

01121
12



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ASPECTOS ESTRUCTURALES DE LAS
RECIMENTACIONES DE MONUMENTOS
HISTÓRICOS

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

PRESENTA
SOFÍA ERICA ARROYO LORANCA

DIRECTOR DE TESIS: ING. ROBERTO SÁNCHEZ

MÉXICO D. F.

2003



A

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
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/018/02

Señorita
SOFIA ERICA ARROYO LORANCA
Presente

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.

"ASPECTOS ESTRUCTURALES DE LAS RECIMENTACIONES DE MONUMENTOS HISTÓRICOS"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. PROBLEMÁTICA DEL SUELO DE LA CIUDAD DE MÉXICO
- III. DESCRIPCIÓN DE LAS CIMENTACIONES ORIGINALES
- IV. DESCRIPCIÓN DE LAS RECIMENTACIONES
- V. COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES
- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
- TABLAS
- FIGURAS

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 HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 24 enero 2002
EL DIRECTOR

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

*"No debemos dejar de explorar.
Y al final de nuestras exploraciones
llegaremos al lugar del que partimos, y lo
conoceremos por vez primera"*

T. S. Elliot

Resulta tan agradable decir "Gracias" a todas aquellas personas que me ayudaron a lograr este sueño que parecía, por momentos, no llegar nunca...

A mi papá y a mi mamá porque siempre pusieron su mano sobre el hombro a veces cansado dándole un respiro profundo para seguir adelante.

A mis queridas hermanas, Raquel, Andrea y Paola, por sus consejos y apoyo en este largo andar.

A Aarón, porque ha estado ahí... hombro con hombro.

A toda mi familia por su apoyo y atención, por su amor y sabiduría... a mamá Raquel y papá Mauro, hasta el azul profundo del cielo...

A la Facultad de Ingeniería... de no haber sido por ella, hoy no estaría concluyendo esta etapa de mi vida.

Al Ing. Roberto Sánchez, por su gran apoyo en este proyecto, por enseñarme y tener la paciencia de estar presente en mis primeros pasos dentro de la Ingeniería.

Al Instituto de Ingeniería por abrirme las puertas y haberme dado tanto...

Al Sr. José Rosales por compartir la aventura de conocer nuevos lugares y aprender más de nuestra cultura a través de los monumentos históricos.

A la Fundación TELMEX por haberme brindado su ayuda en mis días de estudiante.

Al Colegio Madrid... "los recuerdos de mi niñez han de ser siempre para el Madrid".

Al Ing. Cobarruvias, al Ing. Castillo Tejero y al Ing. Jaramillo porque me impulsaron a querer ser mejor cada día.

A todas aquellas personas que de algún modo contribuyeron a que este día por fin llegara...

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. Objetivos	3
1. ANTECEDENTES	5
1.1 Aspectos Históricos	5
2. PROBLEMÁTICA DEL SUELO DE LA CIUDAD DE MÉXICO	11
2.2 Características del subsuelo	11
2.2 Hundimientos diferenciales	13
3. DESCRIPCIÓN DE LAS CIMENTACIONES ORIGINALES	17
3.1 Biblioteca de Finanzas de la SHCP (Ex Capilla Real del Palacio Nacional) ..	18
3.2 Capilla de las Ánimas	19
3.3 Capilla de las Capuchinas	19
3.4 Catedral Metropolitana	19
3.5 Iglesia de la Santa Veracruz	20
3.6 Palacio del Ex-Arzobispado	21
3.7 Palacio Nacional	21
3.8 Templo de San Agustín	22
3.9 Templo de San Antonio Abad	23
4. DESCRIPCIÓN DE LAS RECIMENTACIONES	25
4.1 Problemática	25
4.2 Tipos de recimentación	25
4.2.1 Pilotes de fricción negativa	26
4.2.2 Pilotes de punta	26
4.2.3 Pilotes de control	27
4.2.4 Pilotes de control con funda antifriccionante	29
4.2.5 Subexcavación	29
4.2.6 Inyección de morteros	30
4.2.7 Inyección de Agua	31
4.2.8 Juntas constructivas	32
4.3 Casos selectos	32
4.3.1 Capilla de las Ánimas	32
4.3.2 Capilla de las Capuchinas	33
4.3.3 Templo de San Antonio Abad	34
4.3.4 Catedral Metropolitana	36
4.3.4.1 Recimentación de 1940	37
4.3.4.2 Pilotes de control	38
4.3.4.3 Pilotes de fricción negativa	39

4.3.4.4 Subexcavación	40
4.3.4.5 Inyección de morteros	42
4.3.5 Iglesia de la Santa Veracruz	43
4.3.5.1 Junta constructiva	44
4.3.5.2 Pilotes de control	44
4.3.6 Palacio del Ex Arzobispado	45
4.3.7 Palacio Nacional	46
4.3.7.1 Inyección de Agua	47
4.3.7.1 Pilotes de control con funda antifriccionante	48
4.3.7.2.1 Biblioteca de Finanzas de la SHCP (Ex Capilla Real) ..	48
4.3.7.2.2 Zona Norponiente	49
4.3.7.3 Juntas constructivas	49
4.3.8 Templo de San Agustín	50
5. COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
TABLAS	61
FIGURAS	63
FOTOGRAFÍAS	111

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticas e históricas, los monumentos históricos son aquellos bienes que están vinculados con la historia de la nación, a partir del establecimiento de la cultura hispánica en el país. Asimismo, declara que los monumentos históricos son "...los inmuebles construidos en los siglos XVI al XIX, destinados a templos y sus anexos; arzobispados, obispados y casas curales; seminarios, conventos o cualesquiera otros dedicados a la administración, divulgación, enseñanza o práctica de un culto religioso; así como a la educación y a la enseñanza, a fines asistenciales o benéficos; al servicio y ornato públicos y al uso de las autoridades civiles y militares...".

Este grupo de construcciones está integrado principalmente por obras virreinales que son consideradas monumentos históricos por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (I.N.A.H.) debido al valor artístico y cultural que representan.

El Centro Histórico de la ciudad de México es el más extenso, importante y antiguo de todo el continente americano. En sí mismo ha sido varias ciudades en los últimos ocho siglos: Tenochtitlán, capital del Imperio Azteca; la capital más importante del Imperio Español en América y el centro vivo e intenso de una de las metrópolis más grandes del mundo, en la actualidad. Por tal motivo, en los últimos años, la preservación de la

integridad física de sus monumentos coloniales ha tomado mayor interés, lo que permitirá transmitir este legado a las futuras generaciones, como testimonio arquitectónico y urbano de la realidad social y cultural de nuestra gran ciudad y de nuestra identidad como nación.

La conservación de los monumentos históricos es una actividad multidisciplinaria de suma importancia para la nación; en ella se ven involucrados arquitectos, restauradores, historiadores e ingenieros civiles, entre otros. Los ingenieros ocupan un papel fundamental en la restauración, sobre todo cuando la estructura se ve amenazada por diversos factores externos, tales como los sismos, los hundimientos en el terreno en el que se encuentran desplantados, el viento y la lluvia, por mencionar sólo algunos de ellos.

Desgraciadamente, la mayor parte de los edificios coloniales que se encuentran en el Centro Histórico de la ciudad de México, ha sido afectada por los hundimientos que sufre el subsuelo, principalmente por la extracción de agua para abastecer a sus habitantes. En la gran mayoría de estas estructuras, la magnitud de los hundimientos diferenciales que alcanzaron sus cimientos han puesto en riesgo su estabilidad, de modo que para su preservación, los ingenieros civiles han tenido que hacer importantes intervenciones tanto en la cimentación como en la propia estructura con el objeto de detener y corregir los daños ocasionados.

En este trabajo se hace una buena descripción de los acontecimientos ocurridos desde la llegada de los españoles a nuestro país hasta el término de la Colonia, haciendo especial énfasis en las construcciones realizadas en ese periodo. Posteriormente, se habla de la problemática del suelo de la ciudad de México; para ello, se describen las características del subsuelo y se habla de las diferentes causas y efectos de los hundimientos diferenciales.

Con base en los diversos estudios en el campo de la rehabilitación de monumentos históricos que el Instituto de Ingeniería de la UNAM ha realizado en la última década, en este trabajo también se hace una descripción de los elementos que conforman la cimentación original de un grupo de construcciones históricas tales como la Capilla de las Ánimas, la Capilla de las Capuchinas, la Catedral Metropolitana, el Palacio Nacional y el Templo de San Antonio Abad, entre otros.

Finalmente, se hace una descripción de las diferentes soluciones estructurales que se utilizaron en la recimentación de cada uno de los edificios para combatir el problema de hundimientos diferenciales.

I. OBJETIVOS

Debido a que existen problemas en la cimentación de la mayoría de edificios coloniales, y con base en la información recabada por el Instituto de Ingeniería se consideró conveniente documentar las soluciones conceptuales aplicadas en un grupo de edificios intervenidos.

Bajo este escenario, los objetivos que se plantearon para el desarrollo de este trabajo de tesis son los siguientes:

- Dar a conocer los principales problemas que causan los hundimientos diferenciales en la cimentación de algunos edificios históricos.
- Describir las características de las cimentaciones empleadas en un grupo de construcciones realizadas durante la Colonia.
- Describir las soluciones estructurales más importantes efectuadas en la recimentación de los monumentos que se eligieron en este trabajo.
- En términos generales, se pretende que el trabajo sirva de guía a ingenieros y arquitectos en la labor de rehabilitación de otras construcciones coloniales.

1. ANTECEDENTES

1.1 Aspectos Históricos

La conquista espiritual y religiosa iniciada en el siglo XVI por los españoles en nuestro país dio origen a la edificación de un total de 273 construcciones mendicantes. Las principales órdenes religiosas que se encargaron de la evangelización de los grupos indígenas fueron los Franciscanos (1523), los Dominicos (1525) y los Agustinos (1533). Los primeros evangelizaron a los indígenas que habitaban lo que hoy es el Estado de México y Tlaxcala, parte de Veracruz, Puebla, Hidalgo, Morelos, Colima, Michoacán, Jalisco, Nayarit, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro. Los Dominicos evangelizaron las regiones mixteca y zapoteca del actual Estado de Oaxaca y algunas zonas de los Estados de Puebla, Chiapas y Morelos. Los Agustinos evangelizaron las regiones del Estado de Morelos e Hidalgo, parte de Michoacán, Puebla, Estado de México y Guerrero (Fig 1). Los Jesuitas (1572), más que evangelizar, se encargaron de la educación y enriquecimiento espiritual de la sociedad criolla.

A partir de 1530 la construcción de establecimientos mendicantes en nuestro país tuvo un gran auge. Los Dominicos sólo construyeron 50 templos entre 1530 y 1596. En 1538 los Franciscanos tenían más de 20 edificaciones, para 1560 este número se incrementó a 80 establecimientos y para 1583 ya eran 78 en los estados de Puebla, Guerrero, Hidalgo,

Estado de México, Morelos, Tlaxcala, Veracruz y en la ciudad de México y 48 en los estados de Michoacán, Jalisco y Zacatecas. Estos números siguieron incrementándose hasta llegar a 138 edificios para sus misiones. La actividad de los agustinos, por otro lado, se inició un poco más tarde, en 1533, y a pesar de que contaban con escasos recursos humanos, la orden tuvo una rápida y consistente expansión, principalmente en el Estado de Morelos, de modo que para 1595 contaban con 85 establecimientos en la zona central de la República. (Kubler, 1948)

Durante el siglo XVI, en la ciudad de México, hubo gran actividad arquitectónica de orden religioso, de manera que a mediados de ese siglo la arquitectura religiosa comprendía no sólo templos, sino también conventos, hospitales y escuelas. En el siglo XVII, debido a la rivalidad que existía entre las órdenes religiosas por demostrar su supremacía espiritual, la construcción de carácter religioso se acentuó todavía más y las formas renacentistas se abandonaron para adoptar un nuevo estilo; el Barroco. Finalmente, en el siglo XVIII el auge económico alcanzado por la sociedad novohispana permitió dedicar grandes cantidades de dinero a la donación de toda clase de obras de arte a la iglesia, en una inalcanzable competencia por lograr prestigio social a través de ellas.

Desde el punto de vista estructural, el barroco se apoyó en columnas clasicistas, aunque alterando sus proporciones y cubriéndolas de profusa ornamentación superficial; quebró el plano de las fachadas, provocando salientes y entrantes a base de pilastras adosadas, nichos y cornisas. Un ejemplo claro de este estilo es el templo de San Agustín, en la ciudad de México. Por otro lado, las construcciones religiosas churriguerescas son casi todas de planta cruciforme y cúpula en el crucero. Muestras de este estilo es la Iglesia de la Santa Veracruz, también en la ciudad de México.

Cuando las principales órdenes religiosas llegaron a la ciudad escogieron los solares más grandes, de manera que la iglesia de San Francisco fue fundada al occidente, Santo Domingo al Norte y San Agustín al Sur. Otras de las construcciones mendicantes en la ciudad son: La Iglesia de Asunción de Nuestra Señora (1569) en Xochimilco y la Iglesia de San Matías Apóstol durante la primera mitad del siglo XVI en Ixtacalco, por los Franciscanos, la Iglesia de San Andrés en Mixquic (1620) por los Agustinos y la Iglesia de San Juan Bautista (1588) en Coyoacán y la Iglesia de San Jacinto (1599) en San Ángel por los Dominicos.

En el siglo XVI, el virrey Antonio de Mendoza impuso una traza moderada al diseño de los conventos, la cual unificó algunos criterios. Los edificios constaban de tres elementos fundamentales: atrio, iglesia y monasterio. El atrio estuvo siempre limitado por una barda, a menudo almenada, con sólo dos entradas: una al eje de la puerta de la iglesia y otra perpendicular a la anterior, a la altura del centro del patio, en cuyo sitio se levantaba una cruz, generalmente de piedra. A ese patio daban los elementos más importantes del conjunto: la fachada del templo, la portería del convento y la capilla abierta o de indios.

La iglesia era generalmente de una sola nave, con una puerta al frente y, en el caso de los conventos franciscanos, con otra del lado del Evangelio. Apenas traspuesto el umbral, están el sotocoro, abajo, y el coro arriba. La nave estuvo decorada con pinturas murales, a menudo realizadas en rojo o negro, sobre fondo blanco, y ocasionalmente con una gama de color muy amplia.

Aun cuando las cuatro órdenes religiosas que llegaron a México en el siglo XVI se apegaron en general a este modelo, los resultados formales no siempre fueron los mismos, pues cada una imprimió a sus edificios un cierto sello característico. Los estilos no aparecen individualizados del todo, pues sus constructores procedían de diversas escuelas y regiones de España. Los Franciscanos nunca buscaron construir grandes edificios en poblaciones pequeñas, por el contrario, con frecuencia erigieron edificios modestos en varios poblados importantes como en Otunba o Tulancingo y sujetaron sus pretensiones arquitectónicas a los recursos disponibles de la población local. Los Agustinos, en cambio, no guardaron ninguna relación con las dimensiones de la población, realizando construcciones suntuosas en pueblos de mediana importancia. Los dominicos, a diferencia de los Franciscanos y Agustinos que habían respetado en general la traza del virrey De Mendoza, variaron las plantas, abrieron capillas a los lados de sus templos, construyeron los primeros cruceros y peraltaron las bóvedas. Los Dominicos, menos suntuosos que los Agustinos pero más elegantes que los Franciscanos, construyeron templos y conjuntos presentando algunos rasgos de eclecticismo atribuyendo a sus edificaciones una calidad más variada.

Aunque los aspectos históricos inician dando relevancia a los edificios construidos por las órdenes mendicantes, a continuación se esbozan algunos datos históricos de los

monumentos que se tratarán en este trabajo, que no sólo incluye edificaciones de carácter religioso, sino también algunas de carácter civil.

El Palacio Nacional comenzó a construirse en 1528 donde estuvieron las llamadas "Casas Nuevas" del emperador azteca Moctezuma Xocoyatzin. Este inmueble fue objeto de constantes obras que se continuaron ininterrumpidamente, multiplicando espacios, reparando desperfectos, modificando, reconstruyendo, decorando y embelleciendo el edificio. A finales del siglo XVII se determina el aspecto exterior del actual Palacio Nacional, y en los siglos XVIII y XIX se continuaron los trabajos de ampliación, remodelación y ornamentación. Ya para el siglo XX el Palacio Nacional alcanzó un aspecto suntuoso y completamente europeo, iniciándose la construcción de un nuevo piso.

La Parroquia de la Santa Veracruz fue fundada como ermita, entre 1526 y 1528, por la Archicofradía de la Santa Cruz, instituida por Hernán Cortés y varios conquistadores y se erigió en parroquia alrededor de 1568.

El Palacio Arzobispal comenzó a construirse hacia el año de 1530 por Fray Juan de Zumárraga en el sitio que ocuparon las casas llamadas de Mendel. El Palacio, que contaba con suficientes oficinas para la realización de trámites diversos en asuntos eclesiásticos, fue objeto de múltiples modificaciones y reparaciones durante los siglos XVIII y XIX.

La construcción de la Iglesia de San Agustín comenzó el 28 de agosto de 1541, en el lugar donde se habían establecido desde 1533; sin embargo, ésta se incendió en 1676 y se construyó una nueva que se inauguró en 1692. Es importante mencionar que la estructura original de esta iglesia era una de las más suntuosas de México.

La Catedral de México comenzó a construirse en 1573, conforme a los planos de Claudio de Arciniega; trabajaron en ello los más distinguidos arquitectos del virreinato y fue terminada por Manuel Tolsá a principios del siglo XIX. Concebida en estilo renacentista, tiene elementos herrerianos, góticos, barrocos y neoclásicos.

Los religiosos de San Antonio Abad vinieron a México en 1628, bajo el mando de fray Juan González Gil y se establecieron en uno de los suburbios donde edificaron un amplio hospital y una iglesia aunque pequeña, pero de arquitectura muy sencilla y bastante sólida.

En el siglo XVII aparecieron los primeros templos de los conventos de monjas, de una sola nave, con el eje principal paralelo a la calle y un amplio desarrollo del coro, separado visualmente del espacio destinado a los fieles.

La Capilla de las Capuchinas de la Villa se puede situar como parte de un conjunto en un momento interesante de transición entre el barroco y el neoclásico. El templo fue construido mientras se trabajaba en otros edificios que, de diversos modos, podrían representar a lo más destacado de la arquitectura del momento. Entre ellos, se puede mencionar la Capilla del Pocito, en el mismo conjunto de la Villa de Guadalupe, que fue erigida entre 1777 y 1791.

2. PROBLEMÁTICA DEL SUELO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Paralelo al desarrollo de la Ciudad de México, a principios del siglo pasado, se observó un fenómeno muy importante y significativo: el hundimiento general que la ciudad estaba sufriendo. Este fenómeno ha ocasionado graves daños estructurales y problemas de estabilidad, sobre todo a las edificaciones realizadas durante la Colonia.

2.1 Características del subsuelo

El Valle de México tiene una superficie aproximada de 7160 km², que corresponden a áreas montañosas y a las partes bajas; las primeras con altitudes superiores a 200 m sobre el fondo del Valle; y las segundas, comprendidas entre 0 y 50 m. La altura sobre el nivel demar de la zona más baja es de 2240 m. Hacia el Norte está limitado por las sierras de Tepotzotlán, Tezontlalpan y Pachuca, al este por los llanos de Apan y la Sierra Nevada, al sur por las sierras de Cuauhtzin y Ajusco y al oeste por las sierras de Las Cruces, Monte Alto y Monte bajo.

El subsuelo del Valle de México presenta rellenos constituidos en su parte superior por arcillas lacustres y en su parte inferior por clásticos derivados de la acción de ríos, arroyos, glaciares y volcanes. El conjunto de rellenos contiene además capas de cenizas y estratos

de pómez producto de las erupciones volcánicas menores y mayores durante el Pleistoceno Superior. (Manual de exploración geotécnica, 1988)

2.1.1 Zonificación del área urbana

Gracias a los estudios que se han realizado hasta nuestros días en relación con el subsuelo del Valle de México, Marsal y Mazari han zonificado, desde un punto de vista estratigráfico, la ciudad de México en tres grandes áreas (Fig 2).

a) Zona de Lomas

Esta zona se encuentra en las faldas de la serranía de las Cruces, generalmente formada por terrenos compactos, arenolimosos con alto contenido de gravas, o por tobas pumíticas bien cementadas. Al sur de la Ciudad esta zona invade algunas partes de El Pedregal, en la que aparece una fuerte costra de derrames basálticos.

