



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

66
ZED

"ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA PROPUESTA DE
CORRECCIÓN GEOMÉTRICA PARA LA
CATEDRAL METROPOLITANA"

FALLA DE ORIGEN

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

presenta

ALBA NELIDA GARCIA BELTRAN



MEXICO, D.F.

MAYO 1995

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

Señorita
ALBA NELIDA GARCIA BELTRAN
Presente.

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-026/94

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

**"ANALISIS ESTRUCTURAL DE UNA PROPUESTA DE CORRECCION GEOMETRICA
PARA LA CATEDRAL METROPOLITANA"**

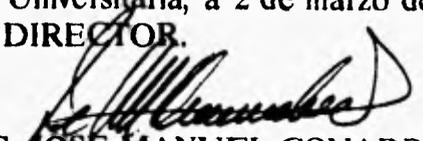
INTRODUCCION

- I. ANTECEDENTES**
- II. DESCRIPCION DE LA PROPUESTA DE CORRECCION GEOMETRICA**
- III. DESCRIPCION DE LOS MODELOS ANALITICOS**
- IV. ANALISIS ESTRUCTURAL DE LA PROPUESTA**
- V. RESULTADOS**
- VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 2 de marzo de 1994.
EL DIRECTOR.


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*nl

*Vivir no es sólo existir,
sino existir y crear,
saber sufrir y gozar,
y en vez de dormir,
soñar.*

Anónimo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1 ANTECEDENTES	4
2 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE CORRECCIÓN GEOMÉTRICA	9
2.1 Objetivos del proyecto de Corrección Geométrica.	9
2.2 Consideraciones tomadas en cuenta para la elaboración de la propuesta.	10
2.2.1 Deformaciones inducidas por los hundimientos diferenciales.	10
2.2.2 Restauraciones anteriores.	10
2.2.3 Concepción Estructural.	11
2.3 Descripción de la propuesta de corrección geométrica.	11
3 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS ANALÍTICOS	14
3.1 Descripción de los ejes analizados	14
3.1.1 Ejes 4 Y 5	15
3.1.2 Ejes 6 Y 7	16
3.1.3 Ejes 8, 9 y 10	16

		II
	3.1.4 Ejes C Y D	17
	3.2 Programa de Cómputo para el análisis	17
4	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA PROPUESTA	19
	4.1 Análisis de la Configuración de Hundimientos.	19
	4.2 Análisis de Pendientes	19
	4.3 Análisis Estructural	20
	4.3.1 Análisis Estructural Elástico	20
	4.3.2 Análisis Estructural Inelástico	20
5	RESULTADOS	22
	5.1 Esfuerzos	22
	5.1.1 Análisis Elástico	22
	5.1.2 Análisis Inelástico	22
	5.2 Desplazamientos	23
	5.2.1 Desplomos	24
	5.2.2 Convergencias	25
	5.3 Pendientes	29
6	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.	31
	AGRADECIMIENTOS	34
	REFERENCIAS	35
	TABLAS	37
	FIGURAS	40

INTRODUCCIÓN

La Catedral Metropolitana es un monumento histórico de valor incalculable, pues forma parte no sólo de nuestro patrimonio cultural, sino que es de interés para América Latina y el mundo entero. (Fig 1)

Este majestuoso monumento colonial situado en el centro de la ciudad de México, puede describirse como una estructura de gravedad donde las fuerzas horizontales son resistidas por los muros laterales. Esta solución estructural y el continuo mantenimiento han logrado que resista una intensa historia sísmica, dos grandes inundaciones y enormes hundimientos diferenciales, siendo éstos últimos los que ponen en peligro la seguridad estructural del monumento.

El hundimiento diferencial acumulado desde la construcción de la Catedral hasta diciembre de 1989 provocó un desnivel máximo de 2.4 m entre el altar mayor y la torre surponiente. Esta deformación se ve reflejada en las grietas que presenta la estructura en arcos, bóvedas, muros y columnas. Además, ha provocado desplomos mayores al 3 por ciento en algunas columnas.

Proyecciones hechas con base en estudios realizados por especialistas en mecánica de suelos, prevén que si no se interviene la Catedral y el Sagrario

Metropolitanos para detener los giros y desplomos de las estructuras provocados por el asentamiento diferencial, ambos templos sufrirán daños irreversibles.

El Sagrario es un templo que se encuentra a un costado del muro oriente de la Catedral y cuya descripción se presenta en la Ref 1.

Por tal motivo, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE, ahora, la Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL, inició en 1989 un complejo y delicado proyecto denominado "Corrección Geométrica de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos" para su rehabilitación. La técnica utilizada para realizar esta corrección es la denominada de subexcavación y se basa en la extracción lenta y controlada del subsuelo, haciendo descender las partes altas respecto a las bajas. En este proyecto intervienen diversas firmas de ingeniería, la Facultad de Arquitectura, FA, y el Instituto de Ingeniería, I de I, ambos de la UNAM.

El I de I apoya la realización del proyecto de restauración, a través del desarrollo de diversos estudios estructurales. Dentro de los que destacan; el desarrollo de modelos analíticos de elemento finito para estudiar su comportamiento estructural durante el proceso de restauración. Además de éstos trabajos, elaboró una propuesta de corrección para la Catedral y el Sagrario la cuál se encuentra ampliamente descrita en la Ref 2.

Por su parte, la FA elaboró una propuesta de corrección geométrica para ambos templos, que consiste en corregir la deformación de la estructura, sufrida en el período entre la construcción de la cripta y 1993. Ante esta perspectiva surgió el interés de conocer la posible respuesta de la estructura ante la propuesta de corrección. Para hacer la evaluación se decidió utilizar como herramienta los modelos analíticos elaborados en el Instituto de Ingeniería,

complementándola con el análisis geométrico de pendientes. En ese sentido, se desarrolló este trabajo cuyos objetivos son:

- a) **Analizar la propuesta de corrección y determinar las acciones que se quieren imponer a la estructura.**
- b) **Realizar el análisis del comportamiento de la estructura ante la acción de la propuesta de corrección geométrica mediante el uso modelos planos de elemento finito; que consideren a la estructura continua y mediante otros que involucren las posibles discontinuidades generadas por la propuesta.**
- c) **Estimar los desplazamientos que experimentará la Catedral ante la propuesta de corrección para:**
 - Determinar la verticalidad de las columnas después de la corrección.**
 - Estimar la variación del claro de las naves de Catedral.**
- d) **Analizar las pendientes de la Catedral y Sagrario metropolitanos inducidos por la propuesta.**

Este trabajo solamente contempla el análisis de la propuesta de corrección elaborada por la Facultad de Arquitectura.

Por último, cabe destacar que este trabajo forma parte del programa de investigación que desarrolla el I de I.

1 ANTECEDENTES

Los españoles decidieron construir la Catedral en el lugar donde se encontraba el centro ceremonial azteca, ubicado en la zona lacustre del valle de México (Fig 2). Como consecuencia, la Catedral ha experimentado desde el inicio de su construcción hundimientos diferenciales de gran magnitud, cuya evolución se estudia con detalle en la Ref 3 y puede resumirse de la siguiente manera:

Los asentamientos desde la colocación del pedraplén fueron debidos a la carga transmitida al subsuelo y a la diferencia de compresibilidad del mismo, ocasionada a su vez por la presencia de estructuras aztecas. Esto provocó que el pedraplén tuviera un espesor variable con un valor promedio de 1 m, siendo mayor en el norte y va disminuyendo hacia el sur; para proporcionar una superficie a nivel que permitiera recibir a las contratabes.

Hacia 1628 todos los muros estaban a más de la mitad de su altura. En 1642 se inició la construcción de las torres y el revestimiento del muro de la fachada con cantera de chiluca. Posteriormente, se suspende la obra por 9 años y en 1651 se hace necesario colocar una hilada de ajuste en los bloques de cantera para absorber el asentamiento diferencial de 22.5 cm de la torre poniente.

Entre 1656 y 1665 se completó la fachada la cual requirió de nuevos

ajustes arquitectónicos, esta vez del orden de 80 cm. (Figs 3 y 4).

Entre 1667 y 1907 continuó creciendo el asentamiento fundamentalmente bajo su peso propio.

De 1907 a 1927 la velocidad de hundimiento se incrementó a 0.4 mm/mes por la perforación de pozos que inicialmente fueron artesianos y después de 1920 requirieron de bombeo.

Entre 1927 y 1956 la ciudad de México sufrió un incremento de población, lo que originó una sobreexplotación de los mantos acuíferos para satisfacer la demanda de agua potable de millones de ciudadanos, ésto se tradujo en el incremento de la velocidad de deformación que varió de 0.8 a 2.6 mm/mes.

De 1956 a 1967 la velocidad de hundimiento regional disminuye, porque se estableció una veda en la apertura de pozos, sin embargo, el asentamiento diferencial continuó a una velocidad de 0.8 mm/mes.

En el período comprendido entre 1967 y 1978 la Catedral soportó la influencia de grandes obras que se construyeron a su alrededor, como la construcción de la línea 2 del metro y el colector semiprofundo.

De 1978 a 1980 la velocidad de deformación diferencial fue de 0.2 mm/mes y la velocidad de deformación regional varió de 4.2 a 8.8 mm/mes.

Con el fin de detener los hundimientos y reducir el daño que causan a la

estructura, la Catedral ha experimentado las siguientes intervenciones.

Primera Recimentación

En 1929 la Comisión Técnica de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos encargó al Arq. Manuel Ortiz Monasterio estudiar la cimentación de la catedral, quien después de hacer una revisión general recomendó realizar las siguientes actividades:

- Retirar el piso de madera existente a nivel de feligresía
- Retirar el relleno de tierra existente entre las contratraves de cimentación.
- Retirar el pedraplén y contratraves de mampostería.
- Colocar una losa de concreto reforzado para dar el piso de feligresía.

De acuerdo con los análisis del Arq. Manuel Ortiz Monasterio al vaciar todas las celdas de cimentación la presión media de contacto disminuiría de 14.33 ton/m² a 10.52 ton/m² con lo que se estimaba reducir los hundimientos diferenciales y con ello las deformaciones de la estructura. Sin embargo, el decremento esperado fue contrarrestado por la construcción posterior de las criptas y el hundimiento diferencial regional.

Segunda Recimentación

En 1975 se llevó a cabo el segundo proyecto de recimentación, esta vez los trabajos estuvieron a cargo del Ing. Manuel González Flores.

El proyecto consistió en hincar 387 pilotes e instalar 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 realizó con base en la longitud de hincado.

En la Ref 3 se encuentra el resultado de esta clasificación y se detallan los trabajos realizados en la primera y segunda recimentación.

Sin embargo, ambas recimentaciones sólo tuvieron un éxito muy limitado y el daño provocado por los hundimientos diferenciales se ha agravado, por lo que a partir de 1989 el Gobierno Federal decidió iniciar un nuevo proyecto de rehabilitación.

De entre las alternativas que se tomaron en cuenta para llevar a cabo este proyecto se encuentran las siguientes:

- a) La técnica de subexcavación.
- b) El hincado de pilotes de fricción negativa
- c) La construcción de pilas ajustables a la primera capa dura
- d) La construcción de pilas ajustables a depósitos profundos

Después de analizar dichas alternativas de corrección se decidió usar la técnica de subexcavación combinándola con el hincado de pilotes de fricción negativa, con el fin de corregir los desplomos y desniveles, actuales y futuros de la Catedral. Para ello fue necesario hacer una serie de perforaciones horizontales, de diámetro pequeño, ejecutadas desde lumbreras o zanjas que permiten el acceso hacia los estratos del subsuelo y desde los cuáles se debe extraer el material bajo el apoyo de la cimentación. El análisis de estas alternativas y el resultado de la técnica de subexcavación como solución más viable se encuentran ampliamente descritos en la Ref 3.

La técnica de subexcavación fue propuesta por Fernando Terracina para detener el crecimiento de la inclinación de la Torre de Pisa, aunque no llegó a emplearse. En México se adoptó con éxito en la recuperación de la verticalidad de varios edificios modernos así como del templo de San Antonio Abad. Mediante

esta técnica y con la ayuda de la gravedad se trata de acelerar el descenso de las zonas más preconsolidadas respecto a las demás, sin buscar detener el descenso del suelo, sino sumándose a él. Con el fin de corregir las deformaciones acumuladas.

Una vez que se seleccionó la técnica de subexcavación se hizo necesario tener una guía para llevar a cabo dichos trabajos de corrección. Después de varios estudios realizados se elaboraron dos propuestas, una la realizó el I de I y se encuentra ampliamente descrita en la Ref 2. La otra fue elaborada por la FA (Refs 4,5 y 6) y consiste en extraer un volumen de suelo que produzca una corrección equivalente a la tercera parte de la deformación total.

El I de I además ha realizado diversos estudios estructurales en apoyo al proyecto de restauración. Asimismo, dada la magnitud y complejidad de la estructura de la Catedral, ha desarrollado diversos modelos de elemento finito para estudiar su comportamiento durante el proceso de restauración. Entre los modelos analíticos desarrollados por el I de I se encuentra el modelo tridimensional del crucero (Ref 7), el modelo de la cimentación y, modelos planos de ejes típicos (Ref 8). Actualmente se está trabajando en la elaboración de modelos analíticos para el Sagrario.

Desde que se inició el proyecto de restauración, en 1989, se ha monitoreado el comportamiento de la estructura.

Por otra parte, se han analizado los modelos planos de los ejes típicos, ante la acción de los desplazamientos medidos a nivel de la cimentación para comparar los desplazamientos del resto de la estructura con los medidos físicamente, esto con el fin de verificar la bondad de los modelos analíticos.

2 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

Esta propuesta fue elaborada en la FA, después de varios estudios cuyas referencias bibliográficas son los trabajos del Dr. Fernando López Carmona sobre el proyecto de reestructuración de la Catedral Metropolitana.

Al respecto, se hará un resumen de la propuesta de corrección geométrica.

2.1 Objetivos del proyecto de Corrección Geométrica

En la propuesta de corrección geométrica se contempla corregir simultáneamente el desnivel que existe entre la torre poniente, el ábside de Catedral y el Sagrario. Con los objetivos siguientes:

- a) Resolver los desplomos de las pilastras
- b) Resolver el alabeo de la cúpula en la porción al sur de la Catedral.
- c) Armonizar el descenso del Sagrario con el trabajo correctivo en Catedral.
- d) Hacer girar hacia adentro los cinturones de contrarresto de las zonas abovedadas de ambos monumentos.

2.2 Consideraciones tomadas en cuenta para la elaboración de la propuesta

La propuesta de corrección geométrica surge de la necesidad de revertir los daños producidos en la estructura por el hundimiento diferencial, generados desde su construcción hasta 1993, para evitar concentraciones agudas de esfuerzos.

2.2.1 Deformaciones inducidas por los hundimientos diferenciales

Entre las deformaciones originadas por el asentamiento diferencial de la Catedral destacan:

- a) La geometría actual de la placa de cimentación sometida al hundimiento de la torre occidental, que interactúa con la preconsolidación del borde oriental saturado de restos prehispánicos, y otra zona dura que corre desde el crucero hasta el ábside a lo largo del borde poniente de la nave central.
- b) El desnivel entre el vértice suroccidental y el borde oriental de la catedral que es de 2.40 m.
- c) Los desplomos de las columnas, principalmente las del crucero central, que han alcanzado valores del 3 por ciento.

2.2.2 Restauraciones anteriores

Se realizaron dos proyectos de recimentación previos al trabajo de restauración que se está llevando a cabo, la primera se realizó en 1940 y la segunda en 1975. Para la elaboración de la propuesta de corrección se tomó en cuenta la realizada en 1940 bajo la dirección del Arq. Manuel Ortiz Monasterio, ya que en ella se considera que debido a la introducción de refuerzos metálicos en la cimentación, ésta cambió de una conducta frágil a una conducta dúctil.

2.2.3 Concepción Estructural

- a) El conjunto monumental fue concebido como una totalidad que incluye a la cimentación, cuya eficacia le ha permitido sobrevivir.(Fig 5).

- b) El sistema que impone las restricciones a los desplazamientos del conjunto abovedado está constituido por las capillas devocionales a ambos lados de la Catedral; al norte, la sala capitular, la sacristía y el ábside, y al sur, las torres y los dos magnos botareles.(Fig 6).

- c) El mantenimiento que consiste en retacar permanentemente las grietas se ha mejorado, y en la actualidad, se reinyectan con morteros fluidos de contracción inhibida al fraguar aplicados por presión hidrostática.

- d) Las grietas reparadas por el mantenimiento en el pasado, ahora serán solicitadas al revés; las zonas retacadas serán comprimidas y las que fueron comprimidas ahora se extenderán.

- e) El sistema abovedado con el mecanismo de falla, Fig 7, y el mantenimiento por inyección permanecerán mientras las restricciones se conserven cercanas a la geometría original.

2.3 Descripción de la propuesta de corrección geométrica

Del total de la deformación sufrida por la Catedral de 1570 a 1993 que alcanza hasta 2.4 m de desnivel entre el ábside y la torre poniente, Fig 8, 80 cm se produjeron durante la construcción del monumento, esta deformación fue

corregida y resuelta por los constructores y por ello se puede definir como una deformación "congénita". Desde 1667 hasta 1935 se produjeron otros 80 cm de deformación, que entonces tenía una cimentación frágil la que fue reforzada en 1940. De 1940 a la fecha aparece una deformación que se debe aceptar como permanente por causa de la introducción de refuerzos metálicos en la cimentación con lo cual ésta cambió de una conducta frágil a una conducta dúctil, en esa ductilidad se funda la propuesta que considera recuperar esos 80 cm de deformación.

Para definir la propuesta de corrección geométrica se hizo corresponder el punto más bajo de la topografía actual con una superficie ideal promedio entre 1667 y 1993, definida a partir del levantamiento de la geometría del edificio y de la situación actual que se usa en vez del dato topográfico de 1940 para considerar los períodos, de 1667 a 1940 donde se produjeron 80 cm de deformación y de 1940 a 1993 en el cual se produjeron 80 cm más. En ese sentido, el primer período corresponde al comportamiento denominado como frágil, mientras que el segundo corresponde al comportamiento denominado como dúctil, ambos con una misma magnitud de deformación. En el caso del Sagrario se trabajó con la nivelación topográfica de 1934 y la nivelación de 1993.

Para determinar el proyecto general de subexcavación, Fig 9, se determinó la diferencia entre las nivelaciones de 1993 y la meta de subexcavación, Fig 10, a partir de ello se puede determinar la velocidad de descenso de todos y cada uno de los puntos de las estructuras durante el trabajo de corrección al subexcavar, simultáneamente, el área que ocupan ambos monumentos.

Con base en una velocidad de descenso de 20 mm/mes, se espera que en un lapso de 3 años se llegue a la meta señalada. La capacidad que se tiene para

manejar las velocidades de descenso permitirá compensar los desajustes que se tengan al iniciar el proceso de subexcavación, sin embargo, se debe tratar de alcanzar lo antes posible la condición descrita en el proyecto para hacer mínimas las concentraciones de esfuerzos. La corrección geométrica que se propone para cada eje tanto de la Catedral como del Sagrario se ilustra gráficamente en las Figs. 11.1 - 11.29.

3 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS ANALÍTICOS

Los modelos planos, de elemento finito, para analizar el comportamiento estructural de los ejes típicos de la Catedral fueron desarrollados considerando a la estructura en una condición ideal, es decir, continua, sin deformaciones y con un comportamiento elástico lineal.

3.1 Descripción de los ejes analizados

Los ejes de la estructura que fueron analizados son los transversales localizados entre los ejes 3 y 11 y los longitudinales C y D, que definen la nave central. Con el análisis de los ejes citados, se obtiene un panorama general del posible comportamiento de la estructura al ser solicitada conforme a la propuesta de corrección geométrica. En las Figs 12 y 13 se muestran los modelos analíticos de los ejes típicos.

De acuerdo con los levantamientos en campo de la geometría de la estructura así como de los estudios experimentales para determinar las propiedades mecánicas de los materiales que constituyen las columnas, se ha estimado con mayor detalle las propiedades geométricas de los elementos

estructurales; las cuales no se han actualizado aún en los modelos planos. Una información más detallada sobre las estas propiedades aparece en la Ref 9.

Para la modelación de los ejes se emplearon las equivalencias geométricas mostradas en la tabla 1 y las propiedades mecánicas de los materiales contenidas en la tabla 2. La ubicación de éstos ejes se representa en la Fig 14.

En la Ref 8 se describe con detalle el desarrollo de los modelos analíticos. A continuación se describen brevemente las características de los ejes analizados.

3.1.1 Ejes 4 Y 5

Los ejes 4 y 5 tienen la misma geometría, están orientados en la dirección transversal del templo y se encuentran al norte del crucero. La parte correspondiente a la superestructura de cada eje la integran cinco naves: dos de capillas o laterales, dos naves procesionales y una nave principal o central. Las naves de capillas involucran los muros de las fachadas laterales y los muros de contrarresto, los cuales tienen en su extremo interior una columna adosada, sobre estos muros descansa una bóveda de 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 por el otro, la columna testicular. Sobre este arco descansa la bóveda de platillo que cubre la nave, así como un arbotante y un contrafuerte. La nave principal incluye al arco formero central que tiene sus arranques en las columnas centrales. Sobre este arco se encuentra una gran bóveda cilíndrica con lunetos.

La subestructura está formada por el pedraplén sobre el que descansan las contratraves las cuales, en la nave central y las naves procesionales, se encuentran cortadas para dar continuidad a los pasillos a nivel de criptas.

También existe una losa que sirve de piso a nivel de feligresía. Los modelos de elemento finito de estos ejes aparecen en las Figs 15a y 15b.

3.1.2 Ejes 6 Y 7

Los ejes 6 y 7 son los ejes transversales que forman el crucero. Por estar en la misma dirección que los ejes 4 y 5 la superestructura está definida por las mismas naves que integran estos ejes. Se distinguen de ellos porque tanto las naves de las capillas como las naves procesionales están formadas por los muros que definen el crucero los cuales alcanzan un nivel igual al de la nave central para servir de base a la bóveda transversal. Estos muros tienen ventanales tanto a media altura como en su extremo superior.

Otra de las características que los distinguen de los ejes 4 y 5, es que en sus extremos cuentan con dos robustos y pesados contrafuertes que sirven para contrarrestar el empuje de las bóvedas y para dar estabilidad a los muros que forman las fachadas laterales. Además, la nave principal con sus cuatro columnas centrales como base y su arco formero reciben al tambor de la cúpula principal. Los modelos de elemento finito de estos ejes aparecen en las Figs 15c y 15d.

3.1.3 Ejes 8, 9 y 10

El eje 8 es un eje transversal que se localiza al sur del crucero. Este eje es semejante a los ejes 4 y 5, y se diferencia de estos porque no existe el dintel sobre la bóveda de la nave central .(Fig 15e).

Los ejes 9 y 10 son semejantes entre sí y se diferencian del eje 8 por no tener los arbotantes que se encuentran sobre las naves de capillas y sobre las naves procesionales. (Fig 15f).

3.1.4 Ejes C Y D

Los ejes C y D de Catedral son longitudinales, Fig 16, están constituidos por los siguientes elementos: al norte el muro del ábside que cuenta con un robusto contrafuerte del lado norte, y una columna adosada del lado sur, después hay tres columnas aisladas sobre las cuales descansan tres arcos de medio punto, los que a su vez sirven de base para recibir muros con ventanales semejantes a los que tienen los ejes 6 y 7. Enseguida se encuentra la nave del crucero donde se ubica un arco formero que recibe la base del tambor de la cúpula principal. Al sur del crucero se tienen cinco columnas aisladas y una columna adosada al muro de fachada, que reciben a otros cinco arcos de medio punto que al igual que los anteriores sirven de base a los muros con ventanales.

La cimentación, al igual que en los ejes anteriores está determinada por el pedraplén, las contratrabes con sus cortes para los pasillos y la losa de feligresía.

3.2 Programa de Cómputo para el análisis

El programa de cómputo que se utilizó para el análisis es el SAP 90 (Ref 10), dicho programa es una adaptación del SAP IV; que se desarrolló en lenguaje Fortran y se puede ejecutar en una computadora personal.

El SAP 90 permite realizar análisis de tipo elástico-lineal de estructuras planas y tridimensionales sometidas a solicitaciones estáticas o dinámicas.

Una de las características importantes del SAP 90 es que cuenta con un preprocesador, que facilita la preparación de datos y un posprocesador llamado SAPLOT, que proporciona un el despliegue gráfico de los resultados.

El programa SAP 90 puede analizar diversos elementos. Por ejemplo los modelos que se utilizaron para el análisis fueron desarrollados con elementos ASOLID. Estos elementos permitieron modelar a la estructura con un comportamiento asociado a un estado plano de esfuerzos.

4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA PROPUESTA

4.1 Análisis de la Configuración de Hundimientos

Para alcanzar la meta del proyecto de corrección geométrica es necesario transformar la configuración que tiene actualmente la Catedral en la que tenía en 1940. Para ello se determinó la diferencia entre el perfil de 1993 y la meta de subexcavación. Con el fin de comprender las distorsiones a que se verían sometidos los monumentos si se lleva a cabo el proceso de corrección. En las Figs. 11.1 - 11.29 se ilustra: el perfil de correspondiente a la nivelación de 1993, el perfil correspondiente a la meta de subexcavación y el perfil de la diferencia entre los dos anteriores. Éste último está graficado a diferente escala la cual, representa la distorsión que habría que imponer a nivel de feligresía.

4.2 Análisis de Pendientes

Los perfiles de diferencias permiten determinar las pendientes que se inducirían con la propuesta de corrección. A partir de ellos se determina la diferencia de desniveles que existe entre ejes de columnas, y al dividir ese desnivel entre la distancia que hay de eje a eje se obtiene el cambio de pendientes.

4.3 Análisis Estructural

Los modelos se analizaron exclusivamente ante la acción de hundimientos diferenciales. Para definir esta acción se obtuvieron las diferencias entre los perfiles de 1993 y la meta de subexcavación (Figs 11.3 - 11.9 y 11.14 - 11.15), al resultado se le restó la diferencia menor para obtener la configuración de hundimientos relativa al punto de menor hundimiento. De esta manera, a los desplazamientos verticales (D_y) que se obtengan como resultado del análisis se les debe sumar la diferencia menor entre el perfil de 1993 y la meta, para obtener los desplazamientos totales que se generarían con la propuesta de corrección. Se realizaron dos tipos de análisis cuyas características se describen a continuación.

4.3.1 Análisis Estructural Elástico

En este análisis se supone fundamentalmente que las propiedades de los materiales se mantienen en el rango elástico y bajo esta hipótesis se realizó, considerando a la estructura ideal, es decir; sin deformaciones, continua y con un comportamiento elástico-lineal. Se evaluaron los desplazamientos de la estructura, y a partir de ellos se estimaron los desplomos de las columnas de la nave central y los cambios de convergencias de las naves.

4.3.2 Análisis Estructural Inelástico

Los resultados del análisis elástico indican que en buena parte de la estructura, se inducirán tensiones superiores a las que puede resistir la mampostería, lo cual produciría discontinuidades importantes en los elementos estructurales. Las cuales al presentarse modificarían la magnitud y dirección de los desplazamientos. Para tratar de obtener una mejor aproximación de la posible

respuesta estructural, se redujo el módulo de elasticidad de los materiales en las zonas sujetas a esfuerzos de tensión elevados.

El modelo así modificado se analizó suponiendo un comportamiento elástico de los materiales, sin embargo, por el hecho de haber reducido radicalmente los módulos de elasticidad en algunas zonas se decidió identificar este nuevo modelo como "inelástico".

El proceso para considerar la falta de capacidad del material para resistir tracciones se realizó por medio de iteraciones reduciendo el valor de los módulos de elasticidad, en las zonas más tensionadas, y se realizó el análisis estructural. Ésto se repitió hasta producir una redistribución de esfuerzos donde el valor de las tensiones en las zonas más susceptibles a sufrir agrietamiento fueran del orden de 5 kg/cm².

Generalmente, las zonas con valores altos de tensión se localizaron en las bóvedas de las naves, arbotantes, arcos y muros de capillas.

En las Figs 15 y 16 se muestran los elementos a los que se les redujo el módulo de elasticidad.

Para este análisis al igual que para el elástico se evaluaron desplazamientos, desplomos y convergencias.

5 RESULTADOS.

5.1 Esfuerzos

5.1.1 Análisis Elástico.

Al inducir en la estructura los desplazamientos necesarios para alcanzar la meta de subexcavación, la mayor parte de ésta se sometió a esfuerzos de tensión elevados en las dos direcciones, particularmente, en las bóvedas de las naves procesionales, en las bóvedas de la nave central, en los muros de capillas y en los arbotantes sobre las naves procesionales (un caso típico aparece en la Fig 17). Por tanto, se identificaron estas zonas como regiones en las que se presentarían posibles agrietamientos los que a su vez disminuirían la rigidez de la estructura y provocarían una redistribución de esfuerzos.

5.1.2 Análisis Inelástico.

En este análisis las tensiones disminuyen de manera significativa adquiriendo valores menores a los 5 kg/cm², sin embargo, al liberarse las tensiones de las zonas abovedadas, los esfuerzos de tensión en la esquina que forman los muros de capillas con el piso de feligresía y las contratraves de la cimentación se incrementan.

En la Fig 18 aparece un ejemplo representativo de la variación que se tiene de los niveles de esfuerzos al realizar un análisis inelástico.

5.2 Desplazamientos

La configuración deformada y los desplazamientos en puntos de interés como resultado de los análisis elástico e inelástico se ilustran en las Figs 19 - 36.

Cabe recordar que para obtener los desplazamientos verticales totales de cada uno de los ejes, se les debe sumar a los desplazamientos obtenidos del análisis, D_y , la diferencia menor entre los perfiles de 1934 y la meta de subexcavación. Por ejemplo, para obtener los desplazamientos totales del eje 4 a los desplazamientos relativos se les deberá agregar un desplazamiento uniforme de 570 mm, de esta manera el punto 5 de la Fig 19 deberá tener un desplazamiento total de 570 mm en lugar del valor de cero.

Al realizar esta operación se comprobó que los desplazamientos en la base de la cimentación de los modelos y los desplazamientos establecidos en el proyecto de corrección son los mismos.

En las Figs 19 - 36 se observa que en un análisis de tipo elástico las deformaciones se distribuyen en todos los elementos del modelo; sin embargo, en un análisis de tipo inelástico las deformaciones se concentran, principalmente, en los elementos a los que se les redujo el módulo de elasticidad.

En los ejes 4 y 5 la zona comprendida entre los ejes A y E gira hacia el poniente, acentuándose este giro en la nave de capillas y entre los ejes E y F el giro se da en la dirección opuesta, hacia el oriente, Figs 19 - 22. En los ejes 8, 9 y 10 la zona comprendida entre los ejes B Y F gira hacia el oriente y la zona entre A y B gira hacia el poniente. (Figs 27 - 32).

La configuración deformada los ejes 4 y 5 muestra que las naves procesionales girarían junto con los muros de capillas hacia afuera reduciendo la efectividad del cinturón de contrarresto.

El eje 6 muestra un giro hacia el poniente, sin embargo, el eje 7 gira en la dirección opuesta, es decir, hacia el oriente.(Figs 23 - 26).

Los ejes longitudinales giran de forma irregular hacia el norte; es importante destacar que el giro se da del eje 8 hacia el ábside, y del eje 9 hacia el sur prácticamente no se mueve de hecho del eje 11 al 12 se presenta un giro hacia el sur. Esta situación genera deformaciones importantes, sobretodo, en los arcos y muros localizados al sur del eje 8.(Figs 33 - 36).

5.2.1 Desplomos.

En la Fig 37 se representan los desplomos iniciales de las columnas de la nave central, y los que se tendrían como resultado de la propuesta a partir de un análisis elástico y un inelástico, en un sistema de referencia común, tomando como origen el centro de cada columna. Esta figura es una representación conjunta del movimiento de todas las columnas.

En el caso del análisis elástico el movimiento tiene una tendencia clara hacia el norte. Para el análisis inelástico el movimiento no presenta una tendencia definida.

La Fig 38 es una representación más detallada sobre el movimiento de las columnas. De esta figura se puede destacar que la columna C7, de acuerdo con los resultados de los dos tipos de análisis, incrementa su desplomo en un 6.7 por ciento y la columna C9 que es la más desplomada, para un análisis inelástico

incrementa su desplomo de 3.4 por ciento a 3.7 por ciento.

Como resultado del análisis de la Fig 38 se tiene la Fig 39 en la que se muestra la corrección de cada una de las columnas en por ciento. De esta figura se concluye que la corrección máxima, para un análisis elástico, la tiene la columna C10 con una corrección del 19 por ciento y la columna D5 es la que presenta un mayor incremento en su desplomo, del 30 por ciento.

Para un análisis inelástico solo las columnas C4 y C6 se corrigen esta corrección es de 9 y 7 por ciento respectivamente. Las demás columnas, excepto la C5, que no se mueve, no solo no se corrigen sino que incrementan su desplomo hasta en un 24 por ciento.(Fig 39).

La tabla 3 muestra el desplomo total de las columnas de la nave central, antes y después de realizar los trabajos de corrección, para un análisis elástico y un inelástico.

5.2.2 Convergencias

En las Figs 40 y 41 se representa esquemáticamente el efecto de la propuesta traducido en la variación del claro de las naves de Catedral, tanto para un análisis elástico como para un inelástico. Las convergencias se obtuvieron a 3 diferentes alturas como se muestra en las mismas figuras.

En el caso de un análisis elástico, Fig 40, se obtienen los siguientes resultados:

La nave procesional poniente se abre, a la altura de plintos y a la altura de capiteles de las naves procesionales, posición baja y media respectivamente.

La nave central a la altura de plintos muestra un cierre del eje 4 al eje 7 mientras que del eje 8 al eje 10 tiende a abrirse. A la altura de capiteles de las naves procesionales se presentan aberturas.

La nave procesional oriente muestra una abertura a nivel de plintos en los ejes 4,5 y 7 y en los restantes un cierre. A la altura media la nave se abre del eje 4 al 8 y los restantes se cierran.

Además de obtener la variación del claro de las naves en sentido transversal, también se determina esta variación en sentido longitudinal para los ejes C y D.

El eje C presenta una abertura general; excepto en los siguientes casos: a nivel de plintos presenta un cierre en los tramos 3-4, 4-5 y 6-7, a la altura media se produce un cierre del claro en los tramos 3-4, 6-7 y 8-9, y en la posición alta se produce un cierre en los tramos 3-4, 6-7, 8-9 y 10-11.

El eje D, a nivel de plintos tiene un comportamiento semejante al eje C excepto para el tramo 6-7, del crucero, ya que para el eje D éste se abre. A la altura de capiteles de las naves procesionales y a la altura de capiteles de la nave central se tiene un comportamiento similar al eje C, excepto en los tramos 3-4 y 7-8 de la zona alta.

Para el caso de un análisis inelástico, Fig 41, se tiene lo siguiente:

La nave procesional poniente muestra aberturas en las dos alturas en que se obtuvieron las convergencias, sin embargo, al provocar que el eje 6 gire en sentido contrario al eje 7, la nave procesional poniente sufre una gran abertura

en el eje 6 y en el 7 sufriría un cierre imperceptible, y en la nave procesional oriente ocurre lo contrario.

La nave central en la posición baja se cierra, en la parte media de produce un cierre para los ejes 4, 5 y 8 a 10, y en la parte alta el crucero y el eje 5 se abren.

La nave procesional oriente, del eje 7 hacia el norte se abre y del 8 al 10 se cierra. Esto ocurre para las dos posiciones en que se obtiene la variación del claro.

El eje C, a nivel de plintos presenta un cierre solamente en los tramos 3-5 y 6-7, en la parte media se cierran los tramos 3-4, 6-7 y 8-9, y en la parte alta se cierran los tramos 3-4, 6-7, 7-8 y 8-9.

El eje D, en la parte baja se abre, excepto en los tramos 3-4, 4-5 y 7-8, en la parte media tiende a abrirse excepto en los tramos 3-4 y 6-7, y en la parte alta solo se cierra del crucero hacia el norte.

