contratrase representa el alma de la viga y el de pedraplén que participa con el eje, representa los patines. Para determinar el ancho de patín se siguió el criterio que se marcan las Normas Técnicas Complementarias para estructuras de concreto, [ref 15], tomando como resultado la mitad de los entre ejes a cada lado de la trabe. En la fig 4.6 se muestra el criterio que se siguió para determinar este ancho. El espesor del pedraplén es variable en toda el área que ocupa el monumento; sin embargo, para fines del modelo se consideró un valor promedio de 2.0 m. Las equivalencias que se requirieron en el desarrollo del modelo se resumen en la Tabla 4.1. El modelo del eje 5 emplea 741 nudos y 599 elementos, (fig 4.7), el modelo del eje 6 se define con 1074 nudos y 904 elementos, (fig 4.8); y el modelo del eje D utiliza 1670 nudos y 1372 elementos (fig 4.9). En todos los casos cada nudo tiene dos grados de libertad, salvo los nudos que se restringen para definir las condiciones de apoyo.

MATERIALES

Debido al período tan largo que abarcó la construcción de la estructura, existe gran heterogeneidad en los materiales empleados, lo cual implica variaciones en las propiedades mecánicas de los mismos. Para fines de este trabajo los materiales se tomaron homogéneos. De acuerdo a inspecciones visuales se definieron los materiales que predominan por su presencia en los diferentes elementos estructurales y que se consideran como materiales base.

Las propiedades de los materiales aparecen en la tabla 4.2, y han sido determinadas en el Instituto de Ingeniería [ref 10], por medio de pruebas, en muestras obtenidas de estructuras construidas en el mismo período y que se han restaurado recientemente. Los materiales son:

- Mampostería, en el pedraplén de cimentación, contrarabes, muros y bóvedas.
- Cantera, en columnas arcos y fachadas.
- Concreto, en las trabes de refuerzo de la cimentación y en la losa a nivel de feligresía, el cual fue colocado en el primer proceso de recimentación .

CARGAS

Para poder incluir en el modelo las cargas de bóvedas que le corresponden al eje, se consideró como área tributaria la mitad de la distancia entre ejes a ambos lados del mismo, dicha carga se asignó mediante elementos con materiales equivalentes en peso y con las propiedades mecánicas de la mampostería, razón por la cual el peso volumétrico de los materiales equivalentes es mayor al de los materiales normales. La ubicación de cada uno de estos materiales equivalentes, en los modelos, se dio en forma tal que la carga se aplicara en las zonas que les corresponden. Para cada uno de los modelos se emplearon diferente número de materiales equivalentes, de modo tal que para el eje 5 se emplearon 3, para el modelo del eje 6 se emplean 5 y para el modelo del eje D se emplean 7. En las figs 4.10, 4.11 y 4.12 se muestra la distribución de estos materiales.

IV.3 RESULTADOS DE LOS ANALISIS

En esta parte se presentan los resultados obtenidos de los análisis por carga gravitacional y por hundimientos diferenciales, para tener un panorama más amplio sobre su interpretación éstos se han dividido en tres partes:

Desplazamientos en las direcciones X y Y

Esfuerzos en las direcciones X, Y y los esfuerzos cortantes.

Trayectorias de fuerzas. Estas únicamente para los análisis por carga gravitacional.

IV.3.1 ANALISIS POR CARGA GRAVITACIONAL

IV.3.1 ANALISIS POR CARGA GRAVITACIONAL

En estos análisis se evalúa la acción del peso propio en la estructura cuya base se encuentra horizontal. Los resultados se comparan con los que se obtienen de una bajada de cargas.

BAJADA DE CARGAS

Para tener una referencia de los resultados del análisis gravitacional, se efectuó un análisis de bajada de cargas hasta el nivel de feligresía, para lo cual se tomó la geometría de los planos 1, 2, 3 y 4 así como algunas mediciones físicas en la estructura. Así mismo se revisó el análisis efectuado por el Ing Guerrero y Gama (ref 4) previo a la segunda recimentación, encontrándose ciertas diferencias, las cuales aparecen en la tabla 4.3, donde se aprecia que son del orden del 14 por ciento, y que se son atribuibles fundamentalmente a los siguientes aspectos:

En este trabajo se consideró un número reducido de simplificaciones, además se tomó la variación del peso volumétrico de los materiales de muros y columnas de acuerdo con la tabla 4.2, así mismo se consideró la participación de todos los elementos que incluye la estructura.

Existen variaciones en las dimensiones especificadas en planos, que en algunos casos llegan a ser significativas. Para los fines de este trabajo fue necesario verificar las dimensiones directamente en el sitio.

DEFORMACIONES

Los desplazamientos que sufre la estructura debidos a la acción del peso propio, en general resultan muy pequeños y en algunos casos se pueden despreciar por la magnitud de los mismos. A continuación se describen en forma breve los resultados obtenidos en cada uno de los ejes.

EJE 5

La respuesta del eje 5 ante la acción del peso propio se presenta en la fig 4.13, en ella se muestra la configuración deformada en forma comparativa con la geometría inicial. Se aprecia que las zonas con mayor desplazamiento son las correspondientes a las claves de los arcos, siendo la del arco central la que sufre el desplazamiento máximo en la dirección vertical (Y) con una magnitud de 0.5 cm. Por lo que respecta a las columnas centrales, se observa que tienen

una curvatura doble lo cual implica que la resultante de la fuerza vertical, que baja por las columnas, cambia de posición con respecto al eje centroidal de la sección. Los desplazamientos horizontales que se presentan en las columnas y muros, son menores que los que se tienen para la clave de los arcos, por lo que los desplomes se pueden considerar nulos ante carga gravitacional, aunque tienen una tendencia de incrementar el claro del arco.

EJE 6

Las deformaciones que experimenta este eje por la acción del peso propio se puede observar en la fig 4.14, y al igual que en el eje 5, las zona con mayor desplazamiento es la de la clave del arco formero de la nave principal, con un desplazamiento de 1.00 cm en la dirección vertical, Y. Las columnas se abren ligeramente debido al gran peso de la cúpula y su deformada no demuestra que estén en curvatura doble; sin embargo, debido a que los desplazamientos son pequeños, los desplomes se consideran nulos. De la misma forma, los muros no sufren gran desplazamiento lateral debido, principalmente, a su gran inercia y a la presencia de los contrafuertes extremos.

EJE D

La configuración deformada se muestra en la figura 4.15 y al igual que en los dos ejes anteriores, se aprecia la zona de la clave del arco formero del crucero es la que mayor desplazamiento experimenta con 1.00 cm en la dirección vertical, las columnas centrales del crucero se desplazan hacia los extremos del eje en forma no simétrica, debido a la diferencia de rigidez entre ambos lados de la nave de crucero; sin embargo la magnitud de estos desplazamientos, así como el de los desplomes correspondientes resultan insignificantes.

ESFUERZOS

La interpretación correcta de los esfuerzos, se basa en la convención de signos la cual es función del tipo de elemento utilizado en el modelo. Dicha convención aparece en la fig 4.5, siguiendo este esquema, se presentan los resultados para cada uno de los ejes.

EJE 5

En las figs 4.16, 4.17 y 4.18 se observan los contornos de intensidad de esfuerzos normales en las direcciones X (σ_{xx}), Y (σ_{yy}) y los esfuerzos cortantes (T_{xy}) respectivamente. En la escala de intensidades que aparece en las figuras las unidades están dadas en ton/m^2 .

En la dirección X, las zonas más esforzadas a tensión son las claves de los arcos de las naves procesionales donde alcanzan un valor máximo de 16.4 kg/cm². Otros elementos donde también aparecen tensiones son: Columnas, muros y arbotantes de la nave de capillas y en los extremos superiores de la nave principal, siendo su intensidad menor de 2.8 kg/cm². Los esfuerzos de compresión máximos aparecen también en los arcos de las naves procesionales, entre los arranques y la clave, donde alcanzan una magnitud, de 8.7 kg/cm².

Para los esfuerzos en la dirección Y las zonas más esforzadas a tensión son las de arbotantes con un valor de 4.0 kg/cm², lo cual implica que como elementos estructurales no cumplen su función de transmitir los empujes que genere la nave principal. En compresión, las zonas más esforzadas son las de los arranques de los arcos procesionales del lado de capilla con un valor de 22.8 kg/cm², y para el resto de la estructura los esfuerzos son bastante menores a éste.

Por lo que respecta a los esfuerzos cortantes máximos T_{xy} , su magnitud es de ± 14.2 kg/cm², y están ubicados en las zonas de arranques de los arcos procesionales.

EJE 6

Las figs 4.19, 4.20 y 4.21 muestran las intensidades de esfuerzos normales en las direcciones X (σ_{xx}), Y (σ_{yy}) así como los esfuerzos cortantes (T_{xy}). Para los esfuerzos en la dirección X, la zona más esforzada a tensión corresponde a la clave del arco de la nave principal con un valor de 17.7 kg/cm², también en columnas y muros se tienen tensiones menores de 4 kg/cm². En compresión las zonas más esforzadas son las más próximas a las claves de los arcos de las naves procesionales con un valor de 15.4 kg/cm².

Para los esfuerzos en la dirección Y, las zonas de tensión se localizan en la base del tambor de la cúpula, por arriba de la clave del arco principal, también en los muros sobre los arcos procesionales y en pequeñas zonas de las contratraves; en esos sitios, las tensiones son menores de 3.8 kg/cm². En compresión las zonas más esforzadas corresponden a los arranques del arco principal con magnitud de 30.2 kg/cm².

Por lo que respecta a los esfuerzos XY, las zonas más esforzadas corresponden con las más próximas a los arranques del arco principal con un valor de ± 12.6 kg/cm².

EJE D

En las figs 4.22, 4.23 y 4.24 se presentan las distribuciones de los esfuerzos normales en las direcciones X (σ_{xx}), Y (σ_{yy}), así como los esfuerzos cortantes (T_{xy}). Para los esfuerzos en la dirección X, la zona de tensión máxima sigue correspondiendo a la clave del arco de la nave de crucero, con una magnitud de 9.8 kg/cm², y también aparecen zonas de tensión en los muros ubicados sobre los arcos adjuntos al de crucero, específicamente en los ventanales, en las columnas, en el muro del absíde y en el contrafuerte de la fachada principal con magnitudes inferiores a 2.5 kg/cm². En compresión, las zonas más esforzadas se localizan entre los arranques y la clave de los arcos de medio punto contiguos al arco de crucero donde su magnitud es de 13.6 kg/cm².

Para los esfuerzos en la dirección Y, la zona más esforzada a tensión es la que se localiza en a la base del tambor de la cúpula, sobre la clave del arco de crucero, con un valor de 4 kg/cm². También, existen zonas de tensión en lo vanos de los ventanales. En compresión, las zonas más esforzadas son las correspondientes a los arranques del arco de la nave de crucero con una magnitud de 34.1 kg/cm². Además, se puede observar la variación de intensidad de esfuerzos entre las columnas centrales que soportan la cúpula y el resto de las demás columnas.

Para los esfuerzos cortantes T_{xy} , las zonas más esforzadas corresponden a los arranques del arco de crucero con un valor de ± 14.8 kg/cm².

TRAYECTORIAS DE FUERZAS

Las trayectorias de fuerzas se obtuvieron ubicando las fuerzas resultantes en varias secciones de cada modelo, empleando para ello las ecuaciones de la estática. En las figs 4.25, 4.26 y 4.27 se muestran las trayectorias obtenidas de las fuerzas producidas por la acción del peso propio. En los tres casos se aprecia que la transmisión de fuerzas presenta una congruencia racional con el tipo de estructuración.

IV.3.2 ANALISIS POR HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES

Para llevar a cabo estos análisis, los modelos se sometieron a los hundimientos diferenciales, que corresponden al levantamiento topográfico con fecha del 10/Enero/1992 (fig 4.28), del que se tomaron los perfiles correspondientes para los ejes 5, 6 y D. Para ello, se realizó una interpolación lineal entre los puntos con hundimiento conocido y los nudos del modelo. También, en estos análisis se hizo participar el peso propio de la estructura que actúa en cada eje, para evaluar los esfuerzos máximos.

DEFORMACIONES

EJE 5

En la fig 4.29 se muestra la configuración inicial y la configuración deformada. En ella, se aprecia que la deformada es muy semejante a la configuración presente en la estructura. Los desplazamientos laterales, que se obtienen como resultado del análisis, son considerables e indican un movimiento generalizado hacia el Poniente, para el muro de la nave de capillas Poniente se tiene un desplazamiento de 22 cm, y para la columna adosada a él, dicho desplazamiento alcanza 20.6 cm. En la nave central, la columna 5C se desplaza 21.8 cm, y la columna 5D lo hace 3.8 cm. La columna adosada al muro de capillas Oriente tiene un desplazamiento de 0.8 cm y el muro del mismo lado, se desplaza menos de 1 cm.

EJE 6

En la fig 4.30 se muestran las deformaciones que sufre el modelo. En ella, nuevamente se observa similitud con las que presenta la estructura, también se aprecia que todos los desplazamientos son hacia el Poniente. Los desplazamientos obtenidos son: 25.8 cm para el muro Poniente y 20.3 cm para el muro Poniente. Para las columnas adosadas a los muros, 16.5 cm para la del lado Poniente y 12.0 cm para la del lado Oriente. En las columnas centrales los desplomes son de 19.3 cm para la 6C y 16.6 cm para la 6D.

EJE D

En la fig 4.31 se observa que las deformaciones que resultan del análisis, también presentan similitud con la configuración actual en la estructura. El desplome del muro del ábside en su extremo Norte es de 12.4 cm y en la columna adosada a dicho muro el desplome se reduce a 6.4 cm. En las columnas centrales del crucero, la 6D presenta un desplome de 15.3 cm mientras que en la 7D es de 25.7 cm. Para el contrafuerte de la fachada principal el desplome

mientras que en la 7D es de 25.7 cm. Para el contrafuerte de la fachada principal el desplome alcanza los 26.6 cm. Todos los desplomes son hacia el Sur.

ESFUERZOS

EJE 5

En las figs 4.32 y 4.33 se muestran las intensidades de esfuerzos para las direcciones X y Y, ahí se aprecia que las magnitudes de los esfuerzos son muy altas debido a los valores de los desplazamientos inducidos en la base de la estructura y por ser el análisis elástico lineal. Dichas magnitudes no se deben de tomar como indicativas del estado de esfuerzos presente en la estructura, pero sí permiten detectar zonas dañadas, donde seguramente se generaron redistribuciones de esfuerzos, tal como se observa en la base de la columna 5C (fig 4.31), donde se presentan tensiones en la dirección X. Estos resultados permiten comprender la presencia de las grietas a lo largo del eje C.

EJE 6

En las figs 4.34 y 4.35 se presentan las distribuciones de esfuerzos para las direcciones X y Y, y se vuelve a observar lo mismo que para el eje 5, con respecto a la magnitud de los esfuerzos, por lo que seguramente también se generan redistribución de esfuerzos.

EJE D

En las figs 4.36 y 4.37 aparecen las distribuciones de esfuerzos en las direcciones X y Y, y se observan nuevamente zonas de esfuerzos de gran magnitud las cuales, seguramente han sufrido redistribuciones de esfuerzos.