Generalmente la zona de Lomas presenta condiciones favorables para cimentar estructuras; la capacidad de carga del terreno es elevada y no existen capas de arcilla compresibles que puedan ser causa de asentamientos diferenciales de gran magnitud. Sin embargo, debido a la explotación de minas de arena y grava, muchos predios están cruzados por galerías a diferentes profundidades, cuya localización se torna difícil porque muchas de ellas, a causa de derrumbes, están rellenas con material arenoso suelto lo que puede ocasionar una falla bajo la cimentación.

b) Zona de transición

En esta zona, situada entre las serranías del poniente y el fondo del lago de Texcoco, las condiciones estratigráficas del subsuelo presentan grandes variaciones de un punto a otro.

La zona de transición presenta depósitos arcillosos o limosos orgánicos, cubriendo a estratos de arcilla volcánica muy compresibles y de espesores variables, intercalados con capas de arena limosa compacta o arena limpia, los cuales descansan sobre mantos en los que el material predominante es la grava y arena. "Los problemas de capacidad portante y de asentamientos diferenciales pueden ser muy críticos, especialmente

cuando se trata de construcciones extensas sometidas a condiciones de carga muy diferentes, lo cual ocurre frecuentemente en esta zona..." (Marsal y Mazzari, 1962)

c) Zona del Lago

Esta zona se localiza en la parte centro y oriente de la Ciudad. A partir de la superficie del terreno, se encuentran los siguientes estratos:

1. Depósitos areno-arcillosos o limosos, con abundancia de restos arqueológicos, o bien rellenos artificiales que en algunos puntos de la ciudad llegan hasta 10 m de profundidad.
2. Arcillas volcánicas compresibles, de variados colores y consistencias comprendidas entre blanda y media, intercaladas con pequeñas capas o lentes de arena y llegan a tener espesores de 15 a 32 m.
3. La primera capa dura, de unos 3 m de espesor, constituida por suelos arcillo o limo-arenosos, compactos y rígidos, se encuentra a 33 m bajo la superficie, aproximadamente.
4. Arcillas volcánicas de características semejantes a las de la formación superior, aunque más comprimidas y resistentes; este manto tiene espesores entre 4 y 14 m.
5. Depósitos de arena con grava, separados por estratos de limo o arcilla arenosa.

Este corte estratigráfico puede sufrir variaciones importantes. Una de las principales razones es la historia de cargas aplicadas en la superficie del terreno, particularmente en la zona ocupada por las construcciones Aztecas y de la Colonia. Por ello se ha subdividido esta zona en dos regiones: la primera abarca a la antigua traza de la ciudad, y en ella las propiedades medias de los estratos arcillosos pueden variar considerablemente; la segunda pertenece a la parte del área urbana que no ha experimentado cambios sensibles debido a que las cargas actuantes en la superficie han sido moderadas o nulas. (Marsal y Mazzari, 1962).

2.2 Hundimientos diferenciales

Cuando los aztecas se instalaron en el Valle de México ocuparon la zona inundable del lago de Texcoco y construyeron grandes calzadas que funcionaban como compuertas para regular el nivel de las aguas y no permitir que las aguas salobres de Texcoco se mezclaran con las aguas dulces de los lagos Chalco y Xochimilco. Después de un tiempo en que las edificaciones eran ligeras y adaptadas al ambiente lacustre, los aztecas crearon zonas libres de inundación mediante rellenos artificiales, principalmente constituidos por fragmentos de roca, gravas y arenas. Así, a través de la consolidación de las arcillas lacustres, fueron construyendo una extensa plataforma que cubrió toda el área ocupada por Tenochtitlan. Según algunas investigaciones, los espesores del relleno variaron de 2 a 10 metros, con máximos en la zona ocupada por el centro religioso (localizado en lo que es el Zócalo de la Ciudad de México).

Las pirámides aztecas estaban apoyadas sobre estacones de madera, sin embargo, debido al enorme peso de estas construcciones y a la deformabilidad del suelo, muchas de ellas comenzaron a presentar problemas de hundimientos severos ocasionando daños importantes en la estructura o el colapso de la misma. De este modo, los aztecas construían nuevas edificaciones sobre las ya colapsadas que requirieron de cimentaciones densamente estacadas y de frecuentes reconstrucciones. En ellas, los estacones se hincaban en el suelo con separaciones de 30 a 40 cm, con una longitud variable de 2 a 4 m y un diámetro entre 10 y 12 cm (Santoyo y Ovando, 2001). En la Fig 3 se muestra una sección típica de una cimentación mexicana.

En el periodo inicial de la Conquista, los españoles destruyeron los principales centros religiosos y cívicos de las culturas indígenas alterando así, el estado de esfuerzos en el terreno. Las edificaciones pesadas de la Colonia (Palacio de Cortés, hoy Palacio Nacional; la Catedral Metropolitana, iglesias y conventos, etc.) cimentaban sus muros de mampostería sobre estacones y las viviendas menores sobre zapatas corridas fabricadas con materiales pétreos y mortero de cal. De este modo, los españoles pudieron levantar sus grandes templos y construcciones mediante ingeniosas estructuras de cimentación, en las que siempre incluyeron los pilotes cortos de madera aprovechando intuitivamente la preconsolidación del subsuelo, ya que elegían sitios que previamente habían sido mejorados por los pesados templos y pirámides aztecas.

La Ciudad de México experimentó asentamientos importantes debidos a los rellenos que se requirieron para hacerla habitable en las zonas bajas del Valle, desde la llegada de los aztecas hasta fines del siglo XIX, así como por construcciones realizadas durante la Colonia y el periodo de Independencia, en lo que hoy se conoce como Centro Histórico. En este último lapso se empezó, además, a perforar pozos para aumentar la provisión de agua en edificios importantes de la Ciudad, a medida que ésta se poblaba y era insuficiente el abastecimiento por medio de los antiguos acueductos.

Durante la construcción del Gran Canal de Desagüe de la Ciudad de México, Roberto Gayol, director de la obra, descubrió y demostró con mediciones de nivelación iniciadas en 1891 que la Ciudad de México se estaba hundiendo a una velocidad de 3 a 5 cm/año. Gracias a esto pudo hacerse una gráfica que muestra los hundimientos registrados topográficamente en varios puntos de la Ciudad (Catedral Metropolitana, La Alameda Central y la estatua de Carlos IV), a partir de 1898 (Fig 4). En ella se observa que en el periodo comprendido entre los años 1898 y 1938, si se toma la velocidad media del hundimiento, ésta varía de 3 cm/año para la Catedral Metropolitana a 6 cm/año para la estatua de Carlos IV. Durante los 10 años siguientes a 1938 las velocidades respectivas de estos puntos aumentaron a valores de 13 y 19 cm/año, alcanzando en la década siguiente promedios de 26 y 33 cm/año. Entre 1958 y 1967 ocurre una brusca disminución de velocidad de hundimiento, llegando a 3 cm/año en la estatua de Carlos IV, 5 cm/año en la Catedral y 8 cm/año en la Alameda Central, para volver a incrementarse en la estatua de Carlos IV y en la Catedral a 5.4 y 7.4 cm/año, respectivamente, después de 1967. En cambio en la Alameda se observa una ligera disminución de 8 a 7 cm/año.

En 1947 Nabor Carrillo presentó un modelo analítico con el que demostró las causas del hundimiento de la Ciudad apoyándose en la teoría de la consolidación de Terzaghi la cual se basa en la consolidación de los depósitos blandos de arcilla, ocasionada por la explotación de los acuíferos del subsuelo mediante el bombeo de pozos. Esta acción produce una pérdida de presión en los estratos permeables, provocando deformaciones muy pronunciadas alrededor de cada pozo de agua. Este fenómeno se extiende a mayor distancia hasta que se generaliza el hundimiento a toda el área de influencia del sistema de bombeo. Sin embargo, las deformaciones de la superficie no son uniformes ya que también influyen las diferencias estratigráficas y la variación de la compresibilidad de las arcillas

blandas debida a la historia de cargas. De este modo, Nabor Carrillo demostró claramente la relación directa entre el hundimiento regional y la extracción de agua del subsuelo, mediante pozos profundos.

Para este entonces existían 95 pozos municipales en operación, dentro del Centro Histórico, extrayendo un gasto de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y aun sabiendo la causa del hundimiento regional, se perforaron 60 nuevos pozos entre 1947 y 1953, aumentando la extracción de agua a $9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Támez, 1992)

El problema de los hundimientos diferenciales es un factor común para todos los edificios que conforman el Centro Histórico de la Ciudad de México. Además del proceso de descenso natural, el subsuelo en que se encuentran desplantados posee partes duras y blandas compuestas tanto por restos de edificaciones que datan de la época precolombina, como por rellenos de todo tipo puestos en las diversas etapas del periodo virreinal, como se mencionó anteriormente. Esto, aunado al abatimiento de la presión en el agua del suelo, ha ocasionado los problemas estructurales que afectan a muchos inmuebles, ya que la existencia de estas zonas duras frena el descenso natural de los edificios en esos puntos, mientras que el resto continúa con otra velocidad poniendo en peligro su estabilidad estructural.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS CIMENTACIONES ORIGINALES

La información histórica relativa a la construcción en la Ciudad de México durante la época Colonial nos muestra las serias dificultades con las que los españoles tuvieron que lidiar para cimentar edificios pesados. “La experiencia de cincuenta años había enseñado a los primeros pobladores de la Ciudad de México, que en ella deben trabajarse los cimientos de los edificios con mucha mayor fortaleza que en otro sitio cualquiera, porque es muy blando su suelo, en razón del agua que le tiene empapado...” (Marroquí, 1969)

En este periodo, los españoles cimentaban sus estructuras mediante 3 sistemas diferentes: mampostería, emparrillado de madera y emparrillado y estacado (Marshal, 1986).

El emparrillado de madera consistía en una cama formada por vigas de madera de 5 cm por lado y de 2 a 4 m de largo, sin descansar sobre pilotes. Sobre las vigas se colocaban lajas o ladrillos y entre ellos descansaban largeros de madera, entre los cuales se ponía un relleno apisonado y sobre ellos había unas tablas colocadas en el sentido de las vigas de madera como se ilustra de manera esquemática en la Fig 5. Este sistema fue utilizado en la construcción de algunos edificios públicos y conventos.

El emparrillado y estacado consistía en colocar estacones de madera de 2 a 4 m de largo y de 12 a 25 cm de diámetro clavándolos en el terreno y sobre ellos se hacía descansar un

emparrillado de madera. Sobre este emparrillado se colocaban lajas y encima de ellas el pedraplén que consistía de piedra, tezontle, mezcla de cal y arena o arcilla (Fig 6). Este sistema se utilizó para los edificios más pesados de ese entonces.

Las cimentaciones de mampostería podían ser de dos tipos:

- a) Cimentación continua: consistía en una zapata corrida de mampostería de piedra con mezcla de cal y arena. Este tipo de zapatas se utilizaba en la cimentación de columnas cuadradas, circulares y muros; y podía ser del tipo escalonada. (Fig 7a y Fig 7b)
- b) Cimentación aislada: consistía en un dado de mampostería de piedra y se utilizaba para cimentar columnas aisladas, como se muestra en la Fig 7c.

Existía otro tipo de cimentación poco común que consistía en bóvedas. Este sistema estaba desplantado sobre un basamento de tezontle, sobre él se colocaban los muros (hechos de tezontle con una mezcla de cal y arena) con arcos en el mismo sentido del basamento, en el sentido transversal y por la parte superior los españoles construían bóvedas de tezontle que rellenaban para colocar sobre ellas el piso del recinto (Fig 8).

A continuación se hace una descripción de la cimentación de los monumentos históricos que se tratarán en este trabajo.

3.1 Biblioteca de Finanzas de la SHCP (Ex Capilla Real del Palacio Nacional)

Esta construcción forma parte del conjunto de inmuebles del Palacio Nacional y se encuentra ubicada al oriente del mismo. Tiene un solo nivel y su forma en planta es rectangular (Fig 9). Sus dimensiones son 45.6 m de largo y 12.8 m de ancho y tiene una altura de 12.8 m hasta el punto más alto del edificio, mismo que corresponde a los pináculos. La Biblioteca se encuentra orientada de oriente a poniente con la fachada principal hacia ésta última dirección (Foto 1).

Sabiendo que los muros están hechos de mampostería de tezontle aglutinados con un mortero de cal y arena ($g = 1.8 \text{ kg/m}^3$), que el espesor de los muros norte, sur y poniente es de 1.3 m, el del muro oriente es de 1.8 m y suponiendo un espesor de losa de 45 cm, una bóveda de cañón corrido con una forma de semielipse de 60 cm de espesor, 44.5 m de longitud, 8.3 m de ancho y 6.1 m de altura, se realizó un análisis muy general para estimar que el peso de esta estructura es del orden de 4 700 ton.

La cimentación original es del tipo continua. Consiste en zapatas corridas de mampostería de tezontle unida con mortero de cal y arena sobre las que descansan los muros de la Biblioteca, se encuentran desplantadas a 2.4 m del nivel del piso del recinto y tienen un espesor promedio de 1.5 m, como se muestra en la Fig 10.

3.2 Capilla de las Ánimas

Esta construcción se encuentra al norponiente de la Catedral y su planta es de forma rectangular. Sus dimensiones, incluyendo muros, son 22 m de largo por 9.3 m de ancho y tiene un peso total del orden de 1 200 ton (Fig 11).

La cimentación original es del tipo continua. Consiste en zapatas corridas de mampostería sobre las que descansan los muros de la Capilla, sus dimensiones son de 1.25 m de altura y tienen un espesor promedio en su base de 1 m, como se muestra en la Fig 12.

3.3 Capilla de las Capuchinas

Esta construcción es de una sola nave y su forma es rectangular. Sus dimensiones son de 17 m de ancho por 48 m de largo y tiene un peso aproximado de 13 300 ton. La orientación de este templo es de oriente a poniente, con la fachada hacia esta última dirección (Fig 13 y Foto 2).

La cimentación es del tipo continua y consiste en zapatas corridas de sección trapezoidal, hechas a base de mampostería de piedra, con una altura de 5 m y un espesor promedio en su base de 3.5 m, como se muestra en la Fig 14.

3.4 Catedral Metropolitana

La Catedral Metropolitana tiene forma de cruz latina orientada de norte a sur. Sus dimensiones, incluyendo muros, son 127 m de largo por 58 m de ancho y 61 m de altura medida desde el nivel de plintos hasta la punta de las cruces localizadas en las torres (Fig 15).

El templo se divide en cinco naves: la mayor o central, dos procesionales o de tránsito, y dos cerradas y divididas por capillas que circundan y terminan el edificio por los costados (Meli y Sánchez, 1993). En la Foto 3 se aprecia la fachada principal del recinto.

La cimentación de la Catedral fue diseñada por el alarife mayor Claudio de Arciniega quien tomó precauciones para limitar los hundimientos en el suelo donde se edificó dando como resultado un sistema estructural muy complejo.

La cimentación consiste en una retícula de 122 m de largo por 66 m de ancho de contratraves de mampostería que recibe a los muros de la Catedral y en cuyos cruceros descansan las columnas, el espesor de las contratraves es de 1.6 m mientras que su peralte es de 3.6 m. Es importante mencionar que los espacios limitados por las contratraves se encontraban rellenos de tierra hasta 1930, cuando fueron vaciados a fin de disminuir la carga total sobre el suelo.

La retícula se apoya sobre un pedraplén de 1 m de espesor y 133 m de largo por 76 m de ancho y está compuesto de piedra basáltica y escaso tezontle aglutinados con un mortero de cal y arena. El pedraplén descansa sobre un firme de mortero a base de cal y arena de 30 cm de espesor, colocado sobre una delgada capa de carbón vegetal y sirve de cabezal a una retícula de aproximadamente 22 500 estacones de madera de 20 a 25 cm de diámetro, con una longitud que varía de 2.2 a 3.2 m, con una separación de 60 cm entre ellos. En la Fig 16 se presenta un esquema de la cimentación original en el que pueden apreciarse los elementos que la conforman.

Este sistema tenía como propósito transmitir de una manera uniforme el peso del edificio al suelo, y de constituir una base rígida para evitar la tendencia a hundimientos diferenciales entre las partes de la construcción. Sin embargo, debido al enorme peso del templo (127 000 ton, incluyendo la cimentación), se transmite una carga cercana a 15 t/m^2 al suelo, la cual es excesiva para un suelo con las características antes mencionadas, por lo que los hundimientos han sido extraordinarios y han producido fuertes daños en la estructura. (Meli y Sánchez, 1998).

3.5 Iglesia de la Santa Veracruz

La Iglesia de la Santa Veracruz se encuentra orientada de oriente a poniente. En la Foto 4 se aprecia la fachada principal de este recinto. Sus dimensiones, sin incluir muros, son 42.3 m de largo por 8.6 m de ancho y tiene un peso del orden de 7 412 ton (Fig 17).

La cimentación original es del tipo continua y consiste en zapatas corridas escalonadas hechas de mampostería sobre las que descansan los muros de la iglesia. Estas zapatas se

encuentran desplantadas a 2.55 m de profundidad. Consisten en tres escalones: en promedio, el primero tiene 60 cm de peralte y 35 cm de huella, el segundo tiene 60 cm de peralte y 50 cm de huella y el tercero tiene un peralte de 65 cm y 45 cm de huella (Fig 18).

3.6 Palacio del Ex-Arzobispado

Este edificio consta de dos niveles y está orientado de norte a sur con la fachada principal hacia este último punto (Foto 5). El edificio en planta tiene forma irregular, como se muestra en la Fig 19 y sus dimensiones son 39.9 m de ancho por 76.7 m de largo con una altura de 10.9 m hasta el lecho superior del pretil de azotea.

Este monumento se encuentra desplantado sobre ruinas prehispánicas, por lo que antes de empezar la construcción fue necesario nivelar el terreno mediante una mampostería de tezontle unida con un mortero de cal y arena.

Mediante un análisis muy general para calcular el peso del edificio sin considerar carga viva, se estimó que era del orden de 8 500 ton.

La cimentación es del tipo continua y consiste en zapatas corridas hechas de mampostería de tezontle unida con mortero de cal y arena. La profundidad de desplante es de 1.4 m y el espesor promedio de su base es de 1 m (Fig 20). Es importante mencionar que en algunos sitios se encuentra apoyada sobre la mampostería de relleno y en otros directamente sobre los vestigios prehispánicos.

3.7 Palacio Nacional

Las dimensiones del Palacio Nacional son 200 m de largo por 200 m de ancho (Fig 21). Originalmente tenía tres niveles que fueron construidos en la época colonial y en 1928 se le añadió un cuarto y último piso, con lo que alcanzó una altura media respecto al nivel de piso de 22 m; en la Foto 6 se muestra la fachada principal del recinto.

A partir de exploraciones realizadas a la cimentación de edificios adyacentes y contemporáneos al Palacio Nacional se llegó a pensar que su cimentación posiblemente estaba compuesta por una retícula de estacones de madera de 25 cm de diámetro y de 3 a 4 m de largo y que sobre esta retícula de estacones se había colocado un pedraplén compuesto de tezontle aglutinado con un mortero de cal y arena. Sin embargo, en trabajos realizados a finales del siglo XX, se encontró que en la esquina norponiente del Palacio,

existe una cimentación continua sobre la que están apoyados los muros del edificio y está formada por zapatas corridas de mampostería de piedra con mezcla de arcilla desplantadas a 2.30 m del suelo con un espesor promedio de 1.50 m como se muestra en la Fig 22.

3.8 Templo de San Agustín

El conjunto de lo que hoy se conoce como el Antiguo Templo de San Agustín (Foto 7) se conforma de dos cuerpos: el templo y la capilla del Tercer Orden. El templo mide 31.5 m de ancho por 73.5 m de largo (Fig 23), tiene una planta en forma de cruz latina, se compone de una gran nave que va de norte a sur con seis capillas a los costados, con crucero y cúpula, está techada con bóvedas y tiene un peso estimado de 36.840 ton. La capilla del Tercer Orden también está dirigida de norte a sur y su exterior fue totalmente cambiado.