En las figuras 40 y 41 se ilustra el cierre o abertura en mm del claro de las naves, obtenidos a partir de un análisis elástico y un inelástico. No obstante para hacer más clara la diferencia de los resultados entre los dos tipos de análisis se presenta la variación del claro de manera gráfica en las Figs 42 a 46. De las cuales se derivan los comentarios siguientes:

La nave procesional poniente presenta una abertura en los ejes 4 al 10 a nivel de plintos. La abertura máxima se encuentra en el eje 10 con un valor de 73 mm, ésto es para un análisis elástico, ahora bien, al realizar un análisis inelástico también se tiene una abertura en los ejes 4 al 10 y la abertura máxima se

presenta en el eje 10, sin embargo, las magnitudes de las aberturas son mucho mayores y en lugar de tener una abertura de 73 mm se tiene una de 113 mm en el eje 10. (Fig 42). Esta diferencia es mucho más drástica a nivel de capiteles de las naves procesionales, ya que la diferencia entre los valores es mayor al 300 por ciento.

La nave procesional oriente tiene un comportamiento similar en las dos alturas, la variación de los claros es mucho mayor para un análisis inelástico. (Fig 43).

Para un análisis de tipo elástico la variación del claro de la nave central a nivel de plintos es de poca magnitud, a nivel de capiteles de las naves procesionales y de la nave central se presentan aberturas importantes. Para un análisis inelástico la nave central se cierra, excepto en el crucero central, empero, el cierre que se produce es muy pequeño si se compara con la magnitud de las aberturas que se tendrían que dar en las naves procesionales. Esto implicaría que el cierre de poca magnitud que se da en la nave central se logra en detrimento de las naves procesionales. (Fig 44).

En el eje C, a nivel de plintos el comportamiento de la variación del claro es similar tanto para un análisis elástico como para un inelástico, pero del crucero central hacia el sur la diferencia entre los valores se incrementa, siendo mayores los obtenidos mediante un análisis inelástico. A nivel medio se presenta una variación de comportamiento del tramo 8-9 al tramo 11-12, de acuerdo con los resultados de un análisis elástico se produce un cierre incipiente y los resultados de un análisis inelástico muestran que los mismos tramos presentan una abertura mucho mayor al cierre del resultado elástico. En la parte alta se presenta una situación similar a la anterior excepto que la variación en el comportamiento es más amplia. (Fig 45).

A nivel de plintos los resultados de los análisis elástico e inelástico muestran un comportamiento similar para el eje D, solo que la variación de la magnitud de los claros es un poco mayor en el caso del análisis inelástico, A nivel medio del tramo 8-9 al tramo 10-11 para un análisis elástico, el eje D, presenta cierres, mientras que para un análisis inelástico se tienen aberturas presentando una abertura mayor en el tramo 9-10 con un valor de 18 mm. (Fig 46).

5.3 Pendientes

Los cambios de pendientes que se deducen de la propuesta de corrección se ilustran en la Fig 47. A partir de ella se pueden hacer los comentarios siguientes:

La nave central del eje 2 al 5 gira de forma irregular hacia el poniente y del eje 6 hacia el sur gira hacia el oriente de la misma forma. Con ésto se estaría produciendo una torsión en el tramo 5-6, lo cuál se puede apreciar claramente en la Fig 48.

La nave de crucero, del eje A al E, gira hacia el norte y el eje F gira hacia el sur, provocando una torsión en el tramo E-F. Todas las pendientes, aún las que tienen igual sentido, tienen valores diferentes. Estos cambios de pendiente se ilustran en la Fig 49.

A la sala capitular también se le provocaría una torsión al darle una pendiente de -1.75 por ciento en el norte y otra de 1.094 por ciento en el sur.

La sacristía gira hacia el oriente y la nave procesional oriente del crucero central hacia el norte gira en dirección opuesta, hacia el poniente.

La parte sur de la zona de crucero, eje 7, giraría hacia el oriente, y la parte norte excepto el tramo C-D giraría hacia el poniente, con lo que se estaría provocando una torsión en la zona del crucero.

En la misma Fig 47 se observa que la mayor parte de la nave de capillas poniente gira hacia el poniente y la parte norte de la nave de capillas oriente gira hacia el oriente .

Por otra parte también se puede observar que las pendientes que se encuentran en la unión de la Catedral con el Sagrario, en la dirección N-S, no son las mismas, y de hecho, en el tramo 1-2 del sagrario las pendientes son contrarias. Lo cual no sería posible porque en esta parte la cimentación es común a ambos monumentos.

En el Sagrario se observa que del eje H al K la estructura giraría al poniente. Y del eje F' al H la estructura giraría hacia el oriente. Aunque todos los giros varían en magnitud esto produciría un cierre favorable de la nave principal de este templo.

En la Fig 50 se presenta en forma gráfica las pendientes que se inducirán con la propuesta, en ella se observa que en la dirección E-W el 83 por ciento de las pendientes son menores al 1 por ciento y en la dirección N-S el 86 por ciento de las pendientes son menores al 1 por ciento, habiendo una pendiente mayor al 2.5 por ciento. Ahora bien, para el Sagrario, Fig 51, solo el 56 por ciento de las pendientes, en las dos direcciones, son menores al 1 por ciento, habiendo pendientes mayores al 6 por ciento en dirección N-S, esto en la esquina suroriental.

6 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Los resultados que se presentan en este trabajo constituyen un esfuerzo para estimar la posible respuesta de la estructura ante la propuesta de corrección geométrica, elaborada por la Facultad de Arquitectura de la UNAM, para la Catedral de la Cd. de México.

De acuerdo con este estudio los objetivos de la propuesta obedecen a la problemática del templo sin embargo, el proyecto que se desarrolló para alcanzarlos no presenta resultados congruentes con dichos objetivos, así lo muestran los resultados de este trabajo, del cual se derivan las conclusiones siguientes:

El desnivel entre los puntos C3 y A12 se reduce en 75 cm. En la Fachada sur el desnivel entre los puntos A12 de la Catedral y H6 del Sagrario se reduce 45 cm, por otra parte, llama mucho la atención el desnivel que se trata de producir en la fachada sur del Sagrario entre los ejes H y K ya que de acuerdo con los objetivos de la propuesta, habría que levantar el punto K6 más de 20 cm, para producir un desnivel de 65 cm, de los cuales 55 cm se producen entre los ejes I y K lo que implicaría un cambio de pendiente superior al 6 por ciento en esos mismos ejes.

Otra de las problemáticas del proyecto se presenta en el movimiento que se trata de inducir en la zona sur de la Catedral, sobre todo, en los sitios donde se localizan las torres, dado que la torre poniente giraría hacia el sur y hacia el poniente con lo cual incrementaría su desplomo además de que produciría serios agrietamientos en su unión con los muros de las fachadas, y en la torre oriente se tiene un diagnóstico similar ya que la torre debería girar hacia el oriente y no hacia el poniente como se propone en el proyecto. Por lo que respecta a la zona central de la fachada, de acuerdo con el proyecto, esta giraría en la dirección correcta, hacia el oriente, pero dicho movimiento es incompatible con el que se trata de inducir en las torres.

Por lo que respecta a la modificación de la verticalidad en muros y columnas se determinó que no se da una corrección generalizada en toda la estructura. En el caso particular de las columnas que definen la nave central, los resultados de los análisis de tipo elástico indican que el 50 por ciento corrige su desplomo en el mejor de sus casos en un 18 por ciento, y el resto de las columnas incrementa su desplomo hasta en un 30 por ciento. Para el caso de los análisis de los modelos que suponen variación en la rigidez de los materiales los resultados muestran un escenario más desalentador; el 79 por ciento de las columnas incrementan su desplomo hasta en un 28 por ciento, una columna no modifica su desplomo, y dos lo corrigen cuando más en un 6 por ciento.

El objetivo de hacer girar hacia adentro el cinturón de contrarresto de las zonas abovedadas no se logra en la mayor parte de la estructura. Así lo muestran los resultados de los análisis sobre todo, en las configuraciones deformadas de los modelos de elemento finito de cada eje, una visión general que corrobora lo anterior la constituyen los resultados del análisis geométrico de pendientes.

Por lo que respecta a los modelos analíticos, los resultados se deben considerar como indicativos de la posible respuesta estructural, pues se debe tener presente el alcance de estos modelos, no obstante, los resultados obtenidos de los análisis de tipo geométrico son congruentes con los primeros.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se considera que la nivelación que se usó de 1934 se debe revisar cuidadosamente dado que se pudo observar que al tratar de producir la situación de ese entonces, la estructura además de corregir su hundimiento diferencial sufriría distorsiones que le provocarían severos daños. Si la nivelación de 1934 fuera correcta se podría suponer que la Catedral en aquella época estaba en peores condiciones que en 1993.

Por último, se recomienda que se revise dicho proyecto y que se efectúen las adecuaciones necesarias para que se cumplan los objetivos. Se sugiere que una vez realizadas dichas adecuaciones se vuelva a evaluar la propuesta con las mismas herramientas que se utilizaron en este trabajo, y se complementen mediante un modelo tridimensional de elementos finitos, para tener una visión general de la respuesta estructural de todo el conjunto.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, especialmente, a la Facultad de Ingeniería, por la formación profesional que me proporcionó y de la cual me siento muy orgullosa.

Al Instituto de Ingeniería por las facilidades brindadas en la elaboración de este trabajo.

A la Facultad de Arquitectura, especialmente al Dr. Fernando López Carmona por la información proporcionada.

A la Secretaría de Desarrollo Social, por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

Y por último, un reconocimiento muy especial al Ing. A. Roberto Sánchez R., ya que gracias a su apoyo y comprensión fue posible la realización de este trabajo.

REFERENCIAS.

- 1** Sánchez Ramírez A.R., Meli Piralla, R., Serrano R., Rodríguez G., Ballinas J., "Estudios estructurales de apoyo al proyecto de rehabilitación del Sagrario Metropolitano", (Memoria II p. 618), X Congreso de Ingeniería Civil. Zacatecas. Zac. Octubre 29, 30, y 31 y Noviembre 1o. de 1994. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. , Universidad Autónoma de Zacatecas.
- 2** Sánchez Ramírez A.R., Meli Piralla R., "Bases para definir el programa de subexcavación de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos". Informe técnico 93/08. Instituto de Ingeniería UNAM. Diciembre de 1993.
- 3** Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), "Estudio de las Cimentaciones de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos". Editorial de los Talleres Gráficos de la Nación. México 1990.
- 4** López, Carmona F., "Catedral Metropolitana y Sagrario Anexo". Centro Histórico de la Ciudad de México. México 1993.
- 5** López, Carmona F., "Proyecto Reestructuración Catedral Metropolitana". México 1994.

- 6 López, Carmona F., "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.
- 7 Cortes, Quezada M. 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.
- 8 García, Rodríguez P., "Estudio Sobre el Comportamiento Estructural de la Catedral Metropolitana Previo al Proceso de Restauración". Tesis para obtener el Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, UNAM. México 1993.
- 9 Peña, Mondragón F., "Comportamiento Estructural de la Catedral de la Ciudad d México ante hundimientos diferenciales". Tesis para obtener el Título de ingeniero Civil. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán, UNAM. México 1995.
- 10 Wilson E. L., Abibullah A., "SAP 90 - Series of computer program for the Finite Element Analisis of Estructures, Users Manual". Version P5.40. Berkeley, California 1989.

TESIS SIN PAGINACION

COMPLETA LA INFORMACION

Tabla 1. Geometría y Secciones equivalentes empleadas para definir los elementos estructurales en los modelos.

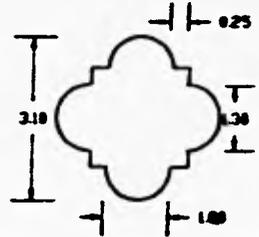
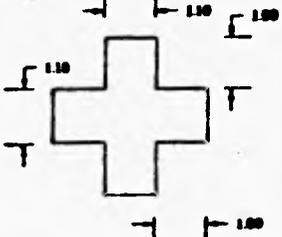
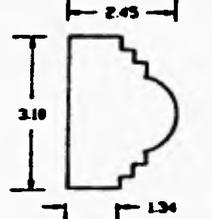
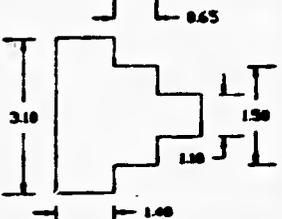
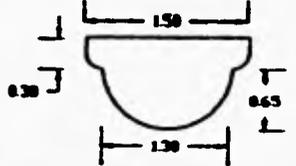
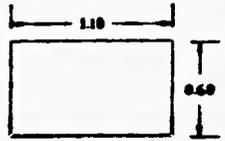
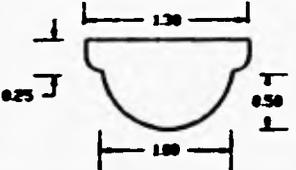
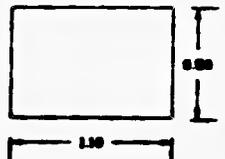
SECCION	GEOMETRIA		AREA		INERCIA REAL		INERCIA EQUIV.		REL DE INERCIAS	
	REAL	EQUIVALENTE	REAL (m ²)	EQUIV (m ²)	I _{xx} (m ⁴)	I _{zz} (m ⁴)	I _{xx} (m ⁴)	I _{zz} (m ⁴)	I _{xx}	I _{yy}
COLUMNA CENTRAL			5.894	5.610	4.724	4.724	5.130	5.130	1.085	1.085
COLUMNA ADOSADA A LOS MUROS			5.843	5.665	3.772	2.279	3.633	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 DE CRUCERO			0.883	0.870	0.035	0.081	0.047	0.089	1.34	1.10

Tabla 2. Propiedades Mecánicas de los Materiales.

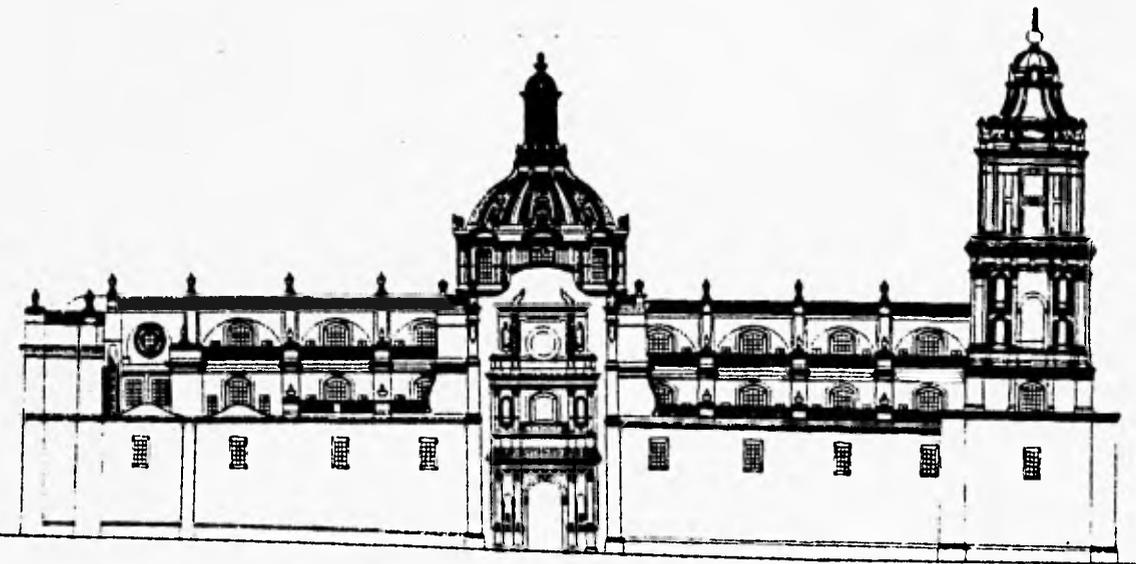
PROPIEDADES MECANICAS DE LOS MATERIALES				
MATERIAL	ELEMENTOS	PESO VOLUMETRICO (ton/m ³)	MODULO DE ELASTICIDAD (ton/m ²)	RELACION DE POISSON
MAMPOSTERIA	muros, bóvedas, pedraplén y contratraves	1.6	200 000	0.20
CANTERA	columnas y arcos	1.8	1000 000	0.15
CONCRETO	refuerzo de la cimentación y losa de feligresía	2.4	1 200 000	0.10

Tabla 3. Comparación de los desplomos medidos en 1993 y de los que se tendrían después de los trabajos de corrección.

DESPLOMOS DE LAS COLUMNAS DE LA NAVE CENTRAL									
DESPLOME MEDIDO				DESPLOME DESPUES DE LA CORRECCION					
				MODELO ELASTICO			MODELO INELASTICO		
COLUMNAS	Dx (mm)	Dy (mm)	TOTAL (mm)	Dx (mm)	Dy (mm)	TOTAL (mm)	Dx (mm)	Dy (mm)	TOTAL (mm)
C-4	-383	-176	422	-320	-188	371	-345	-187	392
C-5	-434	-201	478	-355	-229	423	-418	-229	477
C-6	-516	-213	558	-417	-243	482	-466	-242	525
C-7	-463	-357	584	-527	-359	638	-514	-329	611
C-8	-411	-297	507	-408	-295	504	-539	-263	600
C-9	-554	-362	661	-494	-341	600	-640	-311	712
C-10	-546	-273	611	-441	-242	503	-601	-246	649
D-4	94	-149	176	76	-181	196	126	-179	219
D-5	-14	-141	142	-20	-180	181	-8	-175	175
D-6	-88	-158	181	-8	-198	198	-65	-192	203
D-7	-243	-244	344	-328	-241	407	-303	-231	381
D-8	-311	-233	388	-393	-239	460	-422	-229	480
D-9	-322	-401	514	-367	-397	541	-391	-391	553
D-10	-377	-260	458	-367	-239	438	-393	-257	469



a) Fachada Principal (Sur).



b) Fachada Lateral (Poniente).

Fig. 1 Fachadas.

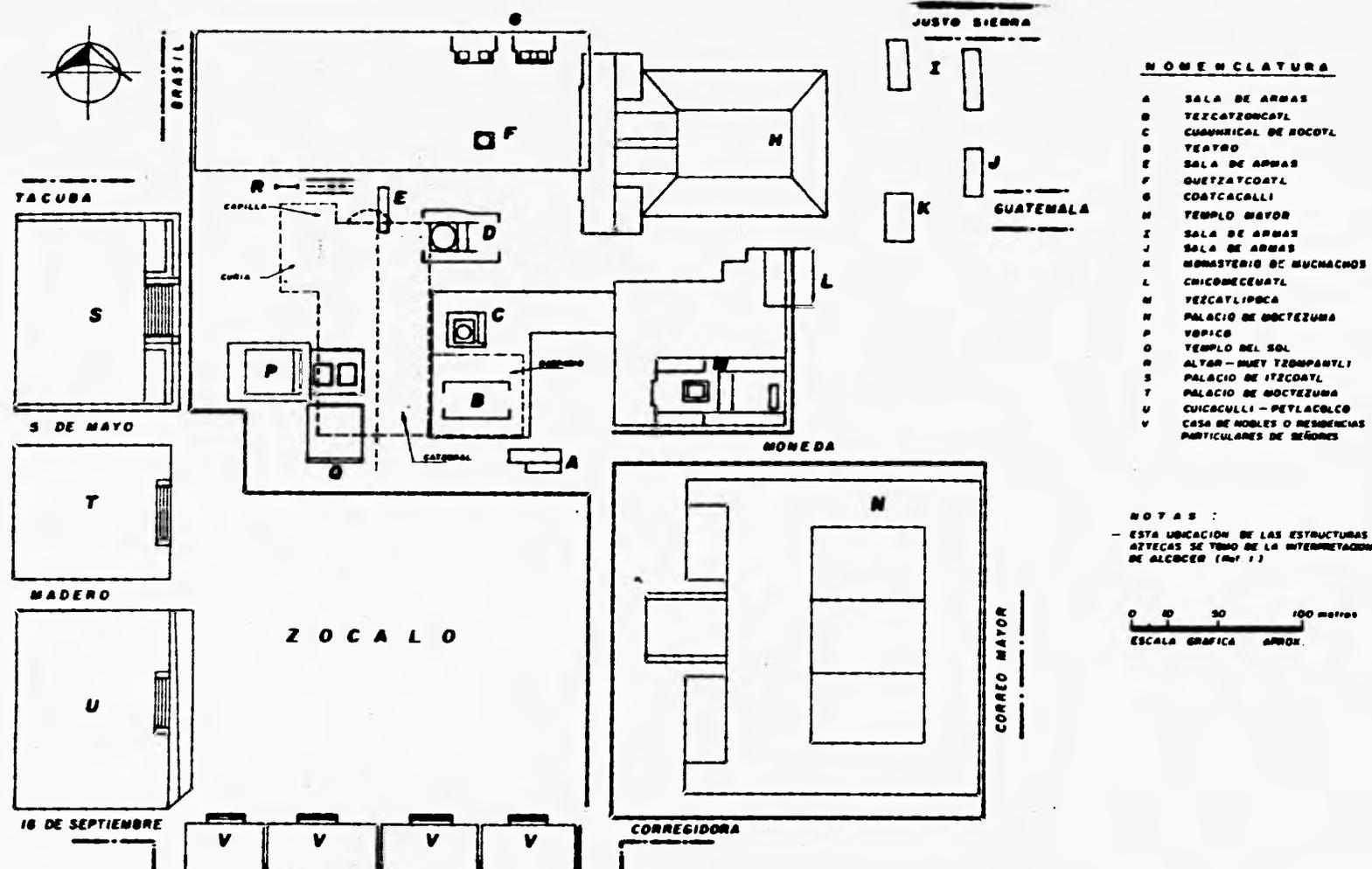
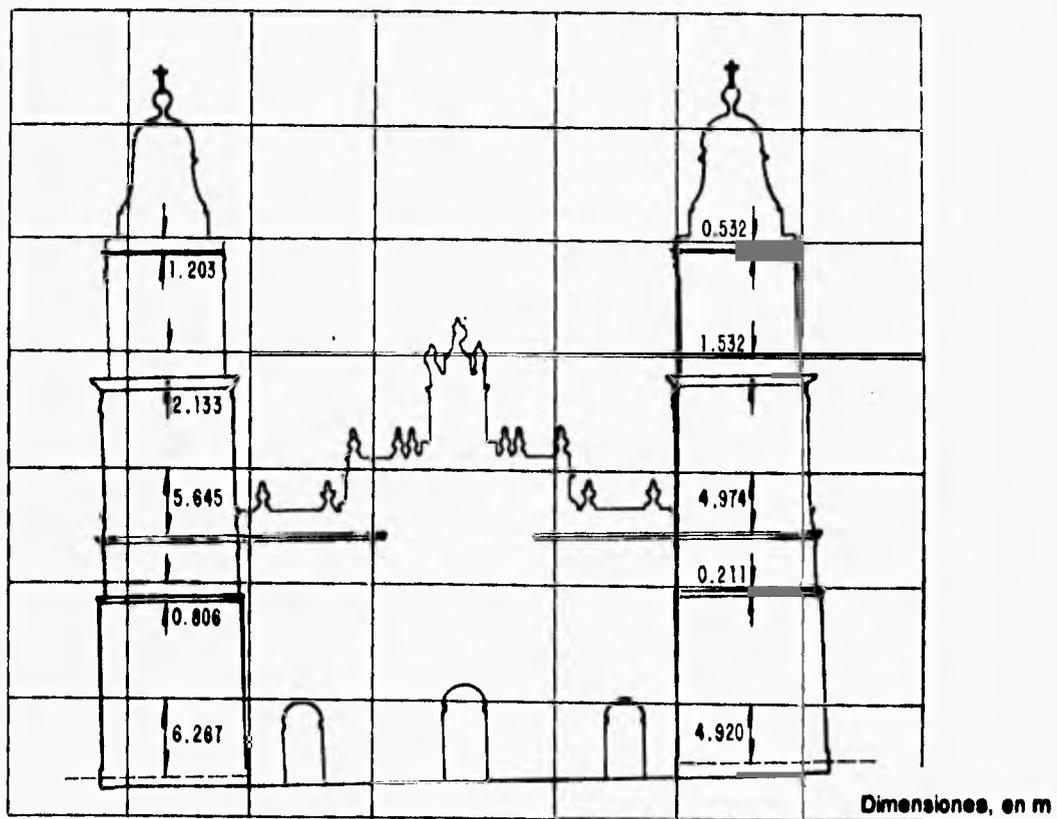


Fig. 2 Ubicación de Estructuras Aztecas.



Dimensiones, en m

Fig. 3 Ajuste de niveles durante la construcción. Fachada sur.

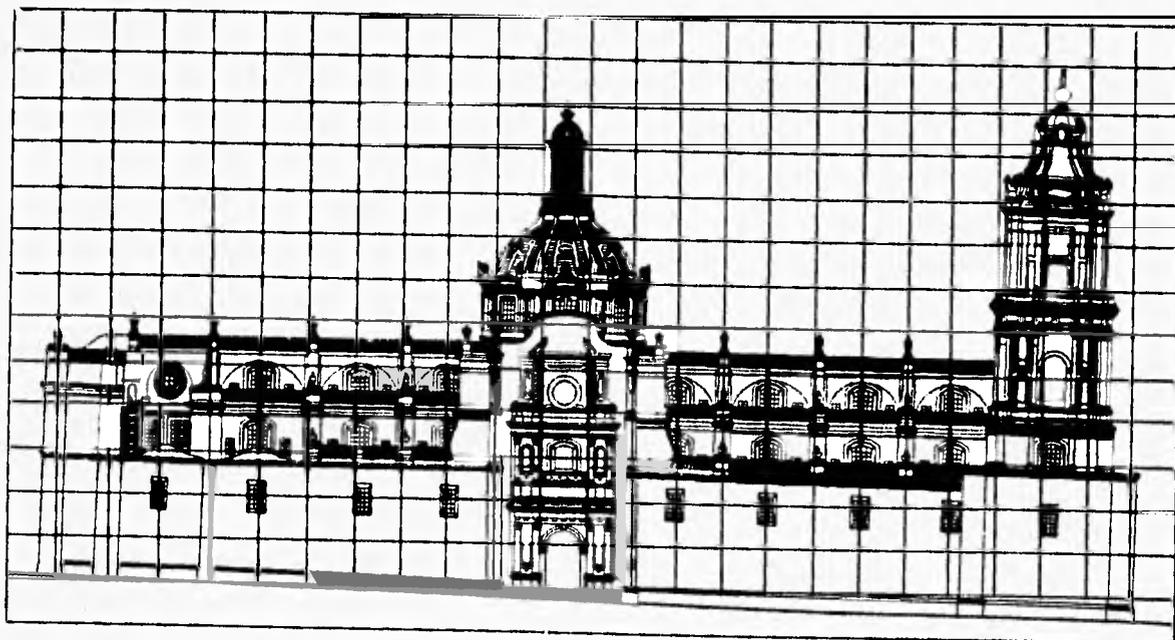


Fig. 4 Ajuste de niveles durante la construcción. Fachada poniente.

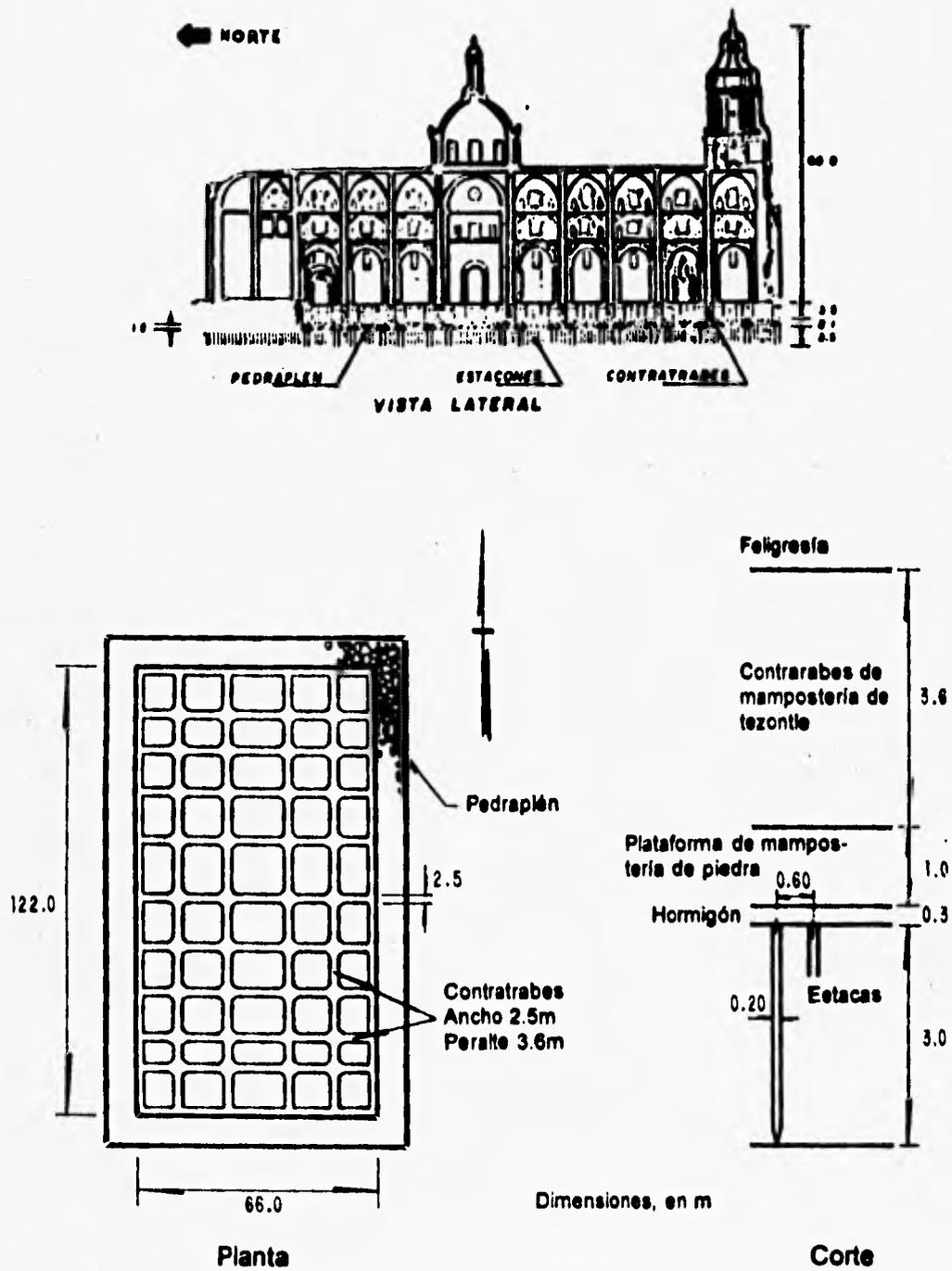


Fig.5 Características de la Cimentación.

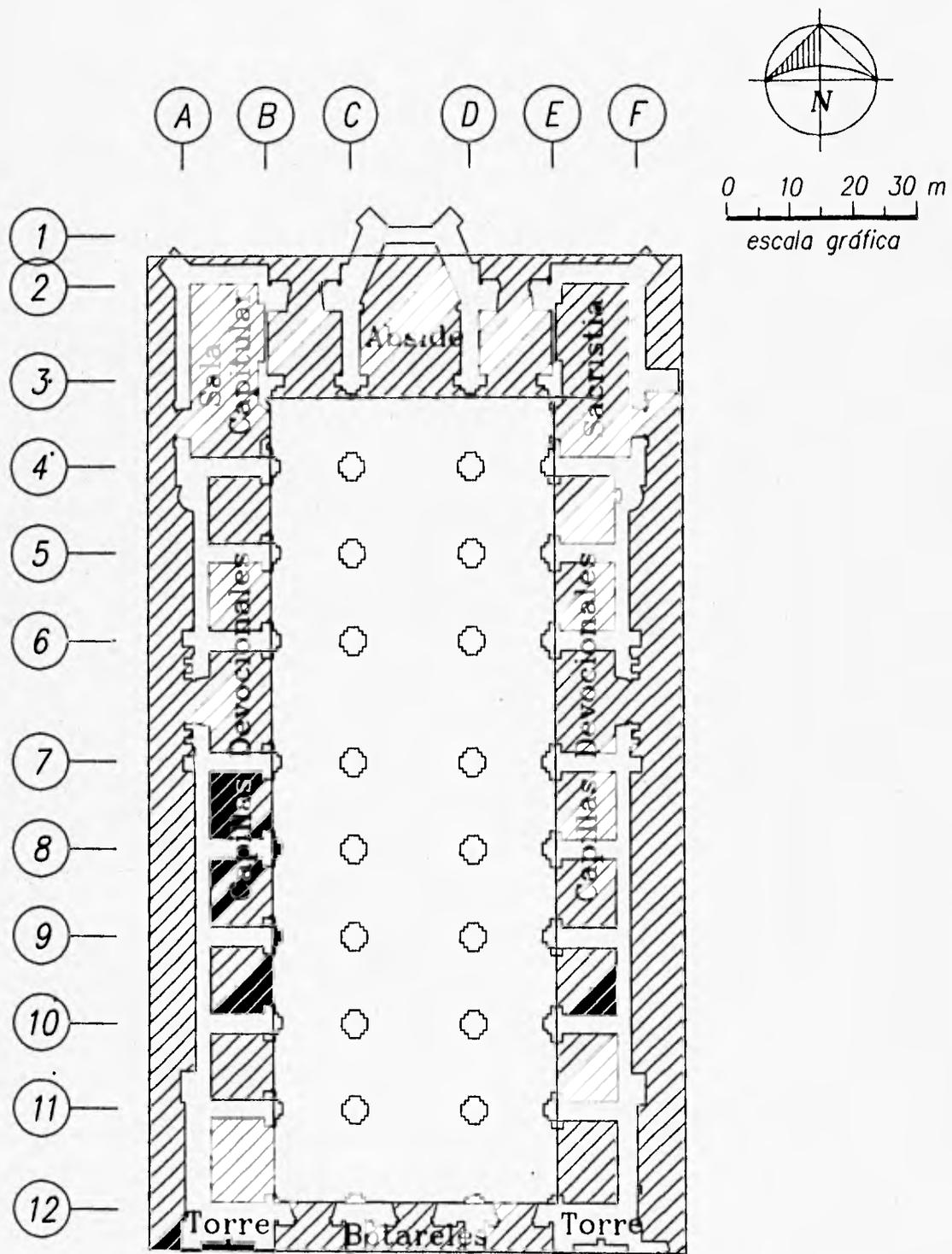
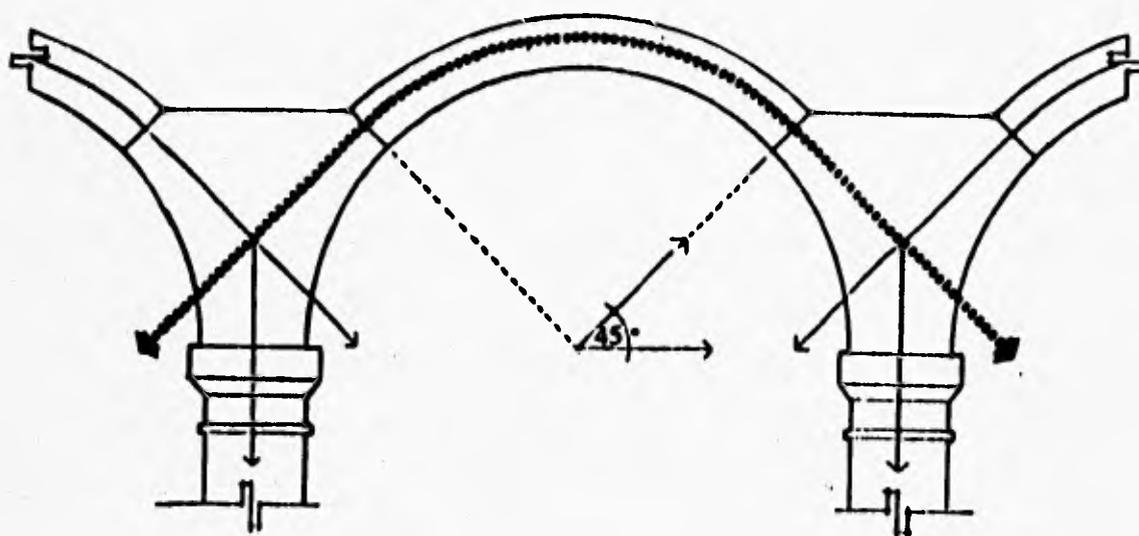


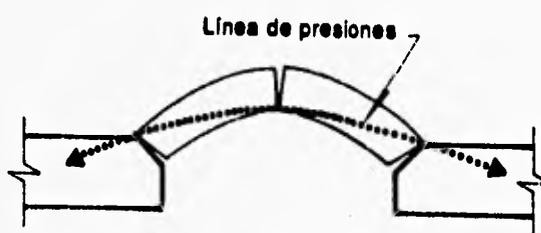
Fig. 6 Sistema que impone las restricciones a los desplazamientos del conjunto abovedado.



arco original



a) Agrietamiento por aumento del claro



b) Agrietamiento por disminución del claro

Fig. 7 Esquema del agrietamiento de las bóvedas por movimientos en los apoyos.