TRAYECTORIAS DE FUERZAS

Por lo expuesto en el punto anterior, al tratar de obtener la localización de la fuerza resultante en diferentes secciones del modelo, se obtuvieron fuertes incongruencias, por lo que de acuerdo a las magnitudes y conociendo las características mecánicas de los materiales se concluye que las fuerzas que resultan de este tipo de análisis no son aplicables en la estructura sin que se presente en algunas zonas la falla de los materiales y por consiguiente redistribuciones de esfuerzos.

V COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA CIMENTACION

V.1 ASPECTOS GENERALES

En los capítulos anteriores, se mencionó que existe en proceso un nuevo proyecto para mejorar el comportamiento de la cimentación y que la ejecución de dicho proyecto impondrá deformaciones importantes tanto en la cimentación como en la estructura. Los modelos analíticos constituyen una herramienta útil para poder simular, de forma aproximada, las acciones que se pretendan inducir a la cimentación durante el proceso de restauración o bien, entender los efectos de una acción dada. Es por ello que en el capítulo anterior y en éste se exponen el desarrollo de los modelos así como algunos resultados de los análisis.

Los modelos se dividen en dos partes: modelos planos de tres ejes típicos y un modelo tridimensional de la cimentación completa. Los primeros involucran a la superestructura y los detalles de ellos se presentan en el capítulo IV, por lo que en éste se discutirán principalmente los resultados relacionados con la cimentación. El desarrollo del modelo tridimensional tiene como objetivo integrar dicho modelo a otro existente de la superestructura [ref 12] para estudiar la respuesta del conjunto en etapas posteriores.

Se verifica la bondad de los modelos que involucran a la cimentación. Para ello, se realizan análisis que toman en cuenta la acción de los hundimientos diferenciales que han distorsionado la cimentación. Las deformaciones que se obtienen como resultado se comparan con las que presenta tanto la estructura como la cimentación. Así mismo se identifican zonas de esfuerzos excesivos y se correlacionan con daños existentes.

V.2 RESULTADOS EN BASE A MODELOS DE EJES TÍPICOS

La descripción de los modelos aparece en el capítulo IV. Aquí únicamente se presentan los resultados que involucran a la cimentación ante dos acciones: carga gravitacional y hundimientos diferenciales.

V.2.1 ANALISIS POR CARGA GRAVITACIONAL

En cuanto a los desplazamientos que se obtienen para esta acción se encontró que son despreciables, por lo que su discusión se omite.

Para cada uno de los ejes se presentan los esfuerzos normales σ_{xx} y σ_{yy} en las direcciones X y Y, respectivamente, así como los esfuerzos cortantes, T_{xy} . Los resultados en cada caso son los siguientes:

- CIMENTACION EJE 5

Los esfuerzos en la dirección horizontal σ_{xx} , manifiestan compresiones en toda la cimentación (fig 4.16), siendo estas en promedio de 2.8 kg/cm²; y se presentan tensiones, en pequeñas zonas de los extremos a nivel de feligresía con magnitud menor de 2.0 kg/cm². En la dirección vertical, los esfuerzos σ_{yy} (fig 4.17), también manifiestan compresiones con magnitud menor a 3 kg/cm², aunque en la base de las columnas y sobre las contratraves los esfuerzos llegan a ser de 18 kg/cm². También se presentan tensiones en las contratraves, específicamente en las zonas entre columnas y sobre los pasillos. Por lo que respecta a los esfuerzos cortantes, T_{xy} , (fig 4.18), su magnitud en promedio es de ± 3 kg/cm², con pequeñas zonas en la base de las columnas que alcanzan hasta ± 6 kg/cm².

- CIMENTACION EJE 6

Para los esfuerzos en la dirección horizontal, σ_{xx} , (fig 4.19), se aprecia que la mayor parte de la cimentación está sometida a compresiones, en promedio su magnitud es de 4 kg/cm²; también se presentan pequeñas zonas de tensión en los extremos a nivel de feligresía, así como sobre los huecos de los pasillos de criptas, con magnitud menor de 3.5 kg/cm². Para los esfuerzos σ_{yy} (fig 4.20), siguen predominando las compresiones menores de 4 kg/cm², nuevamente las zonas de base de las columnas alcanzan una magnitud de 20 kg/cm². También, se presentan tensiones sobre los huecos de los pasillos siendo menores de 4 kg/cm². Respecto a los esfuerzos τ_{xy} (fig 4.21), estos son en promedio menores de ± 2.6 kg/cm², con zonas en la base de las columnas que alcanzan una magnitud máxima de ± 5.2 kg/cm².

- CIMENTACION EJE D

Los esfuerzos, en la dirección horizontal, σ_{xx} (fig 4.22), al igual que en los dos ejes anteriores predominan las compresiones menores de 2.5 kg/cm² y las tensiones que aparecen sobre los huecos de los pasillos son menores de 2 kg/cm². Respecto a los esfuerzos σ_{yy} (fig 4.23), predominan las compresiones con una magnitud menor de 4 kg/cm², y al igual que para los dos ejes anteriores, en la base de las columnas del crucero se alcanzan magnitudes menores de 20 kg/cm². Aparecen tensiones sobre los huecos de pasillos, con magnitud menor de 4 kg/cm². Para los esfuerzos τ_{xy} (fig 4.24), las magnitudes son de ± 3 kg/cm², con pequeñas zonas en la base de las columnas que alcanzan una magnitud de ± 6 kg/cm².

En resumen, de acuerdo con los resultados, de estos análisis se puede decir que los esfuerzos normales que se presentan, por la acción del peso propio son adecuados en comparación con la capacidad de los materiales que conforman la estructura. Sin embargo, los esfuerzos cortantes adquieren valores importantes en comparación con la capacidad de los mismos materiales.

V.2.2 ANALISIS POR HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES

Los resultados obtenidos en el capítulo anterior, en general, no permiten tener una idea cuantitativa de la magnitud de los esfuerzos en la cimentación, debido a que los desplazamientos que le fueron impuestos rebasan con mucho el comportamiento elástico de

los materiales que la constituyen. Sin embargo, de forma cualitativa, se puede decir que los análisis de los ejes 5 y 6 muestran en el eje C, la presencia de esfuerzos de tensión en la dirección horizontal de gran magnitud, lo cual tiene correlación con el agrietamiento a nivel de feligresía.

Por lo que respecta a las deformaciones, éstas se comparan satisfactoriamente con las observadas en la estructura. La discusión al respecto se realiza con mayor detalle en el capítulo anterior.

V.3 MODELO TRIDIMENSIONAL DE LA CIMENTACION

En los capítulos II y III se describe la configuración original de la cimentación, así como las intervenciones que ha sufrido. En esta parte se tratará exclusivamente lo relacionado con el desarrollo del modelo tridimensional.

V.3.1 DESCRIPCION DEL MODELO

El modelo analítico de la cimentación contiene elementos sólidos, para representar tanto al pedraplén como a las contratraves, y elementos placa para incluir la participación de la losa a nivel de feligresía, en la fig 5.1 se muestra la forma en que se definen estos tipos de elementos. El modelo no toma en cuenta los muros de concreto que se tienen a nivel de criptas debido, principalmente, a que no parecen contribuir de manera significativa a la rigidez de la cimentación, por lo que se puede decir que resulta conservadora esta consideración.

A diferencia de los modelos planos, en éste no se efectúan equivalencias en la geometría de las secciones, por lo que las dimensiones que se proporcionan son las que se obtuvieron del plano núm 5.

Las propiedades mecánicas de los materiales, que básicamente son mampostería en pedraplén y contratraves, así como concreto en la losa de feligresía, son las que aparecen en la tabla 4.2. En la definición completa del modelo se emplean 3720 nudos, 1700 elementos sólidos y 618 elementos placa. En las figs 5.2, 5.3, 5.4, y 5.5 se muestran diferentes detalles del modelo.

V.4 ANALISIS POR HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES

Este análisis tiene como objetivo el verificar la bondad del modelo. Para ello, se comparan las deformaciones y las zonas de esfuerzos de magnitud elevada, obtenidas del análisis de la cimentación al inducirle los hundimientos diferenciales, con las distorsiones medidas en el templo y con los daños observados. La configuración de hundimientos diferenciales que se utilizó para analizar el modelo, es la misma que para los modelos planos (fig 4.28), y corresponde al nivel de feligresía. Para este análisis los desplazamientos se inducen en la base de la cimentación, en cada uno de los nudos.

V.4.1 RESULTADOS DEL ANALISIS

Los resultados se dividen en tres partes:

- Desplazamientos en las direcciones X y Y a nivel de feligresía
- Esfuerzos en los elementos placa, y
- Esfuerzos en los elementos sólidos.

DESPLAZAMIENTOS

En la fig 5.6 se muestra la configuración deformada de la cimentación, y al igual que para los modelos planos bajo esta condición de análisis, los desplazamientos son considerables. A nivel de la losa de feligresía, se observa que en la zona de la nave principal, a partir del crucero hacia el norte se tienen incrementos en la distancia entre los ejes de columnas C y D, mientras que del crucero hacia el sur se presenta lo contrario; reducciones en dicha distancia (fig 5.7). Además se hace la comparación con los datos que se presentan en el plano núm 9 que se obtuvo a partir de un levantamiento en el sitio, observándose una correlación aceptable entre ambos parámetros.

En la fig 5.8 se presentan los desplazamientos relativos que experimenta la cimentación entre la base del pedraplén y el nivel de feligresía, en los puntos de intersección de los ejes que definen la nave principal. Al comparar estos resultados con los desplomes de las columnas, correspondientes al primer tramo del fuste se aprecia una correlación importante, por lo que se puede decir que la tendencia en el primer tramo de la gran mayoría de las columnas, que se construyeron en la misma época, la tendencia de los desplomes en columnas se presenta desde la cimentación misma.

En resumen, estos análisis muestran una correlación razonable con las deformaciones que presenta la estructura.

ESFUERZOS

Debido a los dos tipos de elementos que se emplean, los resultados se proporcionan en forma individual. La convención positiva para ambos tipos de elementos se muestra en la fig 5.1.

- ELEMENTOS PLACA

Para las placas se tienen como resultados los esfuerzos normales, σ_{xx} , σ_{yy} , así como los esfuerzos los cortantes T_{xy} .

Los esfuerzos σ_{xx} , aparecen en la fig 5.9 con un gran contraste en la distribución de los mismos, las tensiones se presentan en la zona Norte a partir del crucero, resaltando la distribución de esfuerzos sobre el eje C y la zona comprendida entre las torres y la entrada principal; las compresiones se presentan básicamente hacia el Sur del crucero. En la fig 5.10 se muestran los esfuerzos σ_{yy} , y de igual forma la distribución de esfuerzos es contrastante, al Norte se tienen las tensiones y hacia el Sur las compresiones. La fig 5.11 muestra una distribución más homogénea de los esfuerzos T_{xy} .

- ELEMENTOS SOLIDOS

Como resultados para este tipo de elementos, se obtienen esfuerzos normales en tres direcciones ortogonales σ_x , σ_y y σ_z , así como esfuerzos cortantes T_{xy} , T_{xz} y T_{yz} .

La distribución de esfuerzos σ_x se muestra en la fig 5.12. Ahí se observa una distribución alterna de los esfuerzos de tensión y de compresión y resalta la zona que define la contratrabe del eje C a partir del crucero y hasta el ábside y la zona entre las torres en la entrada principal, que se encuentran sometidas a tensión. Los esfuerzos σ_y se distribuyen de acuerdo a la fig 5.13 y nuevamente las tensiones se concentran en su mayor parte en la zona Norte y las compresiones en la Sur. Resaltan la contratrabe sobre el eje C, así como dos zonas sobre la nave de capillas Poniente donde se presentan esfuerzos de tensión elevados. Una ubicada en

el lado Norte y la otra en el Sur. En la fig 5.14 se muestra la distribución de esfuerzos σ_z , y del mismo modo que para la dirección X la distribución de tensiones está intercalada con zonas de compresión.

Por último en la fig 5.15 se presenta la distribución de esfuerzos cortantes.

VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.- Las hipótesis formuladas para el desarrollo de los modelos de elemento finito, así como para los análisis efectuados, se consideran representativas de acuerdo con los resultados obtenidos.

2.- Los modelos desarrollados permiten estudiar el comportamiento estructural de los ejes C y D, en la dirección longitudinal, así como los ejes 4 al 7 en la dirección transversal. También es factible analizar los ejes 8 al 11 en la dirección transversal haciendo modificaciones simples de tipo geométrico.

3.- Los análisis por carga gravitacional indican que el templo tendría un margen de seguridad amplio si no existiera la problemática de los hundimientos diferenciales. Esto indica, que existió una buena concepción del sistema estructural del monumento para el caso de un suelo firme; sin embargo no se consideraron adecuadamente las características del suelo del Valle de México.

4.- Las cargas que transmite la estructura a la cimentación obtenidas de forma analítica resultan 14 por ciento superiores a las obtenidas en estudios previos. Esto hace necesario evaluar con mayor detalle las cargas reales que transmite la estructura al suelo para detectar si dicho incremento se mantiene constante en toda la estructura o existen variaciones de mayor importancia.

5.- Para los análisis por hundimientos diferenciales los resultados, en términos de desplazamientos, son indicativos de las deformaciones que presenta la estructura. Los esfuerzos no se deben considerar del mismo modo, ya que exceden en mucho la capacidad de los materiales, debido a que los análisis efectuados son elásticos; sin embargo, permiten identificar y explicar la presencia de zonas dañadas.

6.- Al contemplar la participación de la cimentación en los modelos planos se obtiene una respuesta más representativa del conjunto.

7.- El modelo tridimensional de la cimentación, al considerarse en forma aislada, muestra una respuesta razonable al analizarla con los hundimientos diferenciales, dado que reproduce los desplomos en el primer tramo de fustes de columnas, y permite entender así como explicar la variación en las distancias de intercolumnios para la nave central así como explicar la presencia de la grieta a lo largo del eje C, al norte del crucero.

8.- El desarrollo del modelo tridimensional de la cimentación esta concebido para ser acoplado sin dificultades a la superestructura, con lo que se permitirá realizar análisis del conjunto para obtener un panorama más amplio sobre el comportamiento estructural.

9.- Para obtener mayor representatividad de los análisis es necesario retroalimentar los modelos matemáticos de acuerdo con el estado de daño y las características mecánicas de los materiales en la estructura. Además de que se pueden complementar midiendo directamente en el sitio el estado de esfuerzos en zonas de interés mediante técnicas adecuadas, como lo es el uso de gatos planos.

10.- Los modelos planos resultan una herramienta versátil, ya que sus resultados son fáciles de interpretar y permiten tener una visión más clara de la posible respuesta estructural. Sin embargo, al no considerar los efectos tridimensionales se tienen algunas limitantes que no afectan sustancialmente los resultados.

11.- Los resultados obtenidos en los distintos análisis, muestran que es factible emplear los modelos desarrollados en este trabajo para evaluar, al menos en forma cualitativa, la posible respuesta de la estructura e identificar efectos colaterales que pueden inducir las acciones del proceso de restauración.