De acuerdo con la Ref 20, a finales de la década de los noventa se realizaron 6 calas para determinar con detalle el tipo de cimentación utilizado en la construcción del Antiguo Templo de San Agustín, así como la profundidad y las dimensiones de la misma.

Se encontró que la cimentación original del templo estaba formada por una retícula de arcos de mampostería colocados sobre un grupo de estacones de madera de 10 cm de diámetro colocados a una profundidad de 4 a 5 m respecto al piso y separados a cada 30 cm. Los arcos más pequeños están orientados en dirección del eje longitudinal del templo, alcanzan un claro de 3.5 m y un espesor de 2.4 m, mientras que los más grandes, arcos de mampostería invertidos, se encuentran orientados en dirección transversal del templo con un claro de hasta 9.5 m y un espesor de 2.7 m.

En la zona del crucero se construyeron arcos de mampostería también invertidos con un claro de 6.3 m, uniendo las cuatro pilastras que soportan la cúpula y que descansan sobre un arreglo de estacones de madera de 10 cm de diámetro.

El peralte de los arcos transversales de la cimentación varía de 2 a 2.45 m, mientras que la profundidad de desplante lo hace de 2.85 a 3.5 m. El peralte de los arcos longitudinales es aproximadamente de 2 m y la profundidad de desplante es de 3 m. Además, se observó que tanto los arcos longitudinales como los transversales se encontraban rellenos de material heterogéneo, con el objeto darle mayor rigidez a la cimentación.

Los muros de contrarresto que confinan a las capillas laterales se encuentran desplantadas sobre una cimentación continua que consiste en zapatas corridas de mampostería de piedra apoyadas a una profundidad media de 7 m, con respecto al nivel del piso del templo, y cuyas dimensiones son de 2.4 m de ancho y 1.9 m de peralte.

En la Fig 24 y en la Fig 25 se muestran esquemas de un corte longitudinal y otro transversal de la cimentación del templo, en las cuales se observan algunas de las características ya mencionadas. En la Foto 8 se aprecia parte de uno de los arcos que conforman este arreglo.

El propósito principal de los arcos fue recibir las cargas de las columnas a las que se proveía de zapatas aisladas de gran tamaño apoyadas también sobre estacones de madera (Ovando y Takahashi, 1998), como se muestra en la Fig 25.

3.9 Templo de San Antonio Abad

La nave de San Antonio Abad es de cañón corrido con penetraciones conoidales, con una torre en la esquina norponiente de 19 m de altura, construida a finales del siglo XVII. En la Foto 9 se muestra la fachada sur de este templo. La planta de este edificio ocupa un área de 9.45 m de ancho por 34 m de largo (Fig 26). El peso total aproximado de esta estructura es de 4 000 ton y está desplantada sobre zapatas corridas de mampostería de tezontle unida con mortero de cal y arena, con un ancho aproximado de 1 m (Fig 27), ligadas transversalmente mediante contratraves, también de mampostería; la presión que ejercen las zapatas sobre el suelo es del orden de 6 t/m^2 .

4. DESCRIPCIÓN DE LAS RECIMENTACIONES

4.1 Problemática

Los problemas de cimentación en las construcciones virreinales ubicadas en el Centro Histórico de la ciudad de México generalmente se deben a los hundimientos diferenciales que se producen entre los apoyos de la estructura. Dichos hundimientos suelen ser ocasionados por el peso propio del edificio y la distribución irregular de su masa sobre el terreno de apoyo, así como a las variaciones del nivel freático debidas principalmente a la explotación excesiva de los mantos acuíferos, presencia de suelos con distintos grados de consolidación, excavaciones cercanas y el peso de edificios colindantes.

4.2 Tipos de recimentación

Para preservar la integridad de las construcciones históricas con problemas de cimentación los ingenieros especialistas en mecánica de suelos y estructuras han tenido que implementar diversas soluciones, algunas de las que con mayor frecuencia se han empleado son las que a continuación se describen. Asimismo, en la tabla 4.1 se muestra un resumen que contiene datos importantes acerca de los monumentos históricos tratados en este trabajo: el año de construcción, el tipo de cimentación que se utilizó, el año en el que se intervinieron sus cimientos así como el tipo de recimentación que sufrió cada uno de ellos.

4.2.1 Pilotes de fricción negativa

El fenómeno de fricción negativa es aquel que se presenta cuando el suelo tiende a bajar o a "colgarse" a lo largo del fuste de un pilote, induciendo esfuerzos de fricción, que por ser en sentido descendente, ocasionan una sobrecarga en el mismo.

Los pilotes de fricción negativa son aquellos que están apoyados sobre un estrato profundo resistente y sus cabezas quedan separadas de la losa de piso, de modo que el conjunto de pilotes toma, por fricción negativa, una parte del peso de la superestructura (Refs 17 y 24). El funcionamiento de este tipo de pilotes aparece representado de manera esquemática en la Fig 28, en donde se aprecia que una parte del peso del edificio, C , es transmitida al subsuelo a través de la losa de cimentación (reacción q) y la otra por la adherencia desarrollada en el pilote (f en la misma figura).

4.2.2 Pilotes de punta

Cuando el o los estratos de suelo superficiales son considerablemente compresibles y de baja resistencia al esfuerzo cortante suelen utilizarse pilotes de punta, los cuales obtienen la mayor parte de su capacidad de carga de la roca o del suelo sobre el que apoyan la punta.

Estos pilotes pueden hincarse a través de las capas blandas superiores y a través de los mantos progresivamente más duros hasta alcanzar la capacidad necesaria. Por otro lado, obtienen una parte apreciable de su apoyo del material que los rodea, especialmente en la porción inferior de su longitud, pero también pueden obtener un apoyo considerable de la capacidad de carga de su punta.

Algunas veces se ha dicho erróneamente que un pilote de punta es un elemento estructural que trabaja como una columna, transmitiendo la carga de su cabeza a la punta, apoyada en el estrato resistente o en roca. Esta idea lleva a diseñar a los pilotes de manera que sus esfuerzos no sobrepasen a los que se tendrían en una columna del mismo material, mismas dimensiones y sujeta a la misma carga axial. Sin embargo, se ha demostrado que no existe peligro de pandeo en un pilote de punta, de las dimensiones convencionales, por falta de confinamiento lateral, aunque esté rodeado por los suelos más blandos. Por lo que los esfuerzos en esos pilotes, bajo las cargas de trabajo, pueden tomarse como las de los materiales de que están hechos cuando se sujetan a compresión directa. En los pilotes cuya sección disminuye con la profundidad, la sección crítica está en la punta, cuyo material no

debe estar sujeto a esfuerzos excesivos. Una vez satisfecho esto, la capacidad de un pilote de punta, depende completamente de la capacidad del material sobre el cual la punta encuentra apoyo y del grado en que la punta tenga un asiento satisfactorio sobre o dentro del material resistente. En la Fig 29 se presenta un esquema que muestra el funcionamiento básico de este tipo de pilotes y en las Refs 8 y 21 aparecen una amplia descripción sobre su comportamiento.

En un edificio cimentado con pilotes de punta se produce un efecto de sobrecarga sobre ellos, ya que estos elementos restringen, por fricción lateral, el descenso del suelo acarreando perjuicios notables en las estructuras adyacentes como se muestra en la Fig 30.

4.2.3 Pilotes de control

Los pilotes de control fueron concebidos en 1948 por el Ing. Manuel González Flores. Son, en esencia, pilotes de punta del tipo que atraviesa libremente la cimentación, sobre cuya cabeza se coloca un puente unido a la losa de cimentación de la estructura; este puente consiste un par vigas de acero ancladas a la losa con tornillos largos de acero. La unión entre la cabeza del pilote y las vigas del puente se realiza con un dispositivo formado por capas superpuestas de pequeños cubos de madera con características esfuerzo-deformación especiales, e intercaladas entre dichas capas existen placas de acero. En la Fig 31 se muestra un pilote de control, que conceptualmente siempre debe estar apoyado en una capa resistente. El control del hundimiento se realiza mediante los pernos del sistema, mientras que el control de la carga se logra a través del conjunto de cubos de madera.

El mecanismo descrito tiene como finalidad hacer trabajar al pilote a cualquier carga inferior a la de su capacidad. Cada cubo de madera tiene una gráfica esfuerzo-deformación con un rango plástico amplio, cuando se alcanza el límite elástico previamente determinado, puede garantizarse que el cubo está transmitiendo una cierta carga fija a la cabeza del pilote, para un amplio rango de deformación del cubo. Conocida la carga que se desea que tome el pilote, bastará dividir ese valor entre la carga de falla del cubo de madera para determinar el número de cubos que han de colocarse por capa, entre dos placas de acero. Al cabo de un tiempo, los cubos llegan al límite de deformación plástica, por lo que tendrán que ser reemplazados.

El objetivo fundamental de los pilotes de control es lograr que la estructura baje simultáneamente con la superficie del suelo. Una parte de la carga que transmite la estructura es tomada por el suelo, mientras que la otra es tomada por el pilote. Si la estructura tiende a bajar más rápido de lo que lo hace la superficie del suelo (como sucede en la Ciudad de México), los pilotes se harán trabajar a mayor carga, aumentando el número de cubos por capa, con lo que se alivia la parte de carga transmitida directamente al suelo y se frena el descenso relativo de la estructura. Recíprocamente, si la estructura tiende a emerger, respecto al terreno, los pilotes se harán trabajar a menor carga, disminuyendo el número de cubos de madera por capa, de modo que la estructura transmita más carga al suelo, con lo que su asentamiento se verá acelerado.

Si la estructura desciende de una manera no uniforme produciéndose hundimientos diferenciales, las técnicas arriba descritas podrían aplicarse a diferentes zonas del área de cimentación, con lo que sería posible igualar los asentamientos.

En la Fig 32 se muestra el esquema de un corte vertical a lo largo de un pilote de control dentro de un grupo de pilotes. El equilibrio del sistema se logra cuando la carga neta estática, W_{ne} , producida por el peso propio de la estructura menos el peso total del suelo excavado, se descompone en el sistema suelo-pilote en dos partes, una de las cuales se transmite directamente a la cabeza del pilote, Q_c , y la otra al suelo en contacto con la losa de cimentación, W_{se} . La carga W_{se} , aplicada al prisma de suelo tributario que rodea al pilote hace descender al suelo produciendo un desplazamiento relativo entre éste y el pilote, cuya punta se apoya en un estrato resistente, este movimiento hace que la estructura siga al hundimiento regional. El desplazamiento relativo genera una fuerza friccionante descendente, Q_f , sobre el pilote influenciada por el suelo y por la carga que le transmite la estructura directamente al terreno de apoyo. Por otro lado, el estrato resistente debe tener por lo menos la capacidad en punta, Q_p , necesaria para soportar la carga aplicada en la cabeza del pilote más la fricción negativa; es decir $Q_p \geq Q_c + Q_f$. Una explicación más detallada sobre el tema se encuentra en las Refs 24 y 21.

La aplicación de las técnicas descritas exige un número de pilotes adecuado en la cimentación; con pocos pilotes la estructura se hundirá irremediablemente, ya que la carga transmitida al suelo por la estructura sería mayor que la que el suelo mismo podría soportar;

por otra parte, si el número de pilotes es excesivo, puede llegar a suceder que la estructura emerja.

4.2.4 Pilotes de control con funda anti-friccionante

Existe un problema muy común en las cimentaciones piloteadas con pilotes de punta, cuando se presenta una estratigrafía básicamente formada por un cierto espesor compresible, subyacente por el estrato resistente de apoyo y cuando dicho manto compresible tiende a disminuir de espesor por algún proceso de consolidación inducido. Este es el caso del suelo de la Ciudad de México, pues existe un estrato de apoyo a profundidades del orden de 30 m arriba del cual las formaciones arcillosas muy compresibles, se consolidan por efecto del intenso bombeo para el abastecimiento de agua potable.

Para aprovechar la totalidad de la capacidad por punta en pilotes apoyados en la capa dura o depósitos profundos y evitar los efectos de la fricción negativa, se han diseñado estos pilotes que están provistos de una funda de acero en tramos de 3 m que están unidos por medio de camisas de neopreno, que toman las deformaciones provocadas por la consolidación regional; el espacio anular entre el fuste del pilote y el tubo se rellena con grasa. En la Fig 33 se muestra un pilote de funda antifriccionante y sus componentes. Estos pilotes fueron concebidos por el Ingeniero Santoyo para la recimentación de estructuras en sitios con fuerte hundimiento regional y funcionan igual que un pilote de control, sólo que éstos no sufren los efectos de la fricción negativa. La Fig 32 muestra las fuerzas actuantes y resistentes en un pilote de este tipo; puede apreciarse que la presencia de la funda impide que se generen fuerzas de fricción a lo largo de su fuste, por lo que la carga que recibe la cabeza del pilote se transmite directamente a su punta, esto implica que el estrato resistente deba tener, por lo menos, la capacidad de punta Q_p necesaria para soportar exclusivamente la carga aplicada en la cabeza del pilote.

4.2.5 Subexcavación

La técnica de subexcavación la propuso Fernando Terracina, para detener y corregir la inclinación de la torre de Pisa y aunque no llegó a emplearse, se adaptó con éxito en la Ciudad de México en la recuperación de la verticalidad de edificios con problemas de

desplomos tales como la Iglesia del Pocito de la Basílica de Guadalupe y el edificio SERFIN de 16 de Septiembre esquina Bolívar. Así, su objetivo fundamental es corregir los desniveles y desplomos de edificios, que han sufrido hundimientos diferenciales.

Esta técnica consiste en hacer descender las partes altas del terreno mediante la extracción lenta y controlada de suelo en el que se apoya la cimentación. La extracción se hace con perforaciones radiales horizontales de pequeño diámetro ejecutadas desde lumbreras o zanjas, excavadas hasta la profundidad deseada, que permiten el acceso a los estratos del subsuelo y desde los cuales se extrae el material. (Tamez, et al. 1992)

Las principales ventajas del uso de esta técnica son:

- a) En ciertas condiciones permite que en el futuro puedan llevarse a cabo operaciones periódicas de nivelación
- b) No requiere modificar la cimentación actual del edificio que se desee recimentar.
- c) Propicia un control estricto de los hundimientos en la cimentación.

4.2.6 Inyección de morteros

La inyección de mortero consiste en colocar en el subsuelo una compleja estructura de núcleos y láminas verticales de mortero deformable. Esta estructuración, conforma un arreglo de bandas verticales, con franjas anchas de arcilla blanda y láminas de mortero alternadas, como se muestra en la Fig 34, que refuerzan al subsuelo y es capaz de disminuir la velocidad del asentamiento en los puntos más críticos de las cimentaciones. Su principal objetivo es tratar de uniformar la velocidad de hundimiento mediante el endurecimiento de las arcillas en las zonas más blandas (Santoyo y Ovando, 2001). En otras palabras, la inyección de mortero endurece a los suelos sometidos a este tratamiento. Además, este proceso toma en consideración dos aspectos: el gradiente de la velocidad de deformación de la estructura y el volumen y distribución puntual de mortero a inyectar.

Los núcleos de mortero se pueden definir como elementos cilíndricos de mortero, su diámetro debe estar en un rango de 20 y 30 cm, su fabricación se hace dentro de una perforación previa de un diámetro 20% menor, el mortero se introduce a presión dentro de una funda geotextil permeable de poliéster, que al inflarse contra las paredes de la perforación se conforman por la expansión radial del suelo que los confina, lo cual les confiere una geometría irregular que aseguran su gran adherencia con el suelo y

funcionalidad como reductores de la deformabilidad. Por su parte las láminas verticales de mortero se forman por el fracturamiento hidráulico de la arcilla, producido por tubos de manguito exteriores que inyectan la masa de suelo con el mortero deformable, y su número y espesor depende de las veces que se inyecte el suelo, de la presión, del volumen y de la viscosidad del mortero de inyección (Santoyo y Ovando, 2001). En la Fig 35 puede observarse un núcleo con láminas laterales de mortero inyectado y el dispositivo que se emplea para realizar este proceso.

La inyección de mortero se define como una relación del volumen del mortero por inyectar al volumen del suelo. El valor de esa relación expresado en porcentaje es una función de la deformabilidad inicial del suelo y se le llama porcentaje de inyección.

Los morteros que se recomienda utilizar en la inyección de las arcillas del Valle de México, con la finalidad de reducir su compresibilidad, pueden ser de dos tipos:

- a) Los elaborados con cemento, cal y arena pómez.
- b) Los elaborados con cemento, bentonita y arena pómez.

Los primeros tienen una ventaja sobre los segundos debido a que pueden tener mayores deformaciones sin disminuir su resistencia. Los primeros alcanzan su resistencia máxima a los seis meses de edad, mientras que los segundos lo hacen a los 28 días de edad. (Santoyo y Ovando, 2001)

El volumen de mortero que se inyecta depende de la distribución de la deformación del subsuelo y generalmente, entre mayor sea esta deformabilidad, mayor será la cantidad de mortero inyectado.

4.2.7 Inyección de Agua

Esta técnica consiste, en términos generales, en reducir la magnitud de asentamientos futuros que sufre un monumento a causa de los hundimientos diferenciales mediante la recarga artificial de agua a los estratos permeables del subsuelo, y así estabilizar las presiones piezométricas en los suelos más blandos.

La recarga del acuífero implica definir la presión a la que se puede inyectar agua al subsuelo, analizando el mecanismo de fracturamiento hidráulico, que no es más que la condición de falla por el incremento de presión originado por la inyección del agua (Tamez, et al. 1992)

Así, este método propone restituir el contenido de agua de la masa del suelo y con esto disminuir las presiones efectivas que el suelo soporta y reducir la velocidad de hundimiento del terreno sobre el cual está desplantado el monumento en cuestión.

4.2.8 Juntas constructivas

Las juntas constructivas se han empleado cuando el edificio se encuentra desplantado en una superficie natural o artificial con diferentes grados de deformabilidad. Su objetivo es interrumpir la continuidad de la estructura, en las zonas donde los hundimientos la han afectado de manera más severa garantizando su estabilidad.

4.3 Casos selectos

La mayor parte de las construcciones virreinales edificadas en el Centro Histórico de la ciudad de México presentan problemas de cimentación, lamentablemente las intervenciones en sus cimientos generalmente suelen ser complejas y costosas por lo que sólo un número reducido de ellas ha podido ser rehabilitada. A continuación se presenta, de manera sucinta, un grupo de construcciones históricas que ha sido recimentado con el fin de proporcionar una visión más amplia sobre este tema a ingenieros y arquitectos encargados de la rehabilitación de este tipo de edificaciones.

4.3.1 Capilla de las Ánimas

Desde el inicio de la construcción de esta capilla su cimentación interactuó de manera estrecha con la cimentación de la Catedral Metropolitana, ya que la fachada sur de la Capilla se apoya directamente sobre la cimentación que sobresale de la traza de la Catedral, mientras que el muro de la fachada norte se encontraba adosado al cajón de la Línea 2 del Metro, cuya trayectoria pasa por debajo de la calle de Guatemala.

A principios de 1990 el recinto presentaba severos agrietamientos en los muros y en la bóveda, mismos que progresaban rápidamente, por lo que se decidió recimentar la Capilla para protegerla contra los hundimientos diferenciales y, sobre todo contra los efectos que pudiera ocasionar la subexcavación, que se realizaría en la Catedral Metropolitana.

Esta recimentación consistió en hincar 10 pilotes de control con funda antifriccionante. Para ello, se construyó una plantilla de concreto a una profundidad aproximada de 2.5 m, con respecto al nivel del piso, sobre ella se colocó una serie de contratraves de concreto de 25 cm de ancho por 1 m de peralte en el sentido transversal del recinto y la cimentación original de la capilla se confinó con dos contratraves de concreto reforzado de 25 cm de ancho por 1 m de peralte conectadas por varillas de acero tensadas a 1 ton, en todo su perímetro; en la Fig 36 se aprecia un corte transversal en el que se ilustra este arreglo.