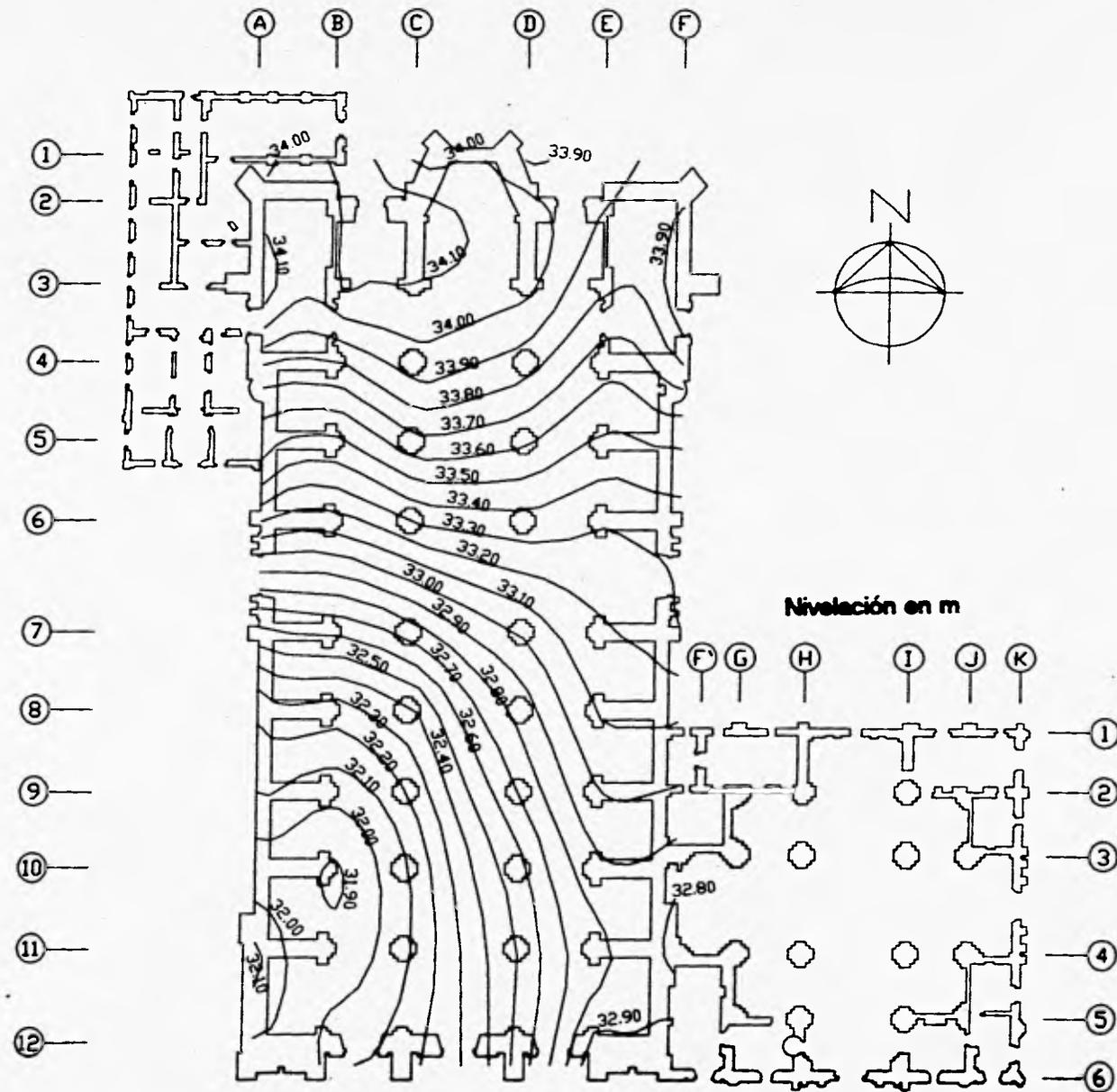


Fig. 8 Nivelación a nivel de plintos. Agosto 1993.

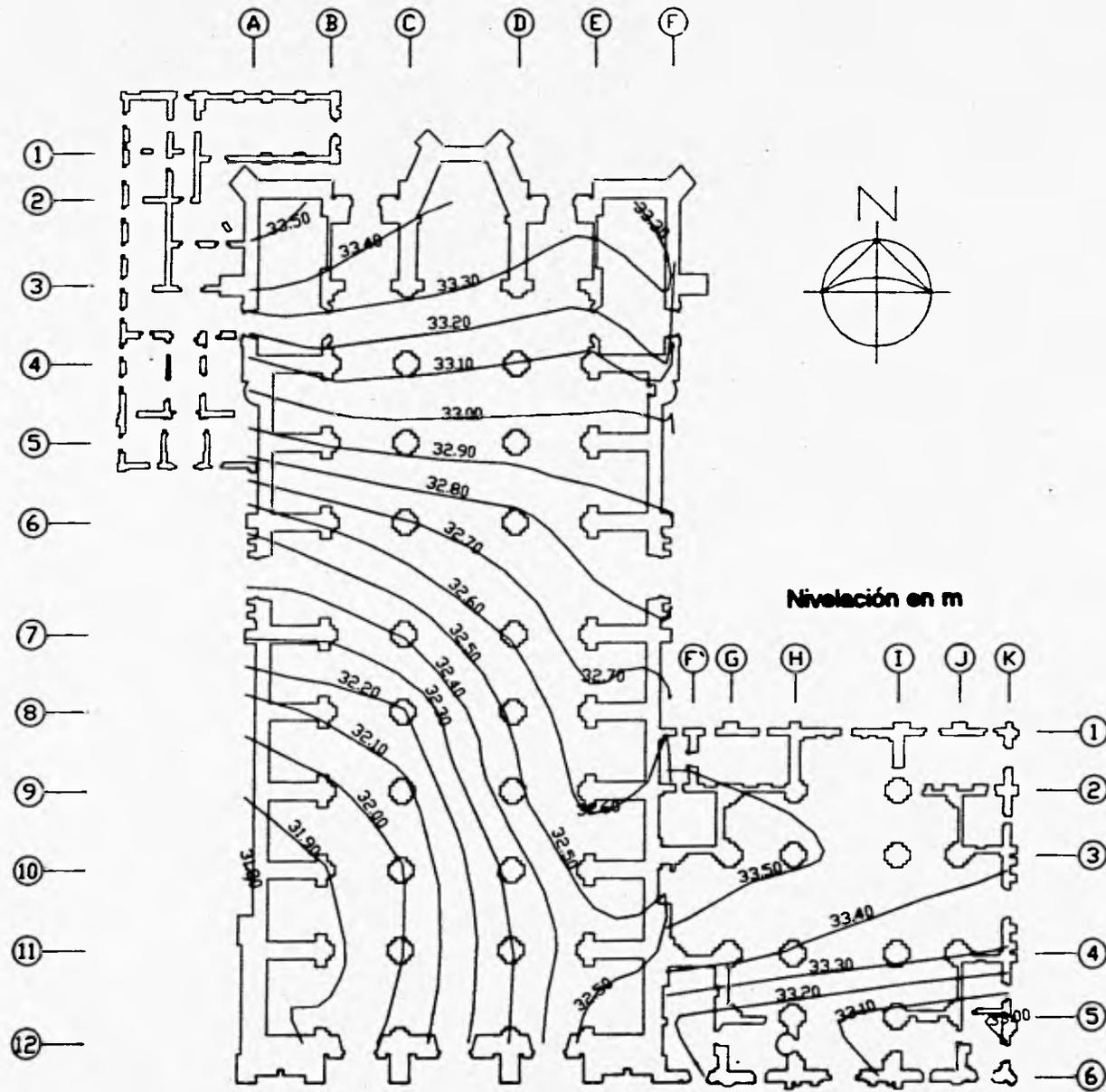


Fig.10 Meta del proyecto de subexcavación.

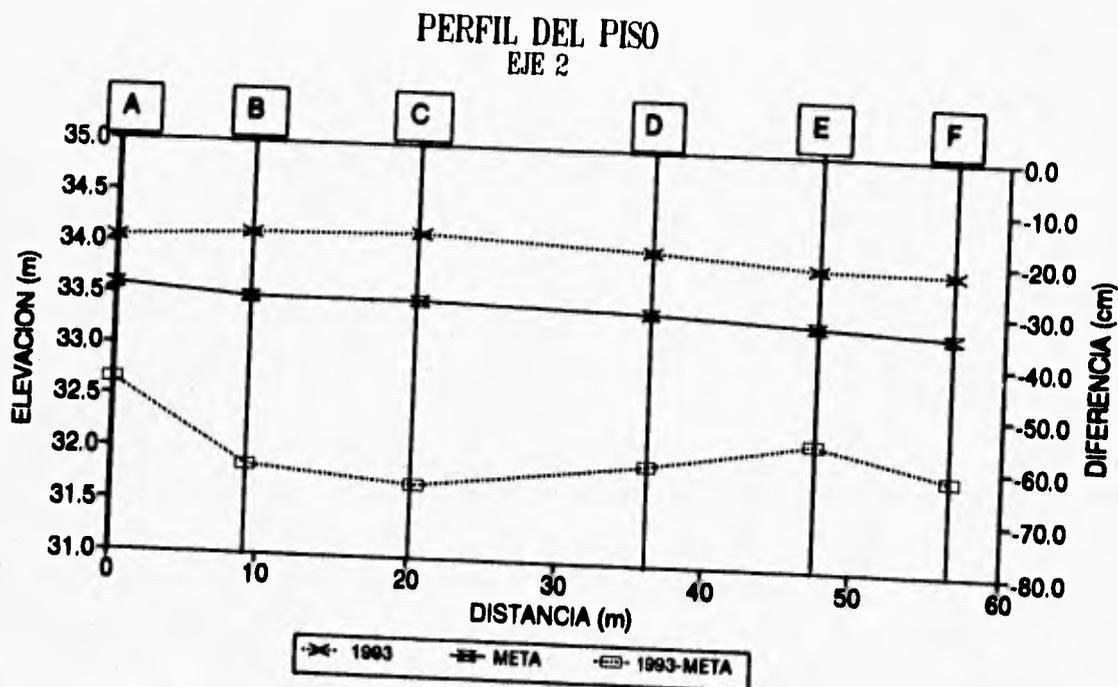


Fig. 11.1 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 2 (Catedral).

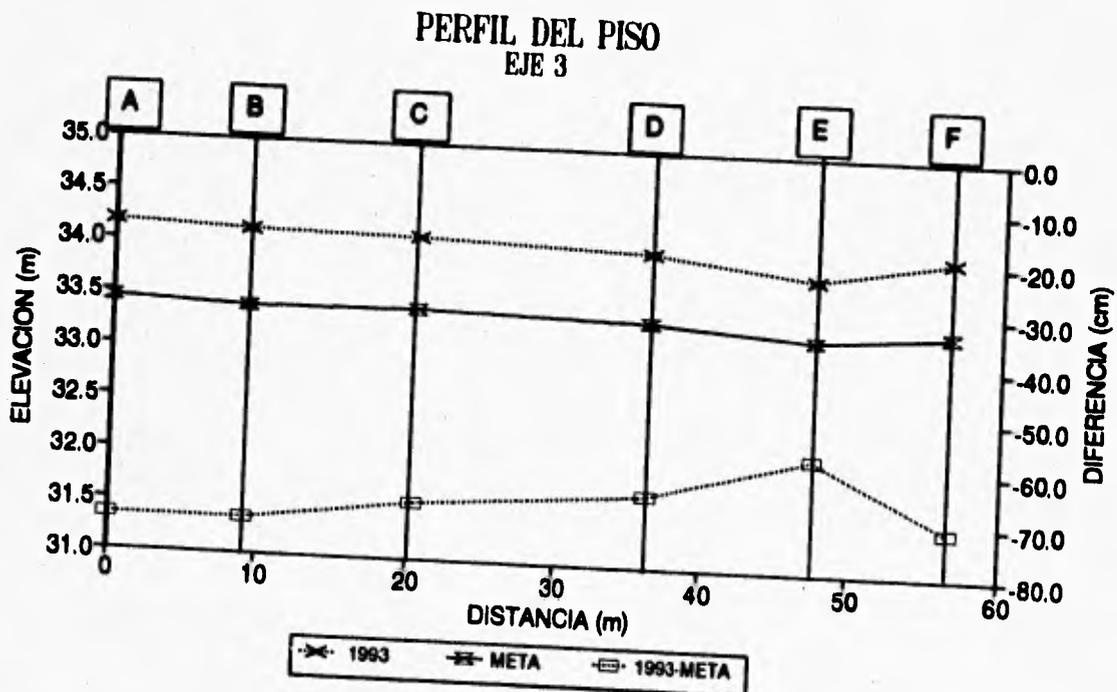


Fig. 11.2 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 3 (Catedral).

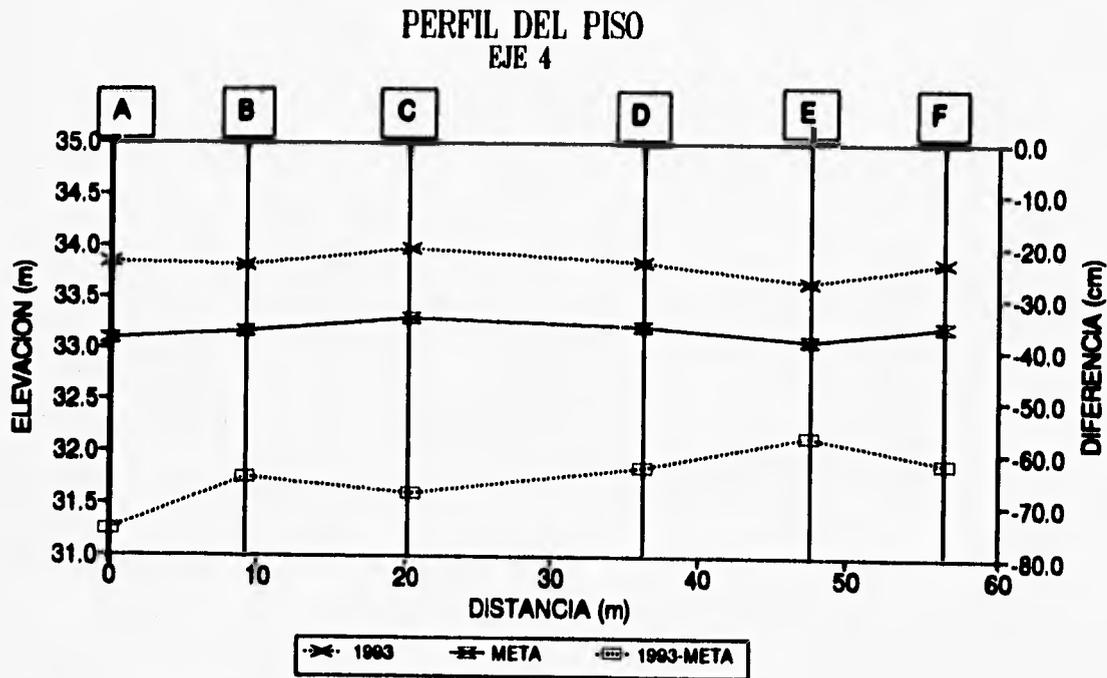


Fig.11.3 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 4 (Catedral).

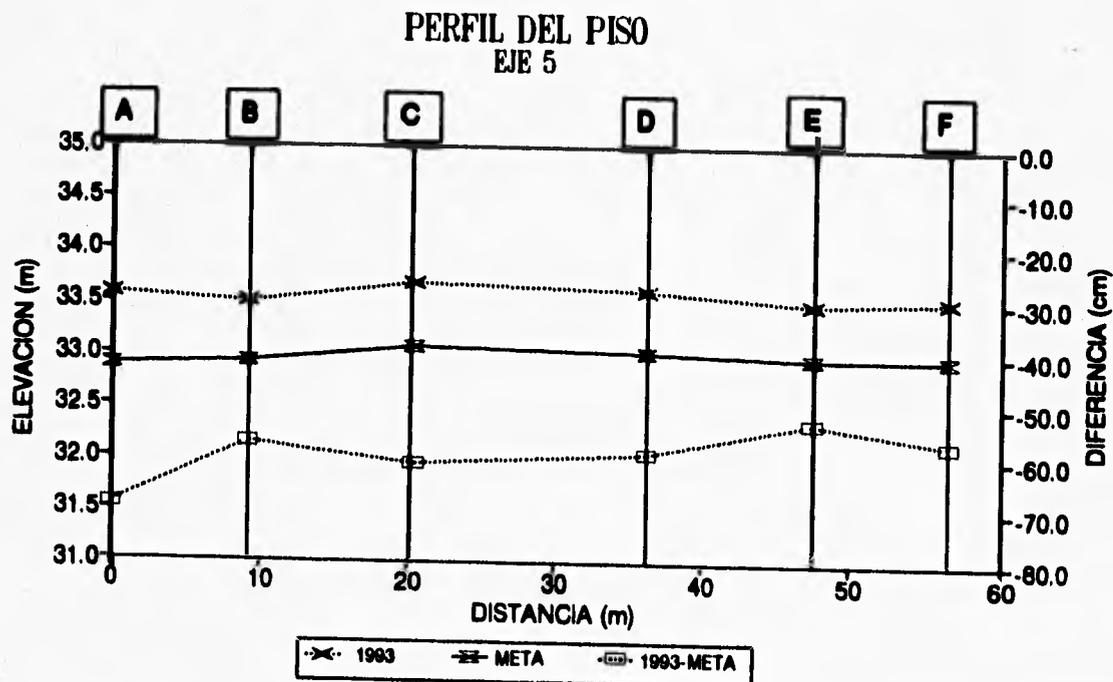


Fig.11.4 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 5 (Catedral).

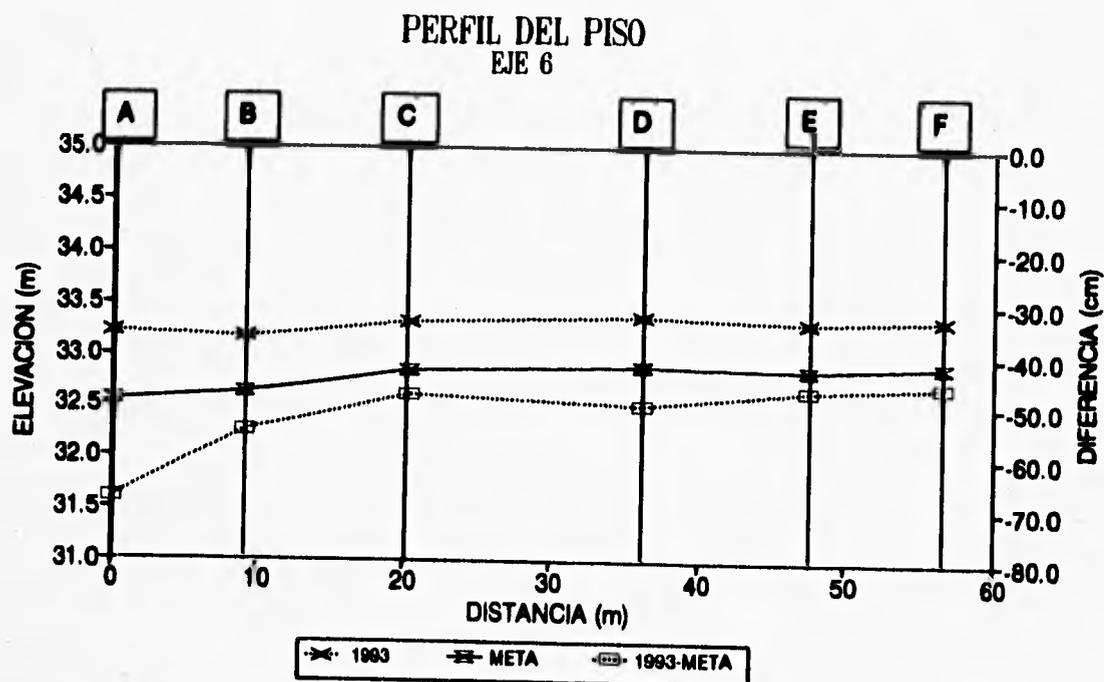


Fig. 11.5 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 6 (Catedral).

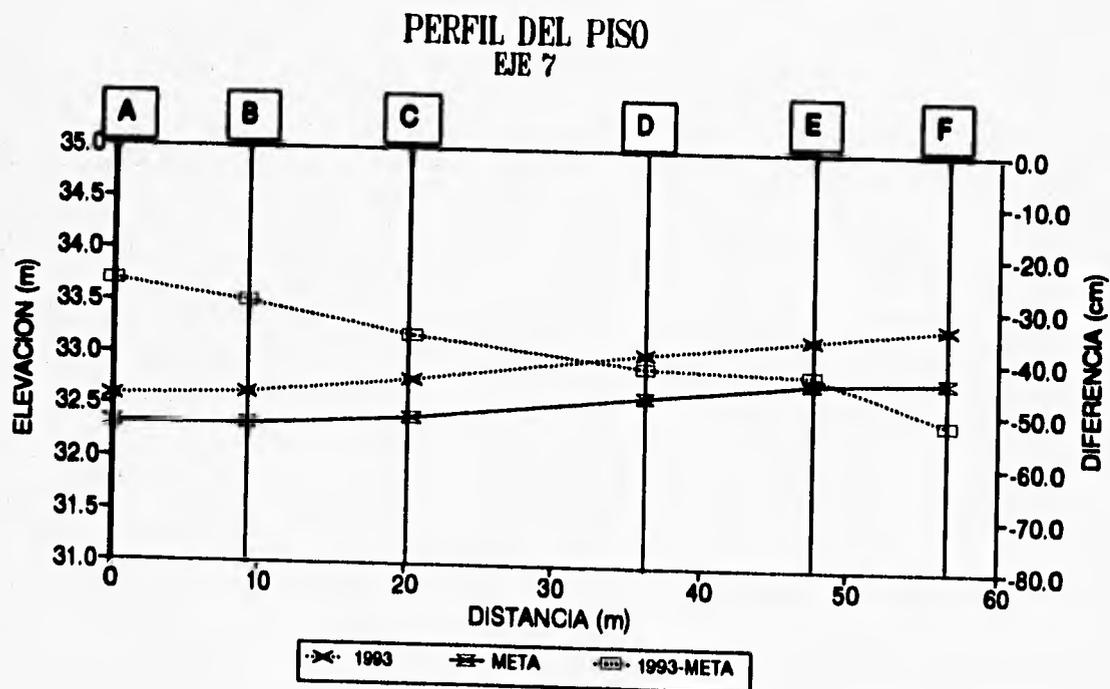


Fig. 11.6 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 7 (Catedral).

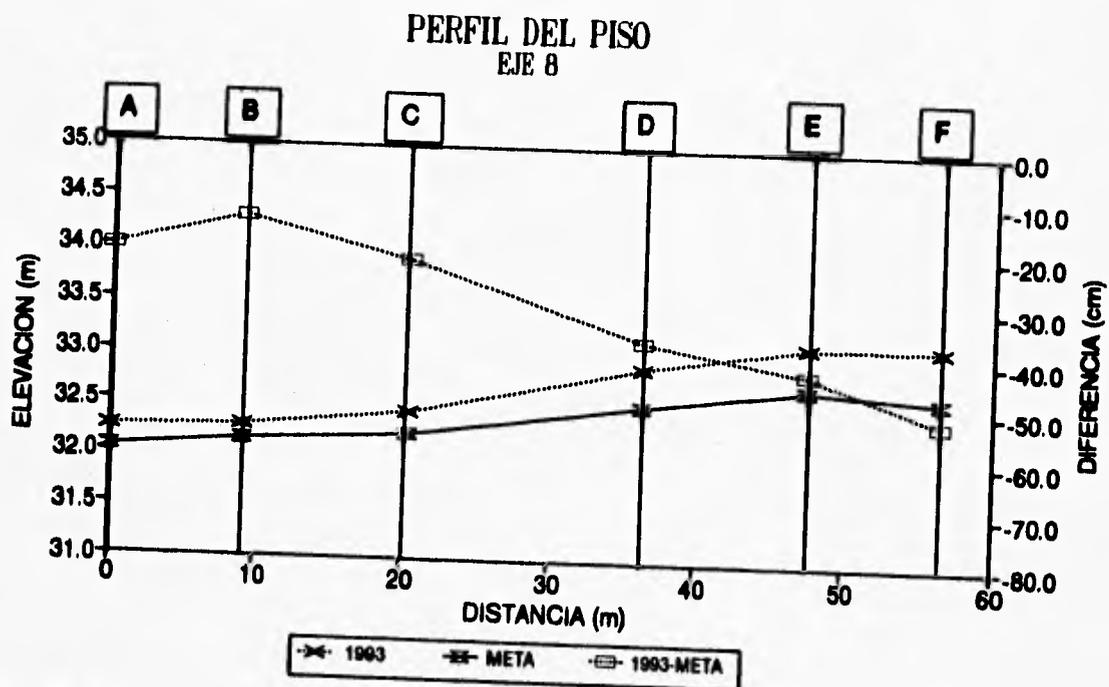


Fig. 11.7 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 8(Catedral).

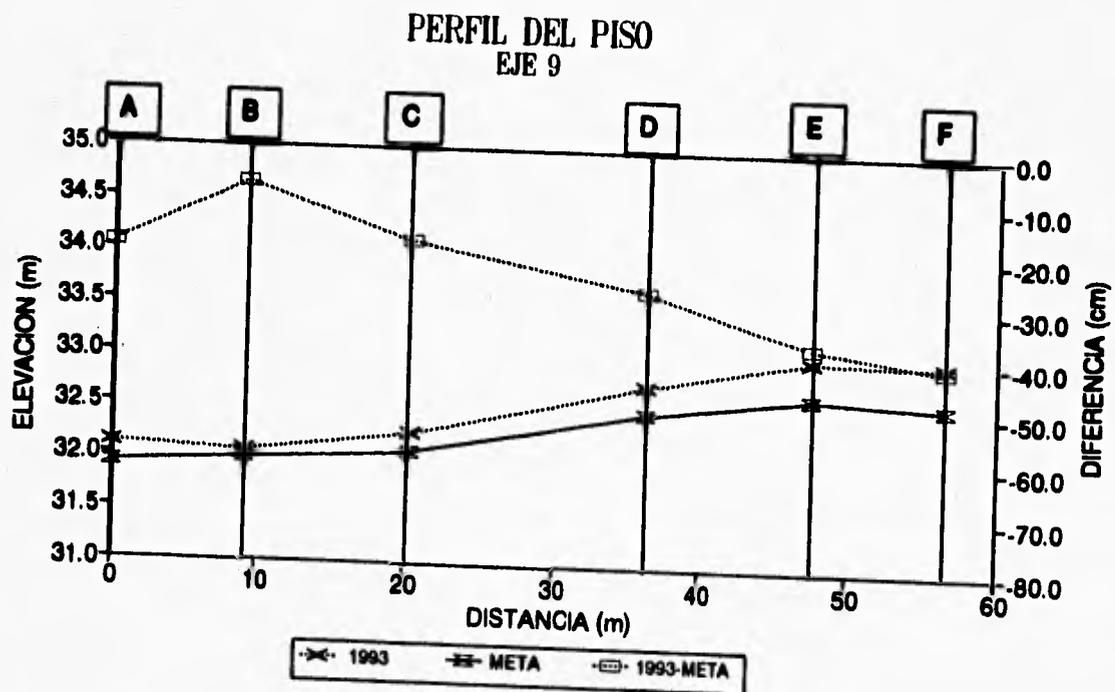


Fig. 11.8 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 9 (catedral).

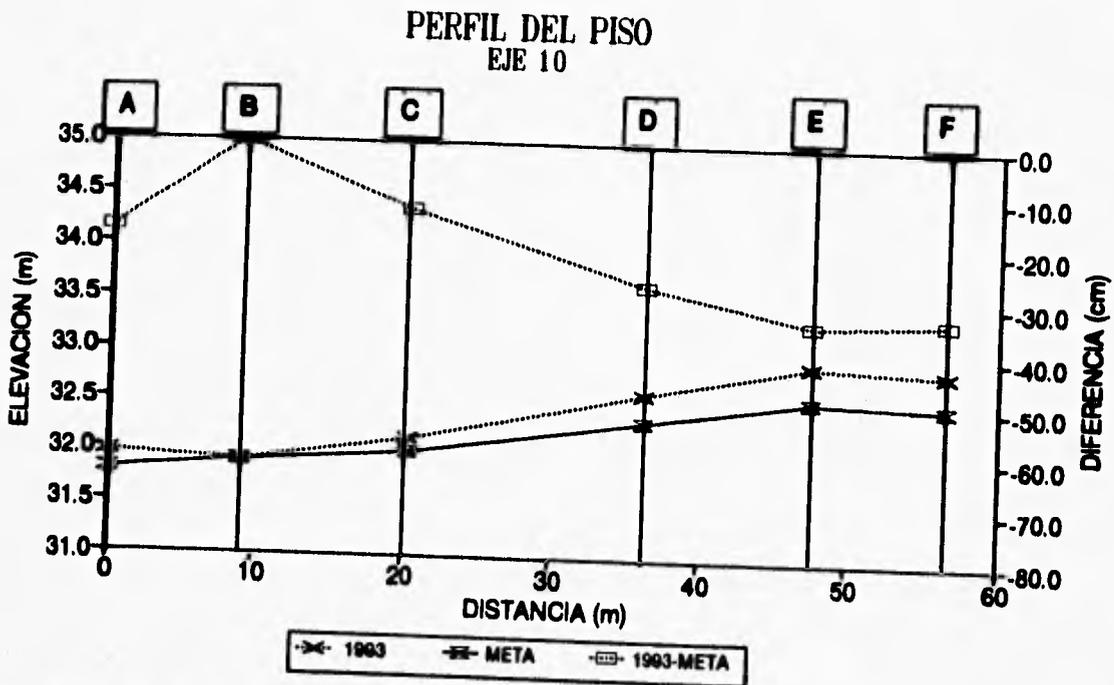


Fig.11.9 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 10 (Catedral).

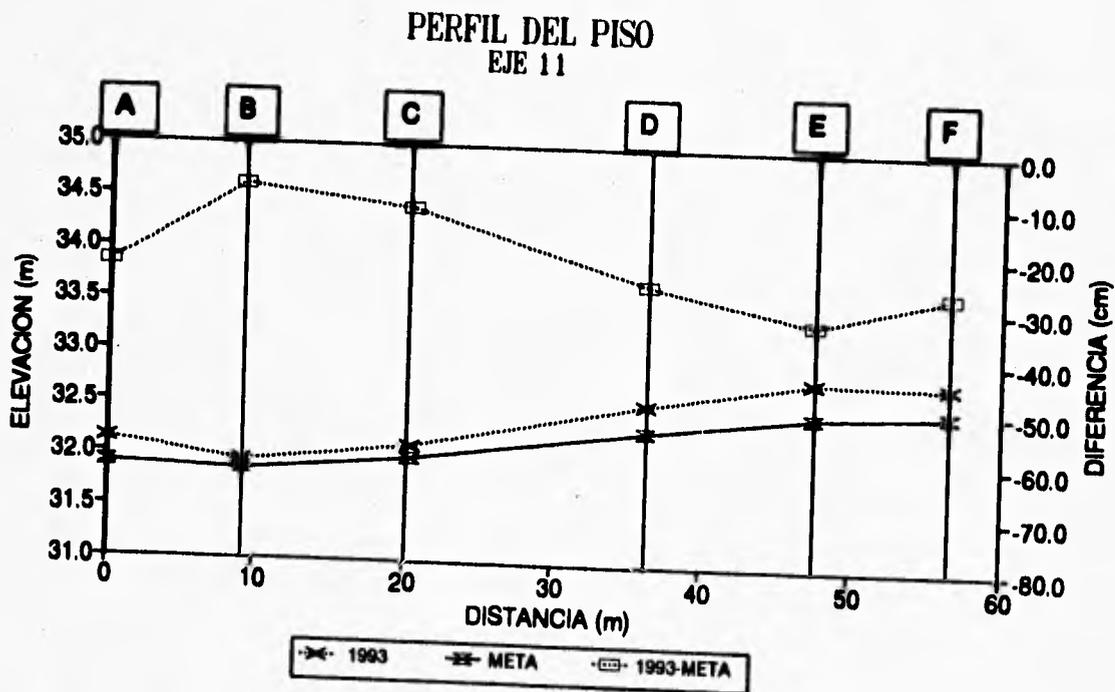


Fig.11.10 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 11 (Catedral).