12.- Dado que los ejes de fachadas presentan una estructuración totalmente distinta a los ejes típicos, es deseable desarrollar los modelos correspondientes para evaluar su desempeño ante el mismo proceso.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por la educación obtenida, especialmente a su Facultad de Ingeniería por la formación profesional proporcionada, de la cual me siento orgulloso.

Al Instituto de Ingeniería por las facilidades y apoyo recibidos durante el desarrollo de este trabajo.

Un reconocimiento especial al Ing A. Roberto Sánchez por su amistad, apoyo y paciencia brindados al asesorar la realización de esta tesis.

A todos mis compañeros y amigos, especialmente a los "incansables", por todos los momentos alegres que su amistad me ha proporcionado, con el deseo de que la amistad que nos une perdure a través de los años.

Por último, y por ello no menos importante, a la Dirección General de Sitios y Monumentos Históricos dependiente de la SEDESOL, por el apoyo brindado a través de su Taller instalado en la Catedral.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Ruíz, Luis R.
Monografía de la Catedral de México con notas Históricas, Artísticas e Informativas.
Instituto Panamericano de Geografía e Historia
Publicación Núm. 36
México 1936.
- [2] Sandoval, Pablo de Jesús; Ordoñez, José
La Catedral Metropolitana de México
Ediciones Victoria
México 1938.
- [3] La Catedral Y el Sagrario de México
Monografías Mexicanas del Arte
Editorial de la Dirección General de las Bellas Artes
México 1938.
- [4] Guerrero y Gama, Vicente
Algunos Cálculos Relativos a la Recimentación de la Catedral Metropolitana
México 1976.
- [5] Estudio de las Cimentaciones de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos
Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología
Editorial de los Talleres Gráficos de la Nación
México 1990.
- [6] Edward L. Wilson and Ashraf Abibullah
SAP80 - Series of Computer Programs for the Finite Element Analysis of Structures,
Users Manual
Berkeley, California 1984.

- [7] Edward L. Wilson and Ashraf Abibullah
SAP90 - Series of Computer Programs for the Finite Element Analisis of Estructures,
Users Manual
Berkeley, California 1989.
- [8] Olgún, Olgún Gerardo
Glosario de Elementos Arquitectonicos
Apuntes Núm. 3 de la ENEP Aragón
México 1988.
- [9] Olgún, Olgún Gerardo
Glosario de Elementos Arquitectonicos en la Catedral Metropolitana
Apuntes Núm. 6 de la ENEP Aragón
México 1988.
- [10] Sánchez, Ramírez A. Roberto; Melé Piralla, Roberto
Seguridad Estructural de Monumentos Históricos de la Ciudad de México
(Primera Etapa)
Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM a SEDUE
México 1991.
- [11] La Catedral de México, Patrimonio Artístico y Cultural
Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología
Editorial Talleres de Reproestudio de Color S. A.
México 1986.
- [12] Cortes, Quezada Miguel A.
Modelo de Elemento Finito Para el Análisis Estructural de la Catedral Metropolitana
Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil
Facultad de Ingeniería, UNAM
México 1992.
- [13] Timoshenko and Goodier
Theory of the Elasticity
Third Edition
Mac Graw-Hill International.
- [14] López, Carmona Fernando
Estudio de la Condición Actual de la Catedral Metropolitana. Las Condiciones de la
Estructura en Función del Suelo.
Tesis para obtener el título de Doctor en Arquitectura.
Facultad de Arquitectura, UNAM.
México 1992.
- [15] Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Concreto, del
Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.
Diario Oficial de la Federación.
México 1987.

REFERENCIAS DE PLANOS

PLANO NUM. 1 - Corte transversal eje 5.

PLANO NUM. 2 - Corte transversal entre ejes 6,7 - B a G.

PLANO NUM. 3 - Corte longitudinal entre ejes D,E - 1 a 12.

PLANO NUM. 4 - Planta a nivel de extrados bóvedas de capillas.

PLANO NUM. 5 - Cúpula de Catedral, planta a nivel del tambor.

PLANO NUM. 6 - Localización y nivel de desplante de cimientos de la Catedral.

PLANO NUM. 7 - Planta a nivel de criptas, Cimentación.

PLANO NUM. 8 - Planta a nivel de feligresía, triangulación de intercolumnios.

PLANO NUM. 9 - Planta a nivel de feligresía, análisis comparativo de desplomes
en el primer tramo de fustes y a nivel de impostas.

Estos planos fueron proporcionados por el Taller de Catedral, Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural, dependiente de la SEDESOL (antes SEDUE).

SECCION	GEOMETRIA REAL	GEOMETRIA EQUIVALENTE	AREA REAL (m ²)	AREA EQUIV. (m ²)	I _{xx} REAL (m ⁴)	I _{zz} REAL (m ⁴)	I _{xx} EQUIV. (m ⁴)	I _{zz} EQUIV. (m ⁴)	RELACION INERCIAS I _{xx}	RELACION INERCIAS I _{zz}
COLUMNA CENTRAL			5.894	5.610	4.724	4.724	5.130	5.130	1.085	1.085
COLUMNA ADOSADA A LOS MUROS			5.843	5.665	3.772	2.279	3.363	2.514	0.891	1.103
ARCO DE MEDIO PUNTO NAVE PROCESIONAL			0.706	0.715	0.016	0.069	0.019	0.065	1.23	0.951
ARCO FORMERO NAVE PRINCIPAL Y CRUCERO			0.883	0.870	0.035	0.081	0.047	0.089	1.34	1.10

Tabla 4.1 Geometría y secciones equivalentes empleadas para definir elementos estructurales en los modelos.

MATERIAL	MODULO DE ELASTICIDAD (ton/m ²)	MODULO DE POISSON	PESO VOLUMETRICO (ton/m ³)
MAMPOSTERIA muros, bovedas, pedraplen y contratraves	200000	0.20	1.80
CANTERA columnas y arcos	1000000	0.15	2.00
CONCRETO refuerzo de la cimentación y losa de feligresia	1200000	0.10	2.40

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas de los materiales.

COLUMNA	IDENTIFICACION	BAJADA DE CARGAS ING. GUERRERO Y GAMA (ton)	BAJADA DE CARGAS (TESIS) (ton)	ANALISIS PROGRAMA SAP90 (ton)
DE LA NAVE PRINCIPAL	5C ó 5D	603.07	768.00	754.00
DE LA NAVE PROCESIONAL LADO DE CAPILLAS	5B ó 5E	713.00	870.00	913.00
DE LA NAVE PRINCIPAL EN EL CRUCERO	6C ó 6D	942.70	1133.00	1101.00
DE LA NAVE PROCESIONAL EN LA ZONA DE CRUCERO LADO DE CAPILLAS	6B ó 6E	713.00	930.00	954.00
DE LA NAVE PRINCIPAL JUNTO AL CONTRAFUERTE DE FACHADA	12D ó 12C	795.41	951.00	978.00

Tabla 4.3 Comparación de los análisis por carga gravitacional.

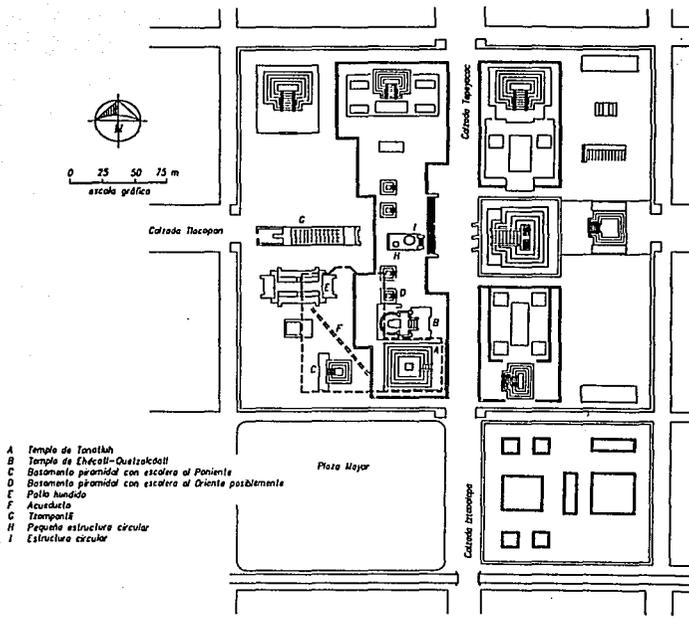


Fig. 2.1 Ubicación de la Catedral Metropolitana en la zona del antiguo Templo Mayor.

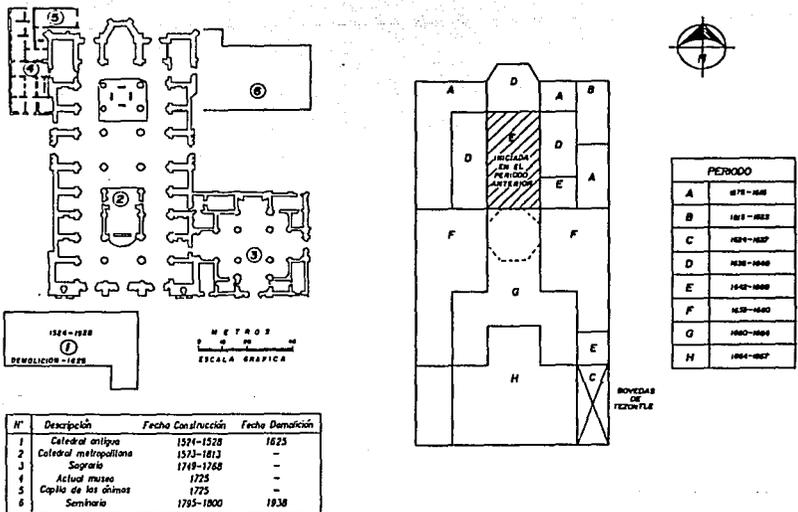


Fig. 2.2 Secuencia constructiva de la Catedral y edificaciones adjuntas.

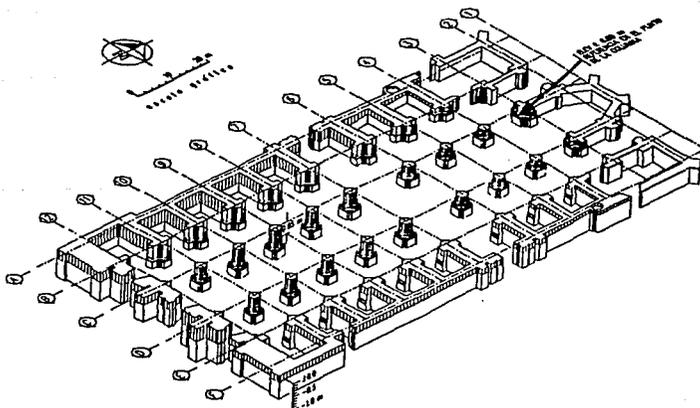


Fig. 2.3 Incrementos en fustes de columnas y muros para corregir los desniveles que se presentaron durante la construcción.

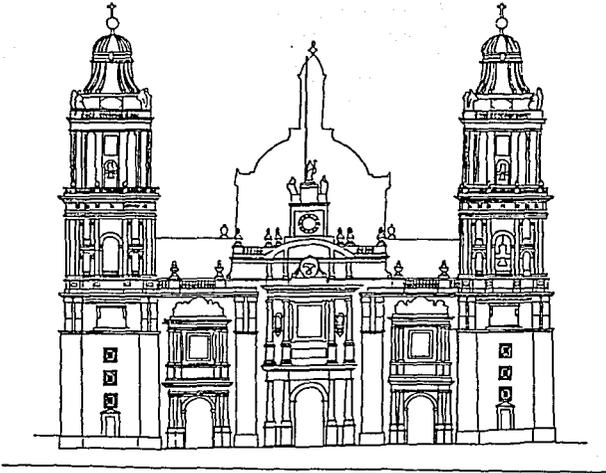


Fig. 2.4 Vista de la fachada principal.

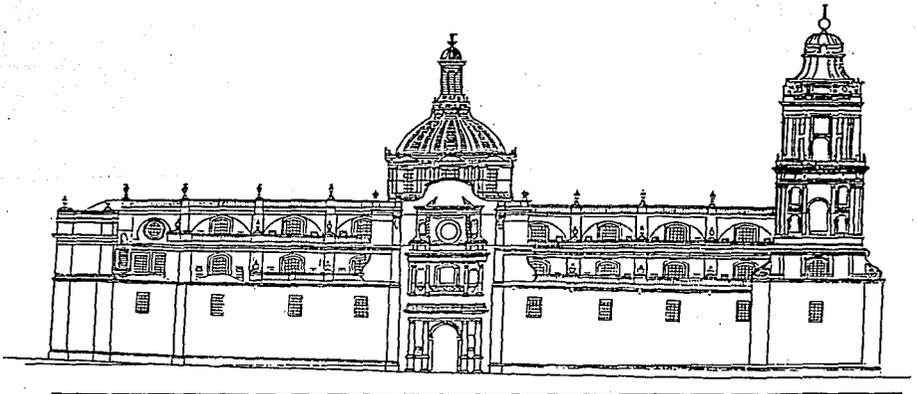
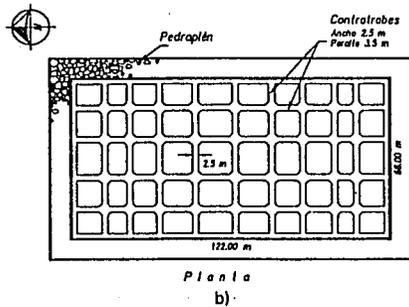
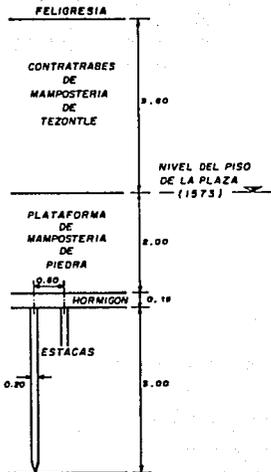
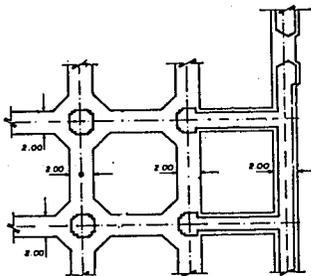


Fig. 2.5 Vista lateral Poniente.