Para recibir el peso del piso de feligresía, resuelto con vigueta y bovedilla, se construyeron 3 vigas "T" de apoyo en el sentido transversal, como se muestra en la Fig 36.

Asimismo, se construyeron dados de concreto reforzado para recibir a los pilotes. Las dimensiones de los dados son variables pero en promedio miden 2.3 m de longitud por 2.2 m de ancho y 50 cm de peralte.

Los pilotes de control con funda antifriccionante están apoyados en la primera capa dura que se encuentra a 40 m de profundidad, aproximadamente, tienen una capacidad de carga de 140 ton y están distribuidos como se muestra en la Fig 37. En la Fig 38 se muestra un esquema de los pilotes de control con funda antifriccionante colocados en la cimentación de la capilla, cuya operación fue descrita en el apartado anterior, y en la Foto 10 se aprecia el detalle de uno de ellos.

4.3.2 Capilla de las Capuchinas

El problema que la Capilla de las Capuchinas presentaba para finales de los años setenta era básicamente un hundimiento diferencial de 3.5 m en su extremo oriente, como se muestra en la Fig 39, esto ocasionó daños severos en su estructura. Para preservar la integridad de tan importante monumento el Ingeniero Manuel González Flores desarrolló un proyecto de rehabilitación, que consistió en levantar la parte hundida. Una vez aprobada su propuesta, en tan sólo 75 días logró reducir la casi totalidad de los hundimientos diferenciales que había acumulado desde el inicio de su construcción.

Antes de dar inicio a la rehabilitación del edificio su estructura y cimentación fueron reforzadas debido esencialmente a la fragilidad y a la baja resistencia a la tensión de la mampostería con la que se encuentran construidas. Para el refuerzo de la estructura se añadieron tensores de acero y las grietas fueron consolidadas, mientras que la cimentación

fue confinada mediante vigas de concreto, como se muestra en la Fig 40. El propósito del refuerzo fue incrementar la rigidez del edificio y proveer un medio para transmitir la carga de la estructura hacia los pilotes de control.

Después de los trabajos de refuerzo 159 pilotes de control, con una capacidad de carga de 83 ton, fueron hincados en secciones hasta la primera capa dura con la distribución que se muestra en la Fig 41. Asimismo, se instalaron gatos hidráulicos de 100 ton sobre la cabeza de cada uno de los pilotes y sobre ellos se colocó otro puente de reacción, con el propósito de eliminar el diferencial de 3.5 m (Fig 42). Debido al reducido rango de elevación de los gatos hidráulicos (200 mm), el proceso de nivelación de la estructura se llevó a cabo en varios ciclos, como se muestra de manera esquemática en las Figs 43 y 44 37.

El proceso de nivelación dio inicio aplicando una presión mínima a los gatos hidráulicos instalados en la fachada norte de la capilla, debido a que esta parte era la que menos se hundía; se le aplicó mayor presión a los gatos instalados al sur y la máxima presión se aplicó a los gatos instalados en la zona poniente que había experimentado el mayor hundimiento.

Una vez que la estructura alcanzó el nivel previsto, un enorme hueco quedó debajo de la cimentación original, en el que se construyó una losa de cimentación conectada a la original mediante muros y columnas de concreto reforzado; los gatos hidráulicos junto con el segundo puente de reacción fueron retirados; los tornillos se recortaron y se colocaron cubos de madera en cada pilote con el fin de mantener la misma carga de 83 ton para conservar el nivel que la capilla había alcanzado.

4.3.3 Templo de San Antonio Abad

En 1990 la Subsecretaría de Desarrollo Urbano recomendó una experimentación previa para los trabajos de subexcavación que se realizarían en la Catedral Metropolitana para corregir los hundimientos que ésta presentaba. Para ello, se propuso el Templo de San Antonio Abad debido a las similitudes que tiene con la Catedral: ambas estructuras tienen la misma geometría, bóveda de cañón corrido con lunetos, estructura de mampostería, subsuelo muy similar y además presentaban desplomos y desniveles que debían corregirse.

Lo anterior implicaba inducir desplazamientos verticales que provocaran desplazamientos horizontales y giros en los elementos constructivos para ubicarlos en una posición deseada.

Con la subexcavación en el Templo de San Antonio Abad se buscó inducir asentamientos correctivos y evaluar el comportamiento de esta estructura. Para ello se abrieron tres lumbreras a un lado del muro norte, el cual corresponde con la parte menos hundida del Templo, y se llevaron hasta una profundidad de 10.2 m respecto al nivel de piso. La losa de fondo quedó desplantada a 9.7 m y los 50 cm de diferencia quedaron huecos para permitir que las lumbreras siguieran la velocidad de hundimiento regional (Fig 45).

Por otro lado, para abatir el nivel freático se instalaron dos bombas eectoras por cada lumbrera, se colocaron boquillas de subexcavación, constituidas por un tubo de acero de 12.7 cm de diámetro a 9 m de profundidad en el inicio de los suelos blandos y se colocaron tubos excavadores de acero con un diámetro de 7.5 cm que pasan por el interior de un ademe de acero de 10 cm de diámetro, aproximadamente. La penetración horizontal máxima de las perforaciones para subexcavación fue de 9 m medida desde la boquilla (Fig 45). Es importante mencionar que durante los trabajos de subexcavación se instalaron en todos los entrejes de la estructura tensores y puntales de acero para evitar deformaciones indeseables en la estructura. (Tamez, et al. 1992)

Con el proceso de subexcavación, se logró generar desplazamientos verticales diferenciales en la superficie del terreno y se indujo el descenso y giro transversal de la estructura como un cuerpo rígido. Asimismo, el frenado del movimiento se logró con la inyección de lodo bentonítico en las perforaciones horizontales, observando con detalle la evolución de los desplazamientos y tiempo para la anulación total del movimiento. La distorsión angular de la estructura se indujo mediante subexcavación en la lumbrera de la esquina norponiente, cercana a la torre (lumbrera no. 3), con el objeto de provocar torsiones y eventualmente el agrietamiento de la bóveda para determinar el límite máximo de distorsión que admite una bóveda de mampostería. Una vez suspendidos los trabajos de extracción de arcilla o subexcavación, se determinó el tiempo necesario para que ocurriera el paro natural de movimientos inducidos. El proceso de excavación en cada lumbrera durante el desarrollo del experimento, se presenta resumido en la tabla 4.2.

Por otro lado, para la etapa de movimiento como cuerpo rígido, los volúmenes extraídos por cada lumbrera fueron de 5 m^3 y en la que corresponde a la etapa de distorsión angular se extrajo un volumen de 12 m^3 de arcilla, principalmente de la lumbrera 3. Asimismo, se observó que la velocidad de desplazamientos verticales se incrementó de acuerdo con el volumen de suelo subexcavado, alcanzando un máximo de 0.45 mm/día para un volumen de extracción de 290 l/día .

El proceso de subexcavación en el templo de San Antonio Abad mostró la factibilidad de la construcción de lumbreras y hacer perforaciones horizontales para la extracción de suelo, induciendo a la estructura a desplazarse verticalmente de una manera controlada.

4.3.4 Catedral Metropolitana

La Catedral fue construida sobre un suelo con distintos grados de consolidación ocasionados por la presencia de restos prehispánicos, lo que contribuyó sustancialmente al desarrollo de hundimientos diferenciales, casi desde el inicio de la construcción. Así, los españoles tuvieron que hacer diversas correcciones durante la edificación de este monumento, como incrementar la altura de muros y columnas para nivelar el arranque de las bóvedas, además de otros artificios arquitectónicos con el fin de disimular el efecto de dichos asentamientos.

Los asentamientos acumulados desde el inicio de la construcción hasta 1991 habían generado un diferencial máximo de 2.4 m entre el cruce de los ejes C y 3 y la intersección de los ejes B y 10 de acuerdo con el esquema que aparece en la Fig 15, además entre ambas torres el diferencial alcanzó un valor máximo de 1.25 m , manifestándose desplomos de muros y de columnas, así como agrietamientos y distorsiones en toda la estructura.

Es importante señalar que los hundimientos en la Catedral también están influenciados por la consolidación del suelo bajo el peso propio y por el hundimiento regional ocasionado por la extracción de agua del subsuelo para abastecer a los pobladores de la ciudad (Tamez, et al, 1992).

Para frenar los hundimientos diferenciales que sufría la Catedral, a partir del siglo pasado se iniciaron varias intervenciones en sus cimientos, las cuales se describen a continuación.

4.3.4.1 Recimentación de 1940

En 1929 el estado de daños que la Catedral Metropolitana presentaba constituía un riesgo importante para su estabilidad, por lo que la Comisión Técnica de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos nombró al Arq. Manuel Ortiz Monasterio para iniciar algunos estudios sobre la cimentación con el fin de definir las medidas que se adoptarían y salvaguardar la integridad de este monumento.

El proyecto propuesto por el Arq. Ortiz Monasterio consistió en retirar el piso de madera del nivel de feligresía, quitar el relleno de tierra existente entre las contratraves de cimentación y colocar un refuerzo de tipo estructural que garantizara la estabilidad del pedraplén y de las contratraves. El objetivo principal de esta recimentación fue reducir la presión de contacto sobre el terreno de apoyo así como darle a la cimentación resistencia a tensión y cierta rigidez.

En 1940 se hizo la extracción de aproximadamente 15 500 m³ de relleno y se decidió utilizar los vanos entre las contratraves para colocar criptas, lo que obligó a abrir pasos en las mismas para permitir la circulación ocasionando una reducción de rigidez de la retícula de contratraves. En el lugar en donde se abrieron los pasos se colocó un refuerzo vertical que consistió en castillos de concreto reforzado de 30 cm de ancho por 30 cm de peralte; en el año 2000 se realizaron algunas calas en la cimentación para corroborar la presencia de dicho refuerzo, en las Figs 46 y 47 se muestra un esquema del refuerzo en la planta del recito y los resultados de una de las calas, respectivamente; en ésta última puede apreciarse los castillos que confinan la mampostería de las contratraves en la zona de los pasos.

Asimismo, se realizó el refuerzo de las contratraves adosándoles, en su parte inferior, vigas de concreto reforzado de 30 cm de ancho por 50 cm de peralte con varillas de 1 ½ in (Fig 48), y en la parte superior vigas de concreto reforzado con perfiles de acero de sección "I" de 15 in de peralte como se muestra en la Foto 11. También se construyeron vigas de concreto reforzado intermedias a nivel de feligresía y sobre el pedraplén, la sección de estas vigas es de 30 cm de ancho por 50 cm de peralte, son continuas y corren a lo largo y ancho de la planta del recinto como se muestra, de manera esquemática, en las Figs 46 y 49.

A pesar de la complejidad del proceso de recimentación, no se llegó a dar continuidad en la retícula de contratraves, ya que la mayor parte del refuerzo se interrumpía en los plintos de las columnas (Fig 46). Probablemente el refuerzo logró que los hundimientos en

Catedral fueran un poco más uniformes pero no pudo evitar que los hundimientos diferenciales siguieran creciendo.

4.3.4.2 Pilotes de control

En 1972 la Secretaría del Patrimonio Nacional (SPN) realizó un estudio estructural y geotécnico con el fin de llevar a cabo la segunda recimentación de la Catedral Metropolitana; dicho estudio estuvo a cargo del Ingeniero Manuel González Flores, quien propuso el uso de pilotes de control para solucionar el problema de los hundimientos diferenciales en este edificio.

El estudio realizado por la SPN indica que la estructura pesaba 111 290 ton (incluyendo cimentación) y que ocupaba un área de 7 140 m². Asimismo, recomendaba colocar 280 pilotes dentro del recinto apoyados en la primera capa dura y distribuidos con mayor densidad en la parte sur, como se muestra en la Fig 50. Se determinó que el diámetro de los pilotes debía de ser de 40 a 45 cm con una capacidad de carga de 72 y 90 ton, respectivamente, y que sobre sus cabezas se pondrían puentes para transmitir cargas que pudieran ser controladas (Tamez, et al. 1992).

Los objetivos principales de esta propuesta eran reducir el trabajo de la cimentación original en un 25%, ajustar el descenso de la Catedral respecto al terreno circundante y uniformizar los hundimientos diferenciales (SEDUE, 1989).

Debido a la importancia del peso de la estructura para determinar el número y la capacidad de los pilotes, se realizó un nuevo análisis estructural, el cual estuvo a cargo del Ingeniero Vicente Guerrero y Gama, quien determinó que el peso total del monumento era de 127 000 ton.

Aunque no existe un proyecto definitivo para el hincado de estos pilotes, se infiere que con la nueva información su número se incrementó a 387. Estos elementos tienen una capacidad de carga de 180 ton y 220 ton para los pilotes de 40 y 45 cm de diámetro, respectivamente, para su hincado se les aplicó una carga promedio de 100 ton con el fin de apoyarlos en la primera capa dura, misma que se encuentra a unos 38 m debajo del piso de feligresía; su distribución en planta difiere de la que se tenía contemplada debido a las dificultades que se presentaron durante su instalación, lo cual obligó a los constructores a colocarlos donde fuera posible, la distribución final de los pilotes aparece indicada en la Fig

51. (Santoyo y Ovando, 2001)

Para transmitir el peso de la superestructura hacia los pilotes, fue necesaria la construcción de 166 dados de planta pentagonal, los cuales consisten en losas de concreto reforzado de 80 cm de espesor; el número de pilotes por dado varía de 1 a 4, según su ubicación.

La liga entre el extremo superior de cada pilote con el dado de concreto se hizo mediante un puente de reacción. El puente se encuentra anclado a los dados mediante barras de acero de 5 cm de diámetro, mismas que se encuentran afianzadas a una pieza metálica denominada "araña", que se encuentra embebida en la losa del dado. Para limitar la carga que transmite la estructura hacia el pilote, entre su cabeza y la superficie inferior del puente existen tres lechos de cubos de madera, cada uno de 5 cm por lado y con 3 ton de capacidad de carga a la compresión, el número de cubos de madera por capa varía de acuerdo con la carga a la cual se desea que opere el pilote. En las Figs 52 y 53 se muestra el esquema de un pilote de control instalado en la Catedral y una "araña" ahogada en el dado, respectivamente, mientras que en la Foto 12 aparece el detalle de un grupo de pilotes que se colocaron en la esquina surponiente del recinto.

Con los pilotes instalados se tenía estimado que el esfuerzo medio de contacto en el terreno se reduciría aproximadamente en un 30%; sin embargo, sólo el 27% de los pilotes quedó apoyado correctamente en la capa dura, por lo que la capacidad de carga de la recimentación es significativamente menor a la que se había previsto. De acuerdo con los estudios de mecánica de suelos se considera que el número de pilotes instalado correctamente es insuficiente para mejorar el comportamiento de la cimentación. (Tamez, et al. 1992)

4.3.4.3 Pilotes de fricción negativa

Al inicio de los años noventa las esquinas nororiental y norponiente de la Catedral Metropolitana presentaban una velocidad de hundimiento mayor que el resto de la estructura, como se muestra en la Fig 54. Para reducir la velocidad del hundimiento en estas zonas, antes de comenzar con el proceso de subexcavación en 1993, se instalaron 34 pilotes de fricción negativa con la distribución que aparece en la Fig 51, dichos pilotes tienen un diámetro de 40 cm y se encuentran apoyados en la primera capa dura.

Desde el punto de vista estructural sólo es necesario confinar el hueco que se realiza en la cimentación original para hincar el pilote: el confinamiento es necesario para evitar la degradación de la mampostería e impedir el contacto entre ésta y el pilote.

4.3.4.4 Subexcavación

Para evitar que los asentamientos diferenciales en la Catedral Metropolitana continuaran acumulándose y con ello los desplomos y el desarrollo de grietas en su estructura siguieran avanzando, en 1991 se decidió modificar el comportamiento de su cimentación mediante el método de subexcavación. Con esto se buscaba la estabilidad del edificio tanto ante su peso propio como ante los sismos y los hundimientos diferenciales adicionales que seguiría sufriendo. Así, en octubre del mismo año se comenzó con la excavación de las lumbreras de acceso hasta el nivel freático y los trabajos de subexcavación propiamente iniciaron hasta agosto de 1993; en abril de 1995 el proceso se suspendió, reanudándolo en junio del mismo año; finalmente, el proceso concluyó en junio de 1998.

Los objetivos principales de la subexcavación fueron:

- a) En la primera etapa, modificar las tendencias de los asentamientos diferenciales al norte del crucero, frenando inicialmente el fenómeno de giro de las naves procesionales y muros de contrarresto hacia el exterior.
- b) En la segunda etapa, corregir los desplomos de muros y columnas, sin modificar la geometría de la estructura. (Tamez, et al. 1992)

En total, se excavaron 32 lumbreras; 29 en la zona de Catedral y 3 en la zona de Sagrario. Las lumbreras tienen un diámetro de 2.6 m y una profundidad promedio, medida desde el nivel de piso, de 20 m, como se muestra en la Fig 55 y el detalle se aprecia en la Foto 13. Su distribución aparece en la Fig 56. Estas lumbreras se revistieron de concreto y en su fondo se dispusieron de 40 a 50 boquillas de tubo de acero de 15 cm de diámetro. En el fondo, una máquina neumática y rotatoria, provista de un émbolo hacía penetrar un tubo de 1.20 m por 10 cm de diámetro en cada boquilla, de modo que el émbolo se retraía y se acoplaba otro tramo de tubo que era empujado por el émbolo, que en operaciones sucesivas permitía la penetración de estos tubos hasta 6 ó 7 m de profundidad, después se hacían regresar y se iban desconectando de manera inversa, por tramos que venían llenos de suelo. El resultado que se obtenía con este procedimiento era el de un pequeño túnel de 6 a 7 m de

longitud y 10 cm de diámetro. A esa profundidad la presión es tal que el túnel se aplasta en poco tiempo, de manera que el suelo se transporta de arriba abajo. Cuando este proceso se repite continuamente en todas las boquillas de las lumbreras se tiene como resultado hundimientos en la superficie del terreno. Este procedimiento se muestra en la Fig 57.

Con el objeto de inducir el movimiento deseado en la estructura fue necesario mejorar las condiciones de estabilidad mediante el apuntalamiento generalizado de la parte de la cubierta que es soportada por las columnas. La estructura de apuntalamiento fue a base de torres y arcos formados por tubos y conectores, colocados de tal manera que permitieran el uso del templo (Fig 58). Es muy importante mencionar que el apuntalamiento fue diseñado para resistir al menos dos terceras partes de las cargas verticales que llegan a las columnas y fue provisto de mecanismos que permitían ajustar su altura y las cargas que tomaban los distintos tubos, a medida que se producían asentamientos del piso por efecto de la subexcavación. Además, se colocaron tirantes para restringir la posible abertura de los arcos de las naves principales y procesionales y se zuncharon las siete columnas más críticas para protegerlas contra alguna posible sobrecarga durante el proceso (Meli, R. 1993).

Por otro lado, el proceso de subexcavación se comenzó atacando las lumbreras al norte del crucero para producir el descenso, principalmente del eje C y en general, de la nave central que en esa zona está elevada con respecto al resto del movimiento. De manera progresiva se amplió la zona de subexcavación para inducir el descenso de toda la zona norte de la Catedral con un giro global hacia el norponiente. La cantidad de material extraído fue aumentando y se fue ajustando para obtener los hundimientos deseados. La Fig 59 muestra el volumen total subexcavado por lumbrera durante el periodo comprendido entre agosto de 1993 y mayo de 1998. El volumen total subexcavado durante este periodo fue de 4057 m³, que corresponde a una excavación promedio de 3.44 m³/día, aproximadamente.

La corrección del hundimiento diferencial máximo (2.40 m) entre la esquina surponiente y la columna C-3, al final de la subexcavación fue de un total de 83.2 cm, de los cuales 9.2 cm se tuvieron en el periodo de construcción (de octubre de 1991 a agosto de 1993), y 74 cm en el de subexcavación (de agosto de 1993 a junio de 1998).