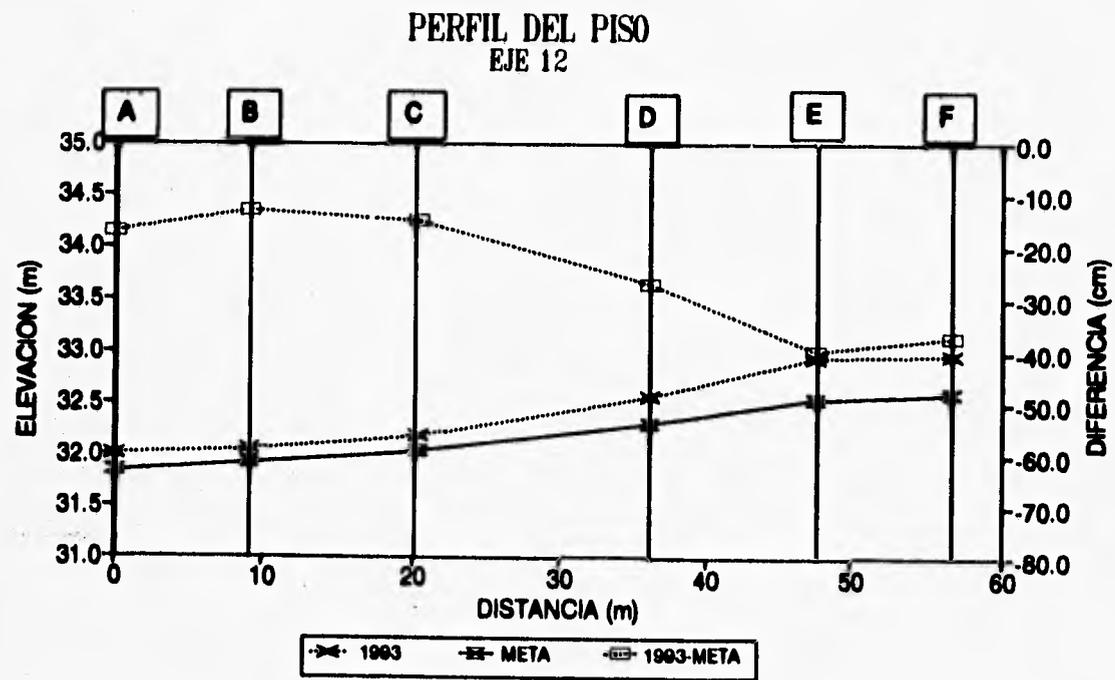


Fig.11.11 *Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 12 (Catedral).*

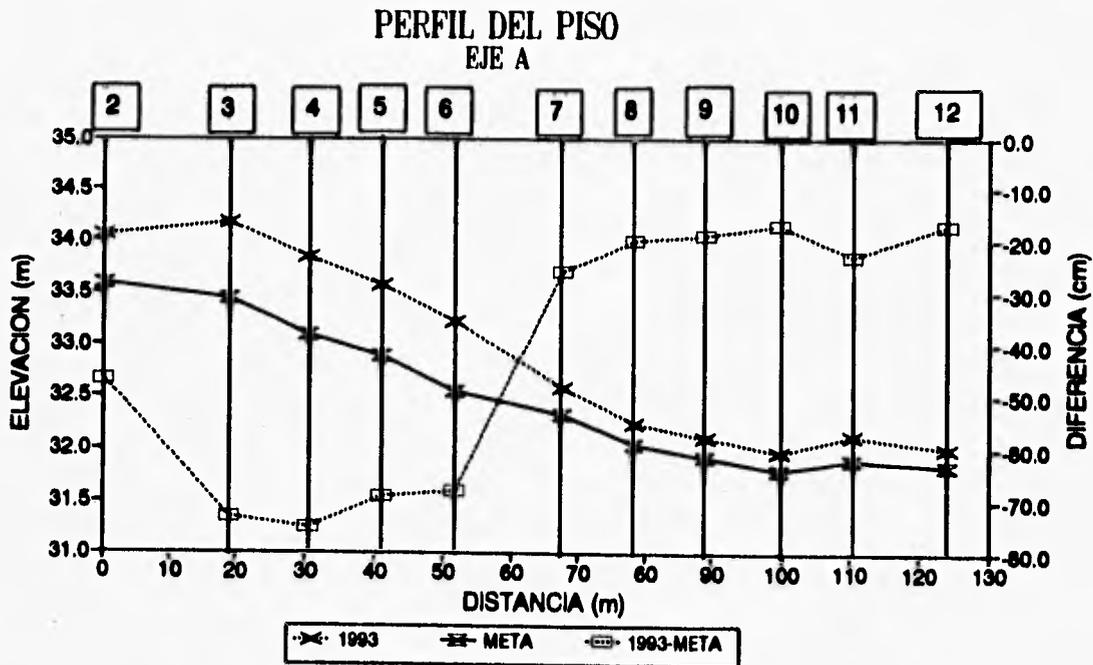


Fig.11.12 *Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje A (Catedral)*

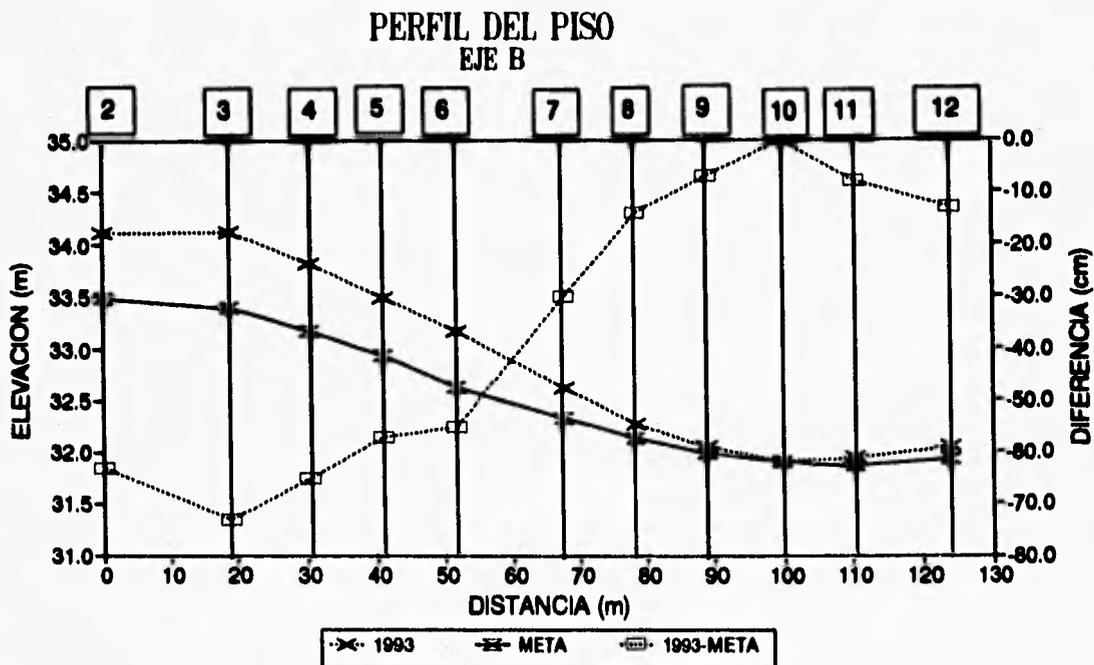


Fig.11.13 *Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje B (Catedral).*

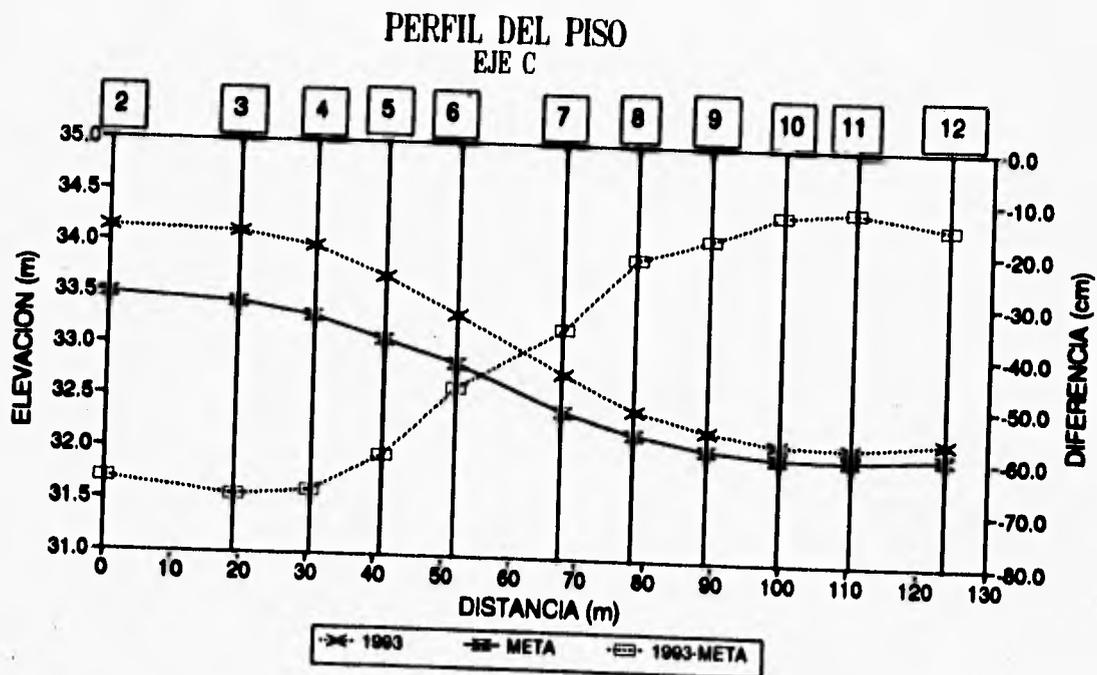


Fig.11.14 *Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje C (Catedral).*

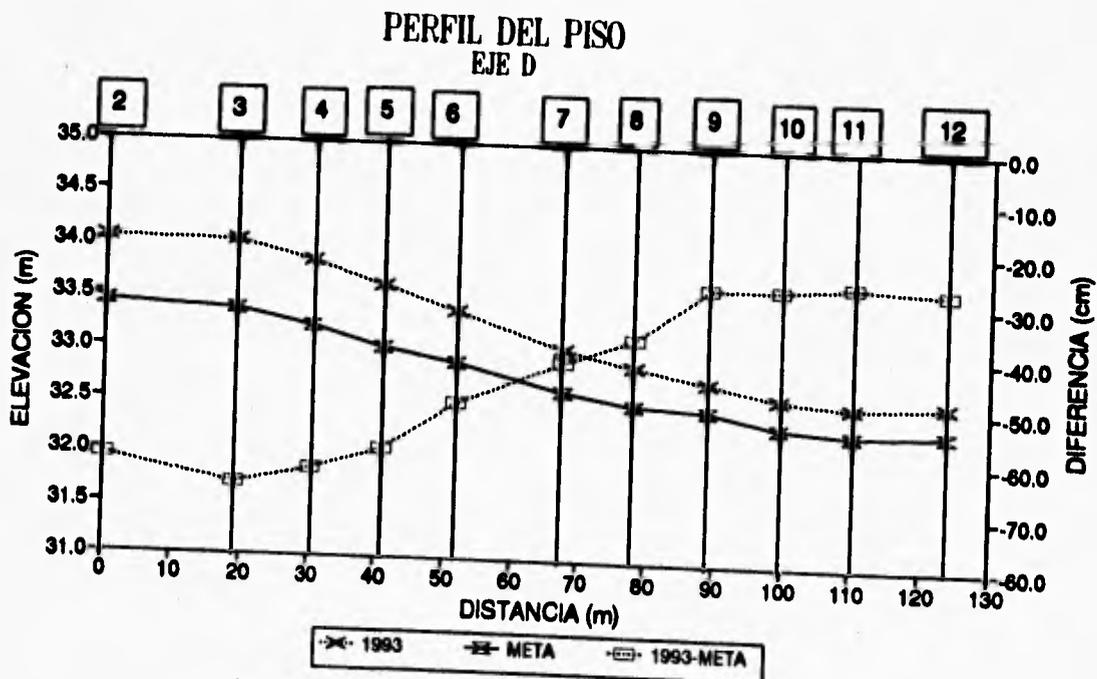


Fig.11.15 *Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje Eje D (Catedral).*

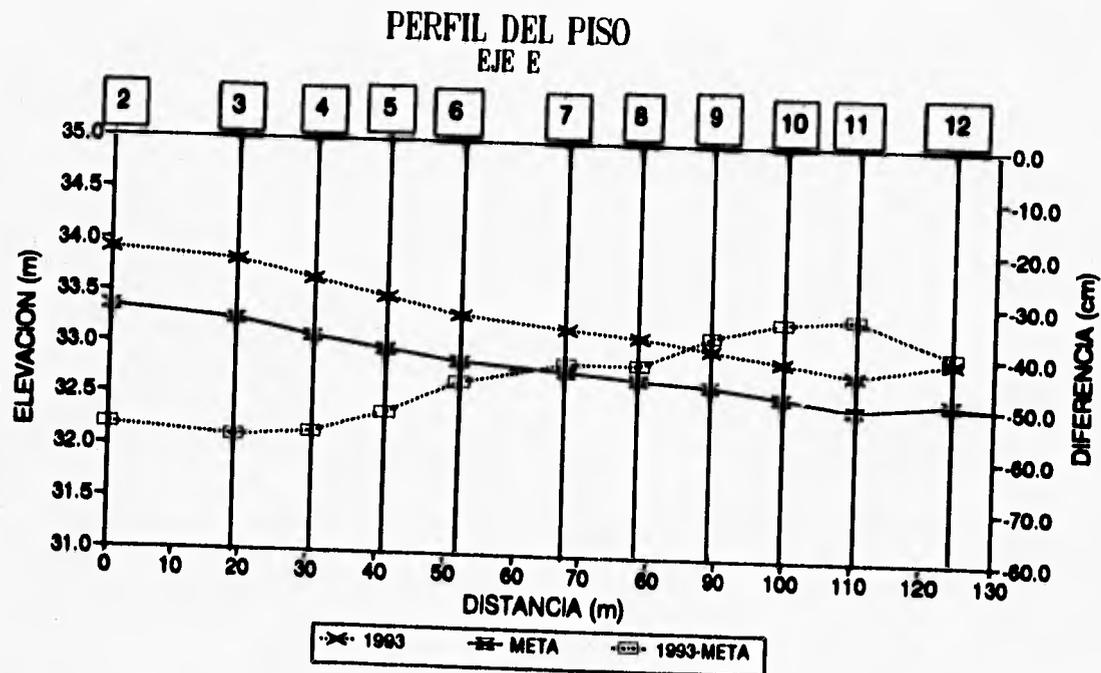


Fig.11.16 *Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje E (Catedral).*

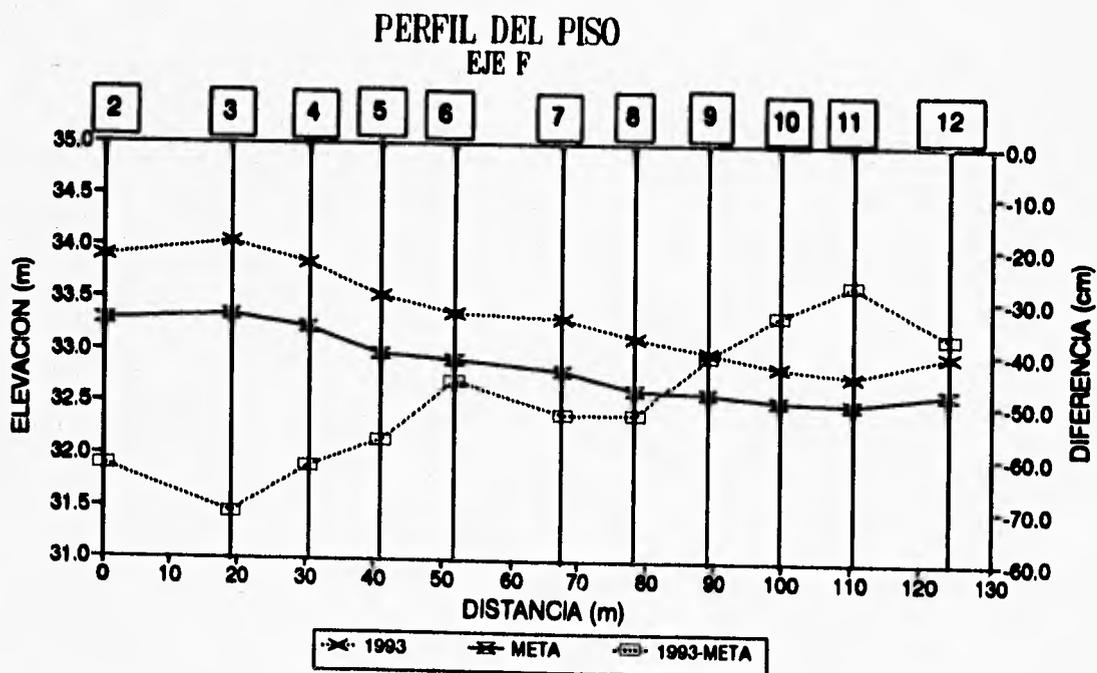


Fig.11.17 *Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje F (Catedral).*

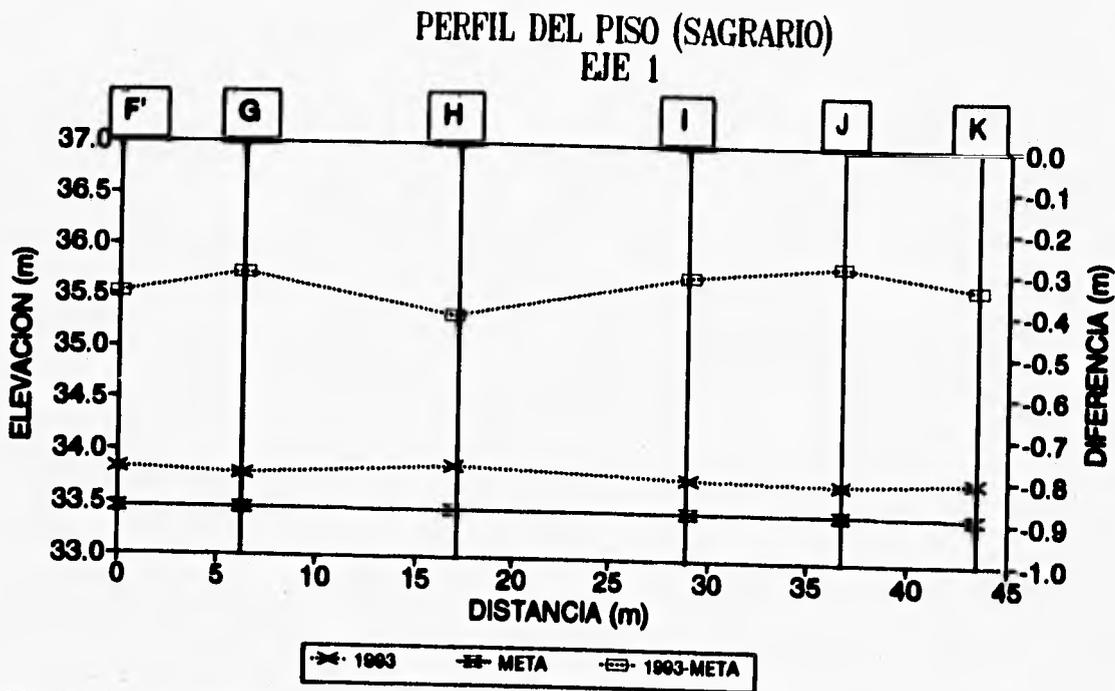


Fig.11.18 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 1 (Sagrario).

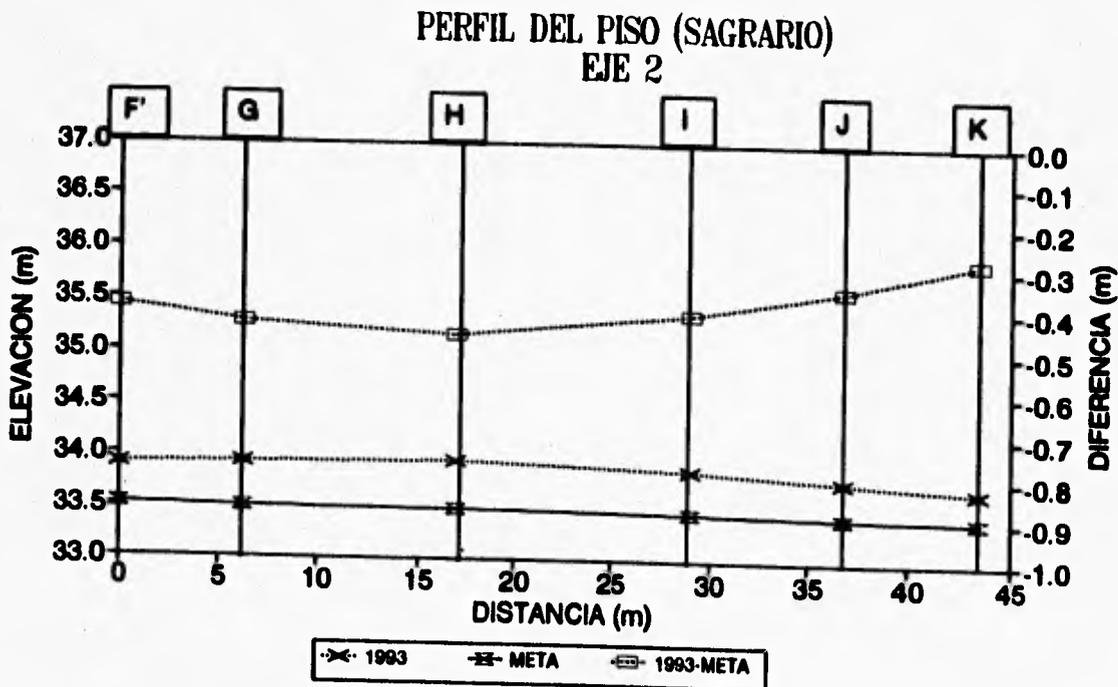


Fig.11.19 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 2 (Sagrario).

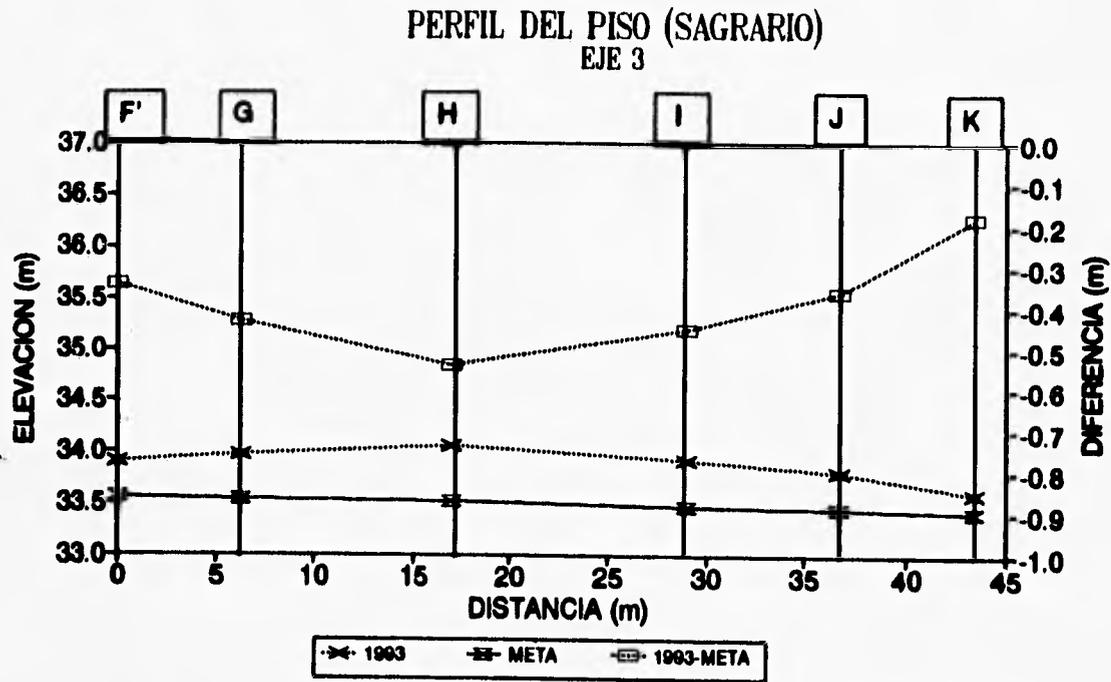


Fig.11.20 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 3 (Sagrario).

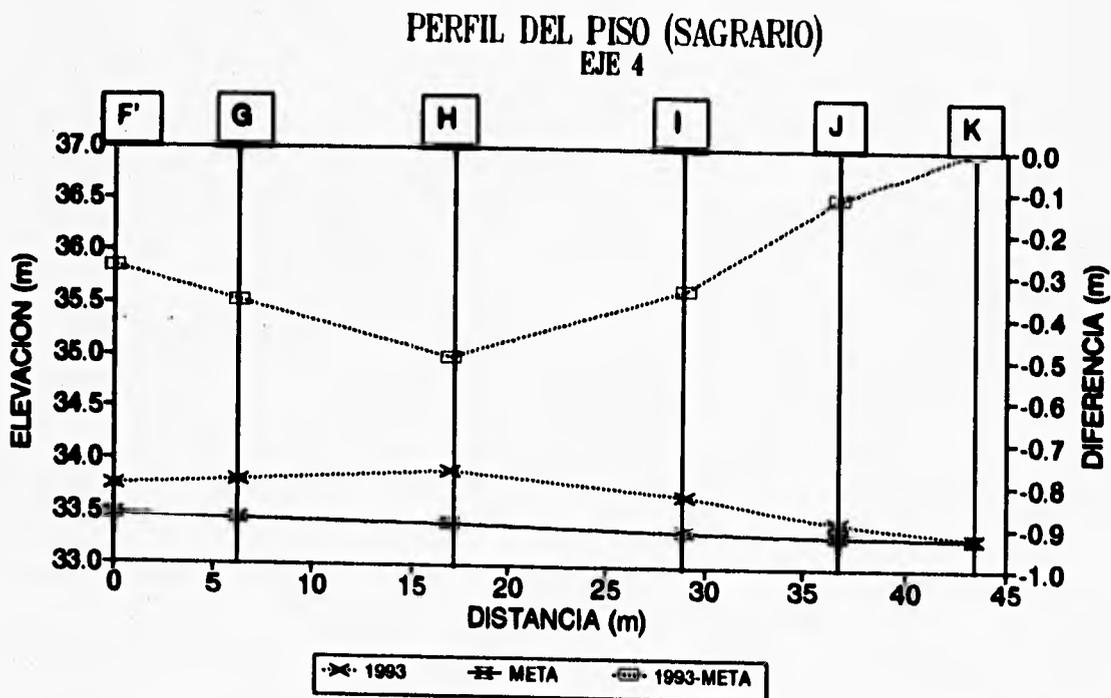


Fig.11.21 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 4 (Sagrario).

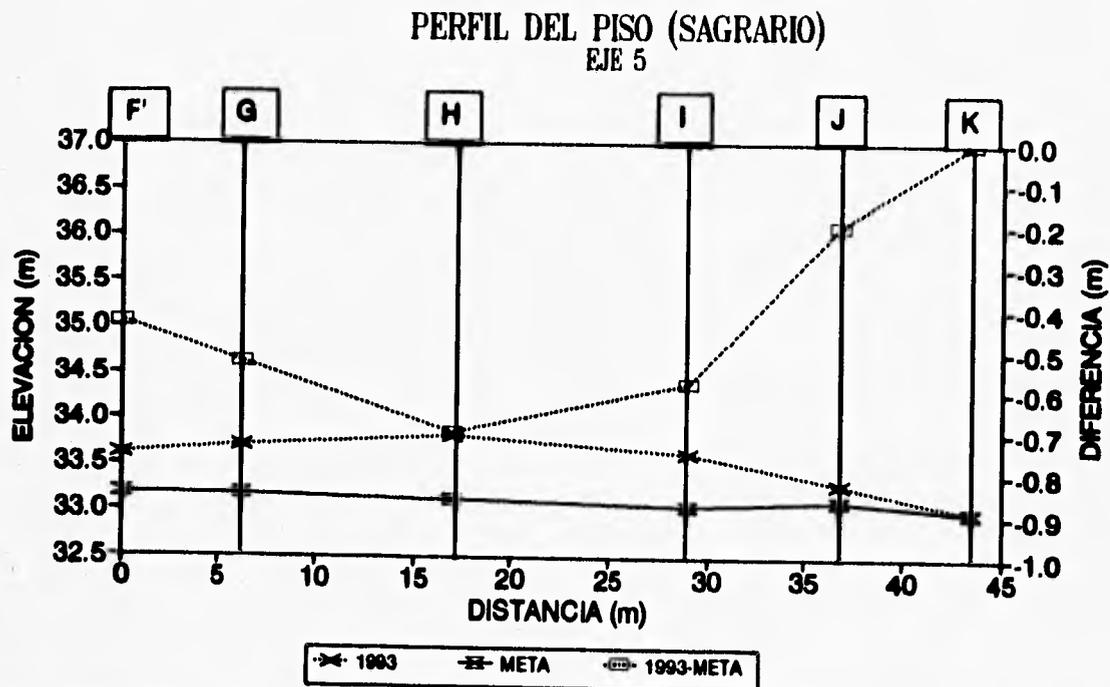


Fig.11.22 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 5 (Sagrario).

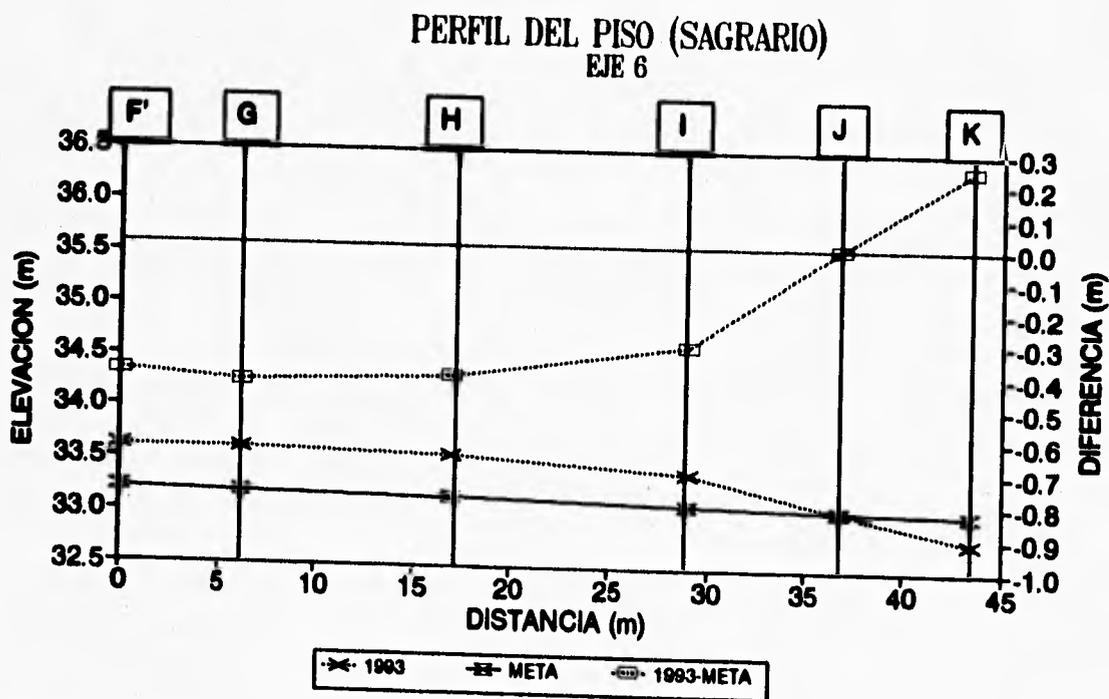


Fig.11.23 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje 6 (Sagrario).

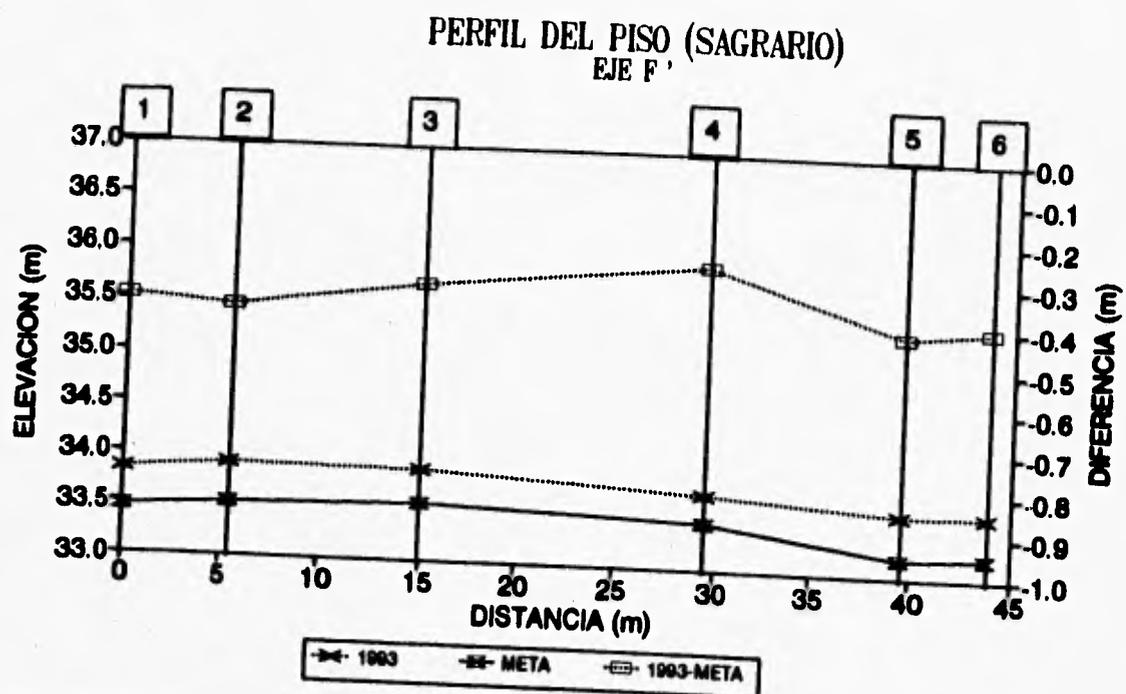


Fig. 11.24 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje F' (Sagrario).

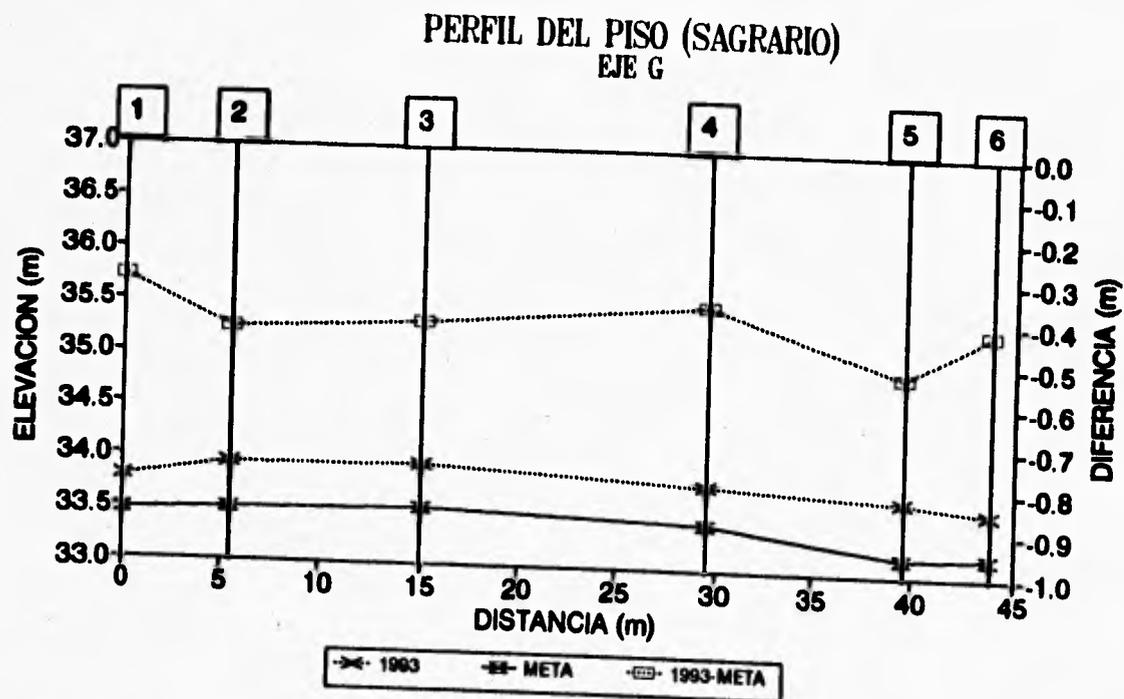


Fig. 11.25 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje G (Sagrario).

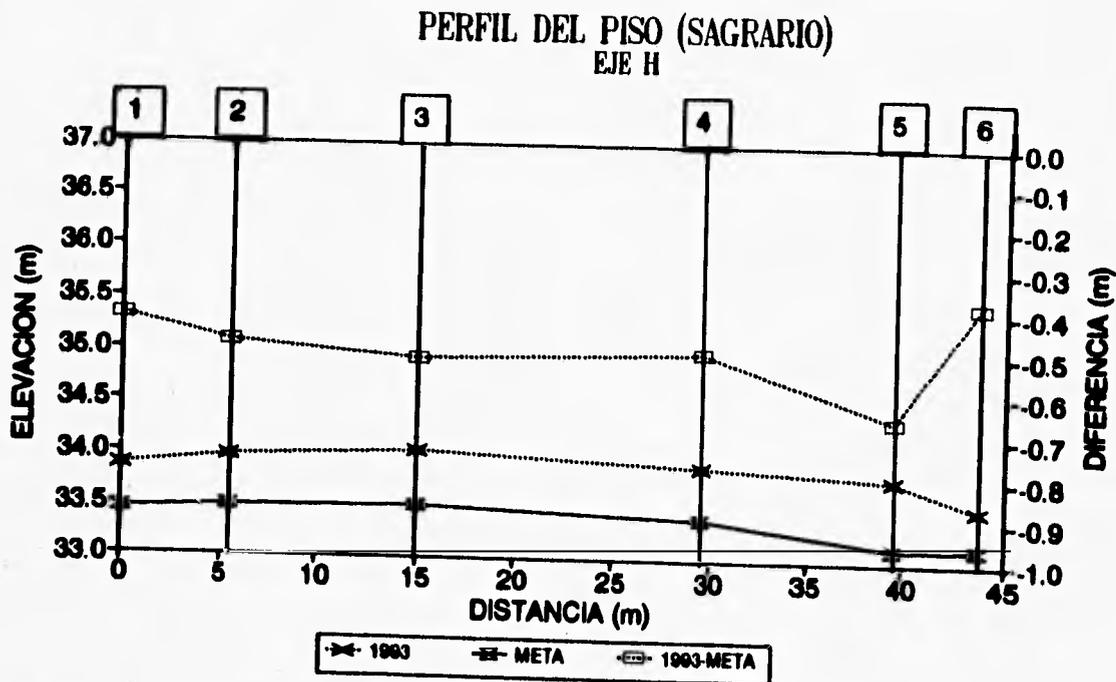


Fig.11.26 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje H (Sagrario).