CIMENTACION ORIGINAL (Ref 3)

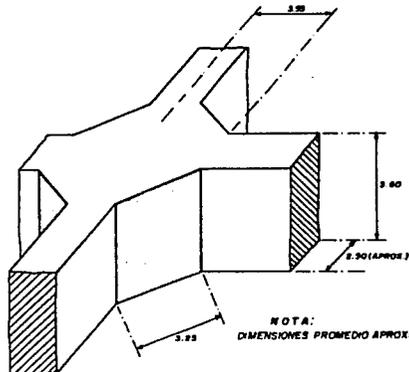
a):



PLANTA DE CONTRATRABES (Ref 3)

c):

NOTA:
 - ACOTACIONES EN METROS
 - ELEVACIONES EN METROS

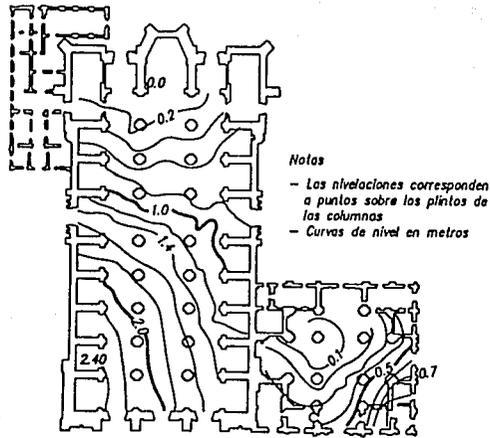


DETALLE DE CONTRABE BAJO UNA COLUMNA

d):

NOTA:
 DIMENSIONES PROMEDIO APROXIMADAS

Fig. 2.6 Características originales de la cimentación
 a) Corte de cimentación
 b) Pedraplén y malla de contratraves
 c) Planta de contratraves
 d) Detalle de contratrabe bajo columnas interiores.



DICIEMBRE 1989

Fig. 3.1 Hundimientos diferenciales acumulados en la zona de la fachada principal.

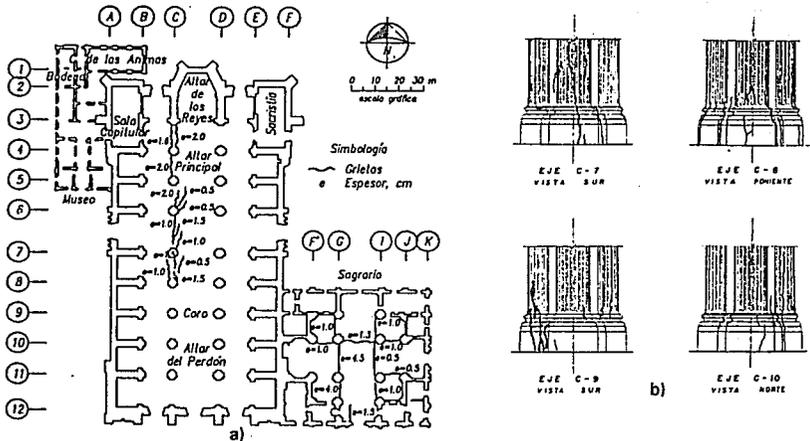


Fig. 3.2 Zonas de agrietamientos, debido a los hundimientos diferenciales
 a) A nivel de losa de feligresía.
 b) En columnas.

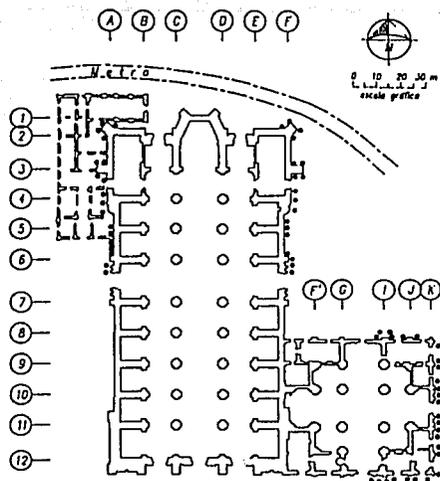


Fig. 3.3 Distribución de pilotes complementarios al Norte del crucero.

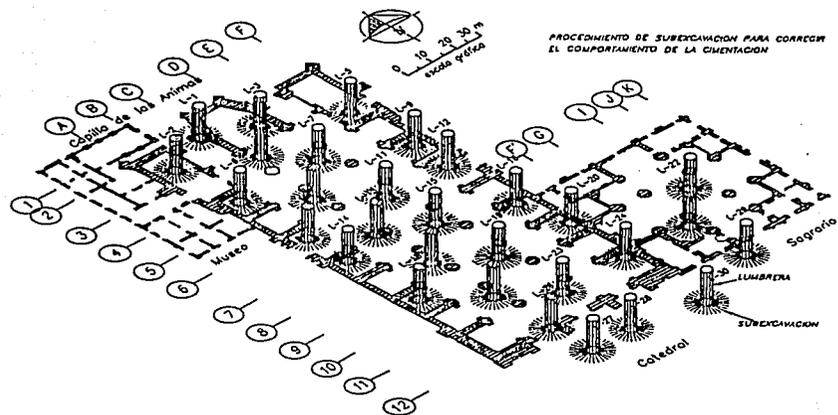


Fig. 3.4 Distribución de lumbreras.

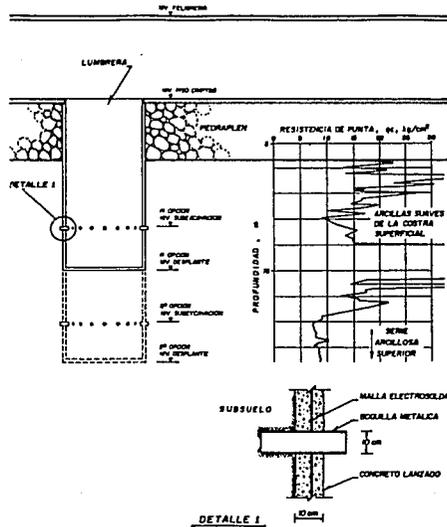


Fig. 3.5 Corte de lumbreira y preparación de subexcavación.

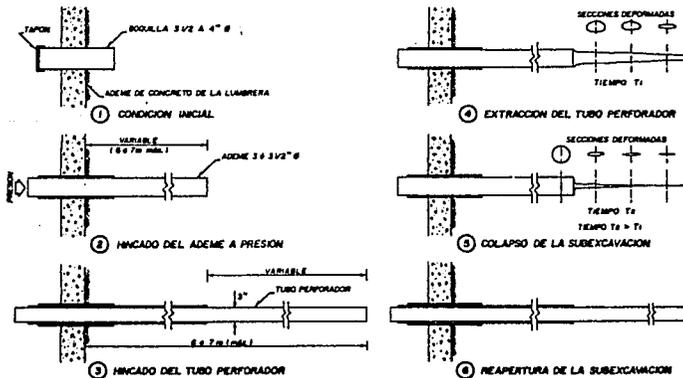


Fig. 3.6 Secuencia del proceso de subexcavación.

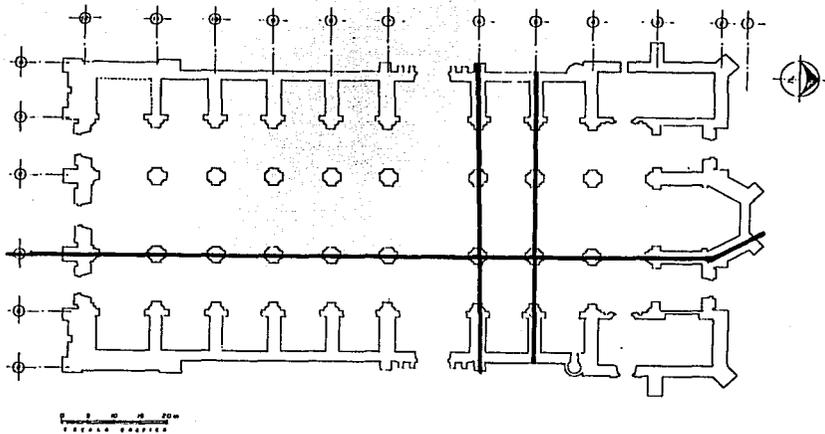


Fig. 4.1 Ubicación en planta de los ejes típicos seleccionados para su modelación.

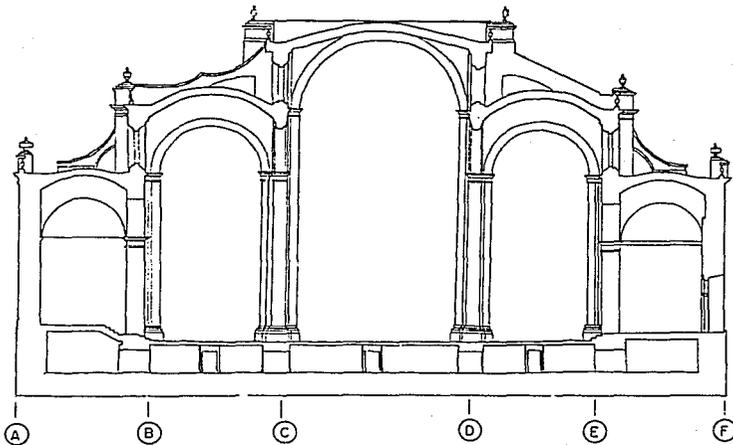


Fig. 4.2 Geometría del eje 5.

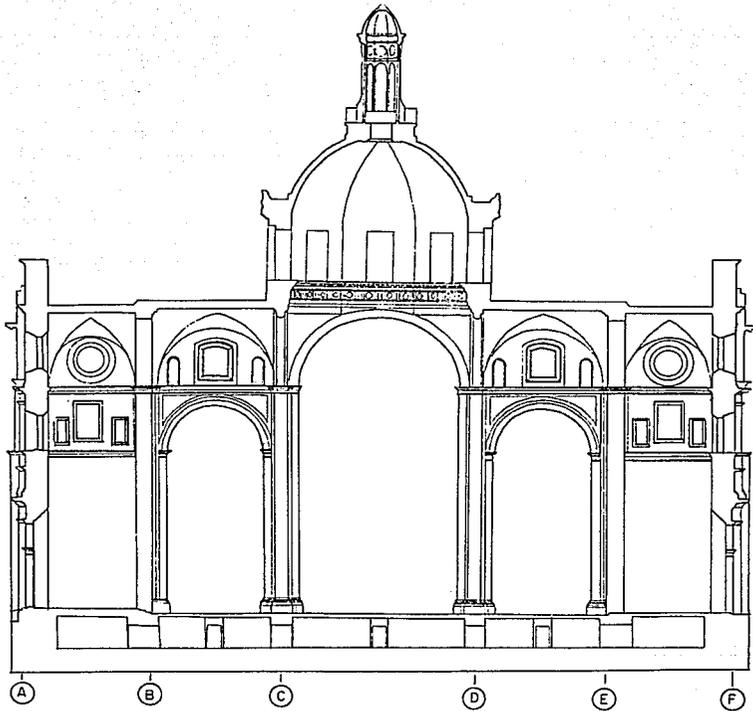


Fig. 4.3 Geometría del eje 6.

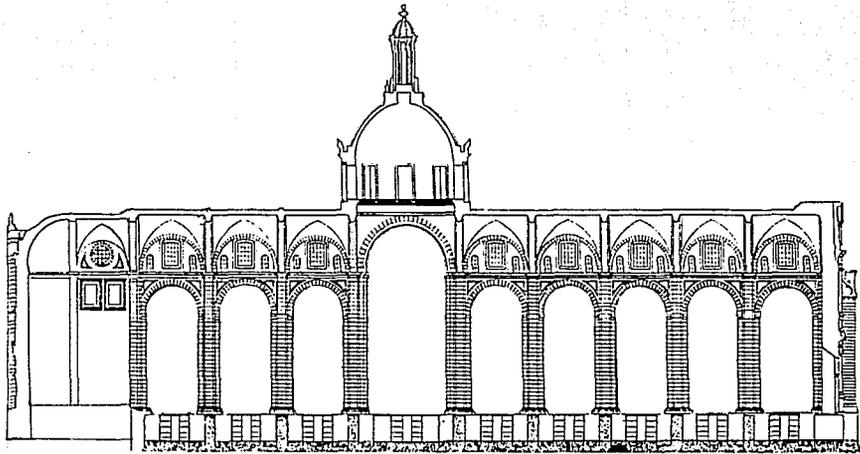


Fig. 4.4 Geometría del eje D.

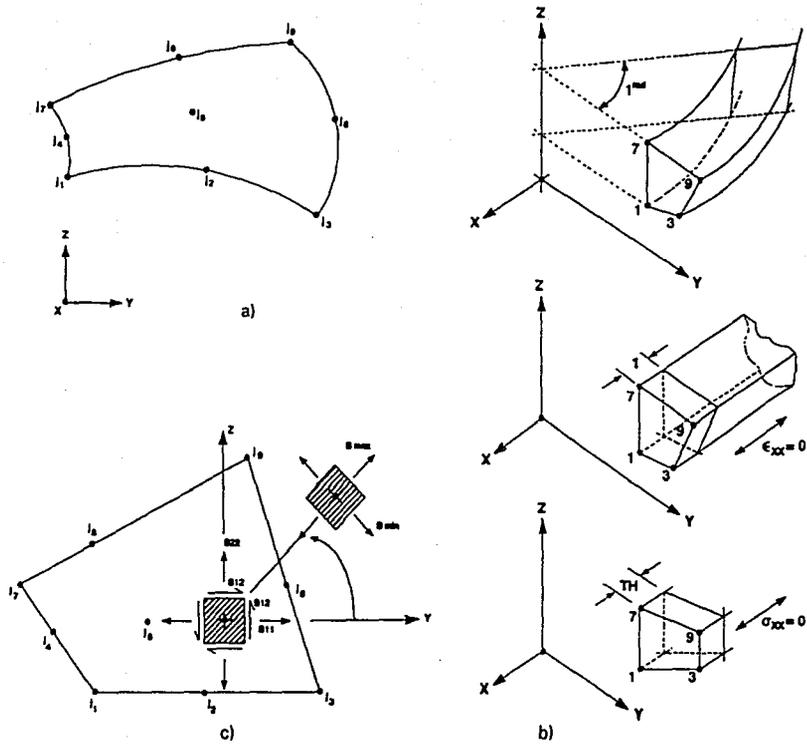
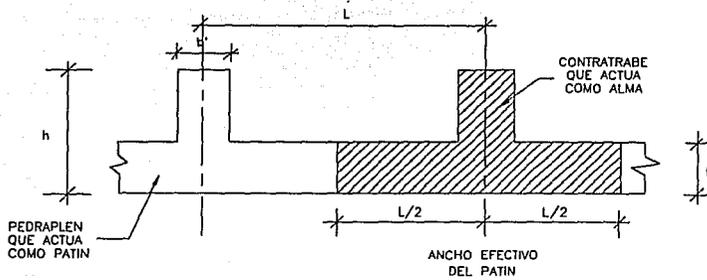


Fig. 4.5 Definición de elementos para el estado plano de esfuerzos (ASOLID)
a) Formulación general
b) Formulación con 4 nodos
c) Convención positiva para los esfuerzos en los elementos.



- Donde:
- L = distancia entre contratraves
 b' = ancho de contratrabe
 t = espesor del pedraplen
 b = ancho del pedraplen que trabaja como patin
- $$b > \begin{cases} 12 + b' \\ 1/(4L) \\ L \end{cases}$$

Fig. 4.6 Criterio para determinar el ancho de pedraplén que participa en el modelo plano.