4.3.4.5 Inyección de morteros

Debido a que el Teatro Nacional, actualmente Palacio de Bellas Artes, sufrió los hundimientos diferenciales desde el inicio de la construcción de su plataforma de cimentación en 1906, a partir de 1910 y hasta 1925 se realizó un proceso de inyección de morteros con el fin de endurecer el subsuelo, primero mediante un mortero de lechada de cemento y después mediante uno de cal con arena. Así, al lograr que en este lugar los hundimientos diferenciales se redujeran, se decidió evaluar esta técnica de manera experimental; para ello, se realizó un conjunto de inyecciones en el ex-lago de Texcoco logrando resultados satisfactorios y sobre todo la experiencia para su aplicación. Con la finalidad de evaluar la potencialidad de la inyección de morteros para disminuir la compresibilidad del subsuelo en la Catedral, se decidió probar dicha metodología en un área de 72 m^2 en el atrio poniente del recinto durante los meses de noviembre de 1997 y enero de 1998.

En la Ref 23 se describen con detalle las pruebas realizadas, así como el proceso completó de inyección efectuado en el subsuelo de la Catedral. A continuación, y de manera sucinta, se presenta la descripción de dicho proceso, la cual en su totalidad fue tomada de la misma referencia.

En el área de prueba se instalaron 18 núcleos de mortero de 25 cm de diámetro, entre 11 y 35 m de profundidad; el espaciamiento entre barrenos fue de 4 m en sentido longitudinal y se ubicaron sobre cuatro líneas de inyección con una separación de 1.5 m cada una, como se muestra en la Fig 60. Después de una semana se formaron las láminas laterales de aproximadamente 7.5 cm de espesor en la cercanía del núcleo de mortero en cuatro etapas de inyección, entre el 7 de noviembre de 1997 y el 24 de enero de 1998.

El volumen total de mortero que se inyectó en el área de prueba, mismo que representa el 6.2% del volumen de suelo inyectado, fue de 179.5 m^3 , de los cuales 22.8 m^3 corresponden a los núcleos de mortero y 156.7 m^3 a las láminas radiales.

Con base en la experimentación anterior, a mediados de 1998, se propuso un mortero de inyección para reducir la compresibilidad del subsuelo de la Catedral dosificado a base de cemento, bentonita y arena pómez con una resistencia a la compresión simple a 28 días de 44 kg/cm^2 y con un módulo de compresibilidad volumétrica de $0.004 \text{ cm}^2/\text{kg}$. (Santoyo y Ovando, 2001)

Después de haber realizado un estudio de carácter geotécnico, se determinó que el mejoramiento del subsuelo se debía aplicar en las zonas surponiente y nororiente de la Catedral, al suroriente y nororiente del Sagrario y en toda el área del Museo.

En la Fig 61 se muestran las áreas donde fue necesaria la inyección en el subsuelo de la Catedral y el Sagrario así como los núcleos instalados en la zona. En ella se observa que los porcentajes de inyección varían del 1 al 7% en la Catedral y del 1 a 5% en el Sagrario. La inyección se realizó mediante 571 núcleos de mortero deformable con sus respectivas familias de láminas laterales, de los cuales 421 se instalaron en la Catedral, 111 en el Sagrario y 39 en el Museo, todos ellos poseen las mismas características de los instalados en la zona de experimentación antes mencionada.

El proceso se llevó a cabo en dos etapas:

- a) Primera etapa: Inició el 8 de septiembre de 1998 y se concluyó el 9 de septiembre del siguiente año. En esta etapa se inyectó el subsuelo de la zona surponiente de la Catedral, así como las esquinas nororiente y suroriente del Sagrario. La esquina surponiente se inyectó en dos etapas con 50% de inyección en cada una. Posteriormente se inyectó la zona sur con el 2% y por último se realizó la misma maniobra en la esquina nororiente, para obtener un total de volumen de mortero deformable inyectado de 3 653 m³. Además, se estimó que el área total a inyectar, para esta etapa, era de 7 133 m², de los cuales 5 348 m² corresponden a la Catedral, 1000 m² al Sagrario y 785 m² al Museo.
- b) Segunda etapa: Inició el 5 de noviembre de 2000 y se concluyó el 22 de diciembre del mismo año. En esta etapa se inyectó un total de mortero deformable de 1 476 m³.

4.3.5 Iglesia de la Santa Veracruz

Esta estructura sufría hundimientos diferenciales, principalmente hacia su esquina norponiente, que ocasionaron problemas de desplomos y agrietamientos en sus elementos estructurales. Para contrarrestar esta situación, se decidió intervenir su cimentación con el hincado de pilotes de control y en realizar una junta constructiva tanto en la cimentación como en la superestructura.

4.3.5.1 Junta constructiva

En 1981 se propuso realizar una junta constructiva que dividiera la nave principal de sus capillas; sin embargo, los trabajos no fueron concluidos; dicha junta exclusivamente se realizó en la cimentación y en parte de los muros, quedando pendiente la cubierta; se extiende de Oriente a Poniente desde el eje 8 al 7 y cambia de dirección en este último para seguir hacia el Norte y terminar en el eje D, como se muestra en la Fig 62. Además existe otra junta con una trayectoria semejante a la anterior entre los ejes 6 y 5, con una longitud de 8.15 m y 10 cm de ancho; en la Capilla Ala Norte la profundidad de la junta rebasa los 6 m (Fig 62). Debido a que la junta nunca fue terminada, la estructura continuó teniendo problemas ya que sus diversas partes no pueden experimentar un movimiento independiente, puesto que aun siguen ligadas.

4.3.5.2 Pilotes de control

A finales de la década de los ochenta se elaboró un nuevo proyecto de rehabilitación cuyos objetivos principales fueron: concluir la junta constructiva y evitar que los hundimientos diferenciales continuaran progresando, esto último mediante la instalación de 73 pilotes de control en la nave principal del templo; sin embargo, el proyecto no pudo realizarse como se tenía previsto, por lo que sólo fueron hincados 53 pilotes con una capacidad de carga de 100 ton y de 45 cm de diámetro, mismos que quedaron apoyados en la primera capa dura y distribuidos como se muestra en la Fig 63.

Al igual que en otras cimentaciones provistas de pilotes de control, fue necesaria la construcción de dados con planta pentagonal que consisten en losas de concreto reforzado para poder transmitir la carga de la superestructura a los pilotes, los cuales a su vez, la transmiten a la capa de suelo resistente mediante el puente de reacción; en este caso, se colocó un dado de anclaje por pilote. En las Figs 64 y 65 pueden observarse esquemas de un pilote de control y de una araña, respectivamente, empleados en la recimentación del templo; como puede apreciarse, la manera en la que está resuelto el sistema de anclaje es semejante al de la Catedral y al de otros monumentos en los que se implementaron este tipo de soluciones.

En 1997, el templo presentaba daños en su estructura causados esencialmente por el comportamiento irregular de su cimentación, debido a que la nave principal había quedado

apoyada sobre pilotes de control y la zona de capillas y sacristía carecen de ellos. Esta situación propicia que la zona sin recimentación se hunda a mayor velocidad que aquella que se encuentra apoyada en un estrato resistente. Por lo anterior, en el 2001 se propuso un proyecto para recimentar las capillas, la sacristía y los anexos de la Iglesia que consiste en la instalación de 40 pilotes de control con las mismas características de los ya instalados. Además, dicho proyecto contempla concluir la instalación de los 20 pilotes que quedaron pendientes en la nave principal.

4.3.6 Palacio del Ex Arzobispado

El edificio del Arzobispado presentaba problemas de hundimientos diferenciales que provocaron que la estructura sufriera daños considerables tales como desplomos y agrietamientos en sus elementos estructurales. Estudios realizados revelaron que la estructura presentaba mayor hundimiento en la parte poniente y menor en su extremo oriente.

En esta construcción, se produjo un asentamiento contrario al que comúnmente experimenta una estructura desplantada en suelo blando, en la que el asentamiento es máximo al centro del área cargada y menor en la periferia. Esta situación que también se presenta en otros edificios contemporáneos al Ex Arzobispado, obedece a que el terreno de apoyo se encontraba en distintos grados de consolidación al momento de desplantar la cimentación, así como a la presencia de restos prehispánicos.

En este caso, el Ex Arzobispado se construyó sobre la pirámide del Dios Tezcatlipoca; incluso, una de sus caras coincide con la zona de mayor agrietamiento, donde se produce la mayor curvatura de la configuración deformada de la cimentación. En la Fig 66 se muestra un esquema de las condiciones de apoyo de los cimientos de este monumento.

Asimismo, los desplomos en la parte que está sobre la pirámide son inferiores a los medidos en los extremos oriente y poniente de este edificio. La mayor inclinación se encuentra al poniente, entre los ejes 9 y 10, con una resultante del 4.6%, con rumbo sur-poniente; al oriente se tiene una resultante de 0.6%, con tendencia hacia el sur-oriente, mientras que la parte que gravita sobre la pirámide tiene una inclinación de 1.3%, hacia el sur-poniente.

Para combatir esta situación, se decidió hacer una junta constructiva. Este método consistió básicamente en dividir la construcción en tres cuerpos independientes y su objetivo principal fue que cada una de estas partes descendiera libremente siguiendo las deformaciones del suelo sin que ninguna sufriera daños. Para ello se elaboraron dos juntas constructivas de norte a sur que dividen al edificio en tres secciones, como se observa en la Fig 67. De este modo, el edificio quedó dividido en Cuerpo Oriente, Cuerpo Central y Cuerpo Poniente. En la Foto 14 se aprecia una parte de la junta constructiva ubicada en la fachada sur del templo.

Por otro lado, en las cubiertas de los corredores norte y oriente del patio principal, a lo largo de la junta estructural oriente, se utilizaron apoyos deslizantes, los cuales consisten en barras de acero de sección circular apoyadas sobre placas del mismo material que permiten el libre desplazamiento de las cubiertas y cuya localización se muestra en la Fig 68. Asimismo, se realizaron juntas tipo "charnela" de 25 cm de ancho en las diagonales de los corredores del patio principal, las cuales consisten en interrumpir en una banda el colado del concreto dejando continuo el acero de refuerzo como se muestra en la Fig 69. Estas juntas tienen la propiedad de permitir la rotación de las cubiertas, restringiendo el desplazamiento relativo entre ellas.

Por otro lado, en la cimentación se realizó un sistema de refuerzo, con el propósito de garantizar la estabilidad de la estructura. Sobre el eje A y entre los ejes 10 y 15, se construyeron dos estructuras de concreto en forma de armadura en ambos lados de la mampostería de cimentación de la fachada sur, con el fin de confinarla. Sus dimensiones son 11 m de largo por 1.7 m de altura y 25 cm de espesor, como se muestra en la Fig 70.

4.3.7 Palacio Nacional

La zona norponiente del Palacio Nacional ha sido afectada severamente, debido a los hundimientos diferenciales que se han venido produciendo en sus cimientos desde el inicio de su construcción y que se agravaron en el siglo XX por la extracción de agua del subsuelo. Como consecuencia, el Palacio presenta una serie de grietas en muros y pisos principalmente en la zona que divide los patios marianos del área ocupada por la Tesorería de la Federación.

Existen otros factores que han ocasionado un incremento en los hundimientos diferenciales de esta estructura: la presencia de un colector de aguas semiprofundo localizado cerca del torreón norte y la construcción de la línea dos del metro, la cual provocó movimientos en la estructura, sobre todo en la zona que ocupa la fachada poniente.

Las deformaciones que han sufrido las bases de los muros de las fachadas del edificio desde el inicio de su construcción han sido de notable importancia, por ejemplo, en la fachada norte, el hundimiento diferencial excede 1.8 m.

Por otro lado, la esquina norponiente presenta un desnivel con respecto a la esquina surponiente de casi 1.5 m. Además, una de las zonas altamente preconsolidadas, ubicada dentro del segundo patio mariano, presenta un hundimiento diferencial con respecto a la esquina donde está desplantado el torreón norte del orden de los 30 mm y con respecto al resto de las estructuras colindantes del orden de 20 mm (TGC Ingeniería, 1997).

En este sentido, el Palacio Nacional ha sido objeto de múltiples reparaciones e intervenciones en su cimentación con el fin de detener los daños que los hundimientos diferenciales le están produciendo. En este trabajo se describirán los procesos de rehabilitación que se han realizado en la esquina norponiente del Palacio así como en la Biblioteca de Finanzas de la SHCP, que también forma parte del conjunto de inmuebles del Palacio.

4.3.7.1 Inyección de Agua

En 1970 se realizaron varias lecturas en nueve estaciones piezométricas instaladas a una profundidad entre 10 y 25 m; los registros indicaban que la presión del agua tendía a decrecer con respecto a la presión hidrostática. Habiendo observado este fenómeno, el Ingeniero Moreno Pecero propuso efectuar inyecciones de volúmenes de agua en la masa de suelo que ayudaran a recuperar la presión del agua subterránea y con ello reducir la velocidad de hundimiento del subsuelo. Para ello, se colocaron dispositivos de inyección como el que se muestra en la Fig 71.

Cada dispositivo estaba compuesto por una tubería de 2 in de diámetro por la que se bombeaba agua de una cisterna a un tanque de agua con una capacidad de 1400 l. De este último salía otra tubería con un diámetro de 2.5 in hasta una celda de inyección (Fig 72),

desde la cual se inyectaba el volumen de agua requerido a una profundidad que variaba de 7 a 25 m.

Este método se aplicó en dos zonas del Palacio: una localizada en la esquina de las calles de Moneda y Plaza de la Constitución y otra ubicada en la esquina de las calles de Correo Mayor y Corregidora.

Es importante mencionar que por medio de esta teoría y otros métodos que pueden consultarse en la Ref 18, se calculó el flujo requerido para incrementar la presión de agua y se determinó que su variación en el tiempo era de 0.4 l/s.

Durante esta etapa, el método parecía funcionar, sin embargo después de analizarlo detenidamente y de realizar otras etapas de inyección, el proceso fue detenido ya que cada vez se requería inyectar un mayor flujo de agua.

Aunque este proceso estaba basado en principios teóricos correctos no fue posible solucionar el problema de los hundimientos diferenciales que afecta al Palacio Nacional principalmente porque se basa en la corrección de la pérdida de presión del agua subterránea únicamente de la zona donde se asienta este monumento, cuando es necesario hacerlo en toda la región que sufre este fenómeno.

4.3.7.2 Pilotes de control con funda antifriccionante

4.3.7.2.1 Biblioteca de Finanzas de la SHCP (Ex Capilla Real)

En la década de los noventa, este edificio fue recimentado mediante la instalación de 45 pilotes de control con funda antifriccionante de 50 cm de diámetro y apoyados sobre la primera capa dura. Para ello, la cimentación original fue confinada mediante galerías de concreto reforzado. En la Fig 73 se muestra la distribución en planta de los pilotes que fueron instalados en la Biblioteca.

En este proceso, lo ideal era colocar los pilotes debajo de los muros de carga, sin embargo esto no fue posible. Se observó que si se colocaba el pilote a un lado del muro, se induciría la excentricidad de la carga, por ello se optó por instalar un pilote en ambos lados de la mampostería de cimentación, como se muestra en la Fig 74. A este arreglo se le conoce como "mancuerna" y su objetivo principal es distribuir la carga tributaria del muro a los dos pilotes. Este sistema exige que ambos elementos deban tomar la misma carga, de lo contrario no habría un equilibrio y en la base del muro se induciría un momento no

deseable. Los elementos que conectan a ambos pilotes son traveses de concreto reforzado de 70 cm de peralte y 40 cm de ancho que atraviesan la cimentación original y en las cuales se instalaron las anclas del pilote, como se muestra en la Fig 74. El control de los pilotes se lleva a cabo por medio del mecanismo ya descrito en el apartado anterior.

4.3.7.2.2 Zona Norponiente

La más reciente de las intervenciones que se han realizado en el Palacio Nacional para contrarrestar el efecto de los hundimientos diferenciales consistió en la recimentación de la zona norponiente, donde está ubicado uno de sus torreones y los edificios que ocupan la Secretaría de Hacienda y Crédito Público. Esta intervención consistió en el empleo de 212 pilotes de control con funda antifriccionante formando parejas en un arreglo de mancuerna, como el que se muestra en la Fig 75, apoyados en la primera capa dura, a una profundidad media comprendida entre los 36.3 y 38.3 m y su distribución aparece en la Fig 76.

En la Fig 77 se muestra el esquema de un pilote de control con funda antifriccionante colocado en la zona norponiente del Palacio Nacional y en ella se observa que es muy similar a los que se colocaron en la Capilla de las Animas, mientras que en la Foto 15 se aprecia el detalle de uno de ellos. Para su instalación, fue necesario confinar la cimentación original mediante un arreglo de traveses de concreto reforzado y muros; para transmitir la carga de la cimentación original hacia los pilotes se emplearon traveses de concreto reforzado de sección variable, instaladas sólo en el área de pilotes, las cuales tienen la misma función que las que se instalaron en la Biblioteca de Finanzas de la SHCP.

4.3.7.3 Juntas constructivas

El Palacio Nacional cuenta con tres juntas constructivas, dos de ellas están situadas sobre la fachada norte que da hacia la calle de la Moneda, aproximadamente a unos 95 y 110 m a partir de la esquina norponiente de donde se ubica el torreón norte. La tercer junta constructiva está ubicada sobre la fachada sur que da hacia la calle de la Corregidora aproximadamente a unos 90 m de la esquina surponiente, como se muestra en la Fig 78. En la Foto 16 se aprecia parte de la junta constructiva localizada en la fachada norte del recinto.

Debido a que la fachada norte era la más afectada por los hundimientos diferenciales, la primer junta constructiva decidió colocarse en este lugar, cerca de la zona que ha originado una configuración convexa en la deformación de las bases de los muros en esta fachada.

4.3.8 Templo de San Agustín

A finales de 1998 el Antiguo Templo de San Agustín presentaba un desnivel de 2.4 m entre las fachadas oriente y poniente, en una longitud de 50 m en el sentido transversal del edificio, producido porque la zona que ocupa la capilla del Tercer Orden baja a una velocidad de 96 mm anualmente, lo cual representa 16 mm más en relación con el promedio general de hundimiento regional que es cercano a 80 mm al año.

Actualmente, los hundimientos diferenciales que afectan al Antiguo Templo de San Agustín alcanzan un máximo de 2.5 m debido, principalmente a la consolidación del subsuelo así como al fenómeno de hundimiento regional (Ovando, E. et al. 2002)

Para evitar que los asentamientos y los desplomos de la estructura continuaran avanzando, se analizaron varias posibles soluciones geotécnicas, entre las que destacan dos:

- a) Recimentar la estructura con pilotes de control apoyados en su punta y aprovechar el hundimiento regional para corregir los asentamientos diferenciales a largo plazo. Esta solución requería 268 pilotes apoyados en los depósitos profundos a 48.0 m de profundidad, con los cuales se pretendía controlar un 69% del hundimiento regional. Sin embargo, esta solución, a pesar de ser factible técnicamente, no lo es constructivamente ya que la cimentación del Templo carece de rigidez para concentrar las cargas a los pilotes. Sería necesario, entonces, construir una retícula de grandes contratraves para transmitir el peso de la estructura a los pilotes, antes de implementar esta propuesta.
- b) Endurecer diferencialmente el subsuelo bajo el Templo y la Capilla de la Tercera orden mediante una retícula de inyecciones al subsuelo y láminas verticales de mortero, la cual, influenciada por el estado de esfuerzos de cada sitio, forma un arreglo de franjas de arcilla blanda. Esta estructura refuerza al suelo y reduce su deformabilidad.

La primera solución propuesta no se llevó a cabo debido al elevado costo y al grado de dificultad constructivo, la segunda, por otra parte, fue la que se llevó a cabo en el Templo por las ventajas constructivas y económicas que representaba.

Para poder aplicar esta técnica en San Agustín se hizo una zonificación del subsuelo de acuerdo con la deformabilidad de las arcillas (Ref 20).

El mortero de inyección utilizado en este proyecto estaba compuesto por cemento, bentonita y arena pómez con una resistencia a la compresión simple a 28 días de 44 kg/cm^2 , aproximadamente y con un módulo de compresibilidad volumétrica, de $0.004 \text{ cm}^2/\text{kg}$. (Ovando, et al. 2002)

Por otro lado, se determinó que el mejoramiento del subsuelo se tenía que aplicar en toda el área de la Capilla de la Tercera Orden, con una variación de inyección de mortero del 1 al 6%, y al surponiente del Antiguo Templo de San Agustín, en el que sólo se inyectó el 1% de mortero, como se muestra en la Fig 79. La inyección se realizó mediante 113 núcleos de mortero deformable, con sus respectivas familias de láminas laterales, en perforaciones de 7.5 cm de diámetro y se llevaron a una profundidad de 35 y 42 m, aproximadamente. El proceso consistió en inyectar a cada metro en progresiones ascendentes el mortero y fue necesaria la instalación de una retícula de puntos de inyección, donde se formaron los pilares (Fig 80). Posteriormente se formaron las láminas de mortero en varias etapas de inyección gracias a los tubos de manguito que tienen lateralmente los pilares.