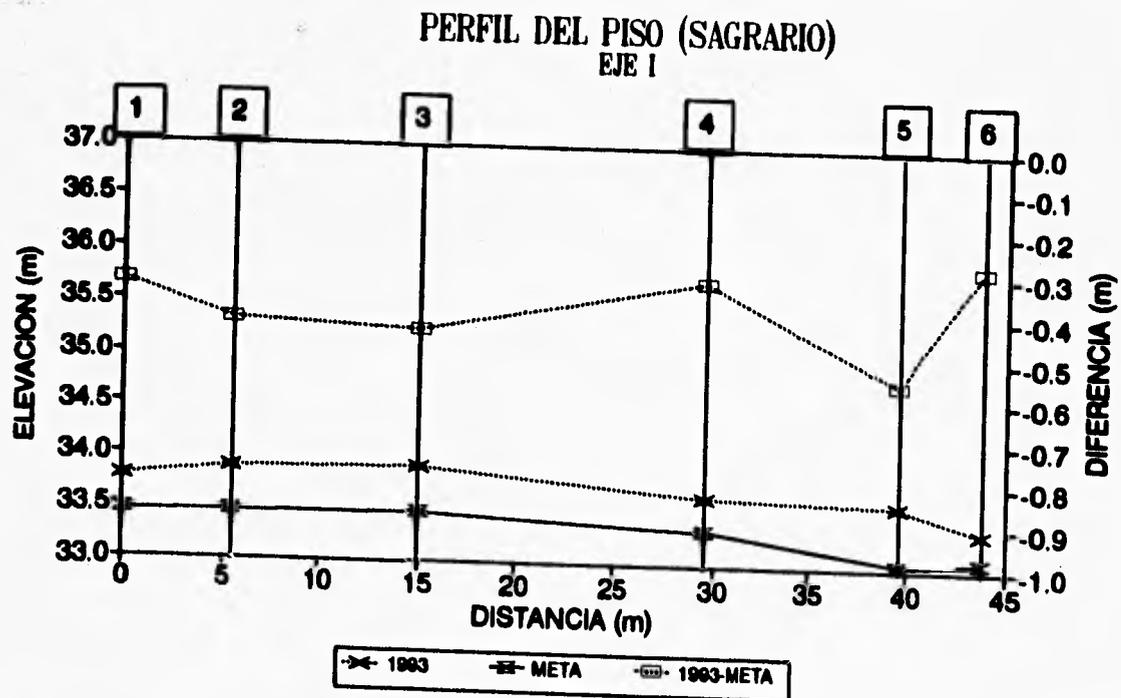


Fig.11.27 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje I (Sagrario).

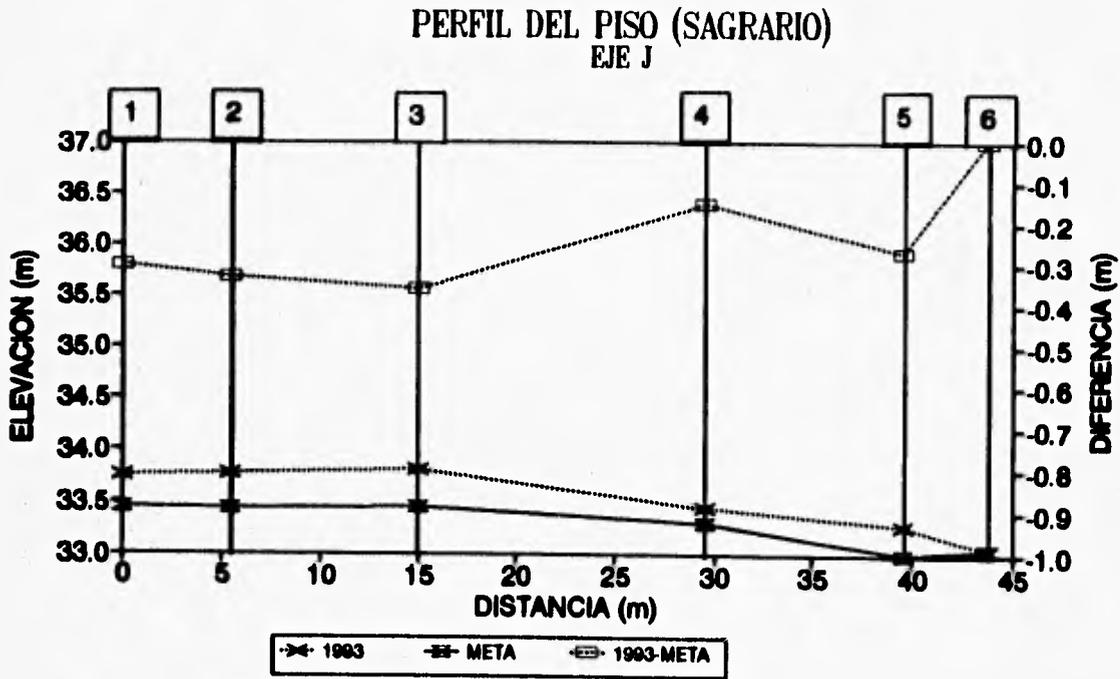


Fig.11.28 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje J (Sagrario).

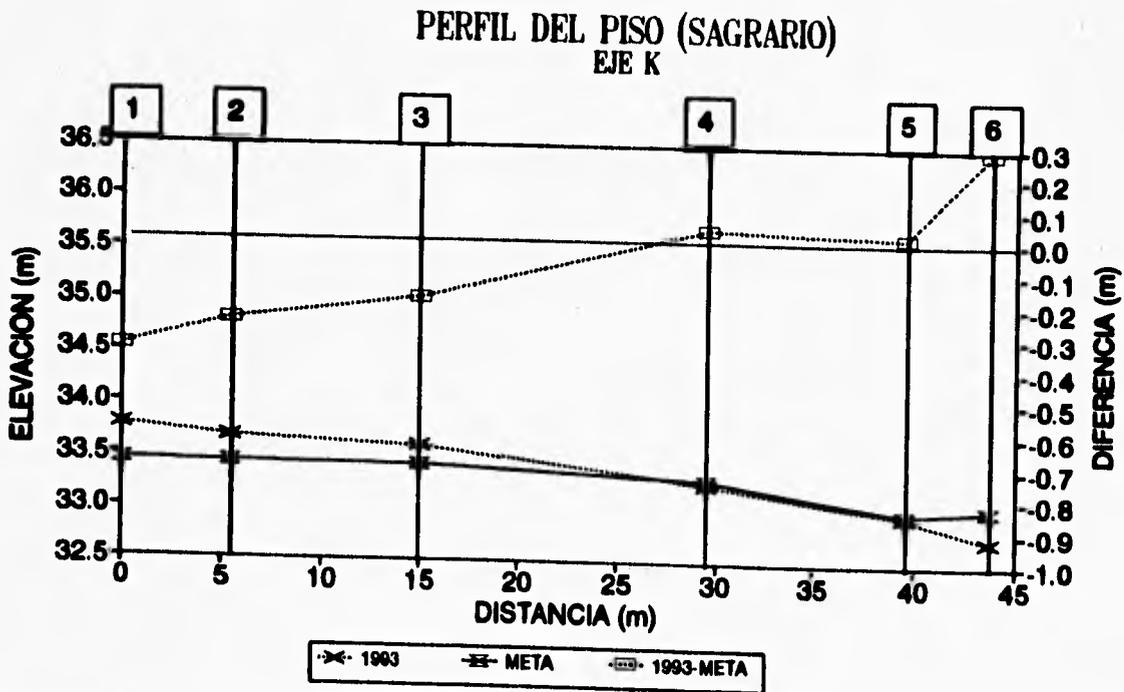
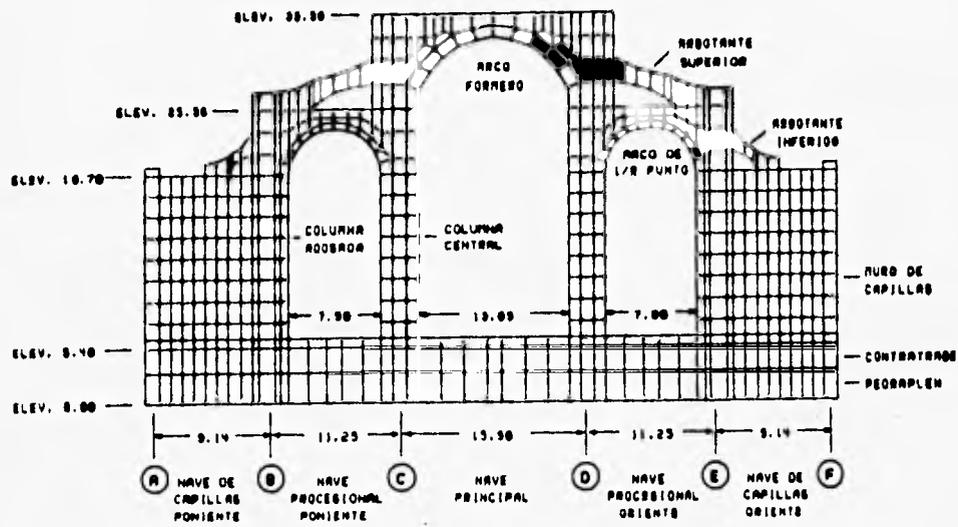
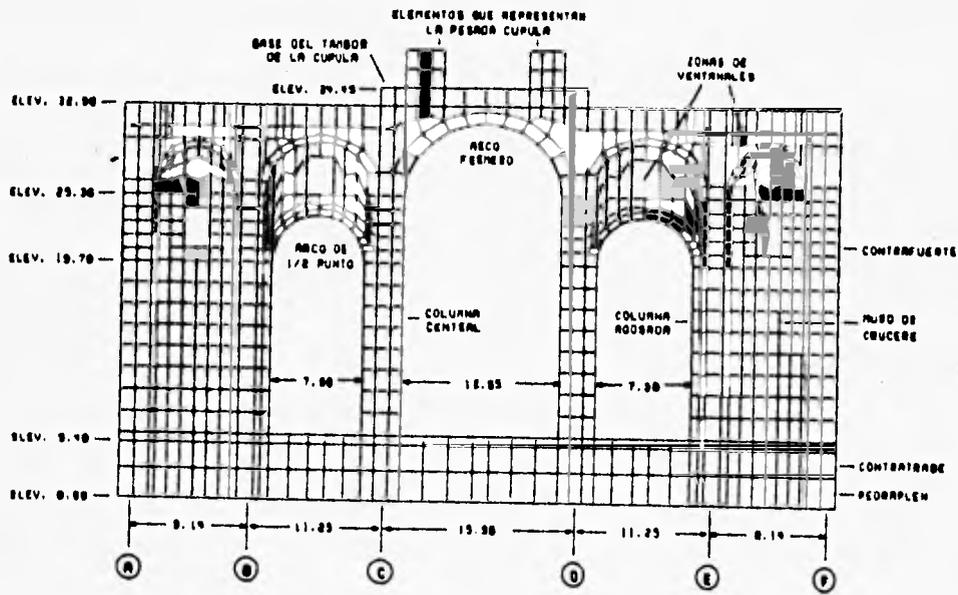


Fig.11.29 Perfiles de nivelación de 1993, la meta de subexcavación y la diferencia entre los dos. Eje K (Sagrario).



a) Eje 5

Dimensiones en m



b) Eje 6

Fig.12 Modelos de elemento finito de ejes típicos. Ejes transversales.

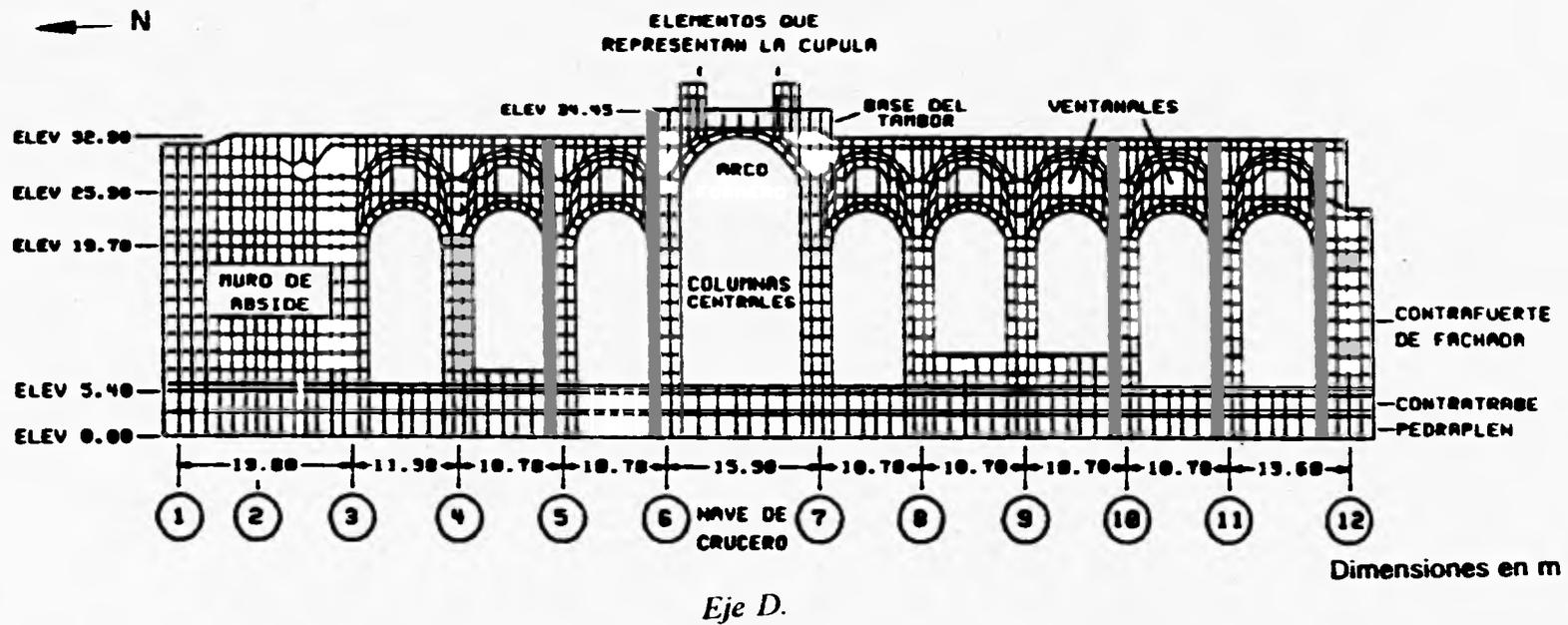


Fig.13 Modelo de elemento finito de ejes típicos. Eje longitudinal.

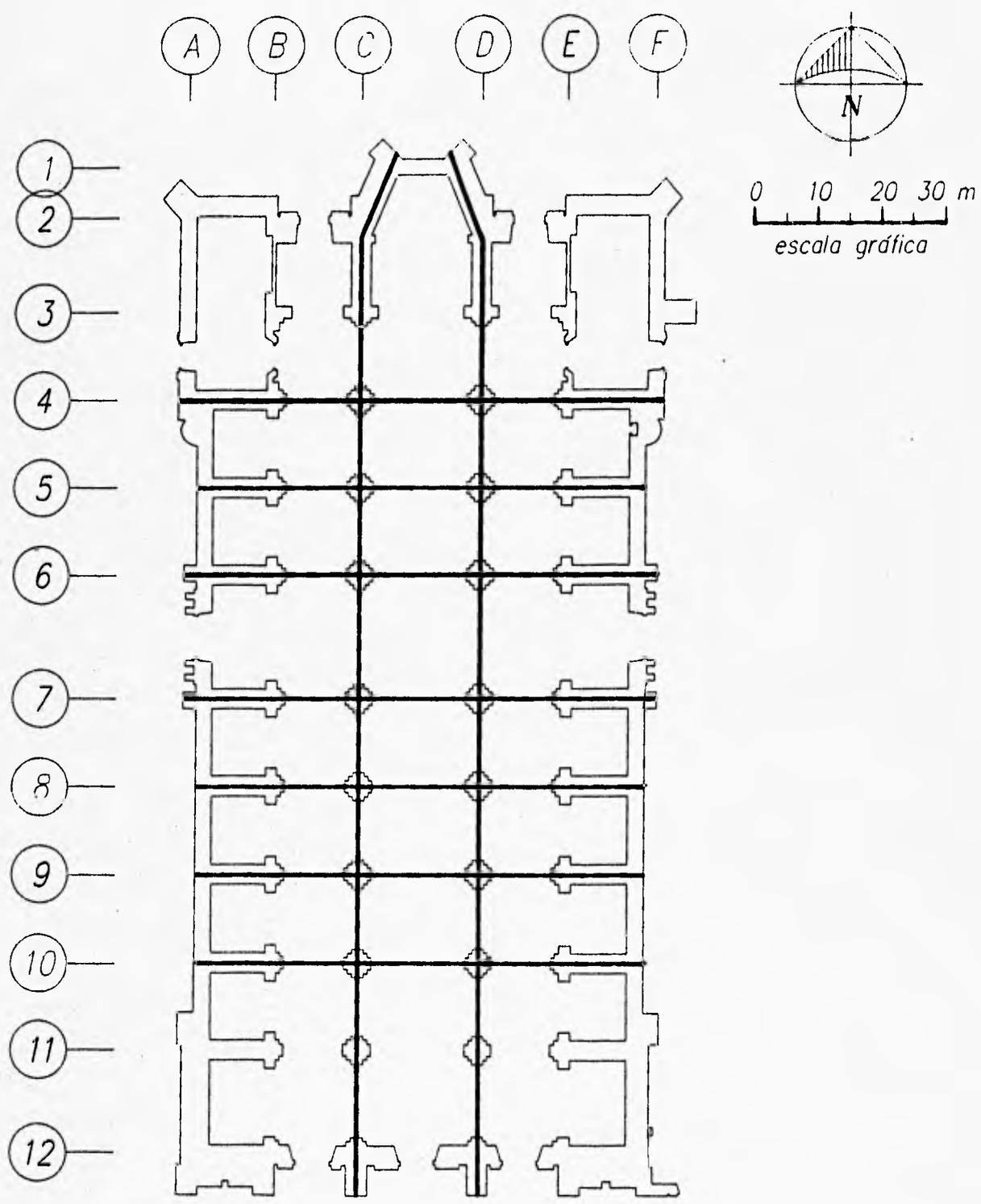
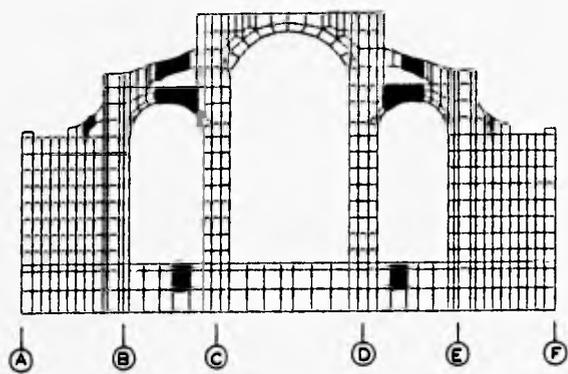
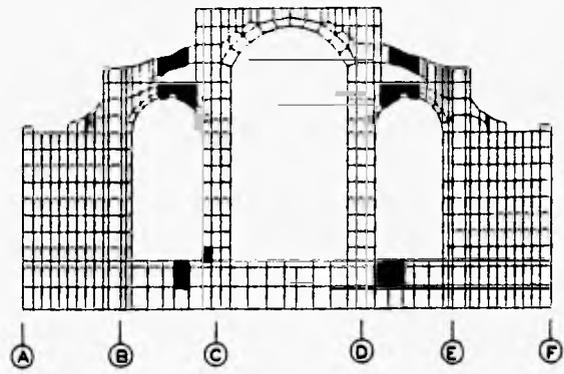


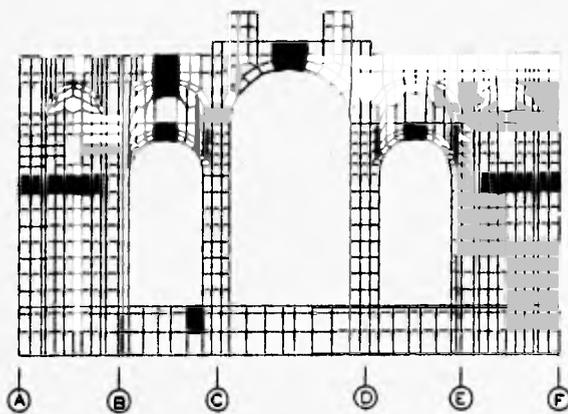
Fig.14 Ubicación en planta de los ejes analizados.



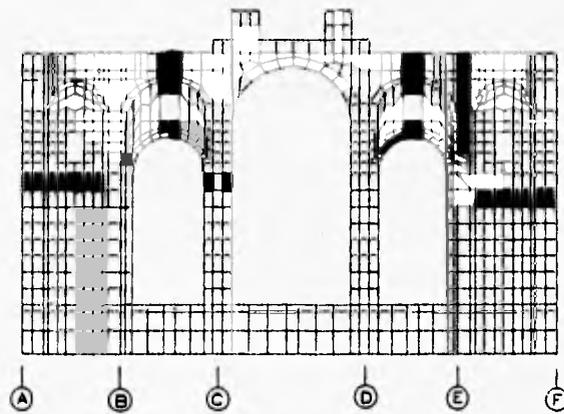
a) Eje 4



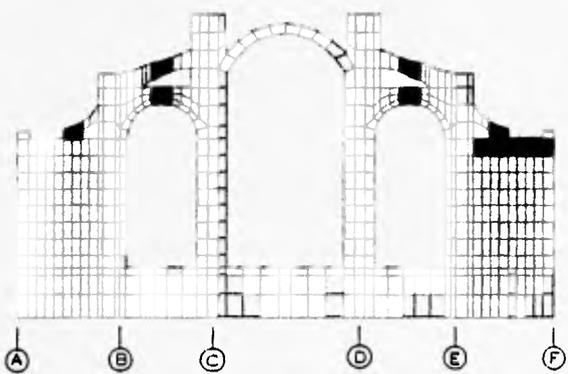
b) Eje 5



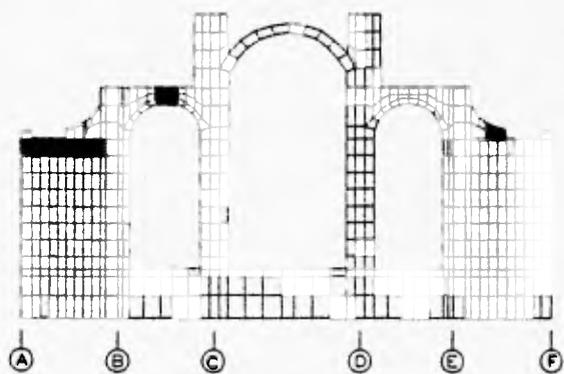
c) Eje 6



d) Eje 7



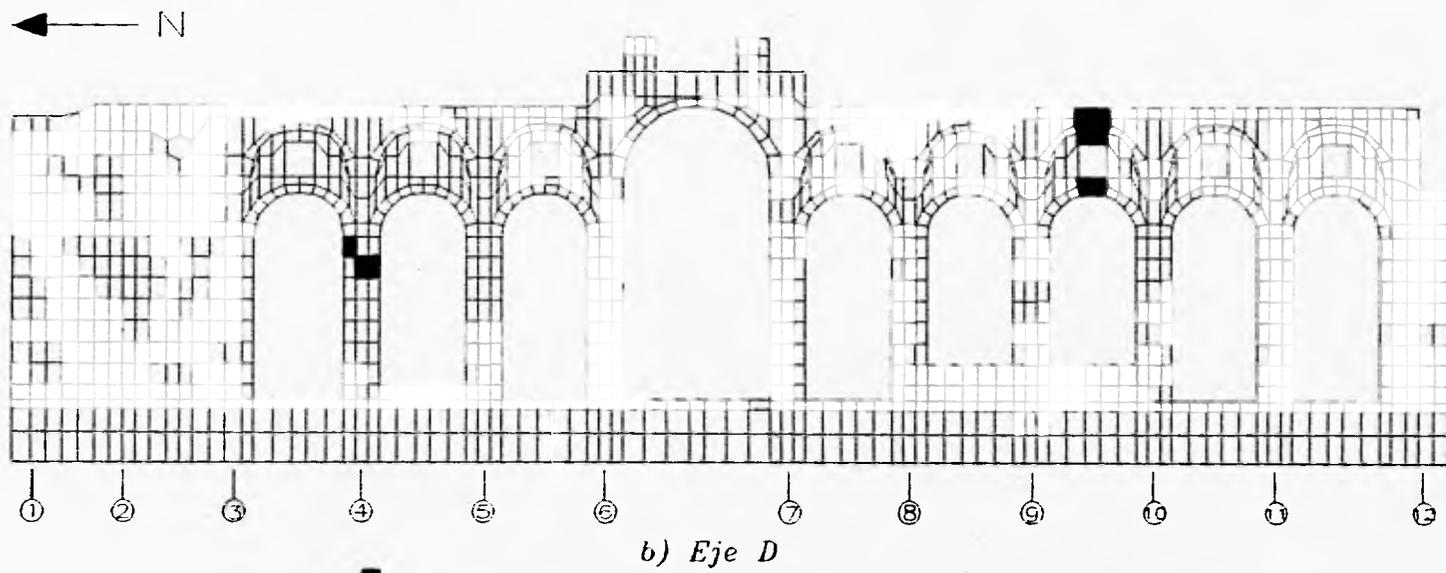
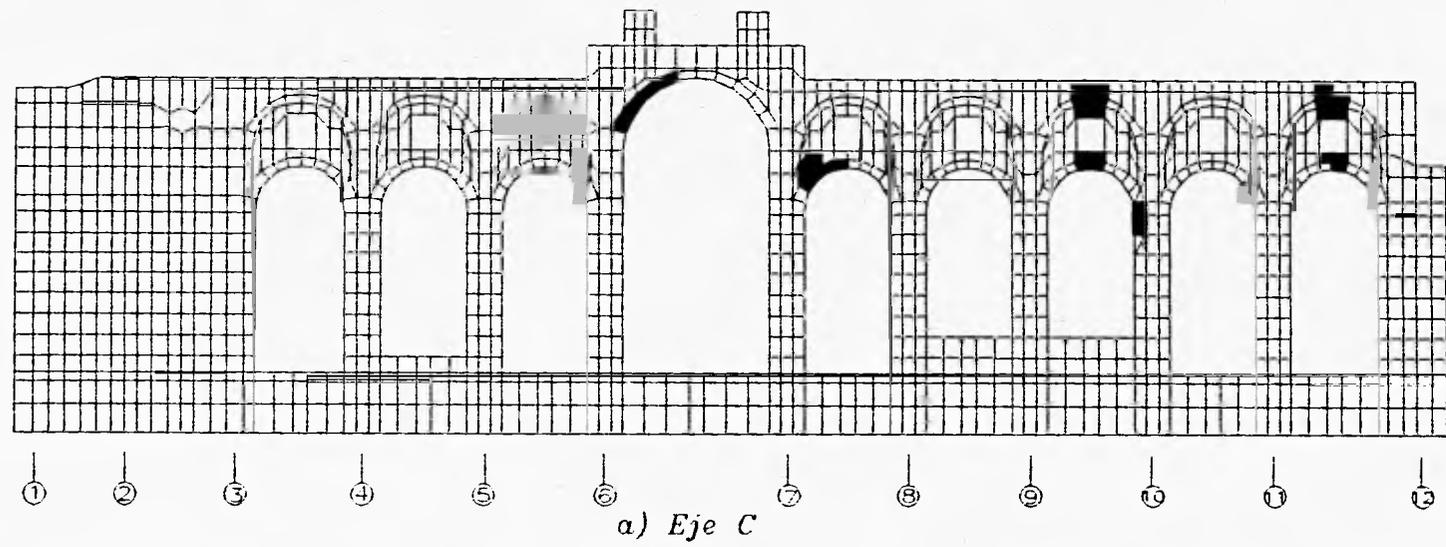
e) Eje 8



f) Ejes 9 y 10

■ Elementos con módulo de elasticidad reducido

Fig.15 Modelos de elemento finito con variación de la rigidez en las zonas marcadas. Ejes transversales.



■ Elementos con módulo de elasticidad reducido

Fig.16 Modelos de elemento finito con variación de la rigidez en las zonas marcadas. Ejes longitudinales.

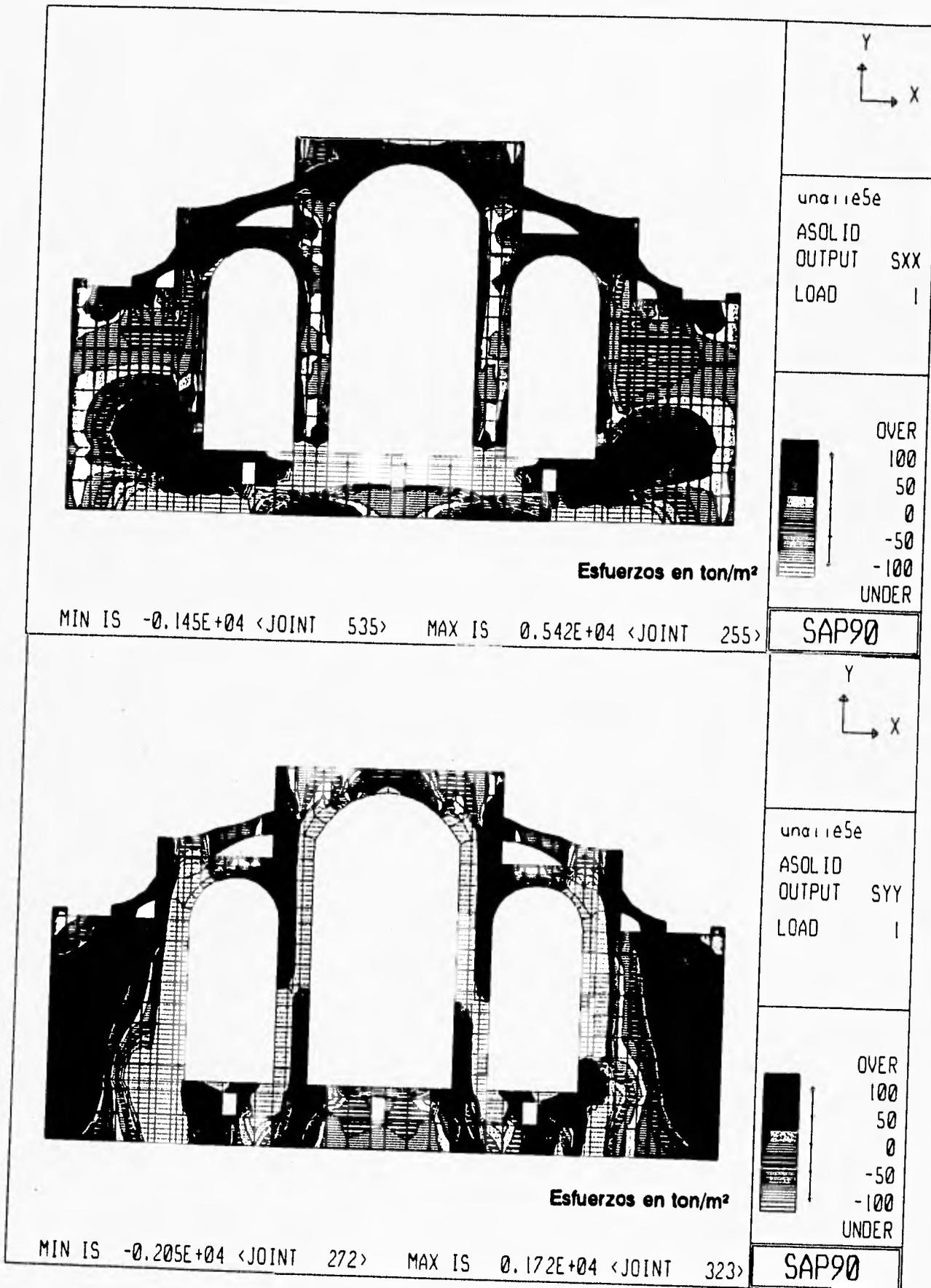


Fig.17 Configuración de los niveles de esfuerzo, obtenidos mediante un análisis elástico. Eje 5.

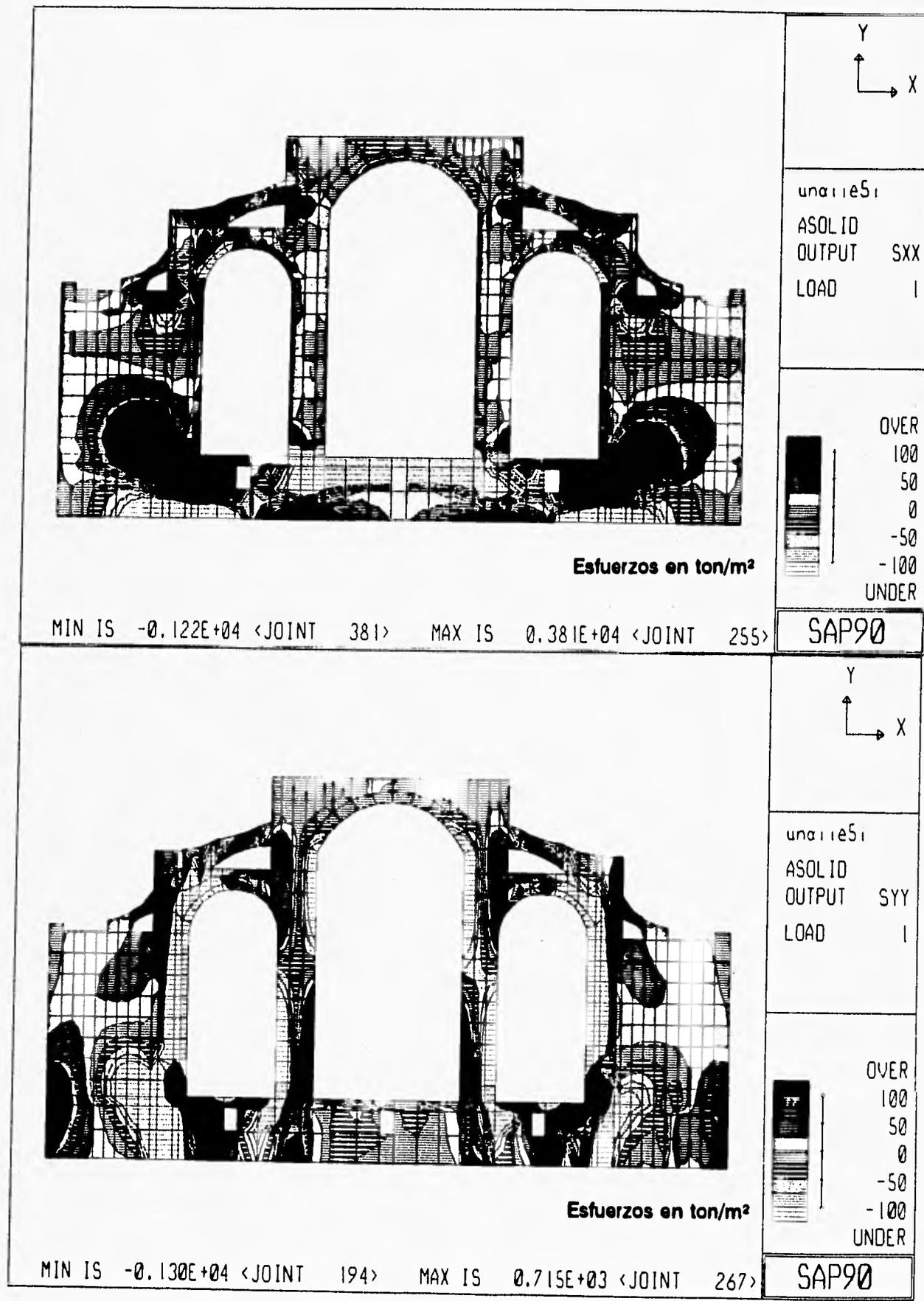


Fig.18 Configuración de los niveles de esfuerzo, obtenidos mediante un análisis inelástico. Eje 5.