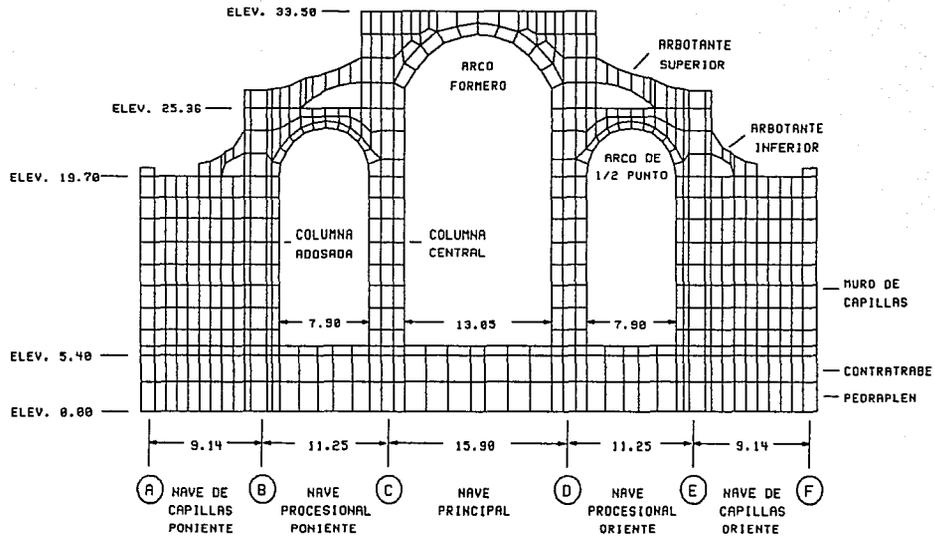


Fig. 4.7 Modelo de elemento finito del eje 5.

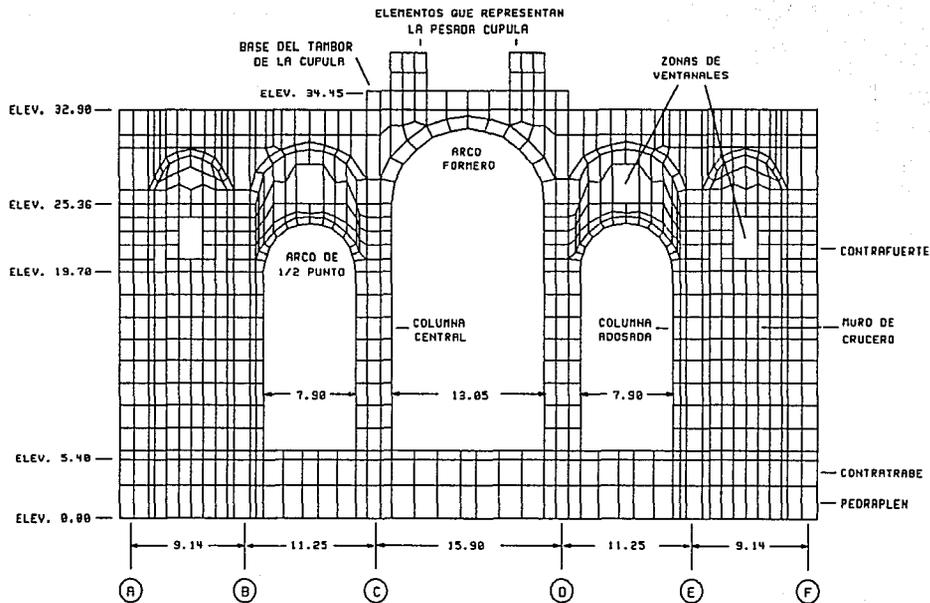


Fig. 4.8 Modelo de elemento finito del eje 6.

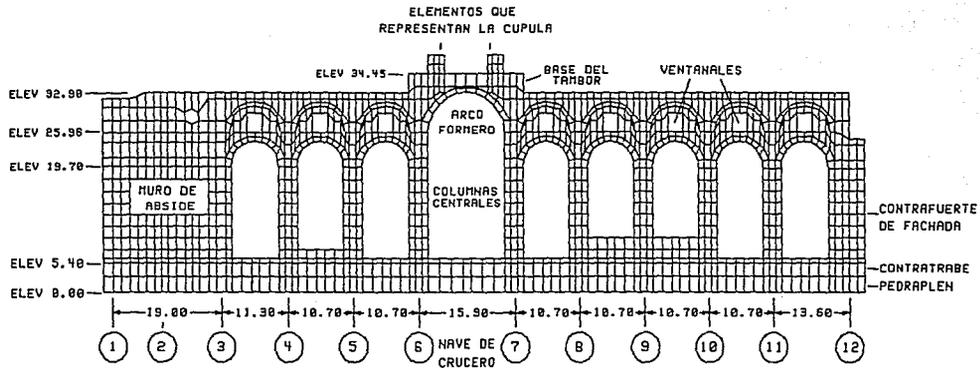


Fig. 4.9 Modelo de elemento finito del eje D.

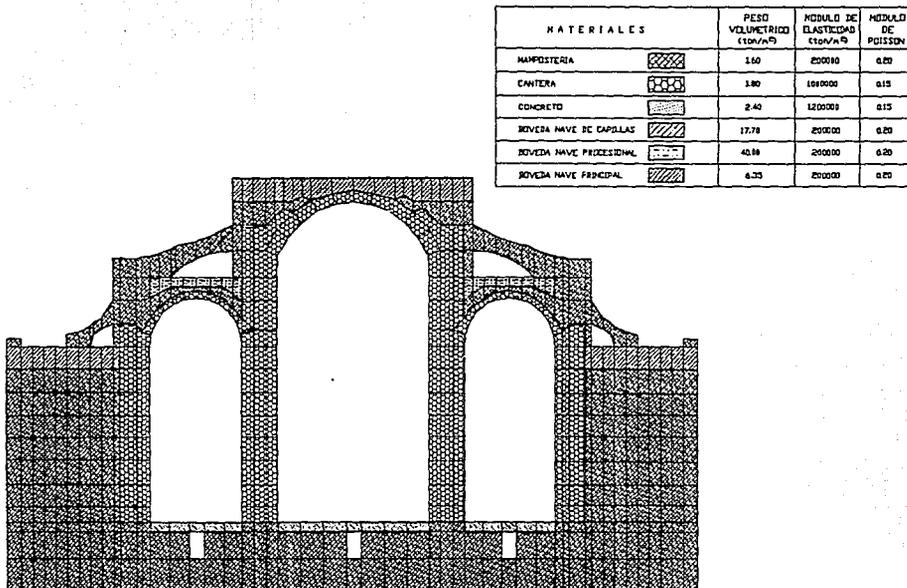
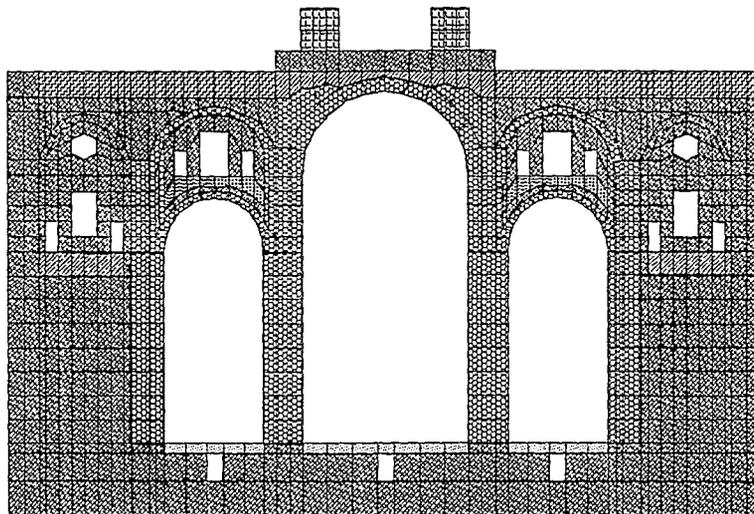
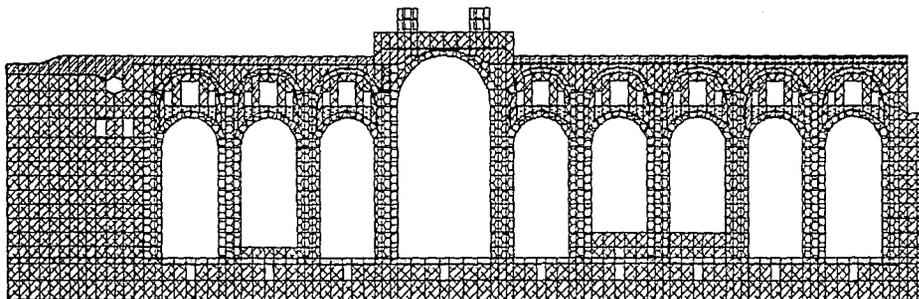


Fig. 4.10 Aplicación de cargas de bóvedas y distribución de materiales en el modelo del eje 5.



MATERIALES	PESO VOLUMETRICO (ton/m ³)	MODULO DE ELASTICIDAD (ton/m ²)	MODULO DE POISSON
MAESTRERIA	1.80	80000	0.29
CANTERA	1.80	100000	0.15
CONCRETO	2.40	120000	0.15
BOVEDA NAVE DE CAPILLAS	10.67	20000	0.20
BOVEDA NAVE PROCESSIONAL	17.80	20000	0.20
BOVEDA NAVE PRINCIPAL	5.94	20000	0.20
CUPULA	28.48	20000	0.20
BOVEDA NAVE DE CRUCERO	5.98	20000	0.20

Fig. 4.11 Aplicación de cargas de bóvedas y distribución de materiales en el modelo del eje 6.



MATERIALES	PESO VOLUMETRICO (ton/m ³)	MODULO DE ELASTICIDAD (ton/m ²)	MODULO DE POISSON
MAMPUESTRIA	1.60	200000	0.20
CANTERA	1.80	1000000	0.15
CONCRETO	2.40	1200000	0.15
NAVE PRINCIPAL NORTE	10.20	200000	0.20
NAVE PRINCIPAL SUR	11.07	200000	0.20
BOVEDA NAVE PROCESSIONAL	20.33	200000	0.20
CUPULA	35.00	200000	0.20
BOVEDA NAVE DE CRUCERO	4.70	200000	0.20

Fig. 4.12 Aplicación de cargas de bóvedas y distribución de materiales en el modelo del eje D.

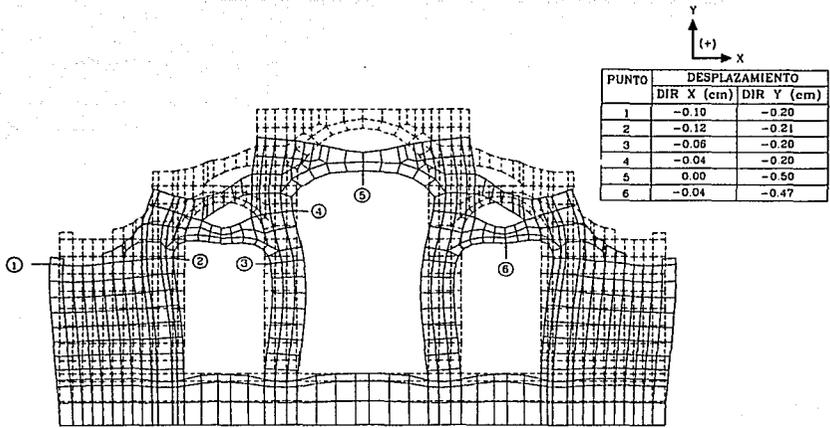


Fig. 4.13 Configuración deformada del eje 5, debida a peso propio.

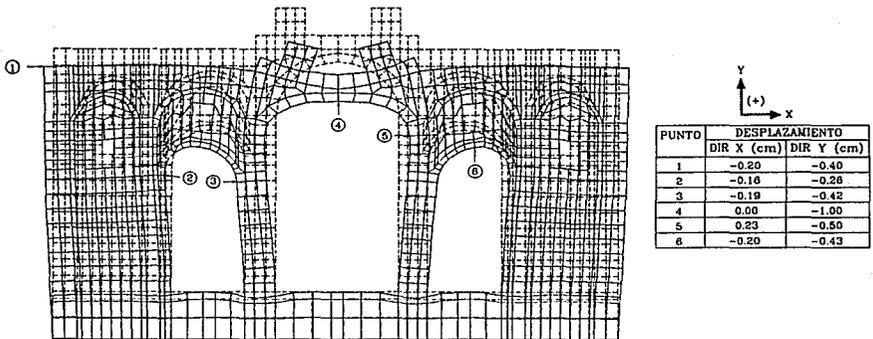


Fig. 4.14 Configuración deformada del eje 6, debida a peso propio.

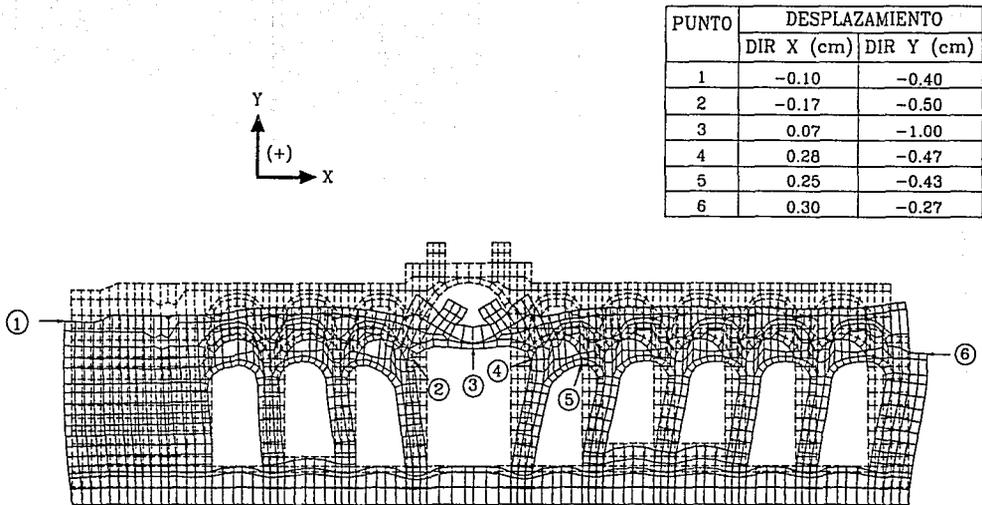


Fig. 4.15 Configuración deformada del eje D, debida a peso propio.

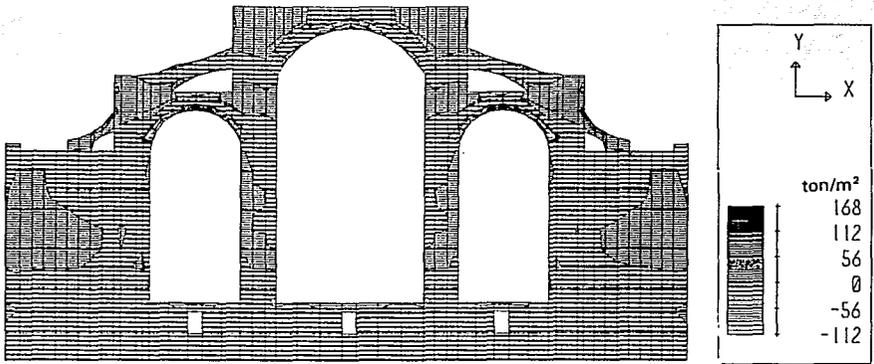


Fig. 4.16 Eje 5. Distribución de esfuerzos σ_{xx} , debida a peso propio.