Las áreas sometidas a las inyecciones se dividieron según las cantidades de mortero que se debió introducir en cada una de ellas. El área total mejorada fue de $2\,146 \text{ m}^2$ y en la cual se inyectó un volumen total de mortero de $1\,472 \text{ m}^3$. (Ovando, E, et al. 2002)

La inyección del mortero se llevó a cabo en tres etapas:

- a) Primera etapa: Se inició en febrero de 1999 y fue concluida en mayo del mismo año. En esta etapa se inyectaron 846 m^3 de mortero. El proceso consistió en reforzar el subsuelo de suroeste a noreste, entre los 10 y 35 m de profundidad. Se perforaron y colaron 86 núcleos de mortero deformables con sus respectivas familias de láminas laterales (Fig 79)
- b) Segunda etapa: Se inició en octubre de 2001 y se concluyó en febrero del siguiente año. En esta etapa se inyectaron 496 m^3 de mortero. El proceso consistió en

perforar e inyectar 27 núcleos de mortero deformable con sus respectivas familias de láminas laterales sobre las calles de Isabel la Católica y República de El Salvador, con una separación de 4 m entre ellos y a una profundidad aproximada de 35 m (hasta el contacto con la primera capa dura). Es importante mencionar que antes de inyectar las láminas de mortero se terminó con la perforación y colado de los núcleos de ambas calles. Con el objeto de formar una pantalla que confinara las láminas interiores, la inyección de mortero se inició en la línea exterior de los núcleos tanto de la calle de Isabel la Católica (de sur a norte) como en los de República de El Salvador (de poniente a oriente) (Fig 79).

c) Tercera etapa: Se llevó a cabo entre los meses de febrero y marzo de 2002 con objeto de endurecer el subsuelo del interior de la Capilla de la Tercera Orden a lo largo del extremo poniente. Esta etapa consistió en la inyección de mortero fraguante entre los 10 y 35 m de profundidad, inyectando primero los núcleos más cercanos al muro poniente de la Capilla, de sur a norte en ciclos sucesivos de inyección hasta alcanzar el volumen requerido, después se inyectaron las respectivas familias de láminas, logrando finalmente un incremento en los porcentajes de inyección en esta zona de 4 a 6% y de 3 a 5% (Fig 79) con un volumen total de mortero inyectado en esta etapa de 130 m³.

Con este proceso de inyección de morteros, se espera tener una reducción en la velocidad del hundimiento de la estructura hasta alcanzar la velocidad del hundimiento regional que es del orden de 80 mm/año.

5. COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES

La mayor parte de los edificios coloniales que se encuentran en el Centro Histórico de la ciudad de México, ha sido afectada por los hundimientos que sufre el subsuelo, principalmente por la extracción de agua para abastecer a sus habitantes. En la gran mayoría de estas estructuras, la magnitud de los hundimientos diferenciales que alcanzaron sus cimientos han puesto en riesgo su estabilidad, de modo que para su preservación, los ingenieros civiles tienen que hacer importantes intervenciones tanto en las cimentaciones como en las estructuras de dichas edificaciones con el objeto de atenuar los daños y las causas que los producen.

A pesar de los complejos y muy variados sistemas de cimentación para transmitir hacia el terreno de apoyo el peso de los edificios coloniales presentados en este trabajo, no fue posible contrarrestar los efectos que los hundimientos diferenciales provocaron en sus estructuras, incluso durante la construcción de las mismas; por tal motivo, para preservar la integridad de dichos recintos fue necesario mejorar sus condiciones de apoyo aplicando diversos métodos de recimentación.

Los pilotes de control constituyen un método efectivo para evitar que los hundimientos diferenciales progresen; sin embargo, para su empleo deben tenerse en cuenta varios aspectos, entre los más importantes destacan: la ubicación teórica generalmente difiere de

la real debido a las restricciones que imponen las características propias de cada construcción; es fundamental apoyarlos en los estratos resistentes y de menor deformabilidad a fin de obtener la mayor eficiencia en su comportamiento; el mantenimiento es un factor que debe tenerse presente tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista funcional para lograr el buen desempeño de estos elementos; el costo de instalación también es un factor decisivo debido a que se trata de una de las opciones más caras.

El uso de los pilotes de fricción negativa es limitado, de hecho sólo se han utilizado en la rehabilitación de la Catedral Metropolitana. Estos elementos se caracterizan por reducir la deformabilidad del subsuelo y no requieren de mantenimiento; aunque su eficiencia es menor que la de un pilote de punta, sus características resultan atractivas para la reducción de los hundimientos diferenciales.

Los pilotes de control con funda antifriccionante resultan trabajar mejor que aquellos que no la tienen debido a que los efectos de fricción negativa no se presentan, ocasionando que la carga que recibe el pilote se transmita directamente al suelo duro. A pesar de que esta es una de las mejores soluciones para atenuar los hundimientos diferenciales, para su empleo es necesario tomar en cuenta los mismos factores que los pilotes de control, sobre todo su costo.

La subexcavación es un método que tiene varias ventajas: no requiere modificar la cimentación actual de la estructura que se desee rehabilitar; permite que en el futuro, de ser necesario, puedan llevarse a cabo operaciones de renivelación; propicia un control estricto de los hundimientos inducidos en la cimentación del recinto. Sin embargo, desde el punto de vista estructural, la subexcavación puede ocasionar graves daños a la estructura si su movimiento no se hace como cuerpo rígido. Asimismo, este método es útil en la rehabilitación de construcciones cuyas dimensiones en planta no sean muy grandes, como San Antonio Abad e incluso en la Torre de Pisa, ya que es más sencillo inducirles el movimiento deseado.

La inyección de morteros, cuyo objetivo es tratar de uniformar la velocidad de hundimiento mediante el endurecimiento de las arcillas en las zonas más blandas, es una técnica empleada en nuestro país a principios del siglo XX y actualmente se ha retomado debido a la sencillez de su ejecución y a la economía que representa; para su aplicación se

requieren estudios especializados de mecánica de suelos. Hay autores que aseguran que la inyección en el Palacio de Bellas Artes ayudó a que la estructura no sufriera deformaciones que son ocasionadas por los hundimientos diferenciales. Tanto en la Catedral Metropolitana como en San Agustín actualmente se evalúa la efectividad de este método.

La inyección de agua en el subsuelo para la rehabilitación de monumentos históricos teóricamente es una solución factible para evitar que los hundimientos diferenciales progresen; sin embargo, desde el punto de vista práctico surgen varios inconvenientes y obstáculos, entre los que se pueden citar: la presencia de mantos permeables, restos prehispánicos y sistemas de drenaje que impiden una retención efectiva de este líquido; además de grandes cantidades de agua, se requiere que ésta sea potable para evitar la contaminación de los mantos acuíferos. Esto último resulta opuesto a las campañas para su buen cuidado y aprovechamiento dada su escasez en esta gran ciudad.

El método de las juntas constructivas requiere de un estudio especializado en estructuras para poder separar, de manera eficiente, al inmueble que así lo requiera. Asimismo es muy importante evitar cualquier fricción entre los cuerpos para permitir el libre descenso ante el hundimiento regional y con ello favorecer el comportamiento de cada una de las secciones. En este sentido, cada una responderá de manera independiente ante el efecto de los hundimientos diferenciales. Por otro lado, para que esta solución realmente funcione, es necesario hacer la junta desde los cimientos para poder obtener estructuras independientes.

Antes de realizar cualquier intervención que involucre a los cimientos de una construcción antigua es fundamental dar seguimiento a su comportamiento ante los hundimientos diferenciales, así como evaluar los efectos de la intervención mediante un programa de monitoreo previamente definido. En este sentido, también se recomienda evaluar la efectividad de la intervención que se elija a fin de mejorar el conocimiento acerca del comportamiento de este tipo acciones en las construcciones consideradas como monumentos históricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Baxter, Silvestre. La Arquitectura Hispano Colonial en México. México, 1934. Secretaría de Educación Pública y Bellas Artes.
2. Carmona, López Fernando. Estudio de la condición actual de la Catedral Metropolitana. Las condiciones de la estructura en función del problema del suelo. Tesis para obtener el título de Doctor en Arquitectura. México, 1992. UNAM.
3. Comportamiento de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos después de la inyección de morteros. México, 2001. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
4. Enciclopedia de México. Tomo I. México, 1993.
5. Estudio de las cimentaciones de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos de la Ciudad de México. México, 1990. Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural.
6. Guerrero y Gama, Vicente. Algunos cálculos relativos a la recimentación de la Catedral Metropolitana. México, 1976.
7. Informe de la Junta constructiva del Templo de la Santa Veracruz. México, 1997. PICOSA.

8. Juárez Badillo, E. y Rico R, A. Mecánica de suelos. Tomo II. México, 1989. Ed. Limusa.
9. Kubler, George. Arquitectura Mexicana del Siglo XVI. México, 1948. Fondo de Cultura Económica.
10. Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes. México, 1983. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
11. Manual de exploración geotécnica. México. 1988. Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.
12. Marroqui, José M. La Ciudad de México. Tomo III. México. 1969. Jesús Medina Editor.
13. Marshal, Raúl y Mazzari, M. El subsuelo de la Ciudad de México. México, 1962. Instituto de Ingeniería, UNAM.
14. Marshal, Raúl. Notas sobre el diseño y construcción de cimentaciones en el Distrito Federal. México, 1986. Comisión Federal de Electricidad.
15. Meli, Roberto y A. R. Sánchez. Rehabilitación de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México. Aspectos estructurales. México. 1993. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
16. Meli, Roberto. Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos. México, 1998. Fundación ICA.
17. Memorias del Primer Congreso Panamericano de Mecánica de suelos y Cimentaciones. México, 1960. Vol. I.
18. Moreno, Gabriel. Refoundation research of Mexico's National Palace. X. Conferencia Internacional sobre Mecánica de suelos, Estocolmo.
19. Ovando, Efraín y V. Takahashi. Cambios y evoluciones de las propiedades del subsuelo de la Ciudad de México. Implicaciones en la preservación de su patrimonio arquitectónico. Ingeniería Civil, vol. 348. Abril 1998, pp. 39-47.

20. Ovando, Efraín, Enrique Santoyo y Julio Hernández. Comportamiento del Antiguo Templo de San Agustín y de la Capilla de la Tercera Orden durante la inyección de morteros. México, 2002. Dirección General de Patrimonio Universitario. UNAM.
21. Peck, Ralph, W. Hanson, et al. Ingeniería de cimentaciones. México, 1995. Editorial Limusa.
22. Primer informe trimestral de la cimentación y comportamiento del Templo de la Santa Veracruz. México, 1997. PICOSA.
23. Santoyo, Enrique y Efraín Ovando. Catedral y Sagrario de la Ciudad de México. Corrección geométrica y endurecimiento del subsuelo 1989 – 2000. México, 2001. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
24. Santoyo, Enrique y J. Segovia. Recimentación y renivelación de estructuras y monumentos. México, 1995. TGC Geotecnia S.A.
25. Tamez, Enrique, E. Santoyo y A. Cuevas. La Catedral Metropolitana y el Sagrario de la Ciudad de México. Corrección del comportamiento de sus cimentaciones. Volumen Raúl J. Marsal. México, 1992. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
26. Tamez, Enrique. Undécima conferencia Nabor Carrillo. "Hundimientos diferenciales de edificios coloniales en el Centro Histórico". México, 1992. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
27. Templo de la Santa Veracruz. Avance de la recimentación. México, 2001. PICOSA.
28. Tovar de Teresa, Guillermo. La Ciudad de los Palacios: crónica de un patrimonio perdido. Tomo II. México, 1992. Espejo de Obsidiana Ediciones.

TABLA 4.1

Monumento Histórico		Año de construcción	Tipo de cimentación original	Año de recimentación	Método de recimentación
Iglesia de la Santa Veracruz		1526	Zapatas corridas escalonadas	1981	Juntas constructivas
				Finales de los años ochenta	53 Pilotes de control
Palacio Nacional	Palacio Nacional	1528	Zapatas corridas de mampostería de piedra con mezcla de arcilla	1970	Inyección de Agua
	Esquina Norponiente				Juntas constructivas
	Biblioteca de Finanzas de la SHCP			1993	212 Pilotes de control con funda antifriccionante
				1994	45 pilotes de control con funda antifriccionante
Palacio del Ex-Arzobispado		1530	Zapatas corridas hechas de mampostería de tezontle unida con mortero de cal y arena	1990	Juntas constructivas
Templo de San Agustín		1541	Reticula de arcos de mampostería colocados sobre un grupo de estacones de madera	1999	Inyección de morteros
Capilla de las Ánimas		1573	Zapatas corridas de mampostería	1991	10 Pilotes de control con funda antifriccionante
Catedral Metropolitana		1573	Reticula de contratraves, pedraplén y reticula de estacones	1972	390 Pilotes de control
				Principios de los años noventa	34 Pilotes de fricción
				1993	Subexcavación
				1998	Inyección de morteros
Templo de San Antonio Abad		1628	Zapatas corridas de mampostería de tezontle unida con mortero de cal y arena	1990	Subexcavación
Capilla de las Capuchinas		1787	Zapatas corridas de sección trapezoidal, hechas a base de mampostería de piedra	Finales de los años setenta	159 Pilotes de control

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

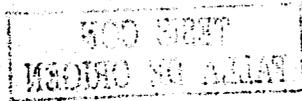
TABLA 4.2

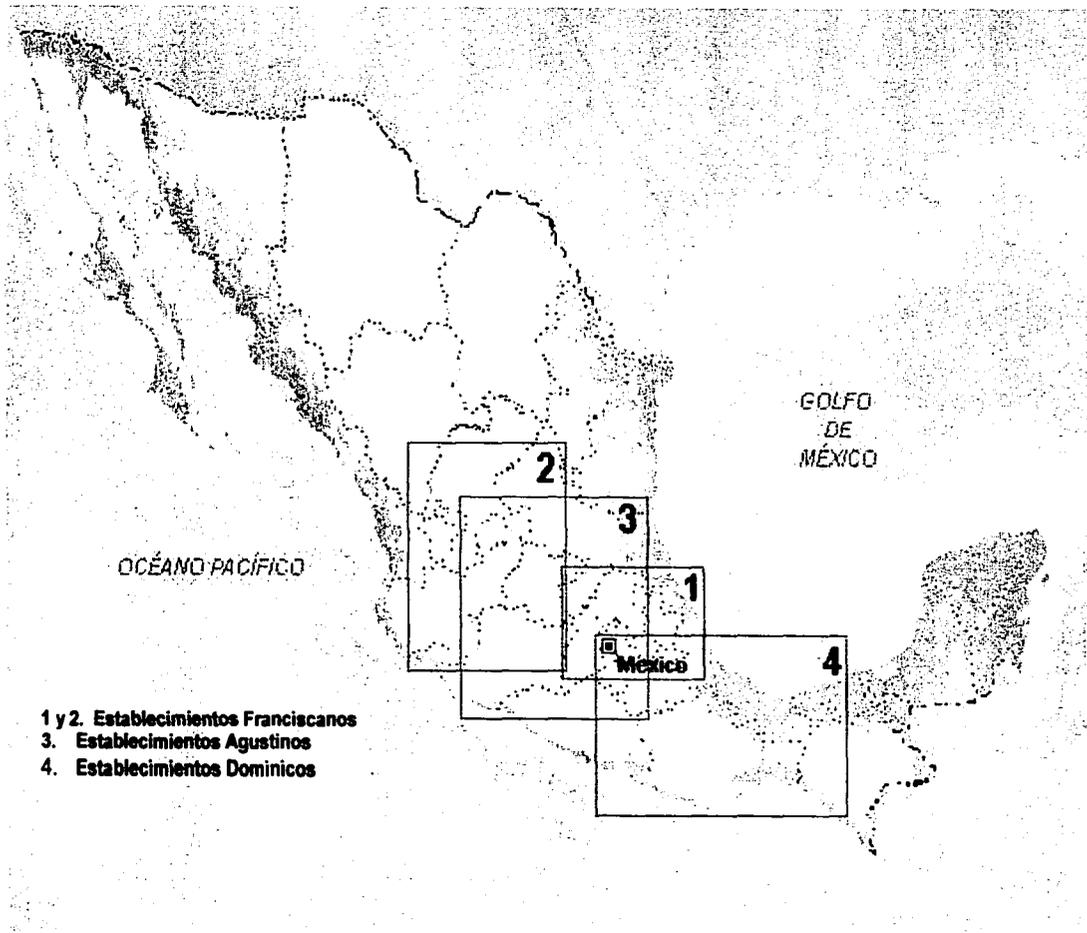
ETAPAS	LUMBRERA N°1	LUMBRERA N°2	LUMBRERA N°3
MOVIMIENTO DE CUERPO RÍGIDO del 19 nov 90 al 2 mar 91	8 dic- 3 ene A = 1.8 m Ls = 5.2 m B = 11	19 nov- 3 ene A = 1.8 m Ls = 5.2 m B = 12	8 dic- 3 ene A = 1.8 m Ls = 4.2 m B = 13
	4-19 ene A = 0.0 m Ls = 7.0 m B = 26	4-19 ene A = 0.0 m Ls = 7.0 m B = 16	4-19 ene A = 0.0 m Ls = 6.0 m B = 26
	20 ene-28 feb A = 0.0 m Ls = 5.0 m B = 26	20-28 ene A = 0.0 m Ls = 5.0 m B = 16	20 ene-28 feb A = 1.8 m Ls = 5.2 m B = 26
		29 ene-28 feb A = 1.8 m Ls = 3.2 m B = 16	
FRENADO INDUCIDO del 3 al 17 mar 91	Se suspendió la subexcavación, se inyectó lodo bentonítico en las perforaciones con una presión igual a la piezométrica		
DISTORSIÓN ANGULAR del 18 mar al 18 jun 91	10-18 jun A = 0.0 m Ls = 5.0 m B = 26	10-18 jun A = 1.8 m Ls = 5.2 m B = 16	17 mar-21 abr A = 1.8 m Ls = 5.2 m B = 26
			22 abr-8 may A = 0.0 m Ls = 7.0 m B = 26
			9 may-18 jun A = 1.8 m Ls = 5.2 m B = 26
PARO NATURAL	Se suspendió la subexcavación el 18 de junio, y se retiró el sistema de bombeo		
a partir del 18 jun 91			

A: Longitud del ademe

Ls: Longitud horizontal de subexcavación

B: Número de subexcavaciones





- 1 y 2. Establecimientos Franciscanos
- 3. Establecimientos Agustinos
- 4. Establecimientos Dominicos

Fig 1. Localización de las principales órdenes religiosas en México durante el Siglo XVI