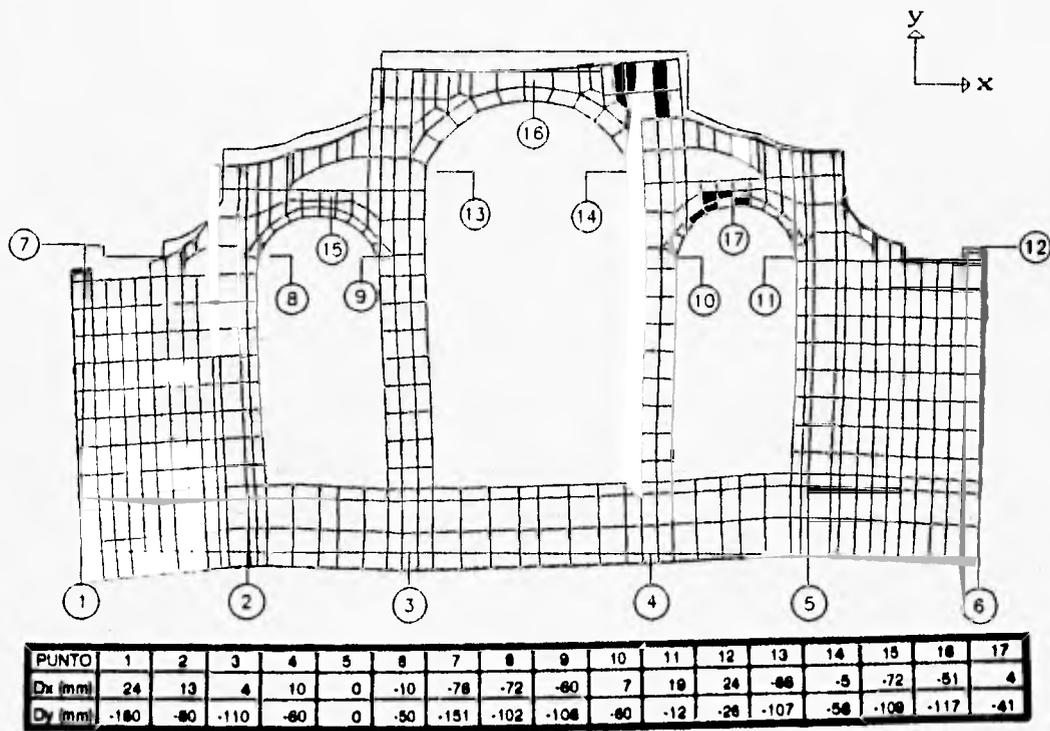


Fig.19 Desplazamientos del eje 4, obtenidos a partir de un análisis elástico.

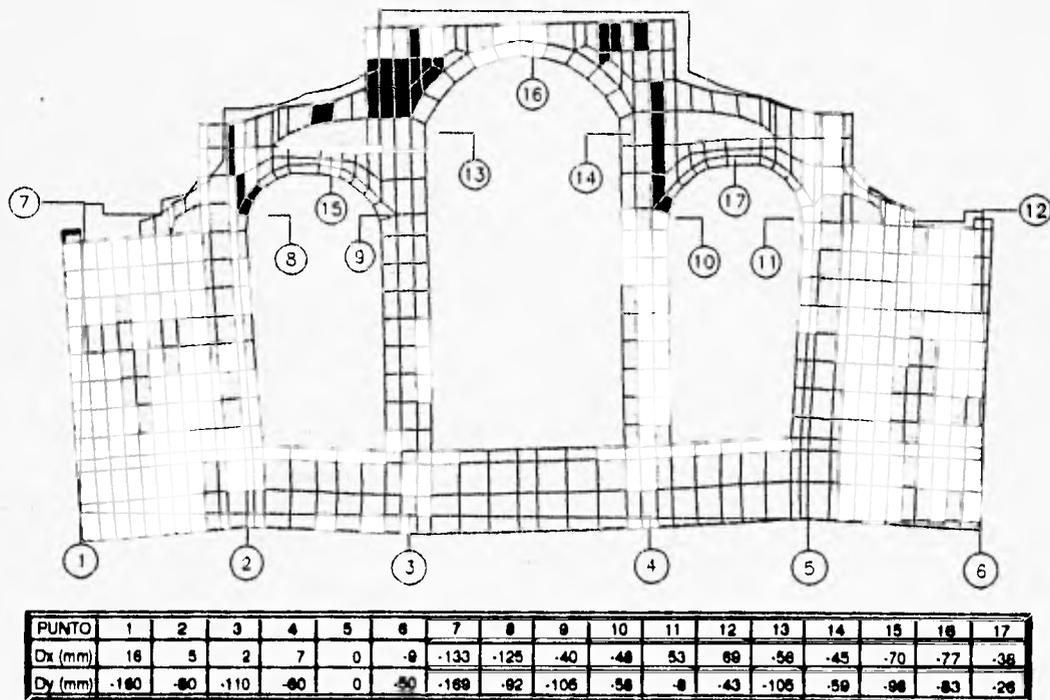


Fig.20 Desplazamientos del eje 4, obtenidos a partir de un análisis inelástico.

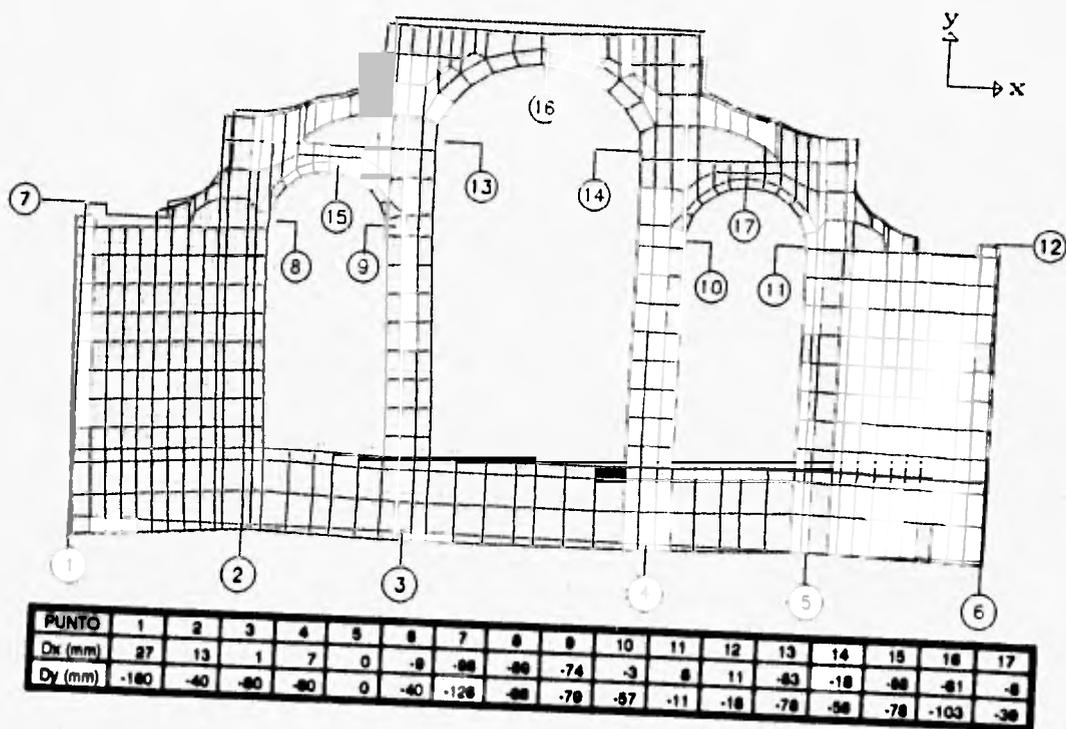


Fig.21 Desplazamientos del eje 5, obtenidos a partir de un análisis elástico.

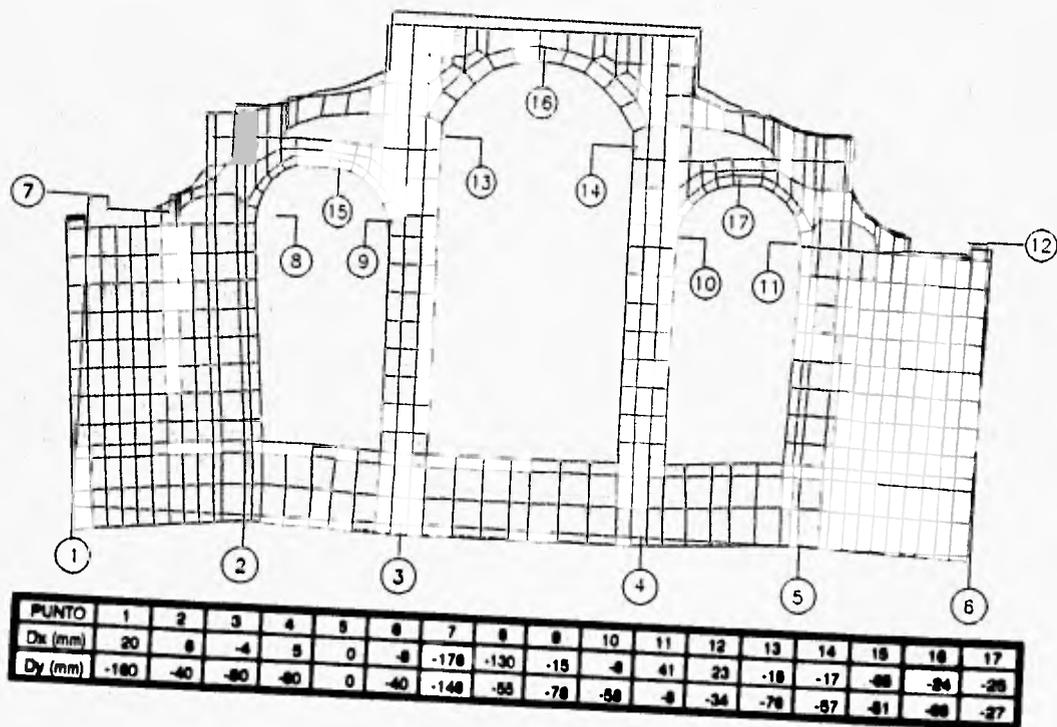


Fig.22 Desplazamientos del eje 5, obtenidos a partir de un análisis inelástico.

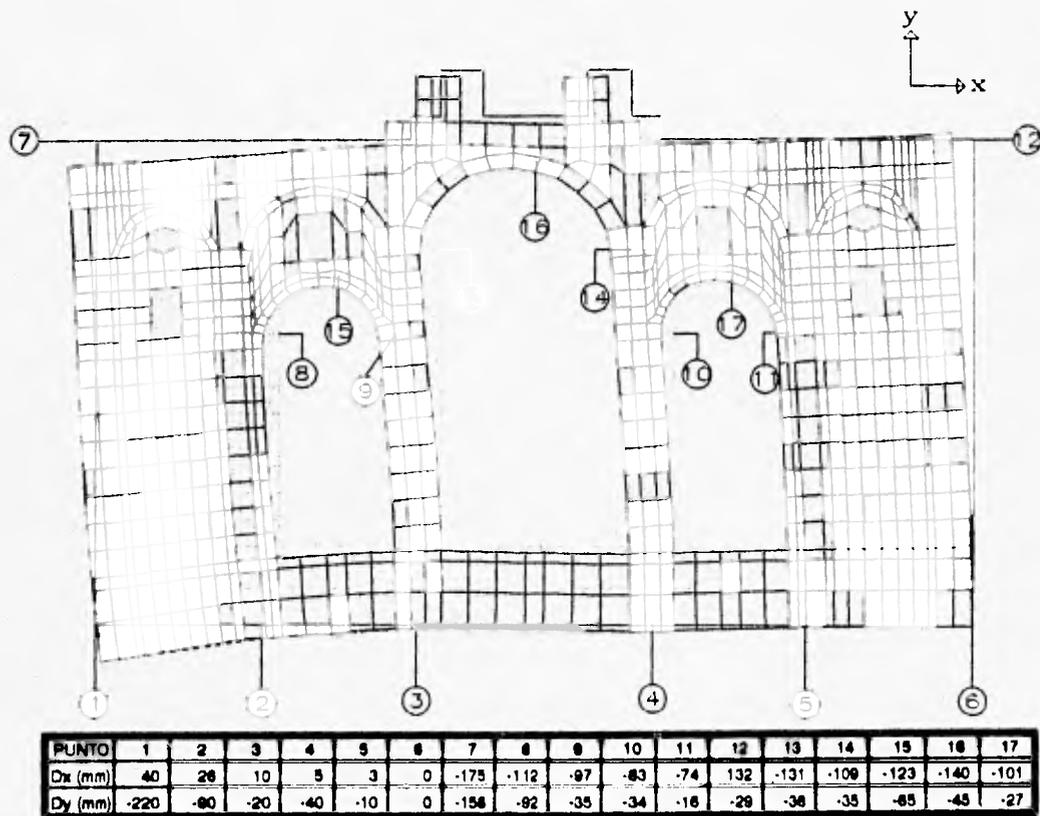


Fig.23 Desplazamientos del eje 6, obtenidos a partir de un análisis elástico.

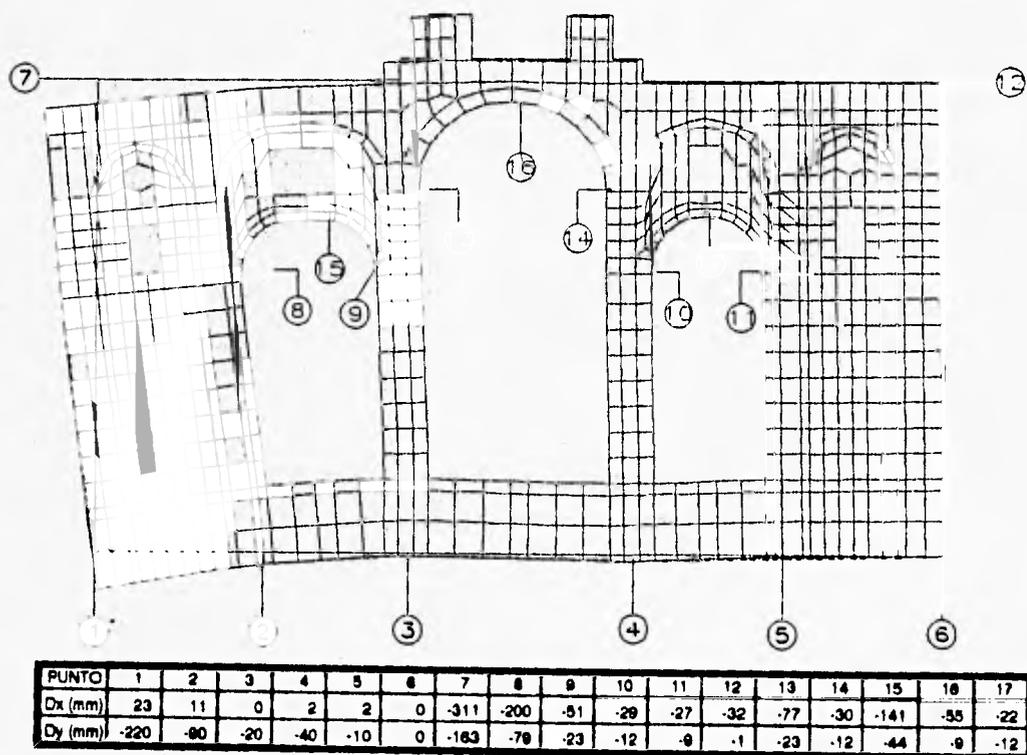


Fig.24 Desplazamientos del eje 6, obtenidos a partir de un análisis inelástico.

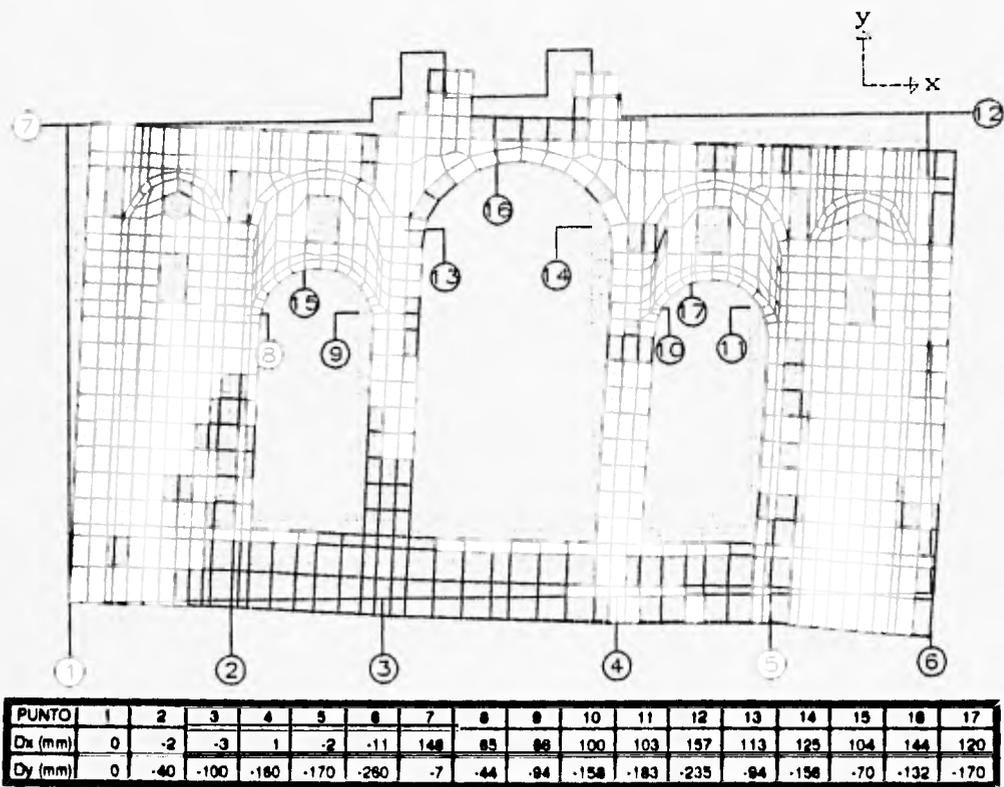


Fig.25 Desplazamientos del eje 7, obtenidos a partir de un análisis elástico.

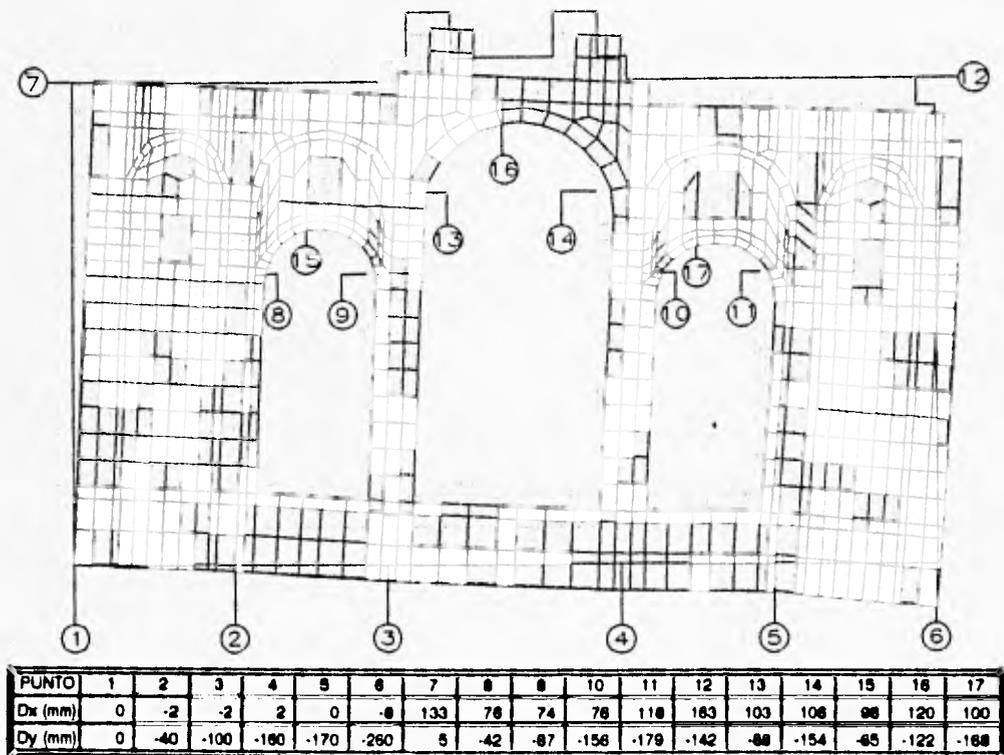


Fig.26 Desplazamientos del eje 7, obtenidos a partir de un análisis inelástico.

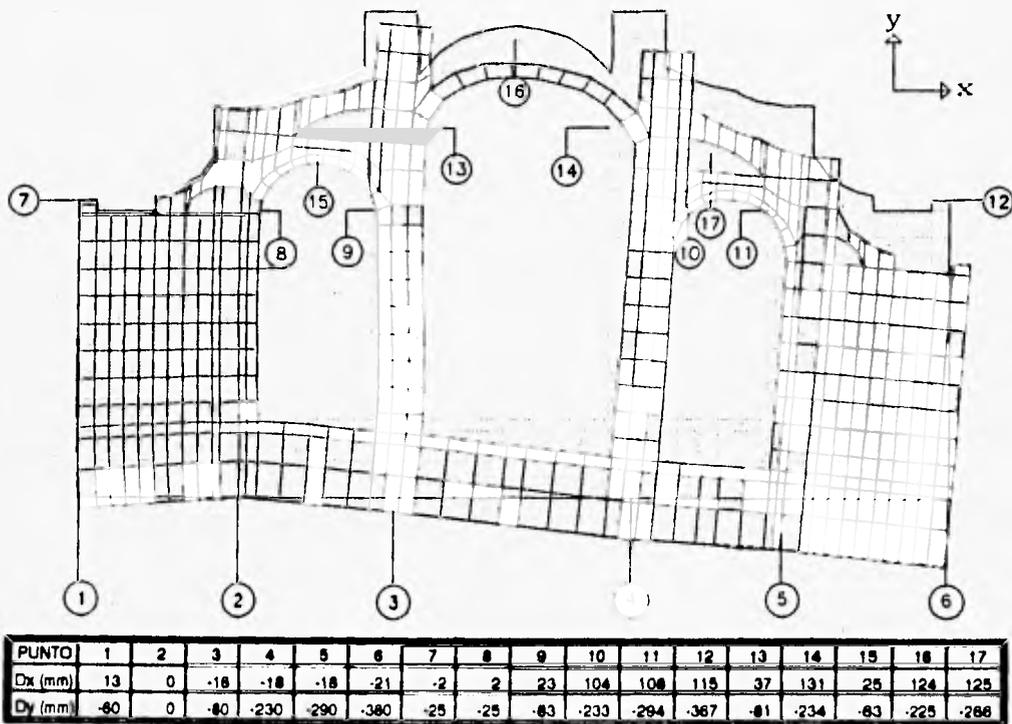


Fig.27 Desplazamientos del eje 8, obtenidos a partir de un análisis elástico.

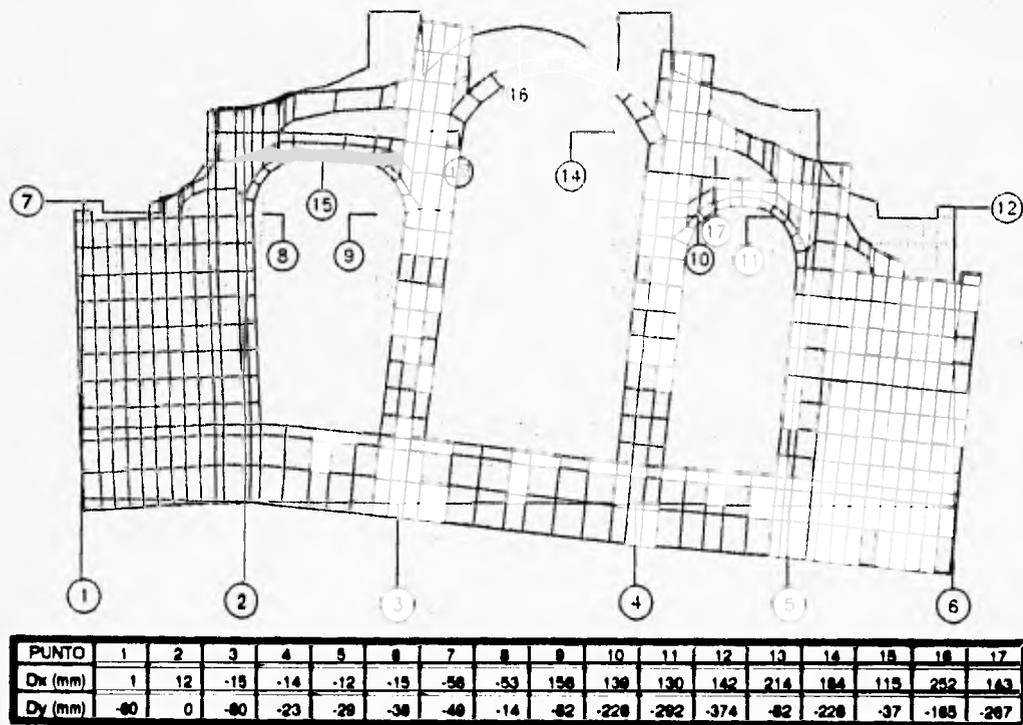


Fig.28 Desplazamientos del eje 8, obtenidos a partir de un análisis inelástico.

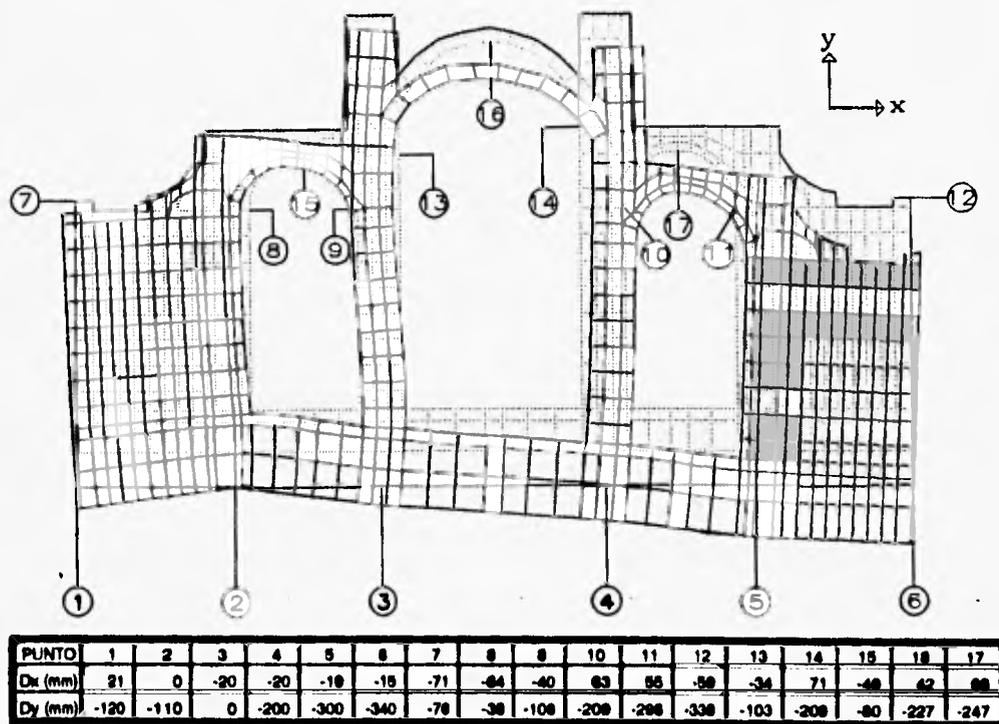


Fig.29 Desplazamientos del eje 9, obtenidos a partir de un análisis elástico.

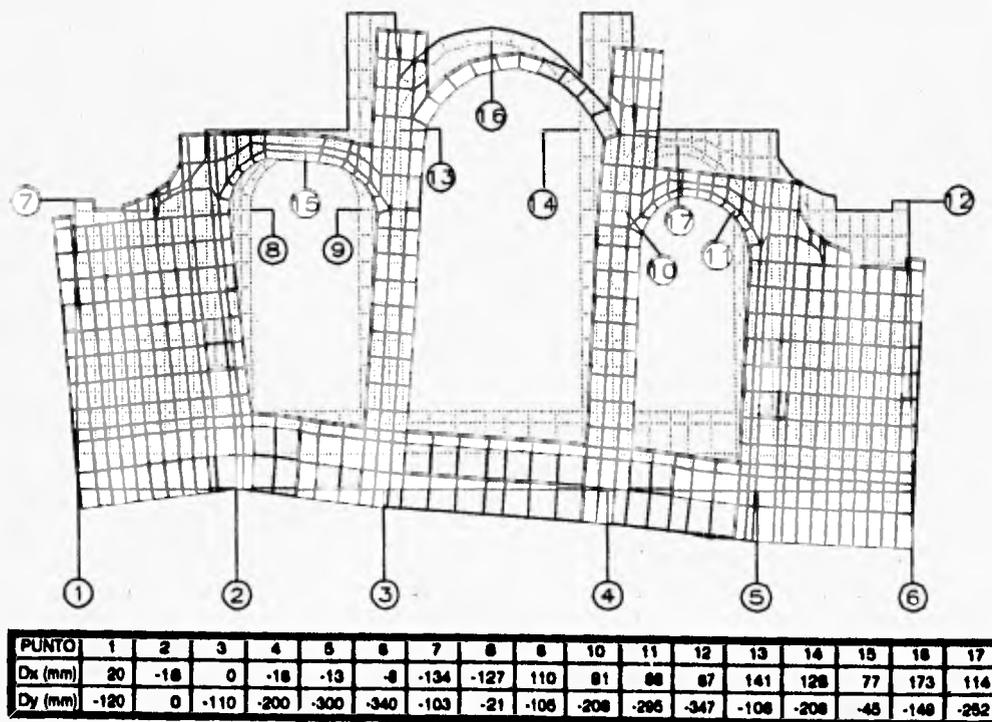


Fig.30 Desplazamientos del eje 9, obtenidos a partir de un análisis inelástico.

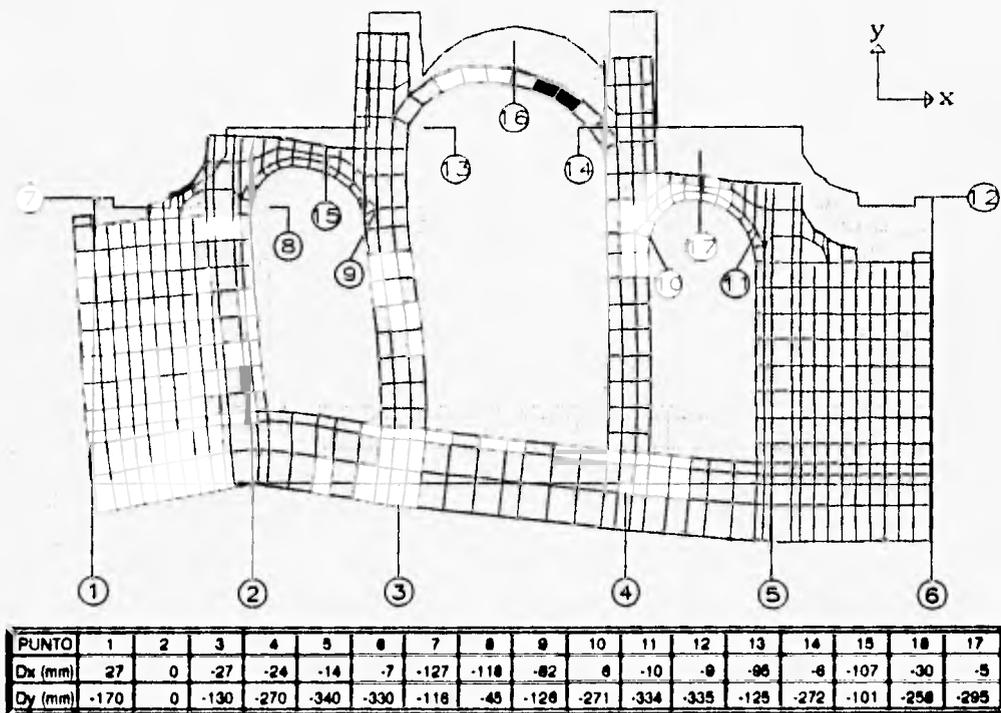


Fig.31 Desplazamientos del eje 10, obtenidos a partir de un análisis elástico.