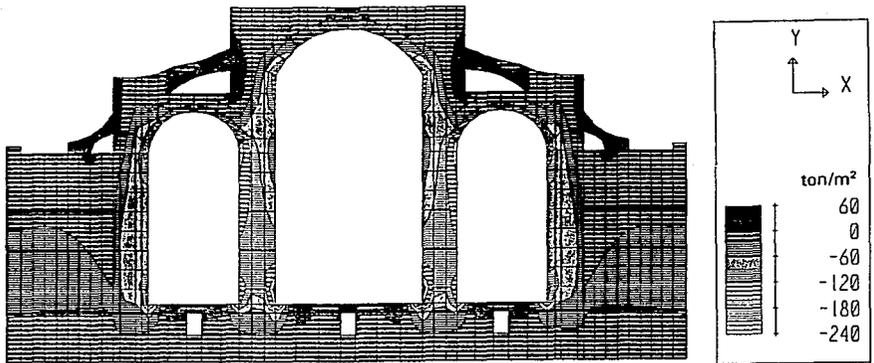


Fig. 4.17 Eje 5. Distribución de esfuerzos σ_{yy} , debida a peso propio.

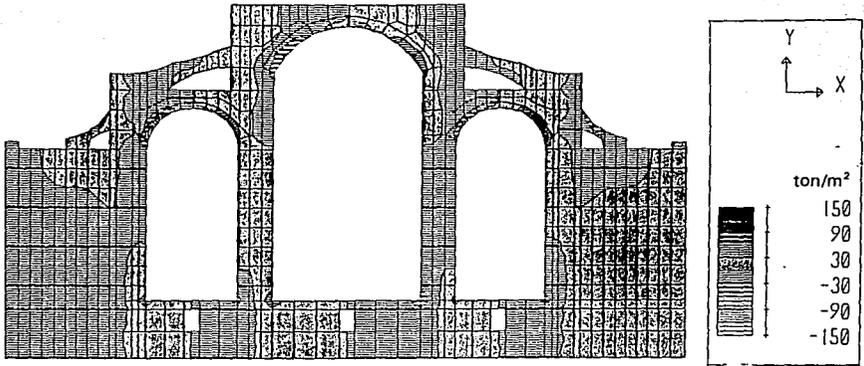


Fig. 4.18 Eje 5. Distribución de esfuerzos cortantes T_{xy} , debida a peso propio.

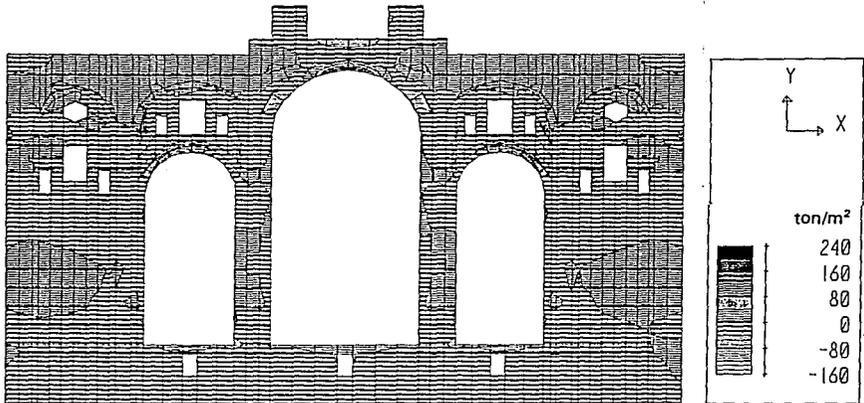


Fig. 4.19 Eje 6. Distribución de esfuerzos σ_{xx} , debida a peso propio.

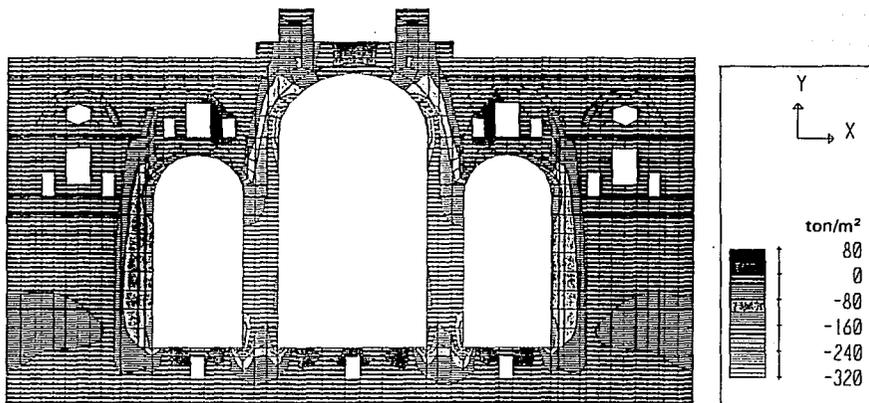


Fig. 4.20 Eje 6. Distribución de esfuerzos σ_{yy} , debida a peso propio.

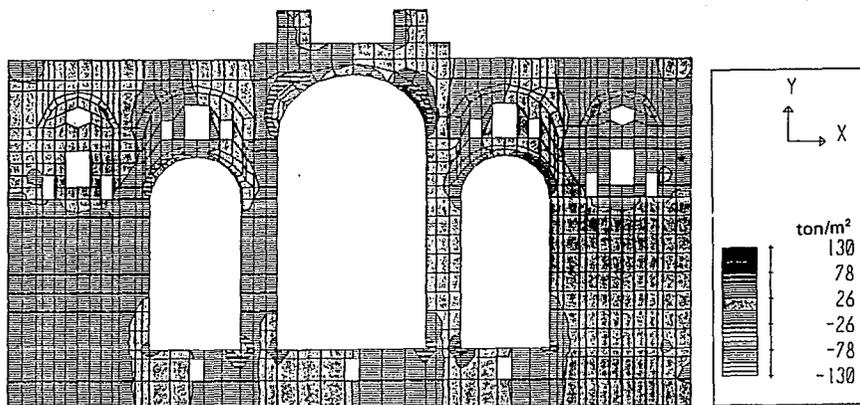


Fig. 4.21 Eje 6. Distribución de esfuerzos cortantes τ_{xy} , debida a peso propio.

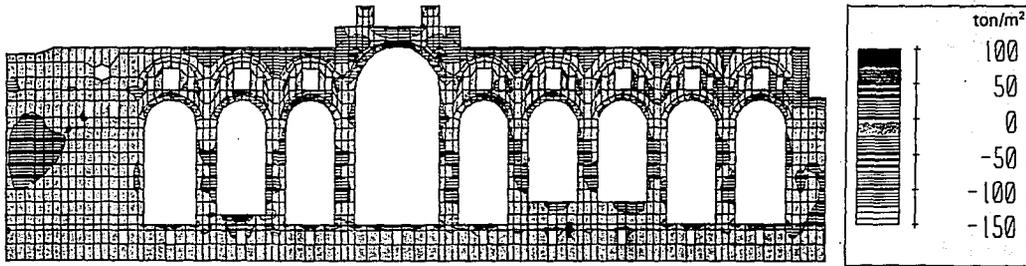


Fig. 4.22 Eje D. Distribución de esfuerzos σ_{xx} , que resulta del análisis por peso propio.

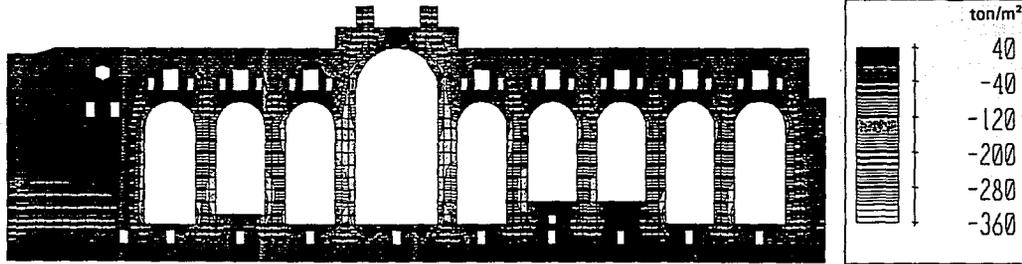


Fig. 4.23 Eje D. Distribución de esfuerzos σ_{yy} , que resulta del análisis por peso propio.

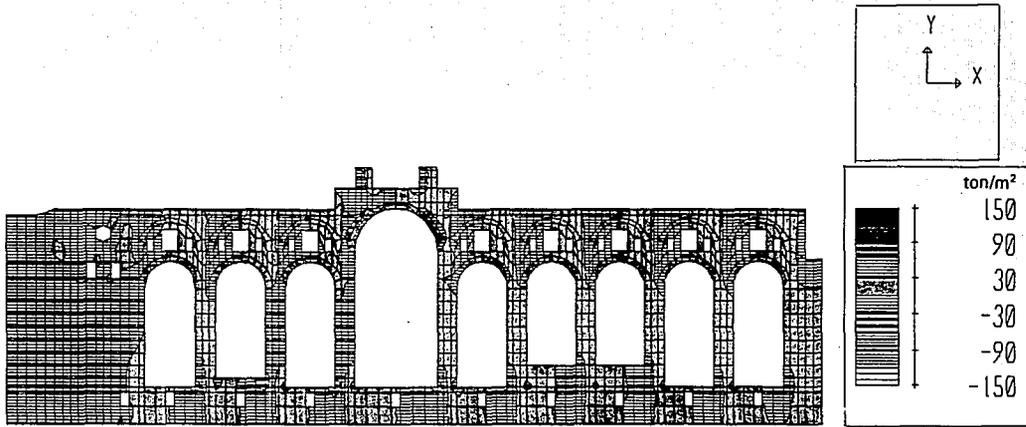
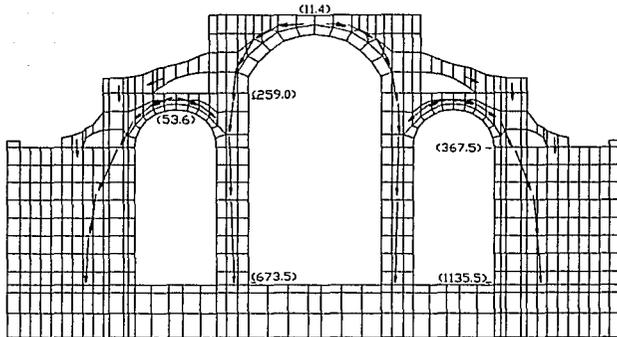
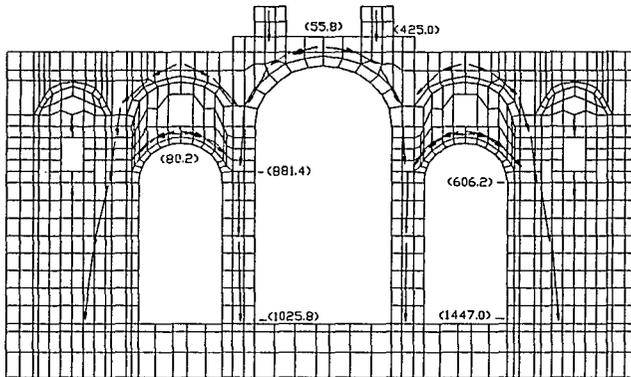


Fig. 4.24 Eje D. Distribución de esfuerzos cortantes T_{xy} , que resulta del análisis por peso propio.



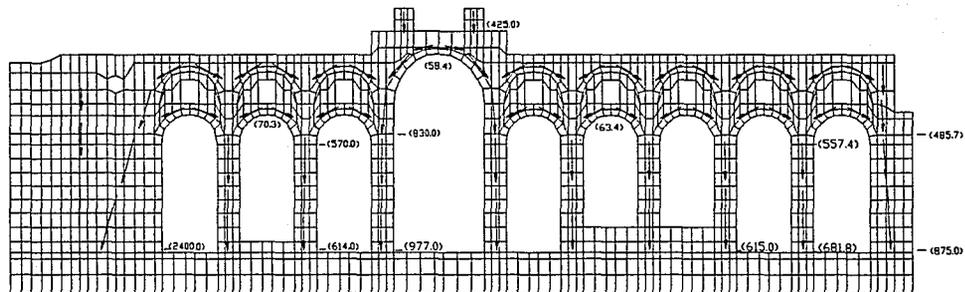
FUERZAS EN Ton.

Fig. 4.25 Trasmisión de fuerzas en el eje 5 que resultan del análisis por carga gravitacional.



FUERZAS EN Ton.

Fig. 4.26 Trasmisión de fuerzas en el eje 6, como resultado del análisis por carga gravitacional.



FUERZAS EN Ton.

Fig. 4.27 *Trasmisión de fuerzas en el eje D, como resultado del análisis por carga gravitacional.*

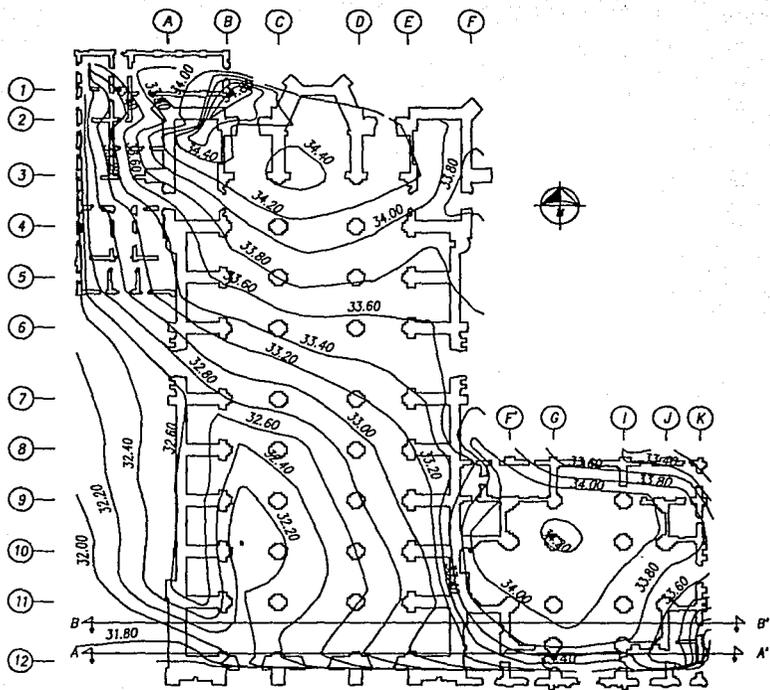


Fig. 4.28 Configuración de hundimientos diferenciales totales a nivel de feligresía tomados hasta el 10/Enero/1992. Punto de referencia BN = 2230.84 msnm.

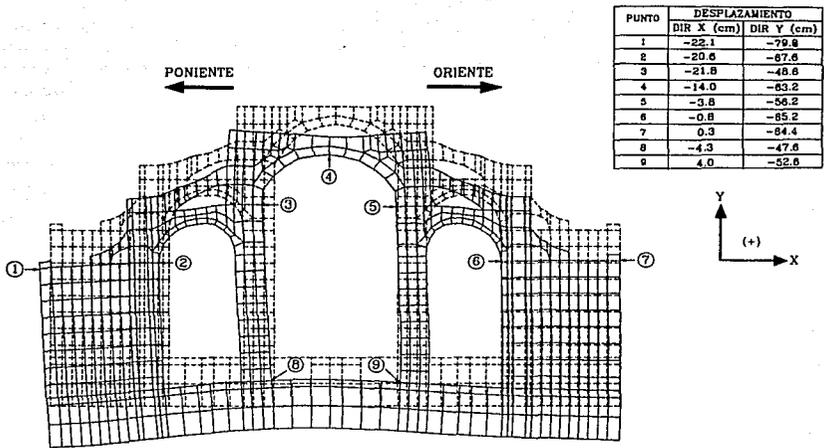


Fig. 4.29 Configuración deformada del eje 5, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.