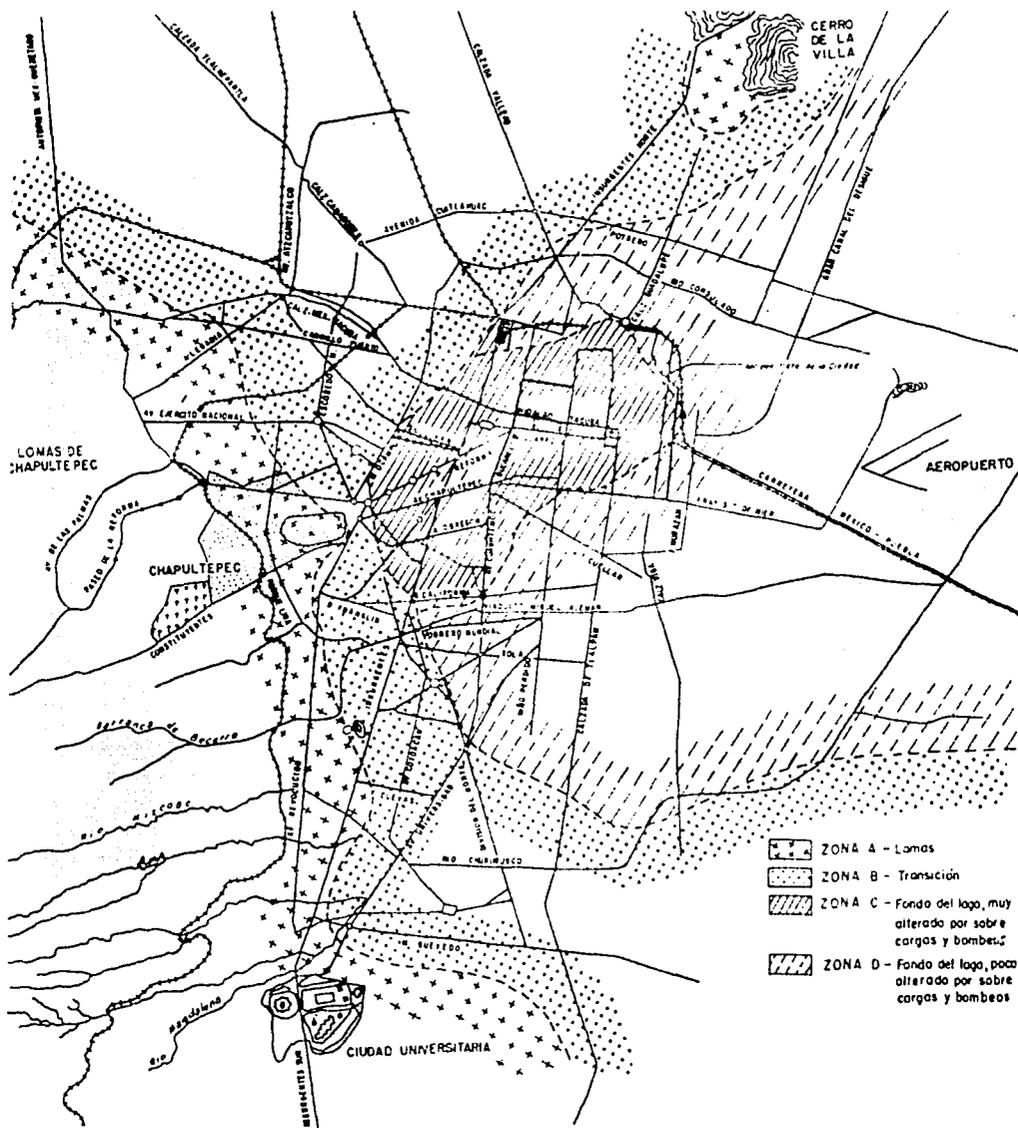


Fig 2. Zonificación de la Ciudad de México

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

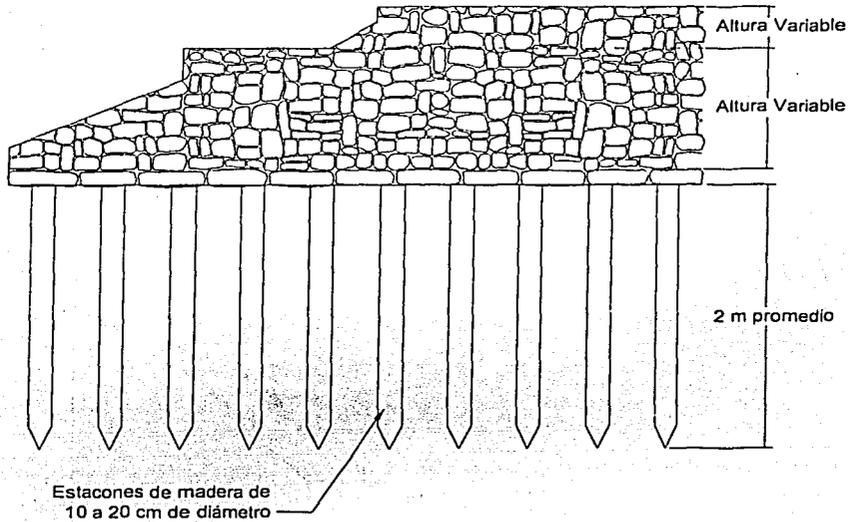


Fig 3. Sección típica de una cimentación mexicana

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

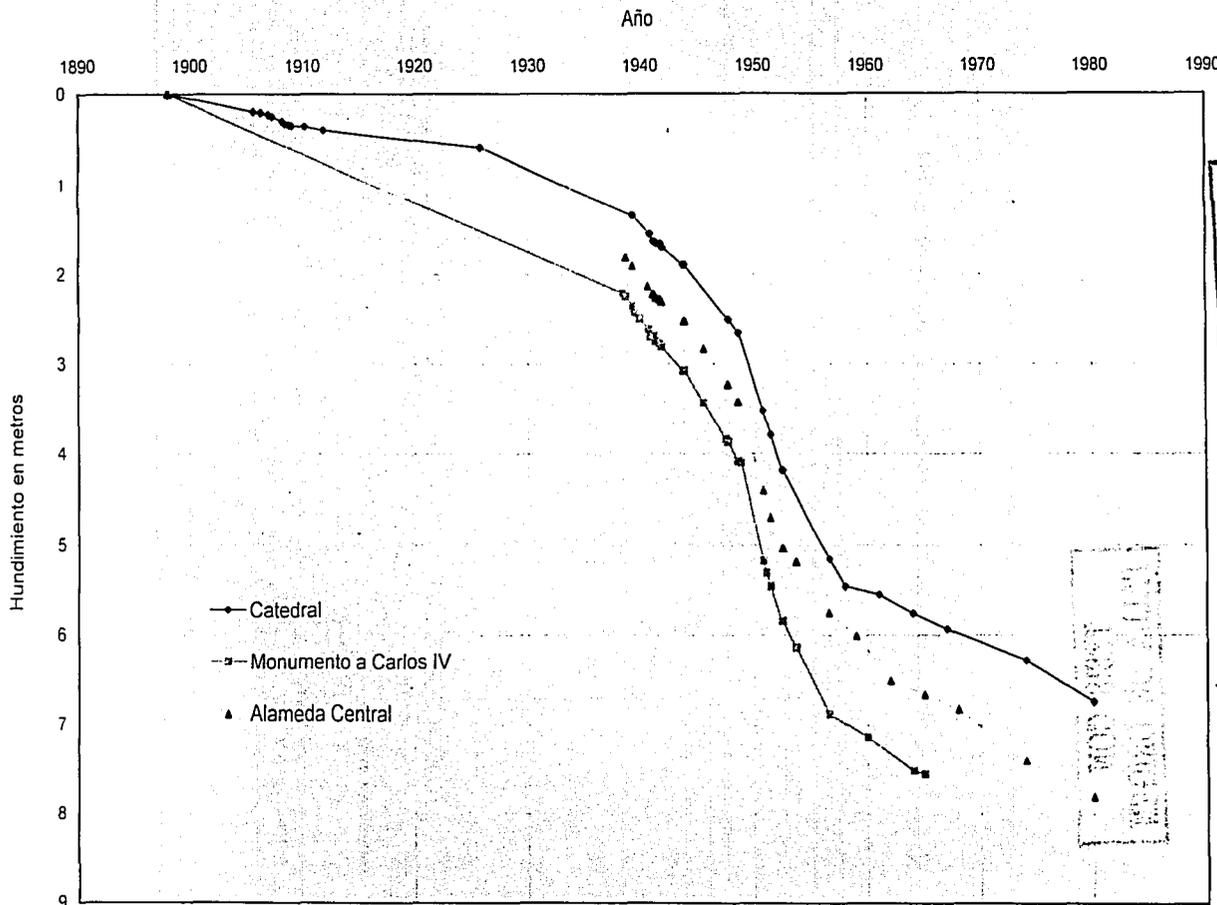


Fig 4. Hundimiento de 3 bancos de nivel superficiales ubicados en el Centro Histórico de la ciudad de México, durante el periodo de 1898 - 1980 (Tamez, et al. 1992)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

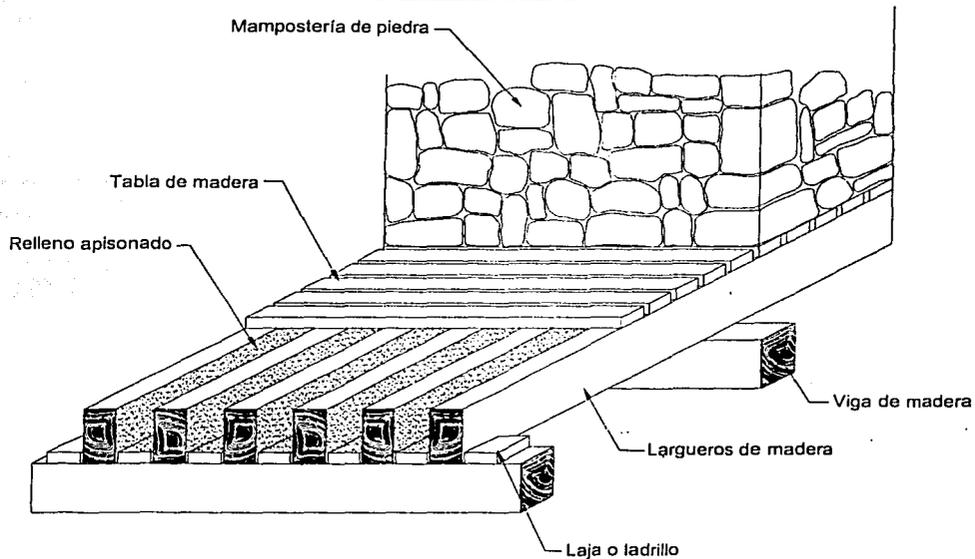


Fig 5. Emparrillado de madera

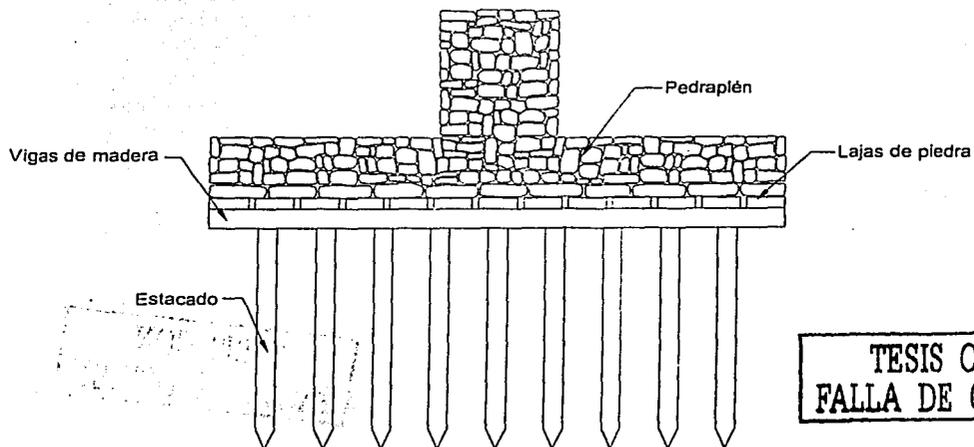
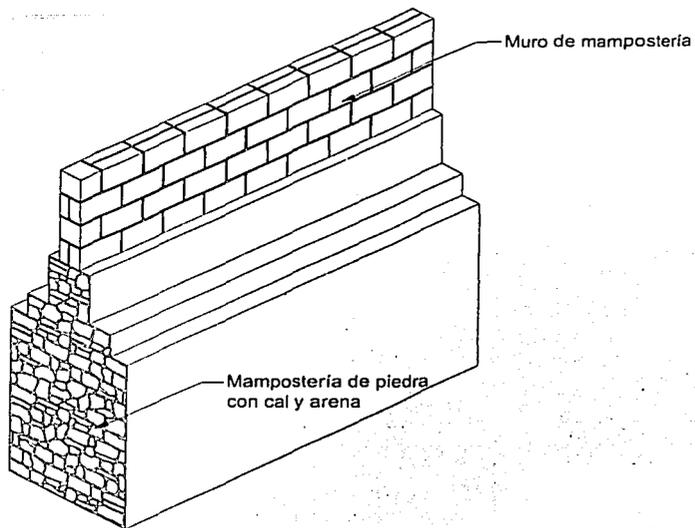
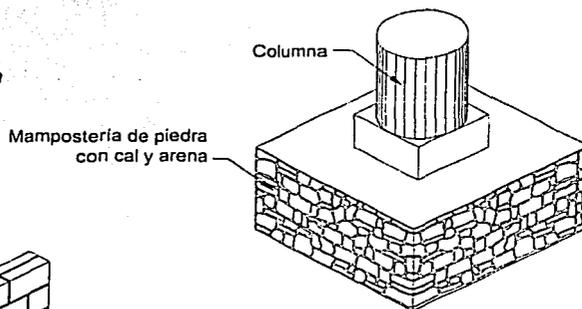


Fig 6. Emparrillado y estacado

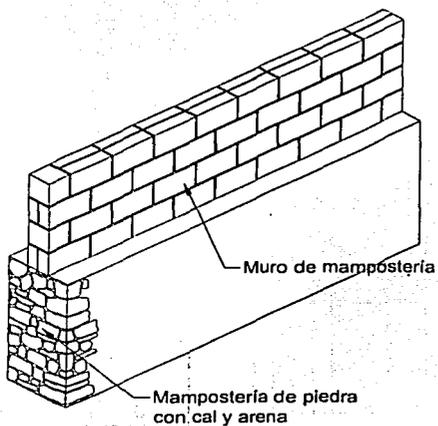
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



a) Cimentación continua escalonada



c) Cimentación aislada



b) Cimentación continua

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig 7. Cimentaciones de mampostería

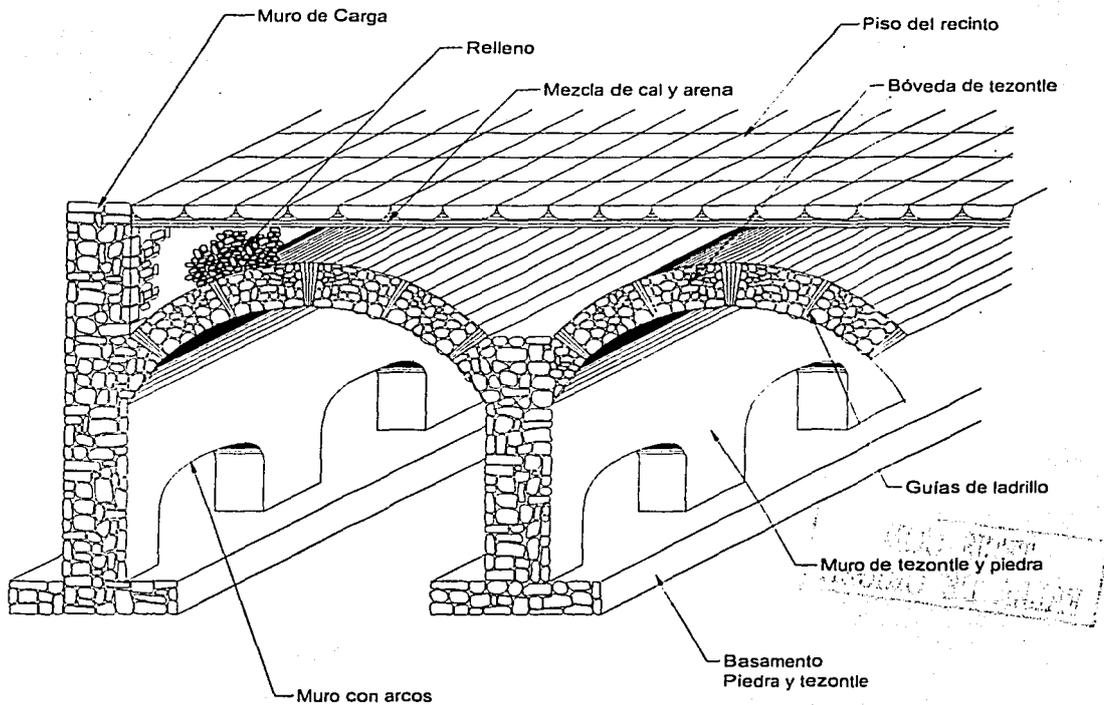


Fig 8. Bóvedas de cimentación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

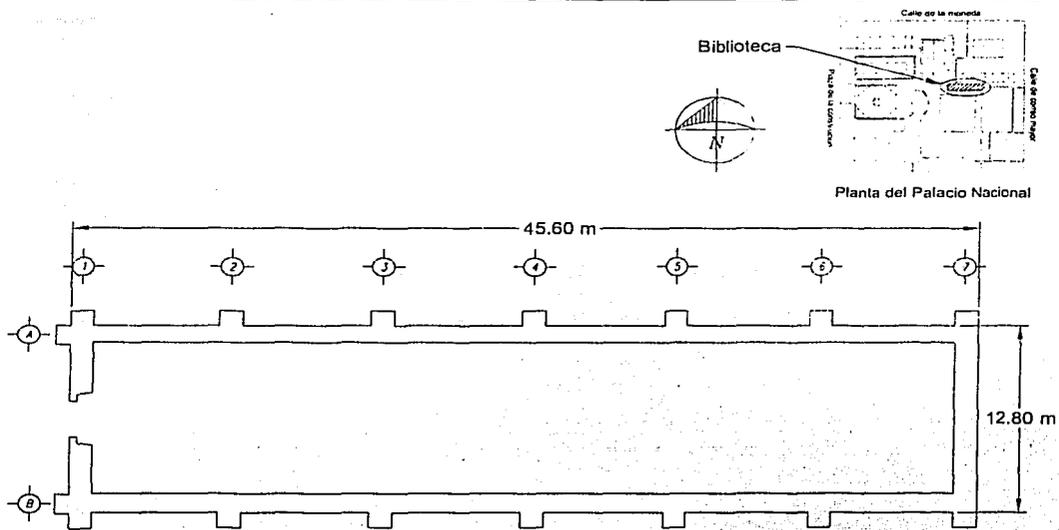


Fig 9. Planta de la Biblioteca de Finanzas de la SHCP

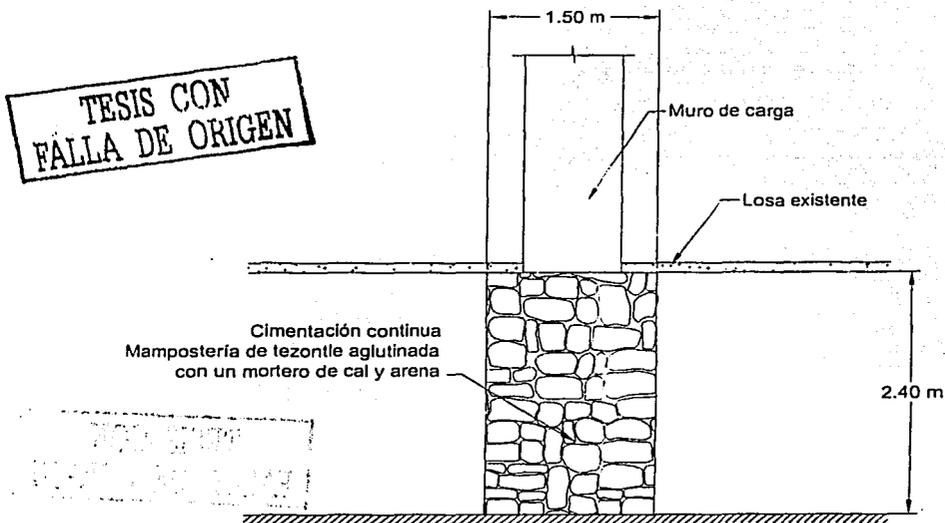


Fig 10. Esquema de la cimentación original de la Biblioteca de Finanzas de la SHCP