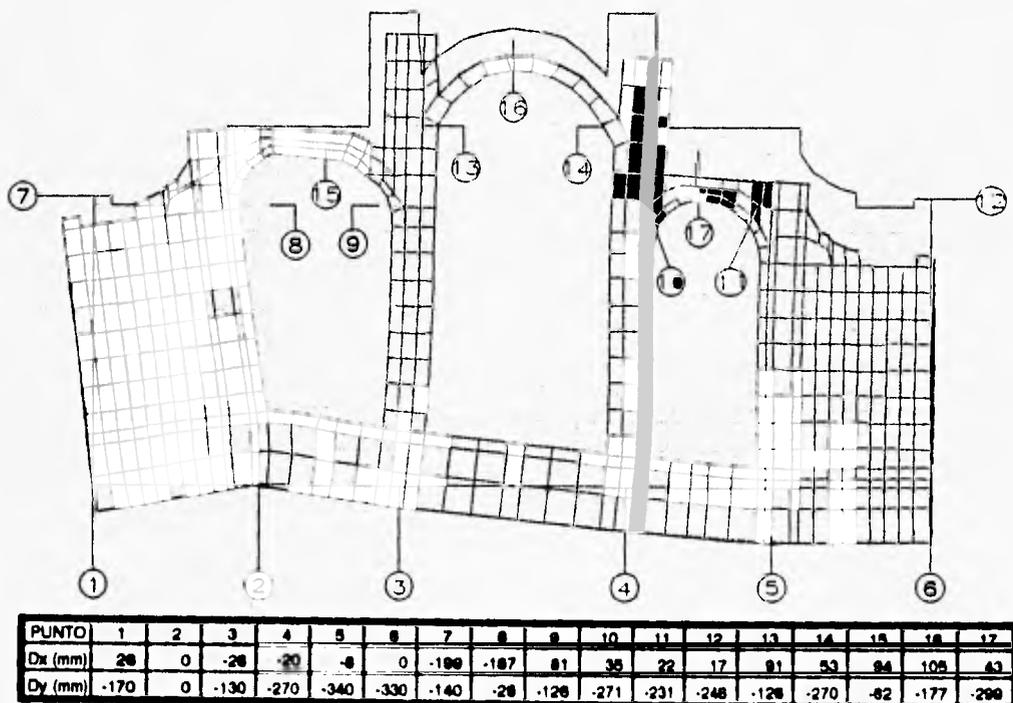
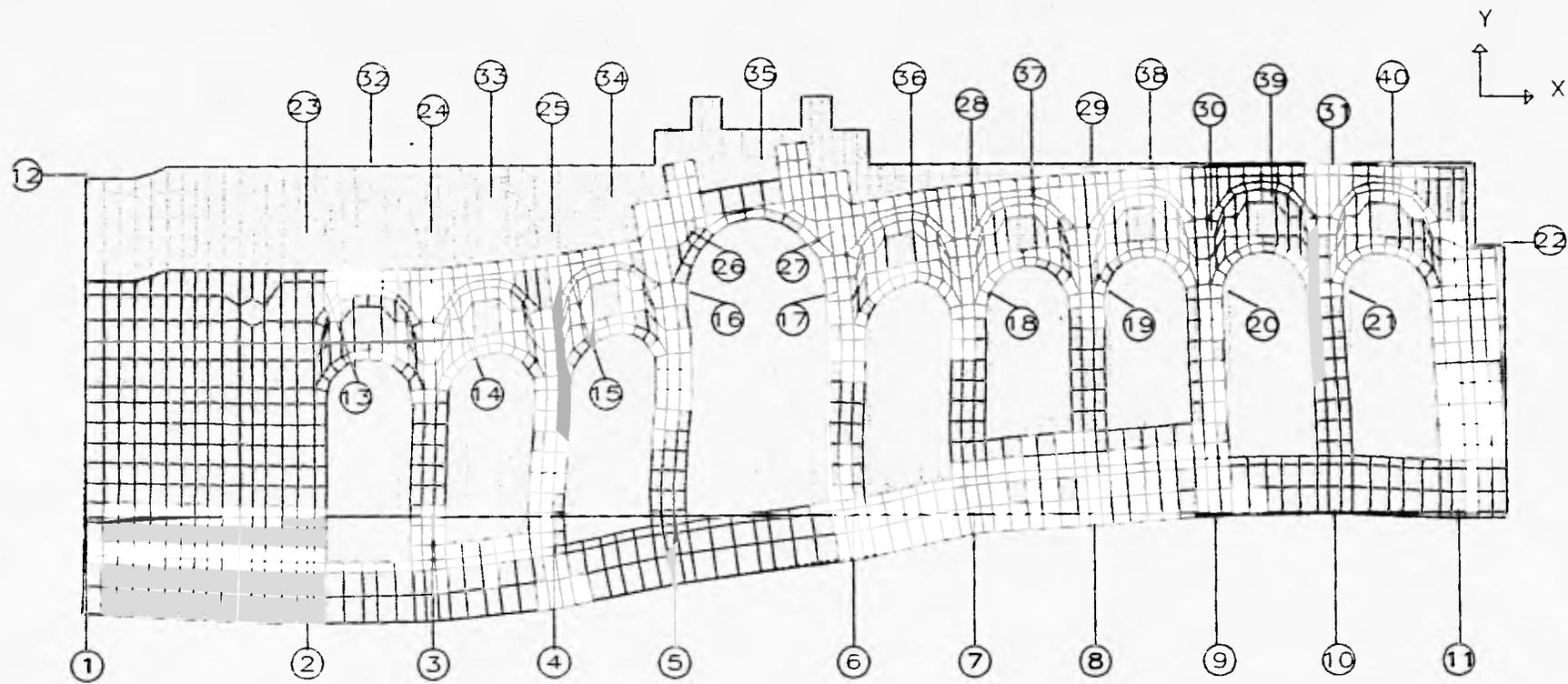
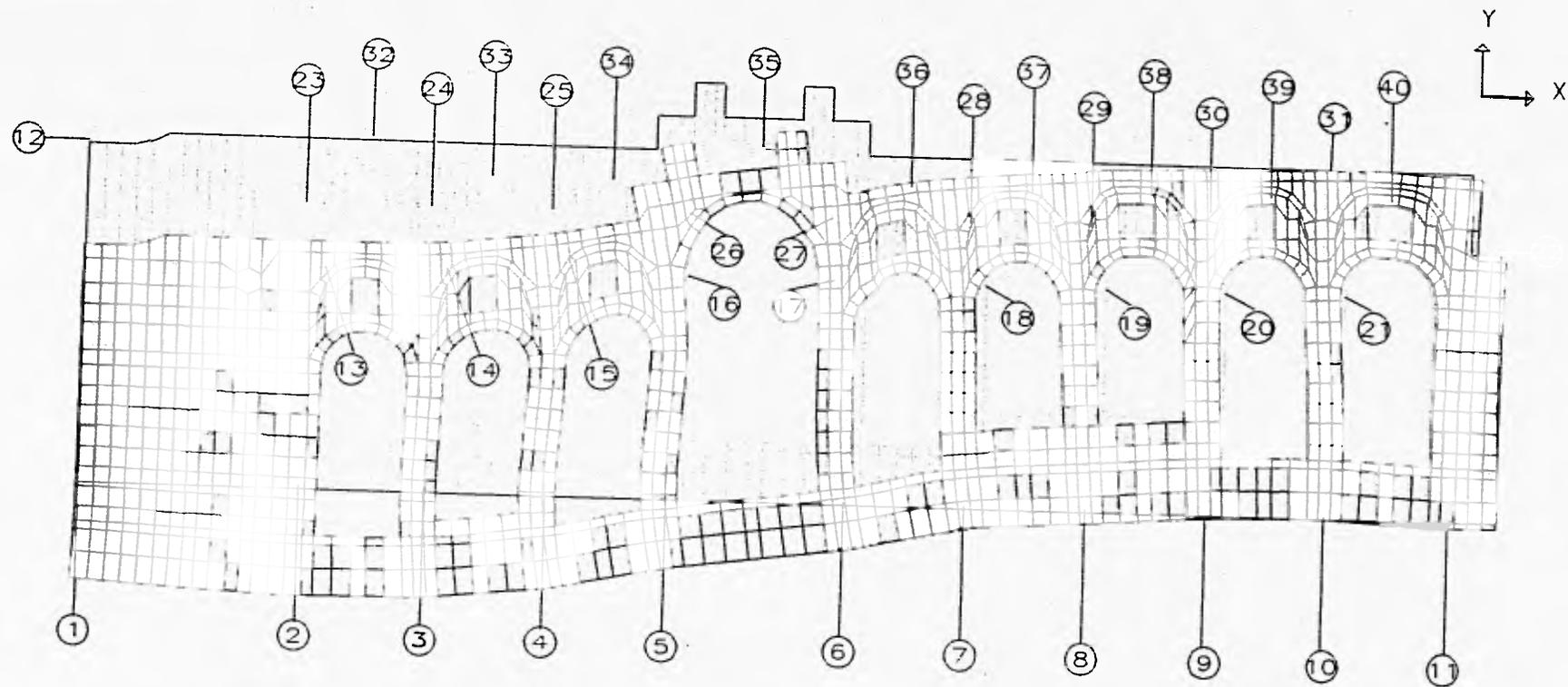


Fig.32 Desplazamientos del eje 10, obtenidos a partir de un análisis inelástico.



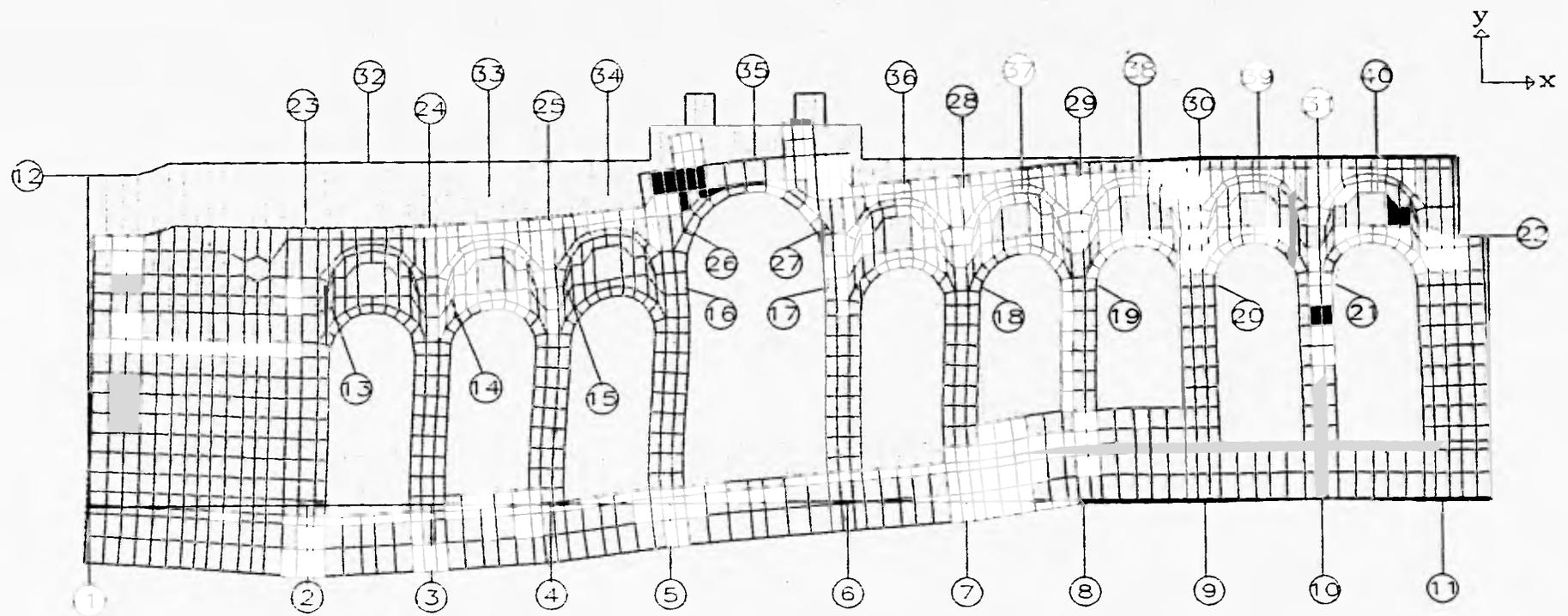
PUNTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Dx (mm)	-22	-4	0	16	23	24	23	13	9	0	-3	-1	-4	-8	14	29	-23	-21	-31	-38
Dy (mm)	-510	-570	-560	-490	-360	-240	-100	-80	-10	0	-30	-536	-552	-548	-483	-372	-225	-115	-57	-15
PUNTO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Dx (mm)	-44	-37	-8	-16	-20	-80	-46	-47	-50	-46	-46	-11	-11	-9	-116	-36	-41	-45	-46	-46
Dy (mm)	-8	-28	-551	-545	-478	-375	-228	-110	-86	-15	-8	-561	-520	-430	-307	-171	-84	-34	-8	-18

Fig.33 Desplazamientos del eje C, obtenidos a partir de un análisis elástico.



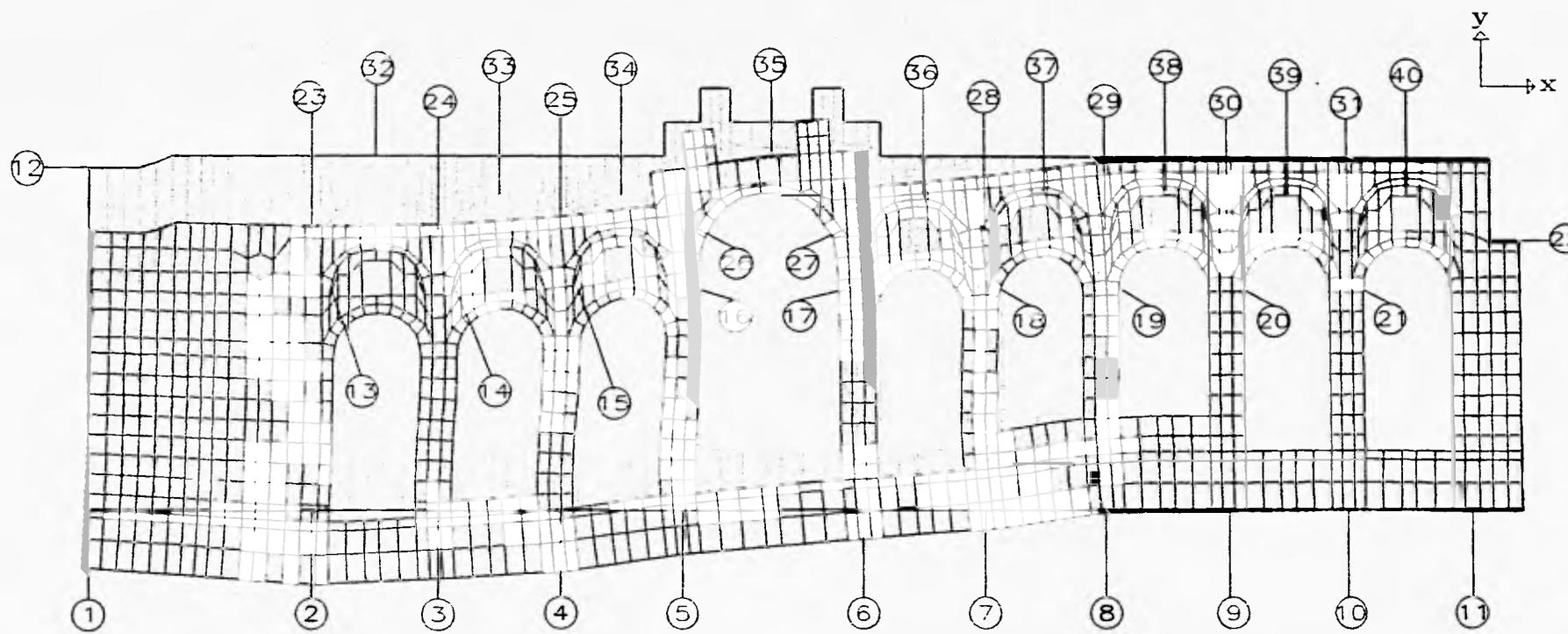
PUNTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Dx (mm)	-26	-17	-4	12	18	20	20	10	7	0	-2	-6	-15	-25	-34	-25	-58	-87	-89	-44
Dy (mm)	-510	-570	-560	-490	-360	-240	-100	-80	-10	0	-30	-552	-548	-483	-500	-364	-116	-58	-27	-5
PUNTO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Dx (mm)	-43	-32	-13	-21	-24	-25	-71	-87	-88	-44	-43	-18	-18	-14	-101	-72	-80	-55	-41	25
Dy (mm)	-26	-34	-550	-548	-501	-353	-117	-58	-28	-5	-25	-550	-521	-430	-280	-188	-85	-38	-17	-7

Fig.34 Desplazamientos del eje C, obtenidos a partir de un análisis inelástico.



PUNTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Dx (mm)	26	-14	-3	7	12	12	15	13	2	0	-2	-31	18	13	18	18	-18	-12	-17	-24
Dy (mm)	-310	-400	-370	-330	-240	-160	-110	-10	-10	0	-10	-378	-375	-387	-227	-245	-157	-100	-28	-8
PUNTO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Dx (mm)	-28	-1	18	11	1	-29	-29	-28	-30	-32	-32	15	-17	13	-63	-22	-22	-28	-31	-31
Dy (mm)	-3	-1	-373	-386	-325	-253	-155	-8	-27	-7	-3	-371	-348	-288	-201	-131	-63	-15	-4	-7

Fig.35 Desplazamientos del eje D, obtenidos a partir de un análisis elástico.



PUNTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Dx (mm)	-33	-20	-9	1	-3	8	13	11	1	0	-1	216	9	-17	-11	8	-30	-44	-45	-7
Dy (mm)	-310	-400	-370	-330	-240	-160	-110	-10	-10	0	-10	-378	-387	-327	-252	-161	-105	-20	-10	-8

PUNTO	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Dx (mm)	-7	-8	9	1	-4	-7	-44	-44	-46	-7	-7	6	2	1	-56	-37	-36	-13	-7	-7
Dy (mm)	-11	0	-387	-326	-252	-161	-105	-29	-11	-7	-11	-373	-350	-282	-193	-138	-87	-11	-8	-8

Fig.36 Desplazamientos del eje D, obtenidos a partir de un análisis inelástico.

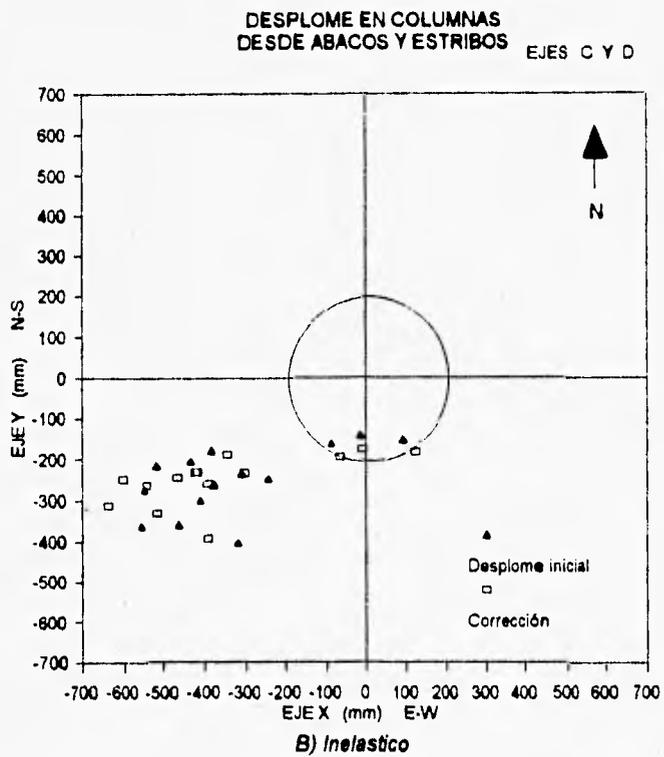
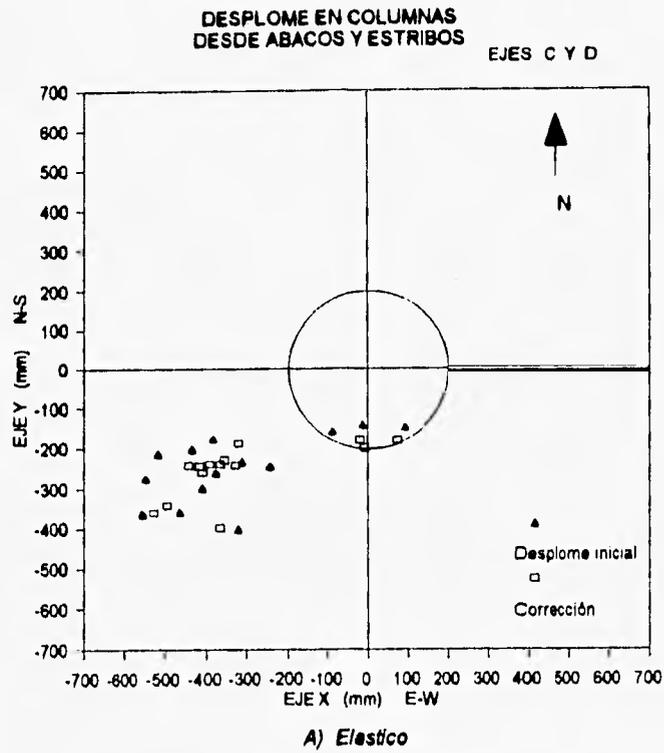


Fig. 37

Posición conjunta de los desplomes de las columnas de la nave central, actuales y de los que se obtendrán con la propuesta de corrección geométrica, obtenidos mediante un análisis a) y b).

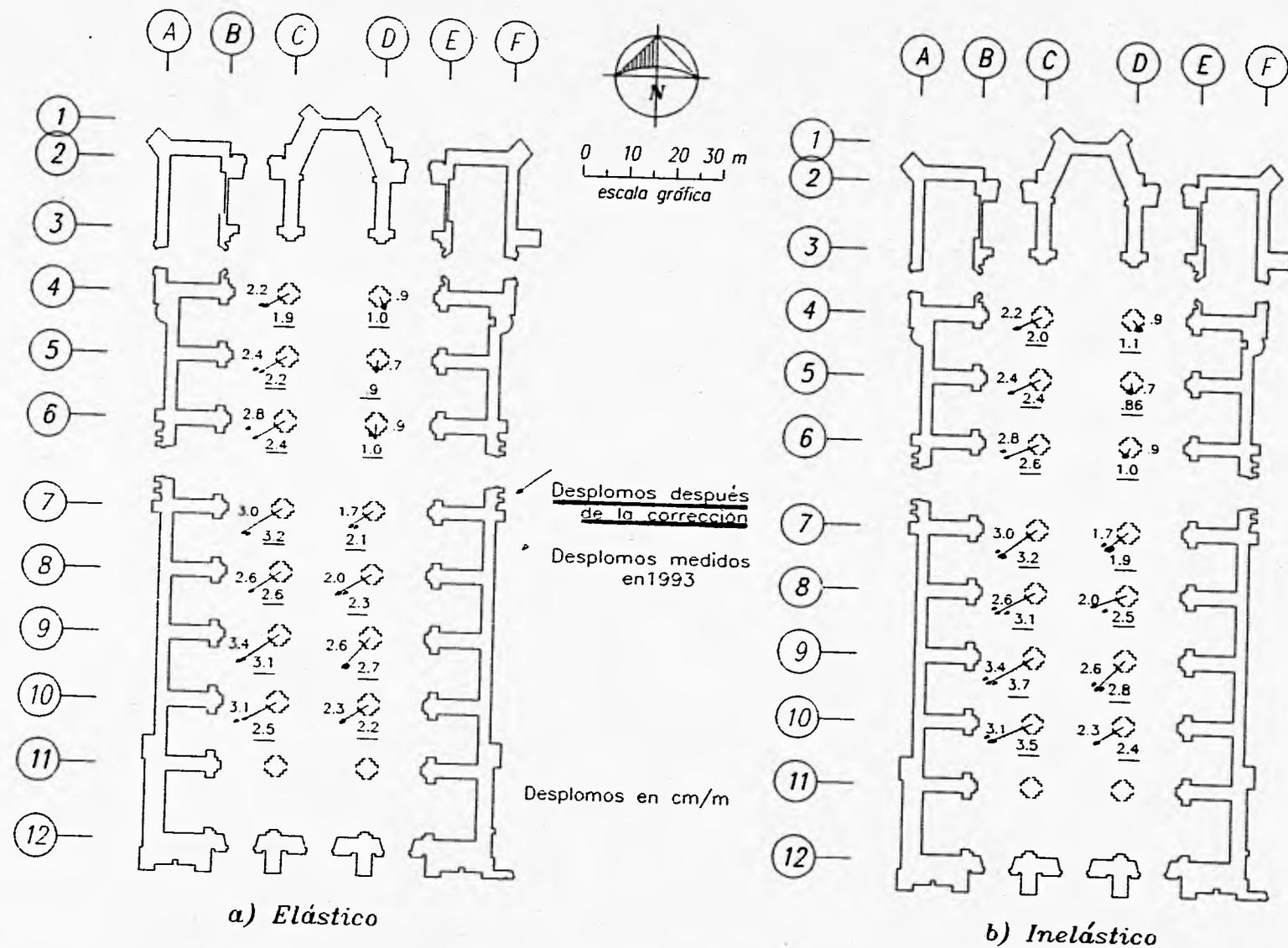
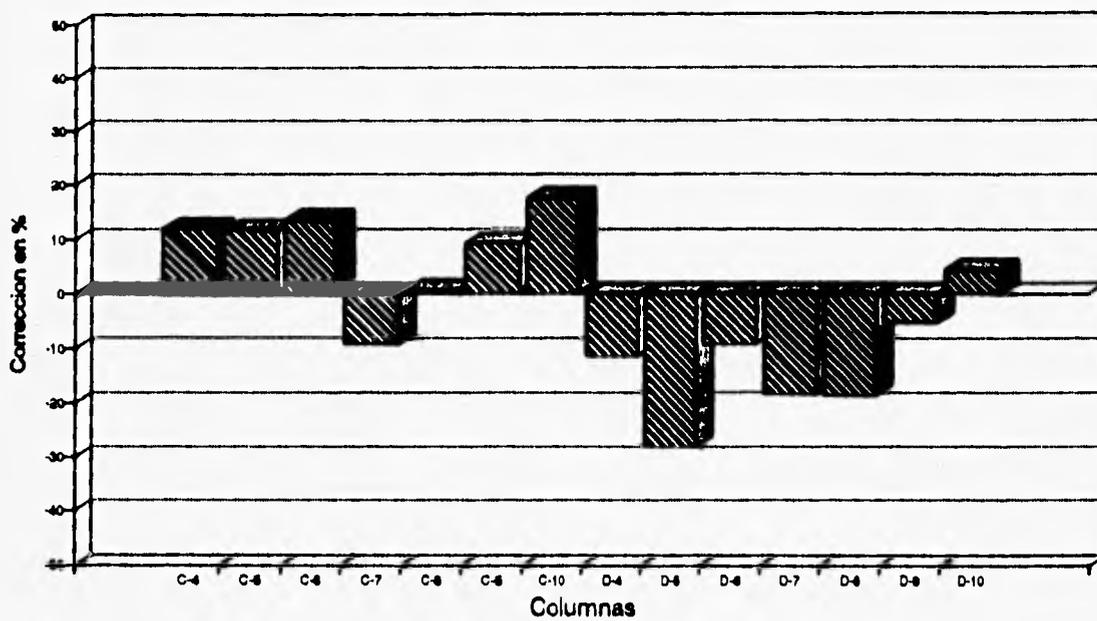


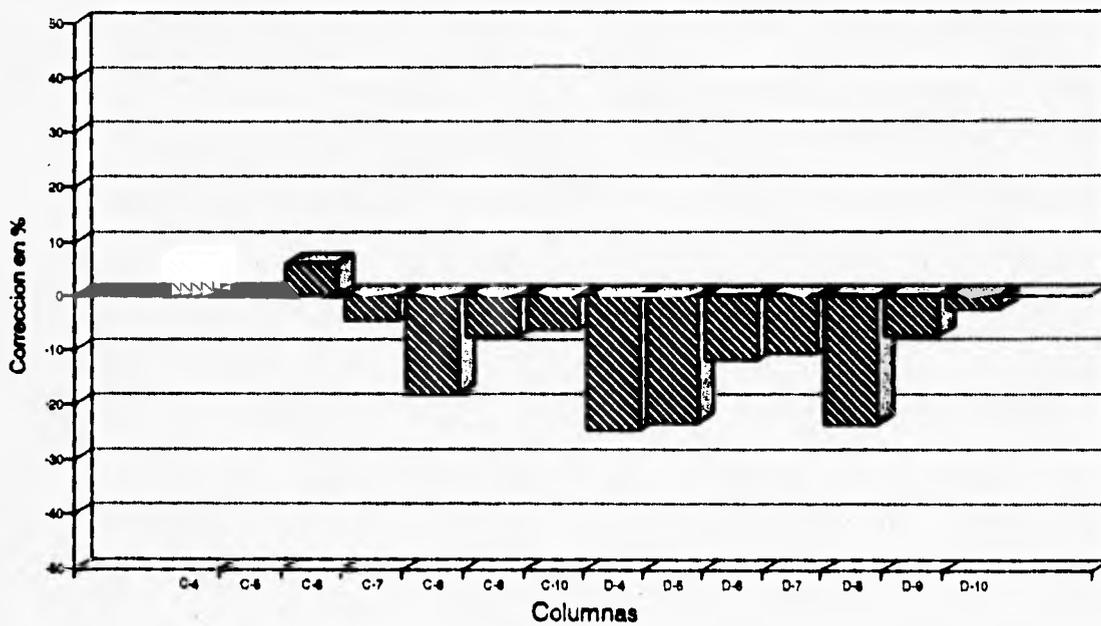
Fig.38 Comparación de los desplomos medidos en 1993 y de los que se obtendrían si se lleva a cabo la propuesta.

**CORRECCION DE LOS DESPLOMOS
DE LAS COLUMNAS DE LA NAVE CENTRAL**



a) Elástico

**CORRECCION DE LOS DESPLOMOS
DE LAS COLUMNAS DE LA NAVE CENTRAL**



B) Inelástico

Fig.39 Representación gráfica de la corrección en por ciento de los desplomos de las columnas de la nave central.

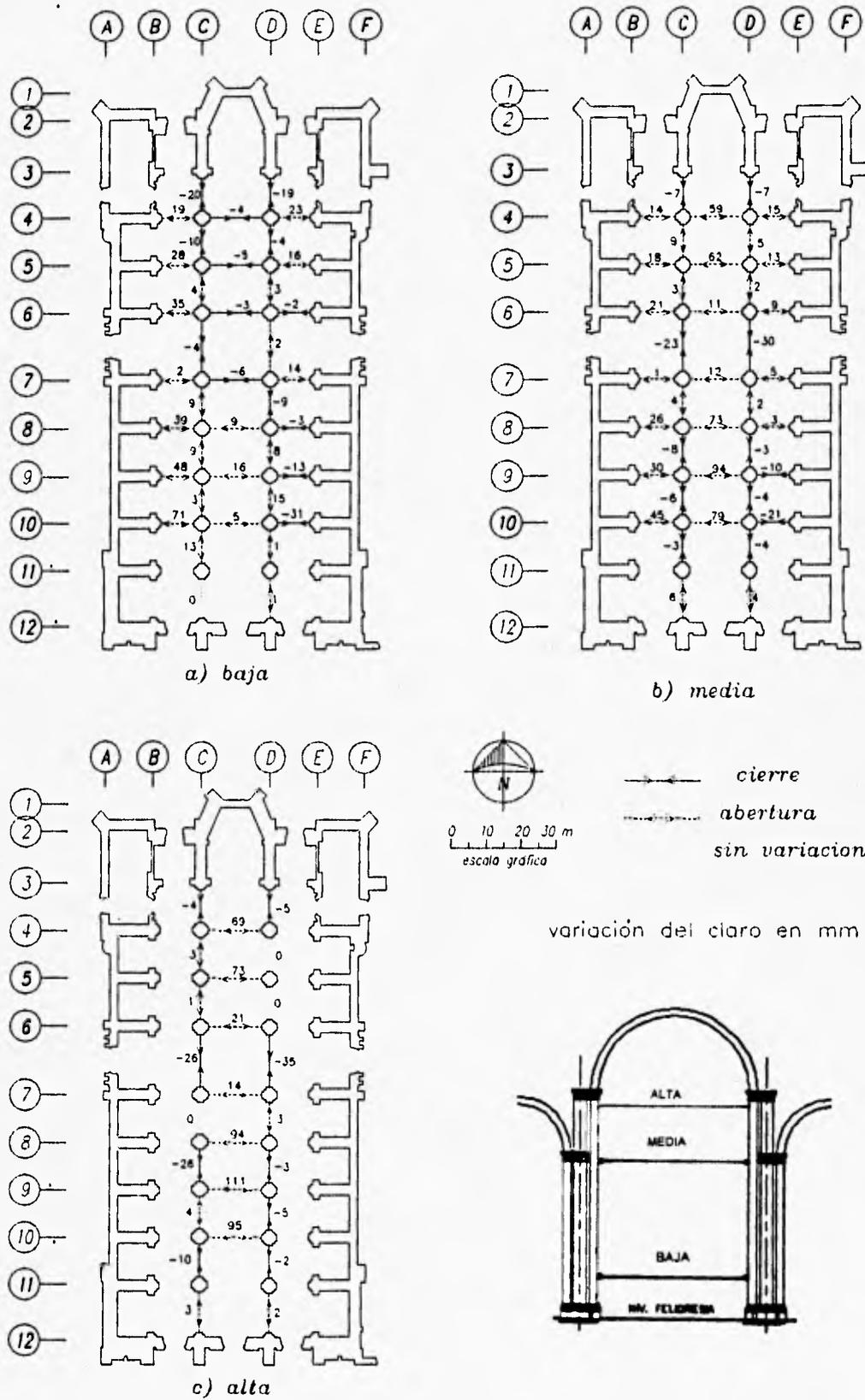


Fig. 40 Variación del claro de las naves de Catedral, obtenida apartir de un análisis elástico

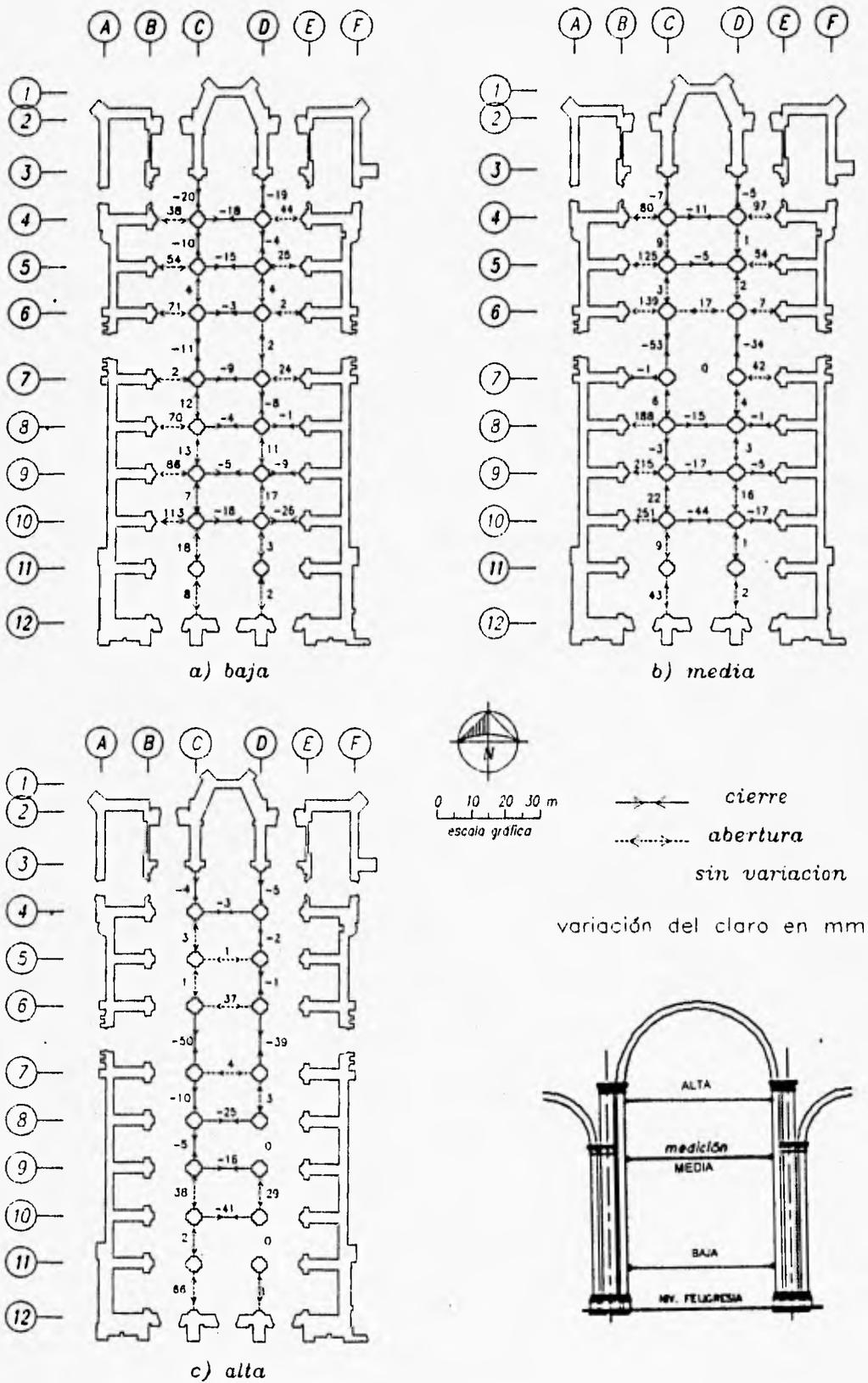


Fig. 41 Variación del claro de las naves de Catedral, obtenida apartir de un análisis inelástico

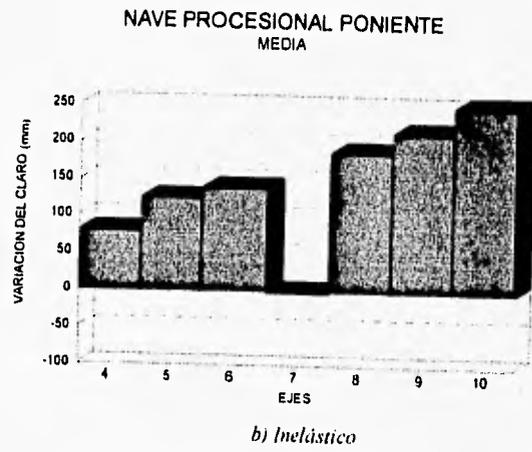
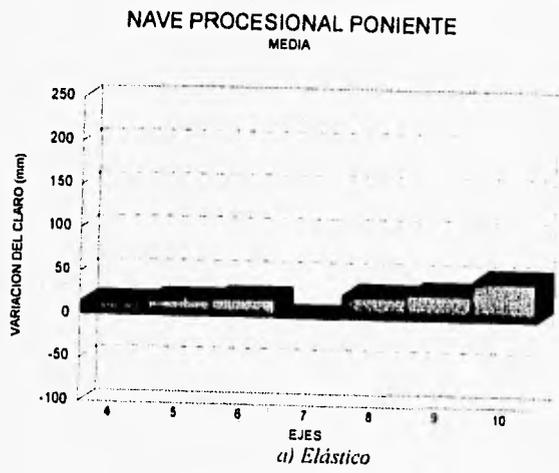
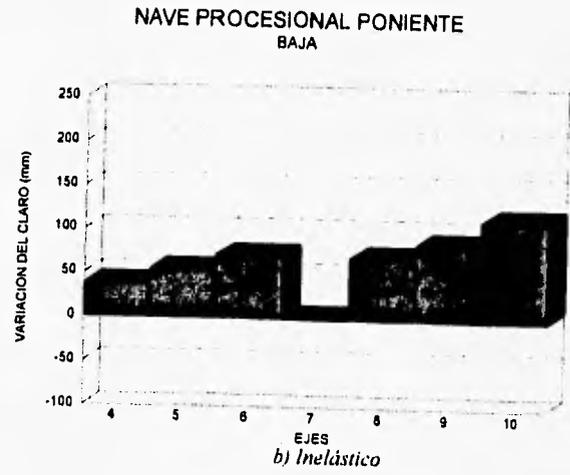
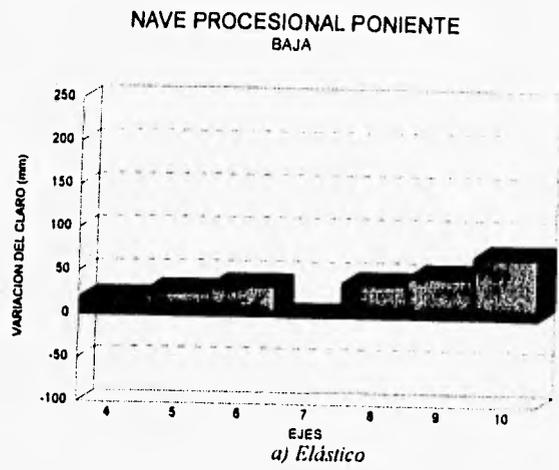


Fig.42 Representación gráfica de la magnitud de variación del claro de la nave procesional poniente.