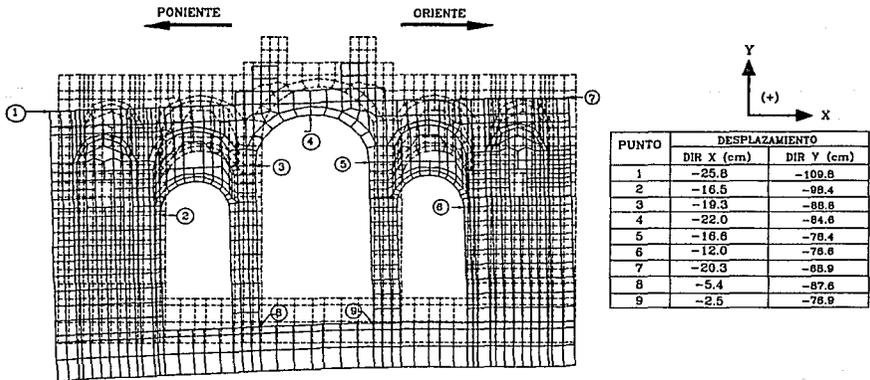
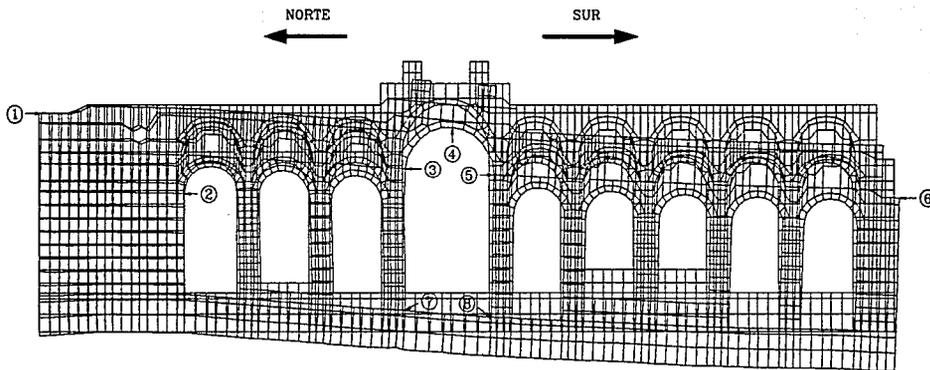


Fig. 4.30 Configuración deformada del eje 6, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.



PUNTO	DESPLAZAMIENTO	
	DIR X (cm)	DIR Y (cm)
1	12.2	2.7
2	6.4	-12.4
3	15.6	-81.2
4	32.4	-101.7
5	25.7	-114.1
6	26.6	-184.4
7	10.4	-81.9
8	9.8	-113.5



Fig. 4.31 Configuración deformada del eje D, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.

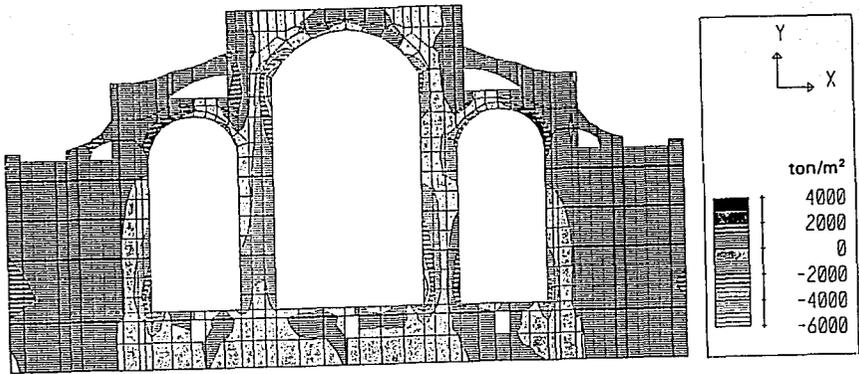


Fig. 4.32 Eje 5. Distribución de esfuerzos σ_{xx} , que se obtiene del análisis por hundimientos diferenciales, notese la magnitud y la zona de tensión en la base de la columna 5C.

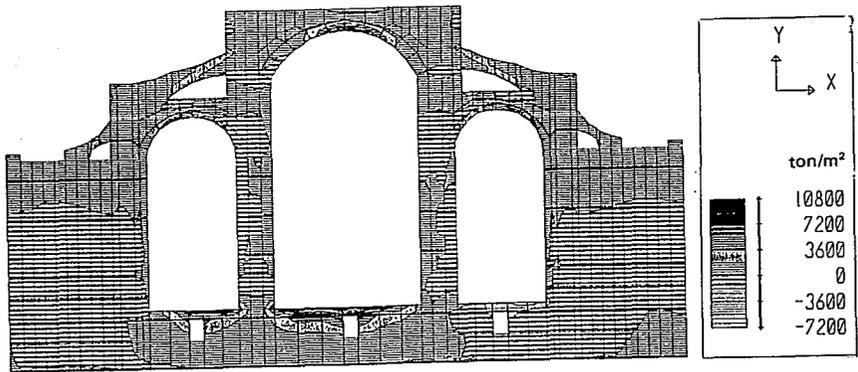


Fig. 4.33 Eje 5. Distribución de esfuerzos σ_{yy} , que se obtiene del análisis por hundimientos diferenciales.

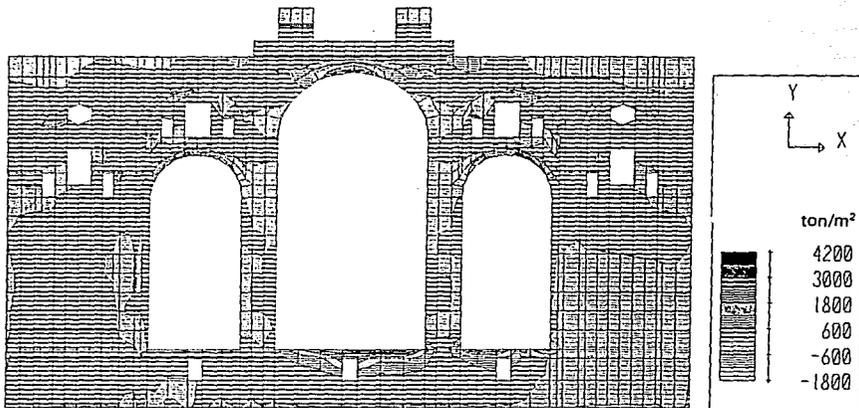


Fig. 4.34 Eje 6. Distribución de esfuerzos σ_{xx} , que se obtiene del análisis por hundimientos diferenciales; notese la magnitud.

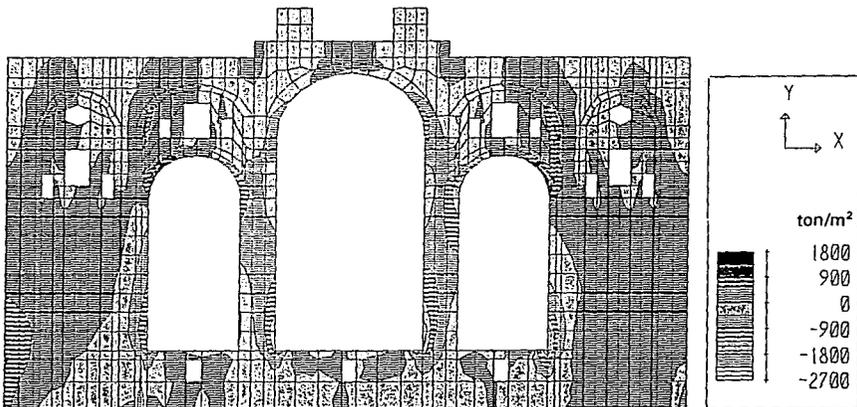


Fig. 4.35 Eje 6. Distribución de esfuerzos σ_{yy} , que se obtiene del análisis por hundimientos diferenciales.

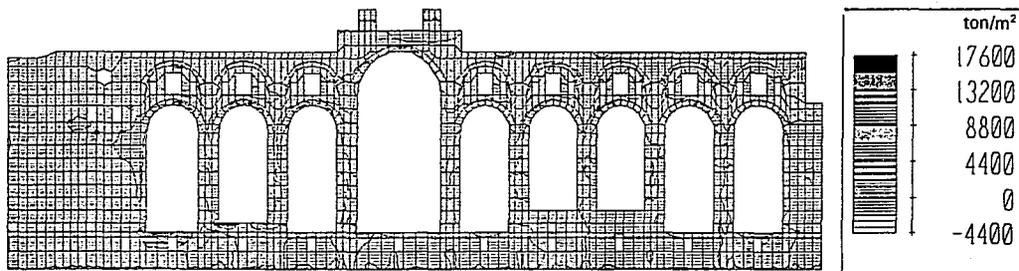


Fig. 4.36 Eje D. Distribución de esfuerzos σ_{xx} , que se obtiene del análisis por hundimientos diferenciales.

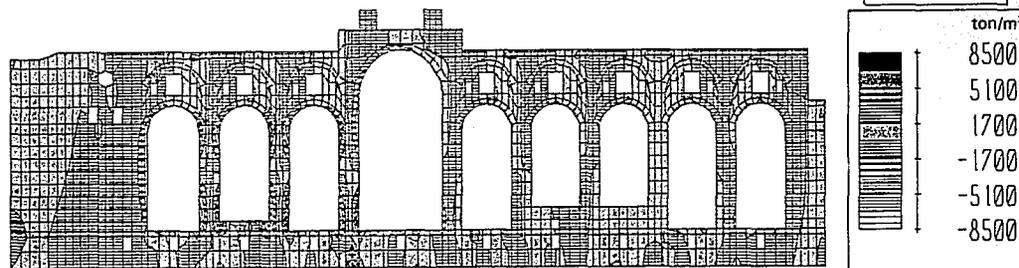


Fig. 4.37 Eje D. Distribución de esfuerzos σ_{yy} , que se obtiene del análisis por hundimientos diferenciales.

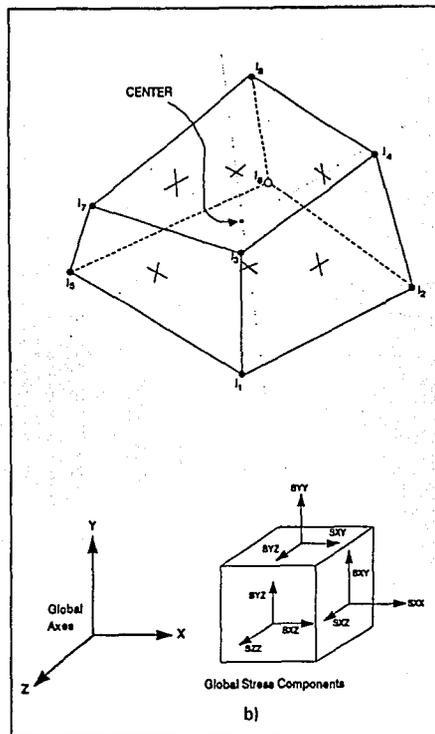
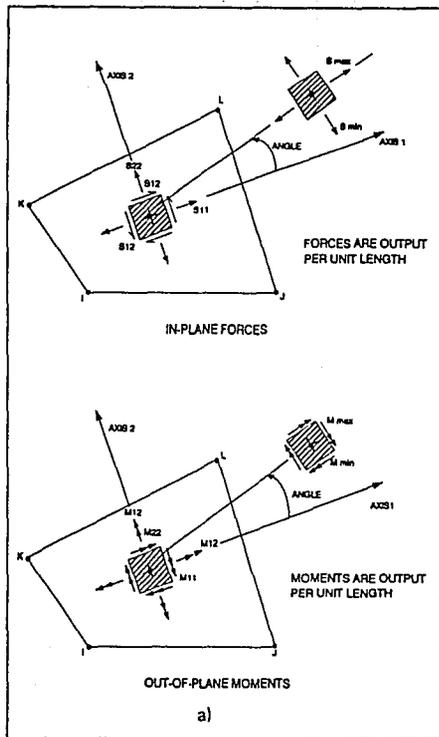


Fig. 5.1 Definición y convención de signos para los elementos placa y sólidos
 a) Elementos placa
 b) Elementos sólidos.

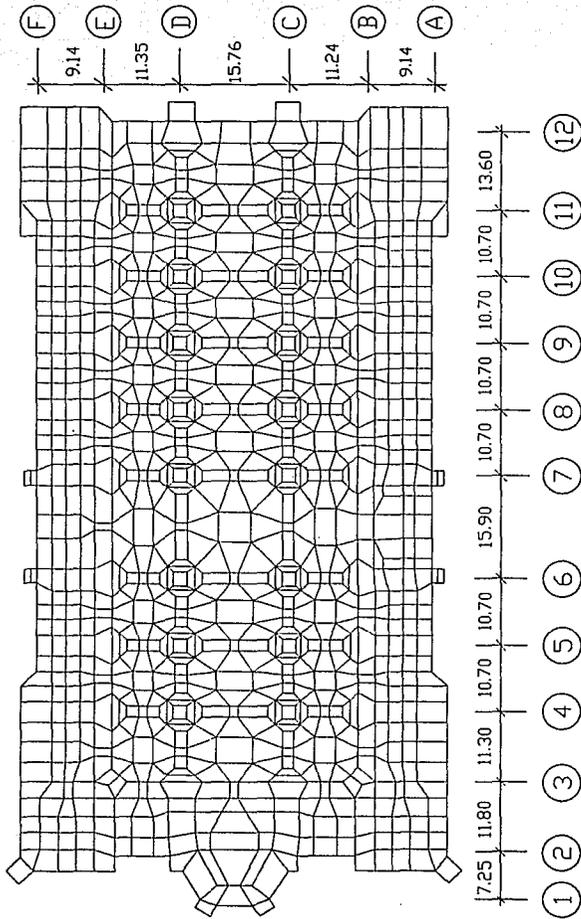


Fig. 5.2 Vista en planta del modelo de elemento finito de la cimentación.

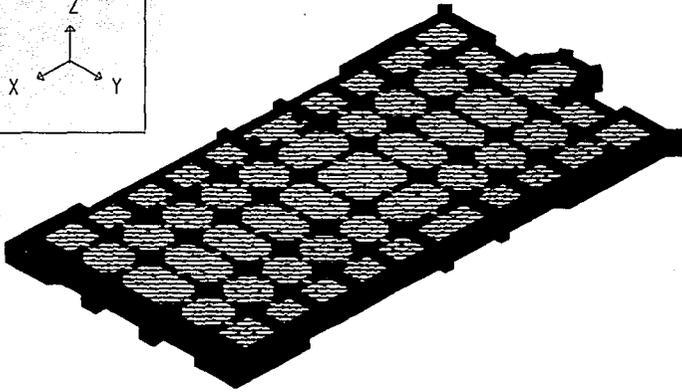
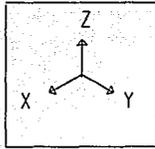


Fig. 5.3 Vista tridimensional del modelo de la cimentación, donde se aprecian los tipos de elementos empleados.

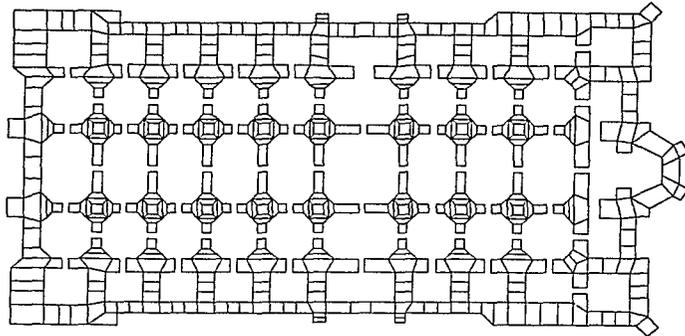
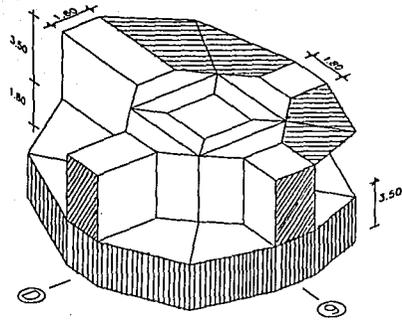


Fig. 5.4 Vista en planta del modelo donde se observa la reticula de contratabes, notense los cortes de los pasillos de criptas.



ELEMENTO ESTRUCTURAL	MATERIAL	MODELADO CON
 PEDRAPLEN	MAMPOSTERIA	SOLIDOS
 CONTRATABES	MAMPOSTERIA	SOLIDOS
 LOSA FELIGRESIA	CONCRETO	PLACAS

Fig. 5.5 Detalle del modelo donde se muestra, pedraplen, base de columna y contratabes.

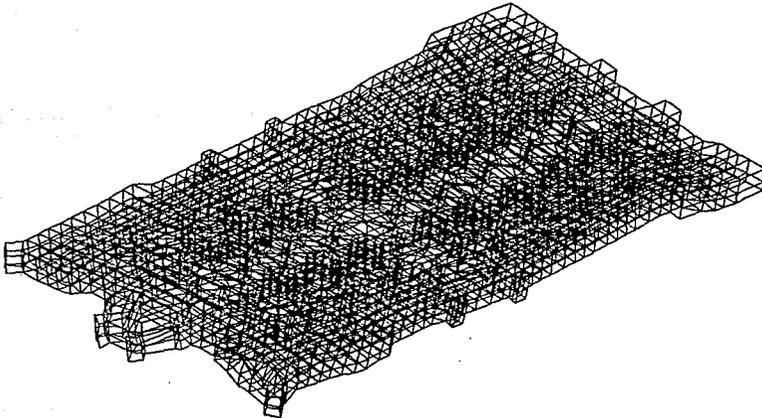


Fig. 5.6 Configuración deformada de la cimentación, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.

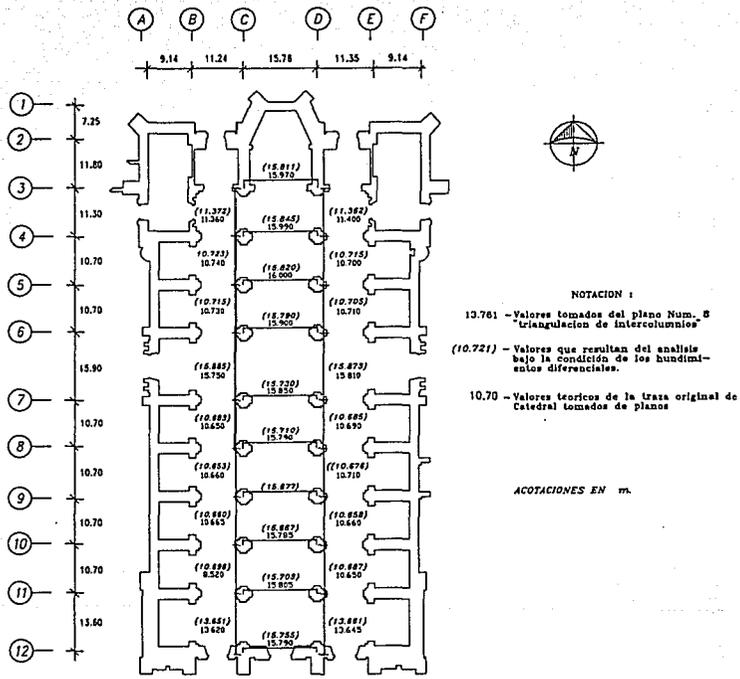
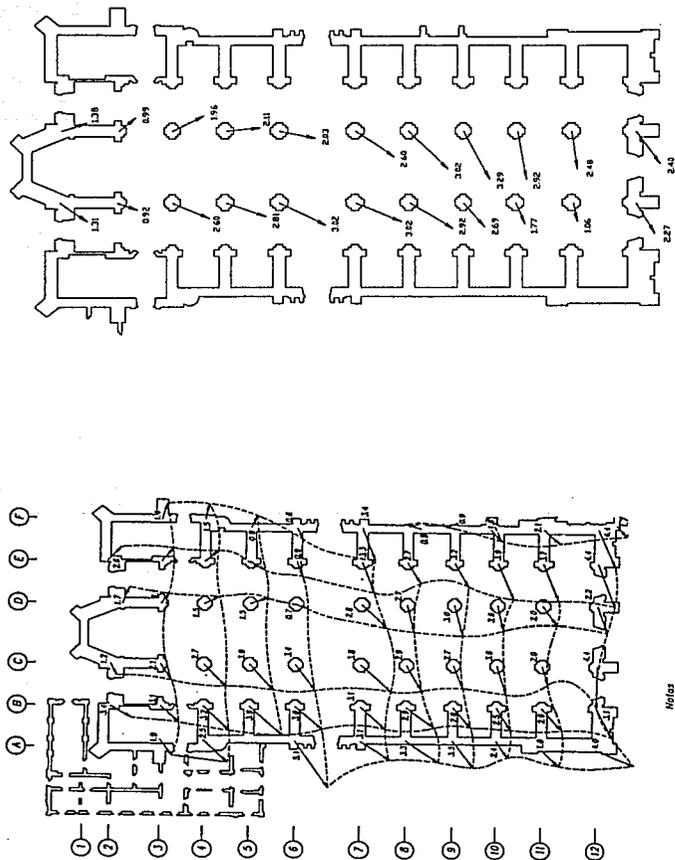


Fig. 5.7 Variación de las distancias de intercolumnios en la nave central a nivel de feligresía.



NOTACION :
 Desplomes relativos en X que se obtienen entre la base del pedraplen y el nivel de losa de feiglesia, debido al hundimiento por hundimientos diferenciales.

Notas
 - Los desplomes anotados en este figur, corresponden al nivel de la base del fuste de las columnas en el primer tramo de la nave principal.
 - La medición se hizo con una alfilería de 1,22 m de longitud.
 Catedral entre Oct y Nov de 1989

Fig. 5.8 Comparación de los desplomes en el primer tramo de columnas y desplazamientos entre la base del pedraplen y el nivel de feiglesia, para la nave principal.

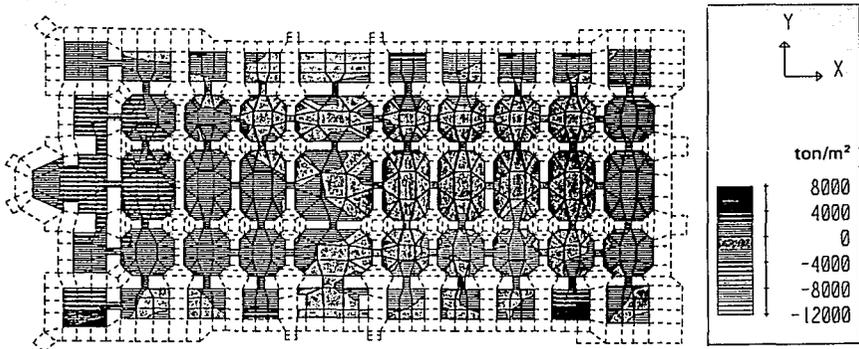


Fig. 5.9 Distribución de esfuerzos σ_{xx} para los elementos placa, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.

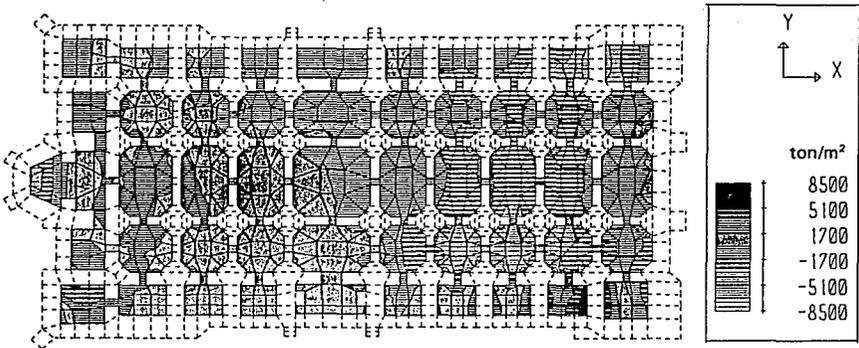


Fig. 5.10 Distribución de esfuerzos σ_{yy} para los elementos placa, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.

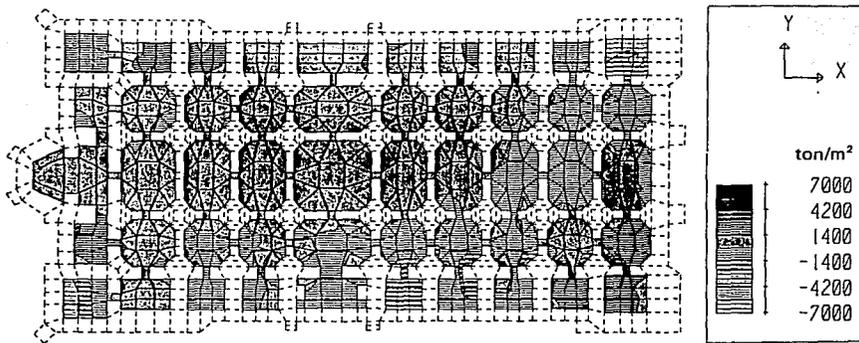


Fig. 5.11 Distribución de esfuerzos cortantes T_{xy} para los elementos placa, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.

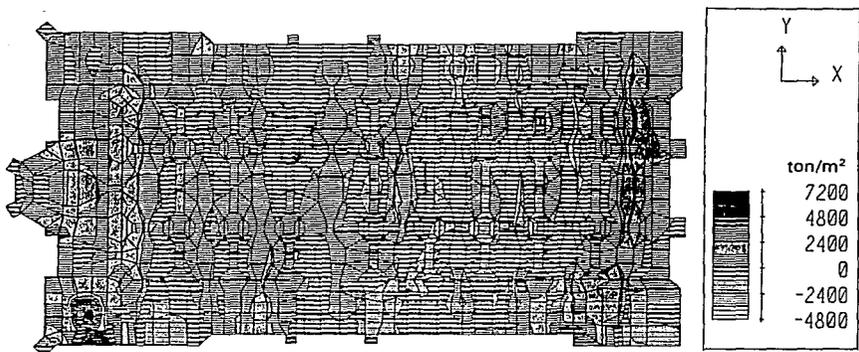


Fig. 5.12 Distribución de esfuerzos normales σ_{xx} para los elementos sólidos, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.

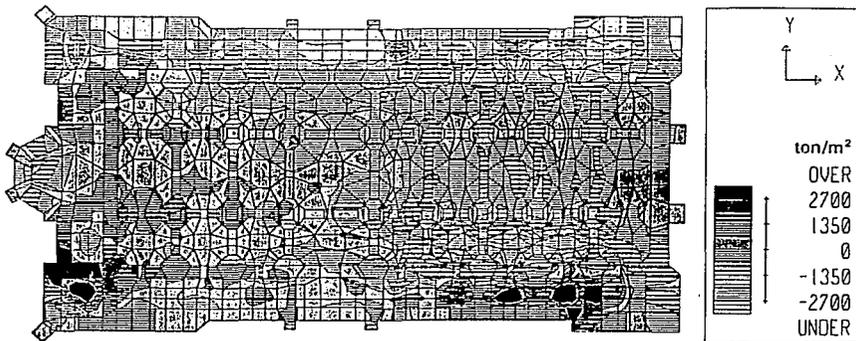


Fig. 5.13 Distribución de esfuerzos normales σ_{yy} para los elementos sólidos, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.

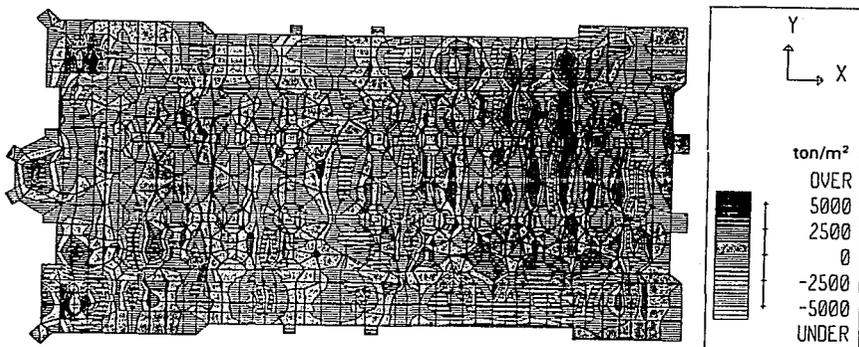


Fig. 5.14 Distribución de esfuerzos normales σ_{zz} para los elementos sólidos, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.

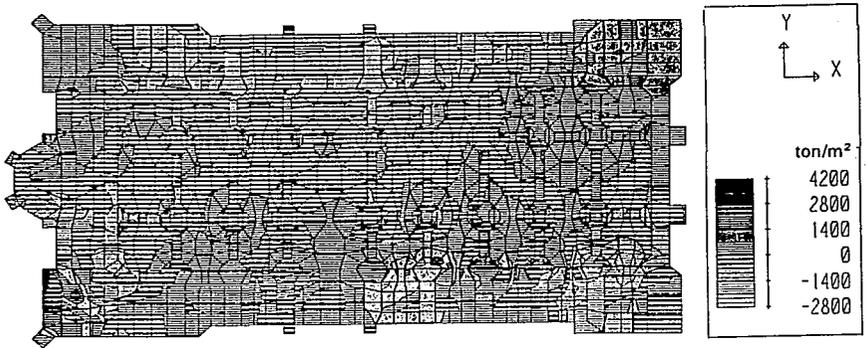


Fig. 5.15 Distribución de esfuerzos cortantes T_{xy} para los elementos sólidos, que resulta del análisis por hundimientos diferenciales.