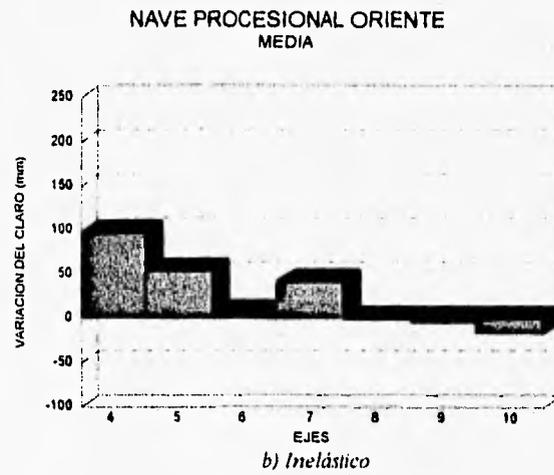
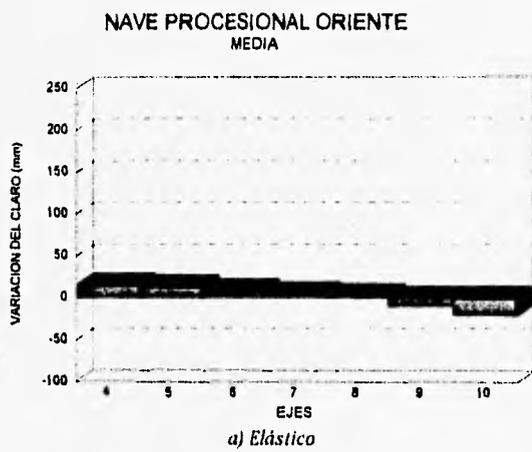
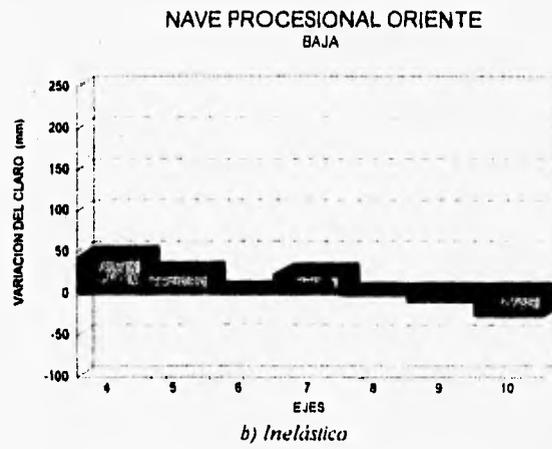
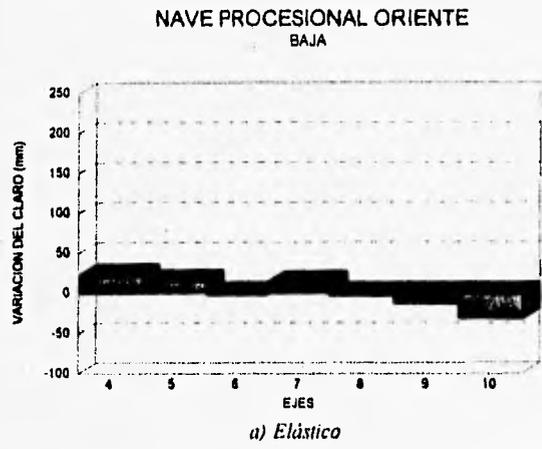


Fig.43 Representación gráfica de la magnitud de variación del claro de la nave procesional oriente.

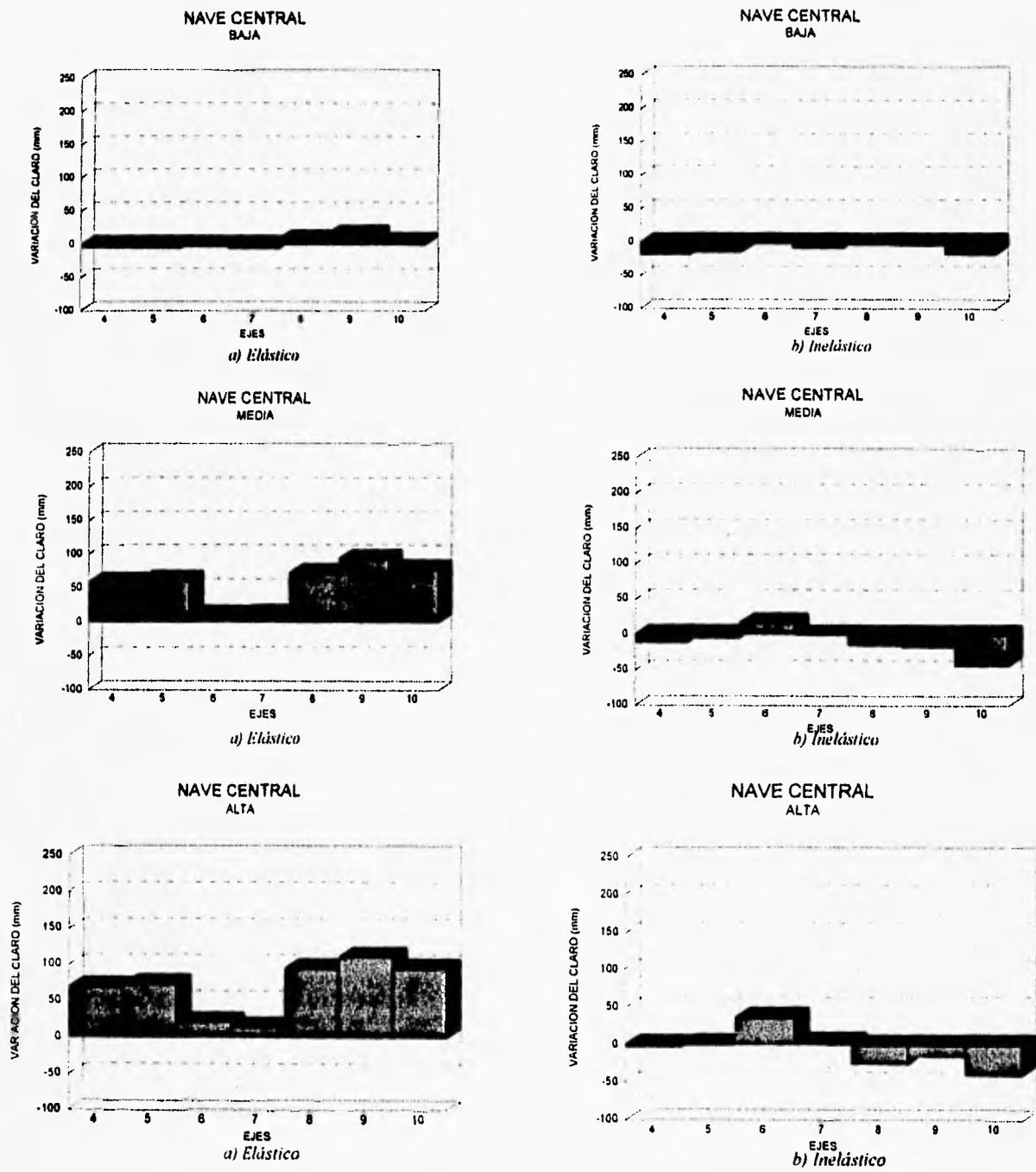


Fig.44 Representación gráfica de la magnitud de variación del claro de la nave central.

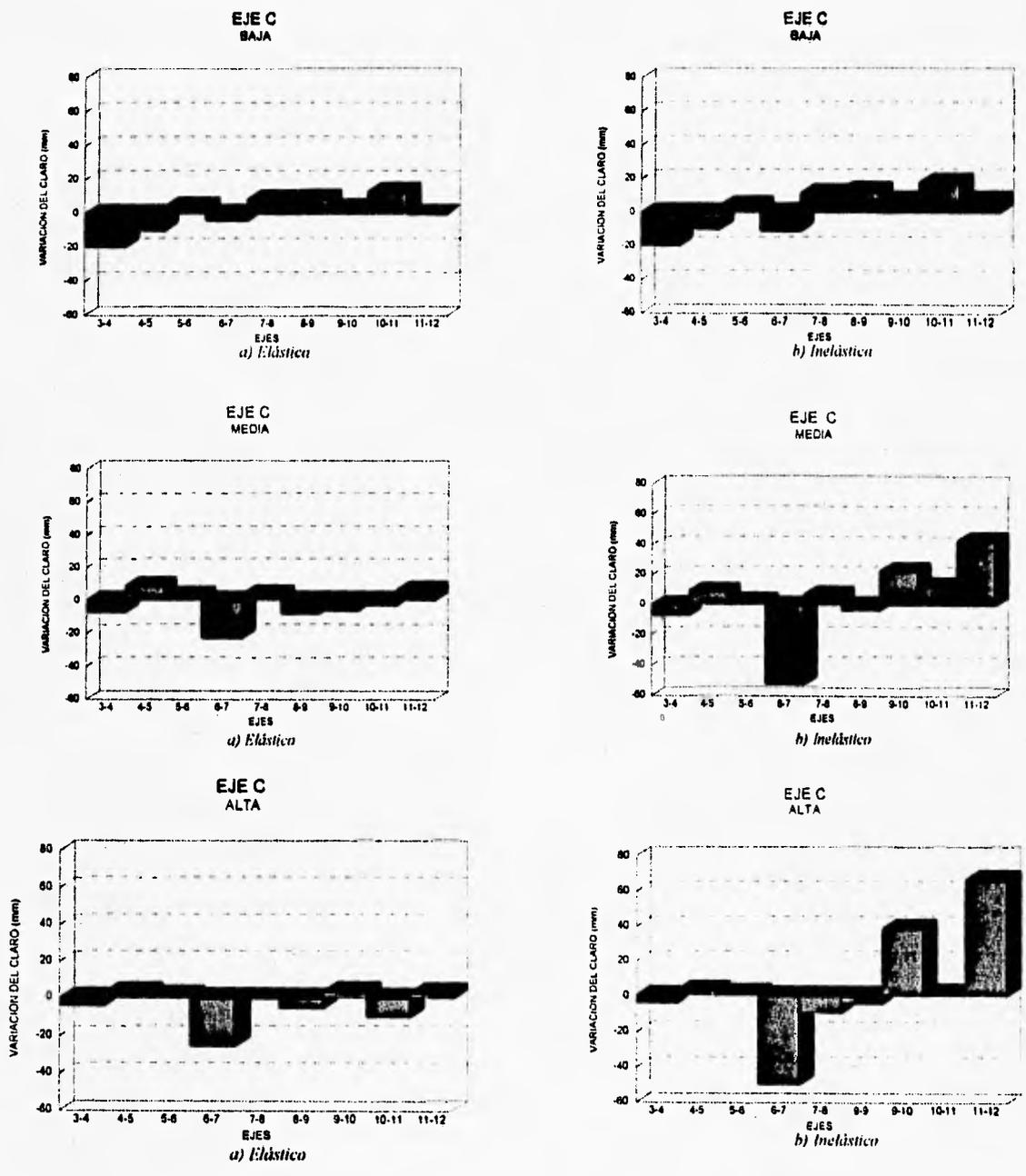
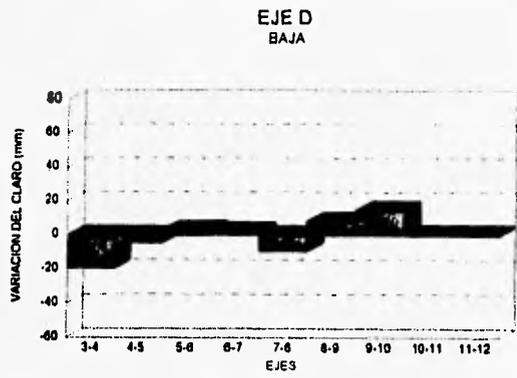
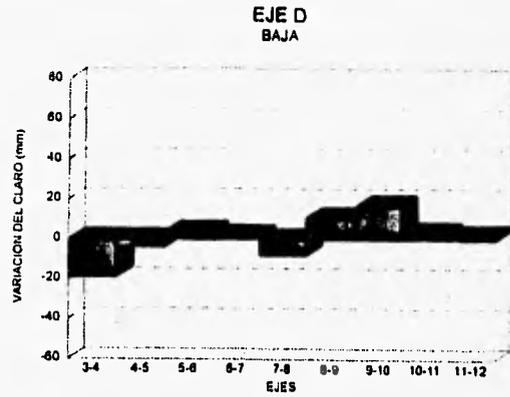


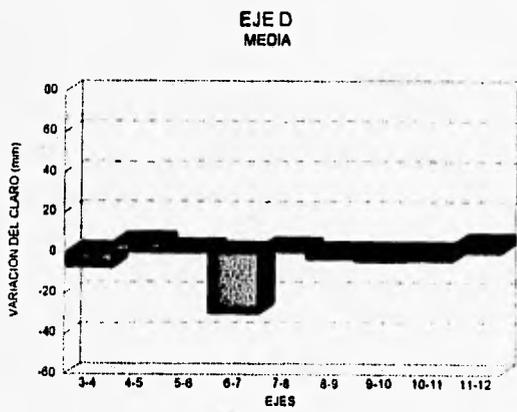
Fig. 45 Representación gráfica de la magnitud de la variación del claro a lo largo del eje C.



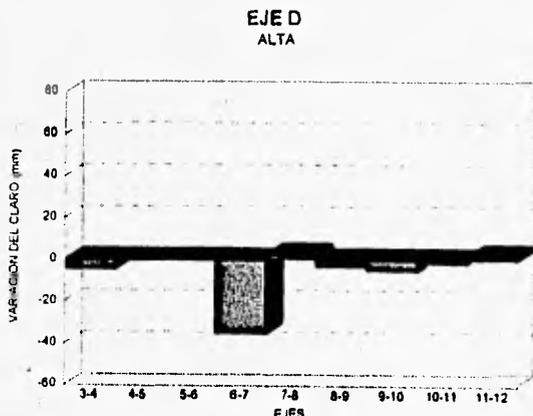
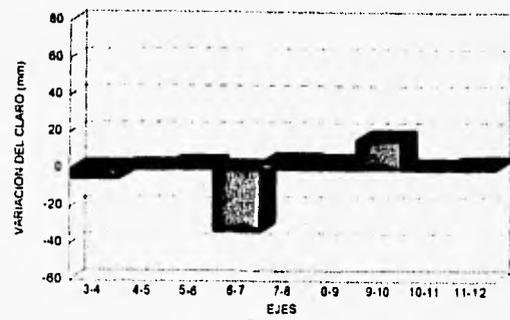
a) Elástico



b) Inelástico



b) Inelástico



a) Elástico

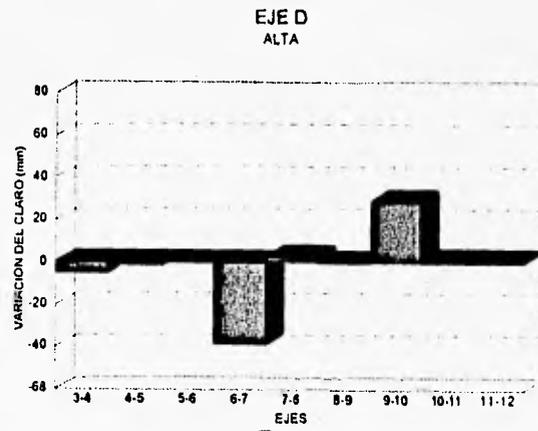


Fig.46. Representación gráfica de la magnitud de la variación del claro a lo largo del eje D.

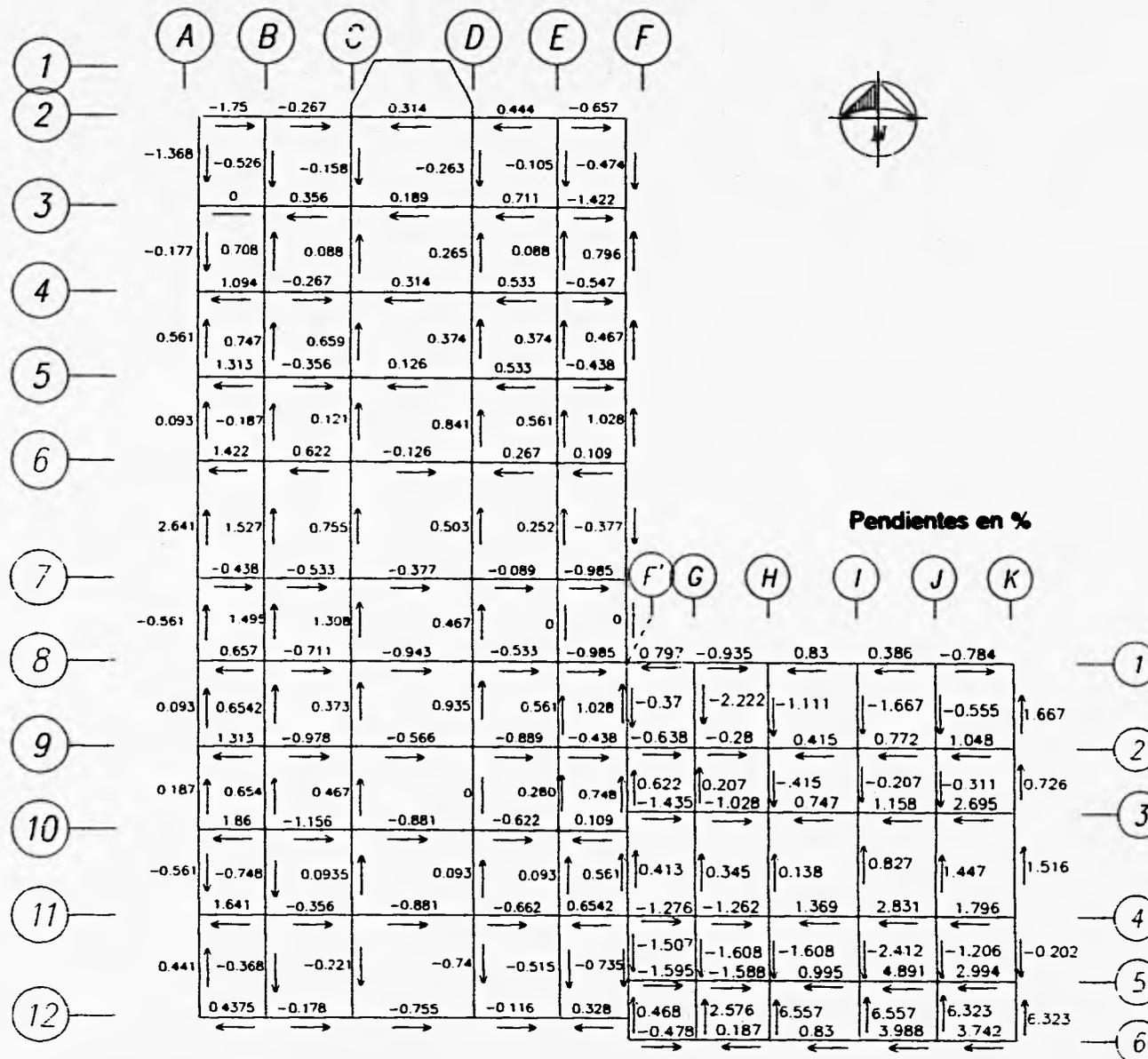


Fig.47 Pendientes que se inducirían en la base de la cimentación de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos al llevarse a cabo la propuesta.

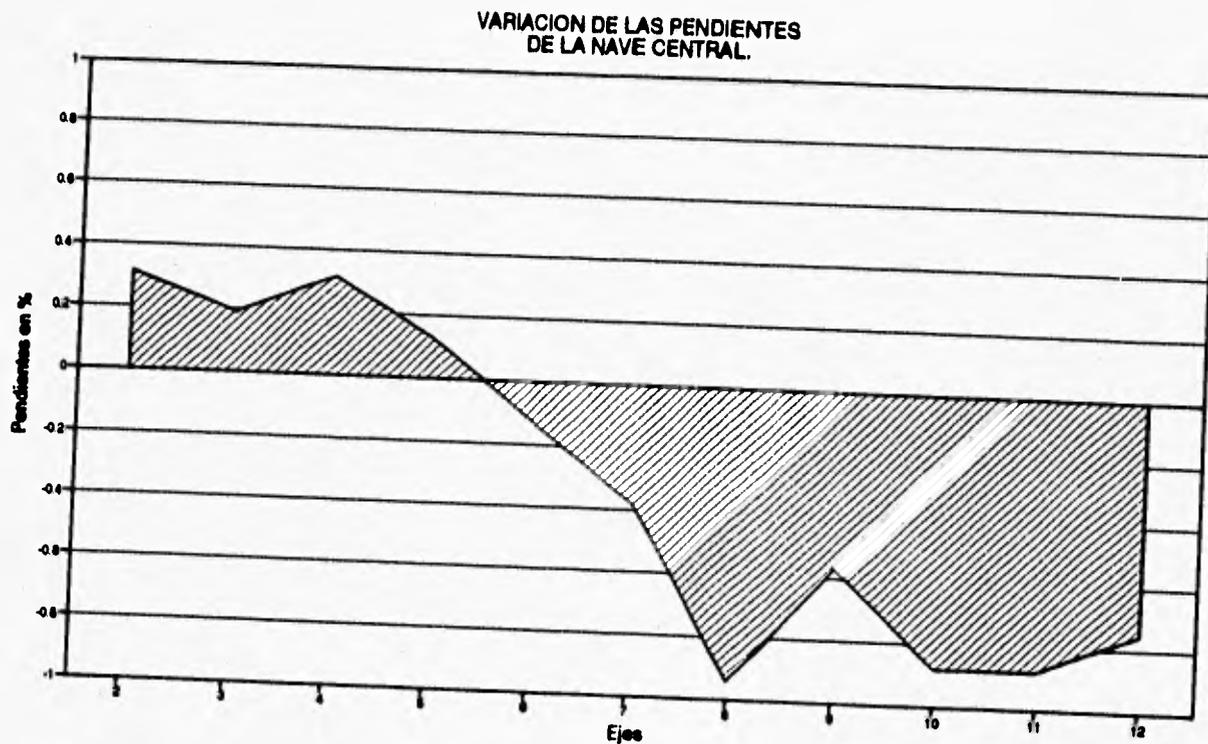


Fig. 48 Vista de las pendientes transversales que se inducirán a lo largo de la nave central, si se lleva a cabo la propuesta.

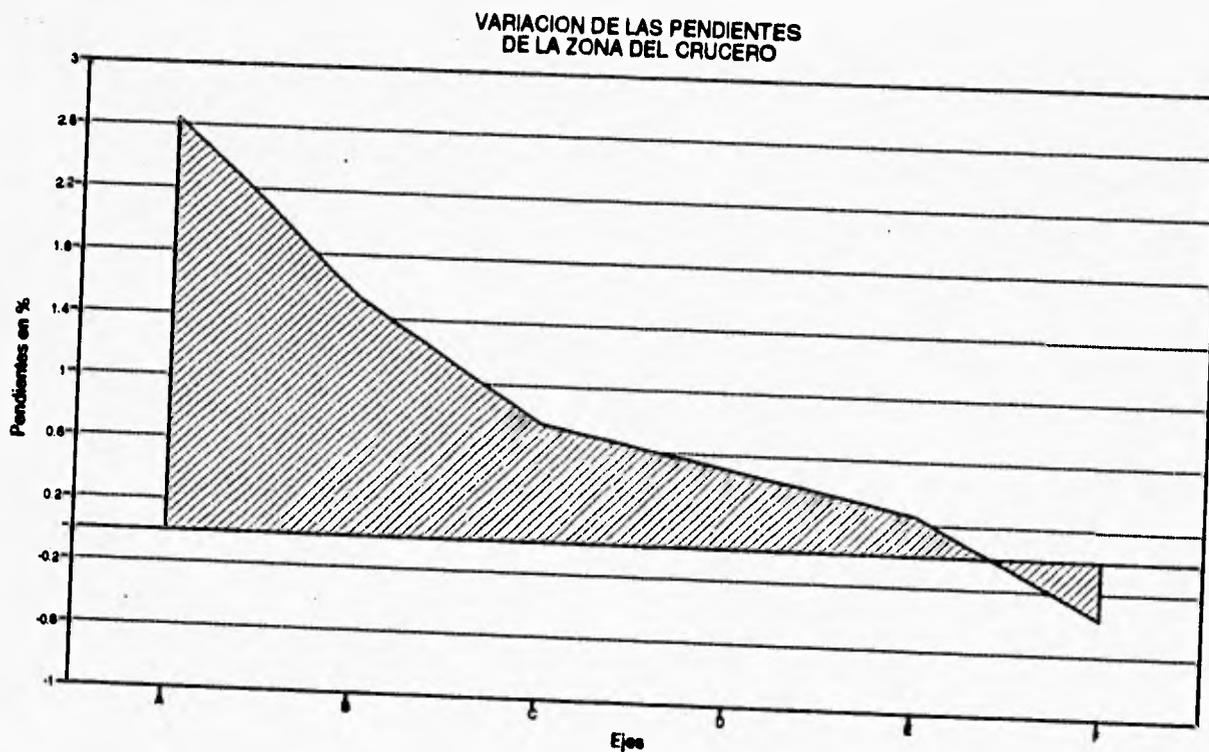
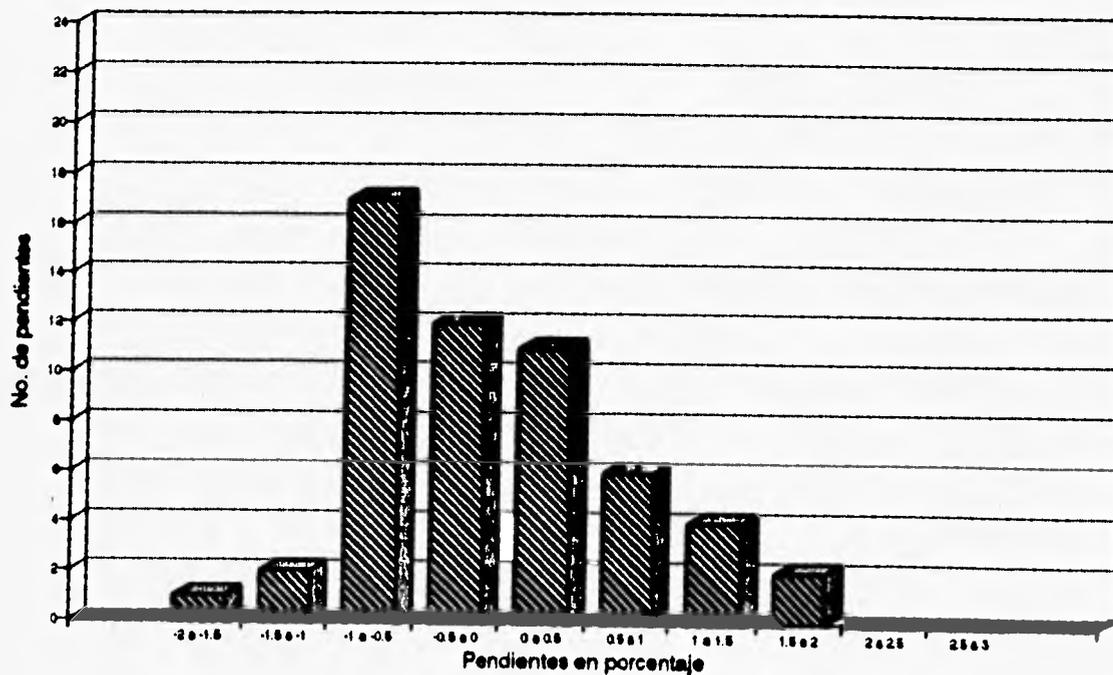
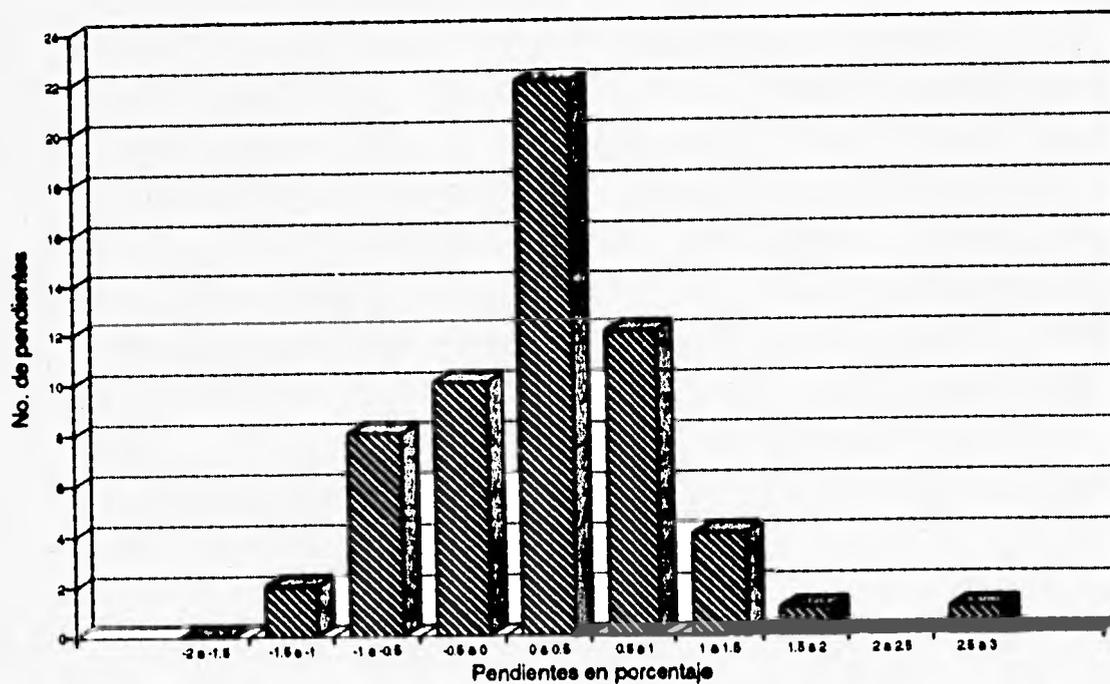


Fig. 49 Vista de las pendientes longitudinales que se inducirán en la zona del cruce, con la propuesta.

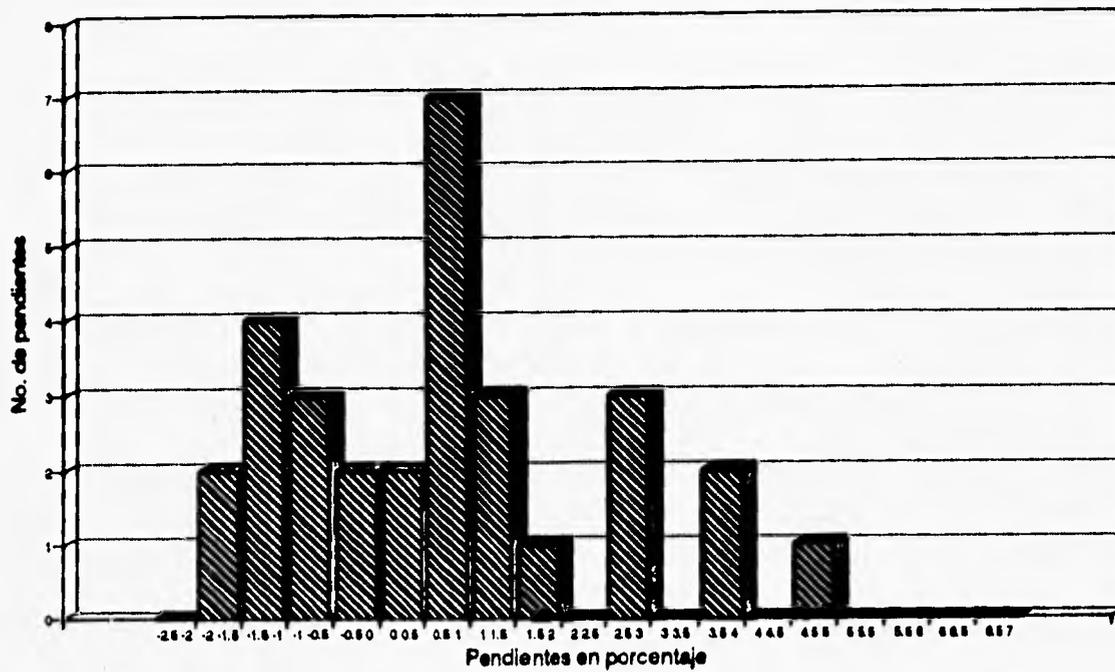


a) Direccion E - W

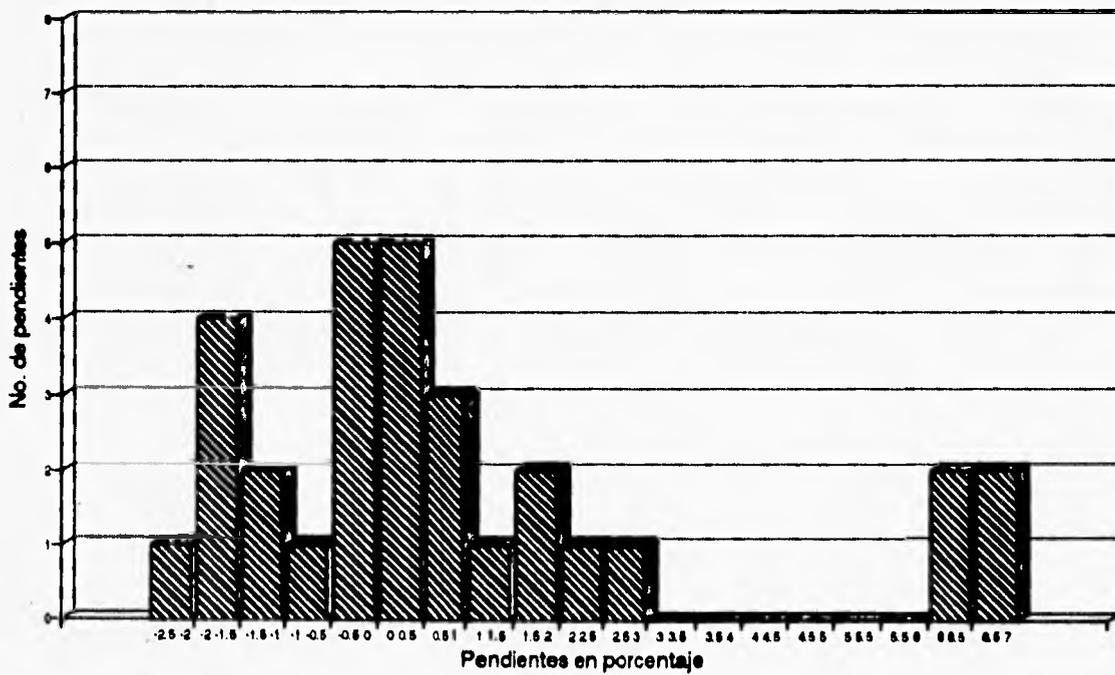


b) Direccion N - S

Fig.50 Representación gráfica de las pendientes que se inducirán en Catedral como resultado de la propuesta, obtenidas en la dirección a) y b).



a) Dirección E - W



b) Dirección N - S

Fig.51 Representación gráfica de las pendientes que se inducirán en el Sagrario como resultado de la propuesta, obtenidas en la dirección a) y b).