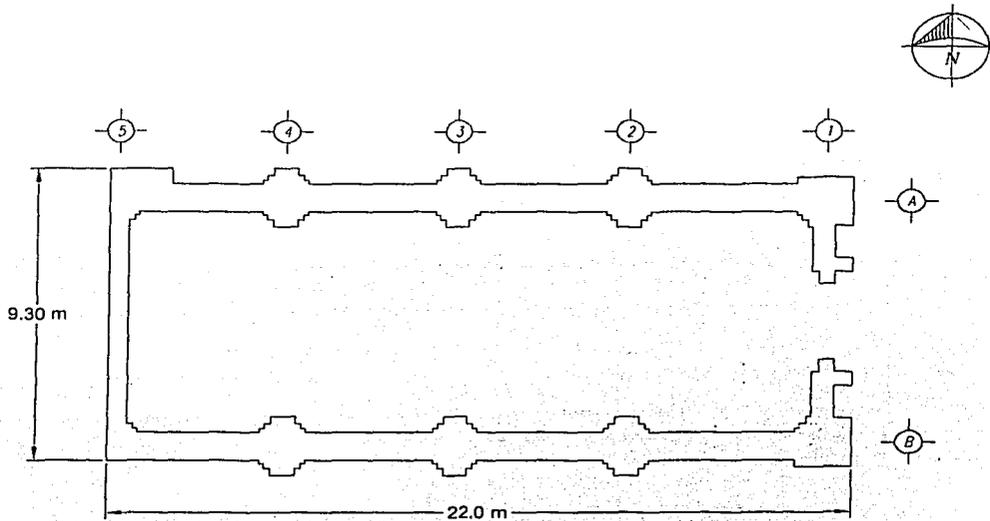


Fig 11. Planta de la Capilla de las Ánimas

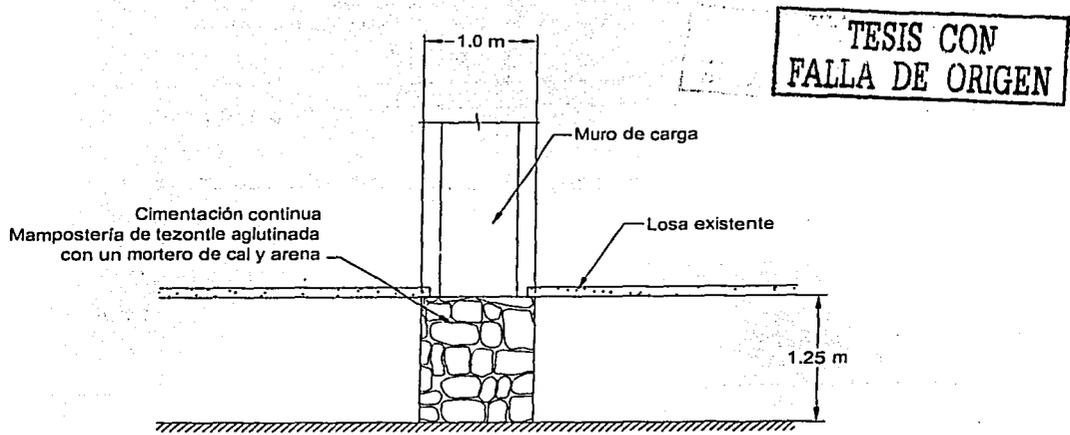


Fig 12. Esquema de la cimentación original de la Capilla de las Ánimas

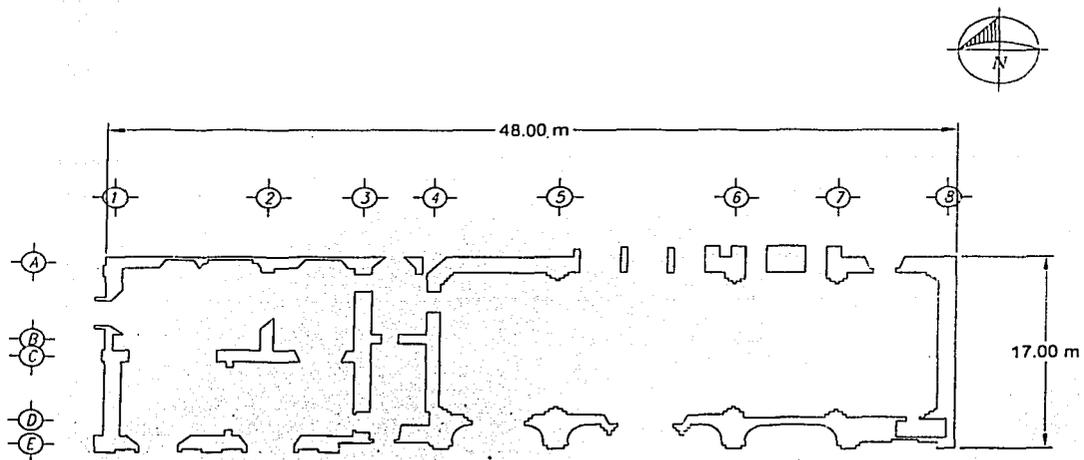


Fig 13: Planta de la Capilla de las Capuchinas

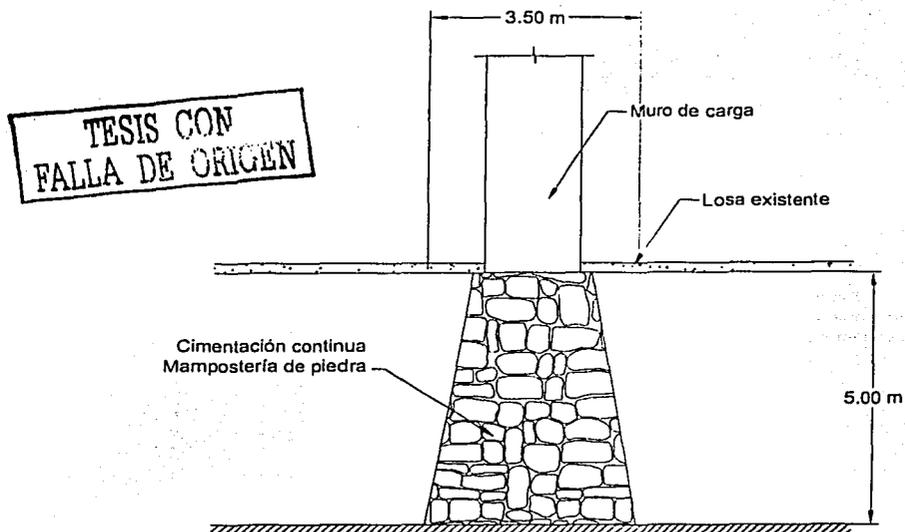
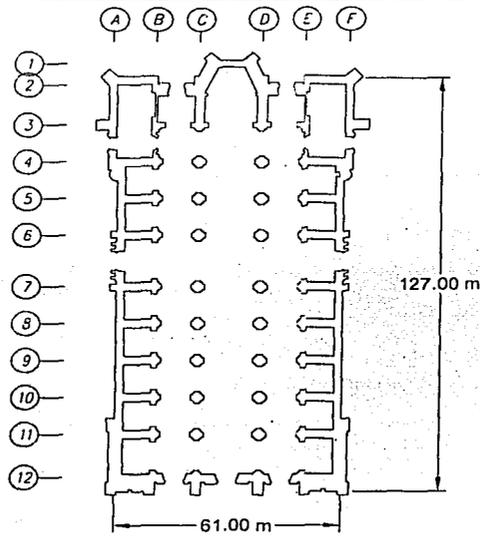


Fig 14. Esquema de la cimentación original de la Capilla de las Capuchinas



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig 15. Planta de la Catedral Metropolitana

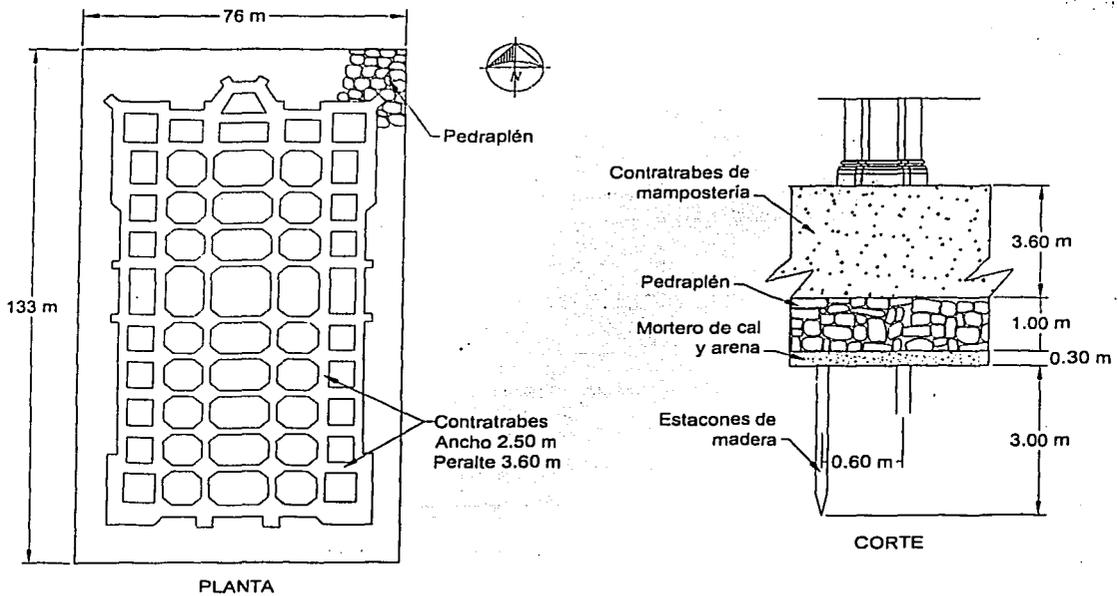


Fig 16. Esquema de la cimentación original de la Catedral Metropolitana

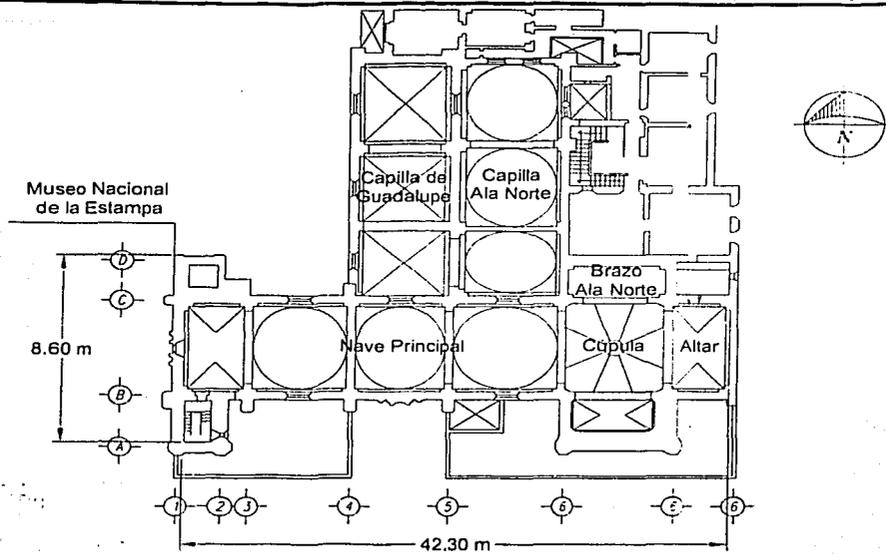


Fig 17. Planta de la Iglesia de la Santa Veracruz

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

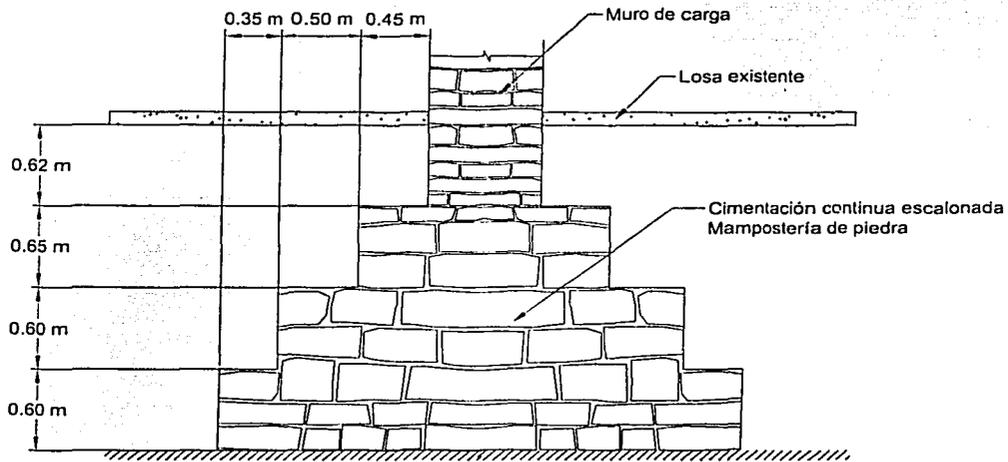


Fig 18. Esquema de la cimentación original de la Iglesia de la Santa Veracruz

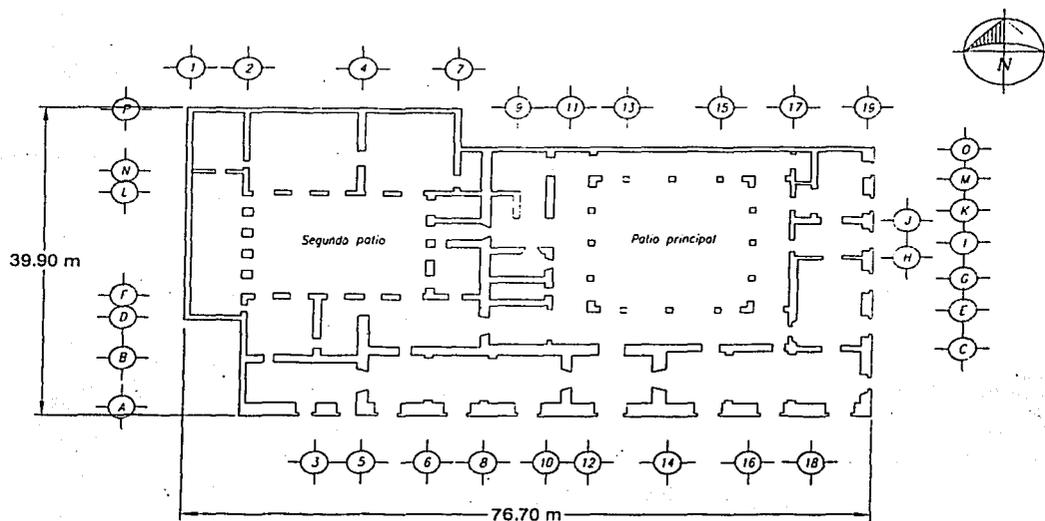


Fig 19. Planta del Palacio del Ex-Arzobispado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

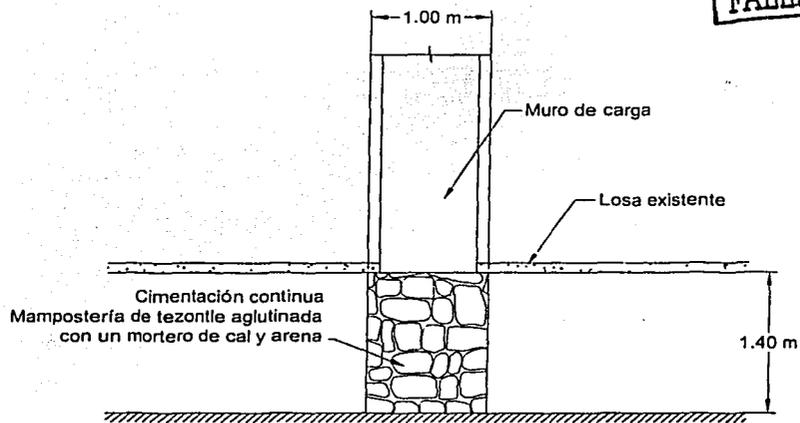


Fig 20. Esquema de la cimentación original del Palacio del Ex-Arzobispado

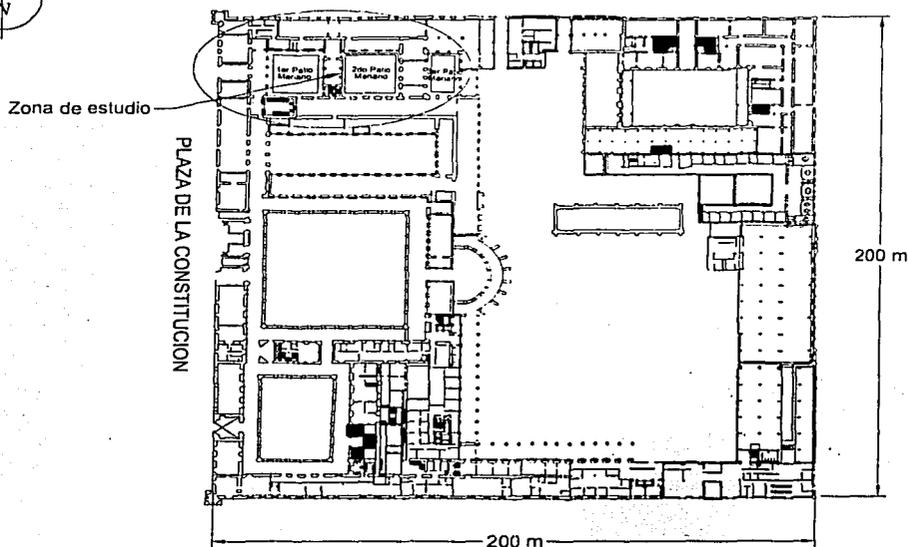


Fig 21. Planta del Palacio Nacional

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

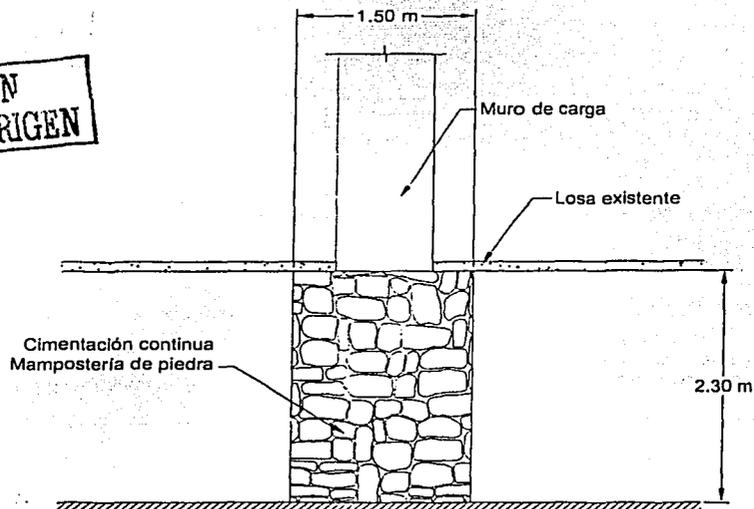


Fig 22. Esquema de la cimentación original de la esquina norponiente del Palacio Nacional

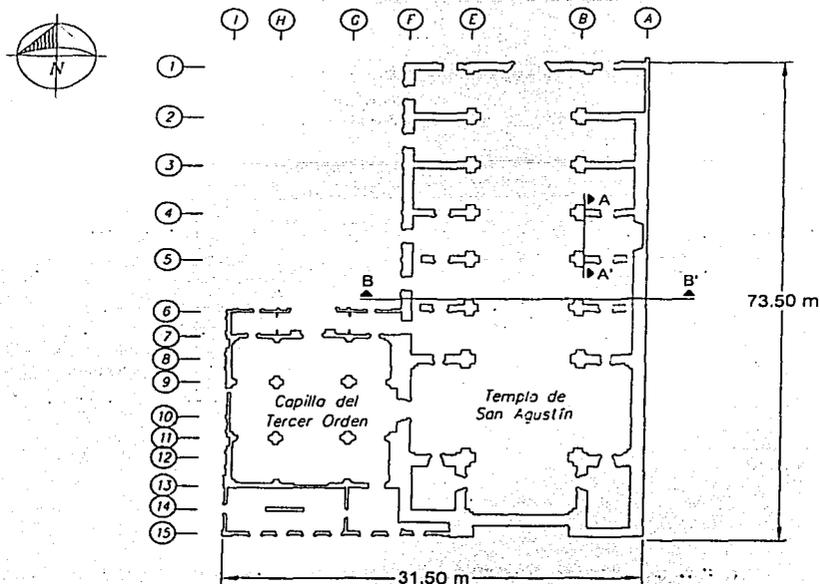


Fig 23. Planta del Templo de San Agustín

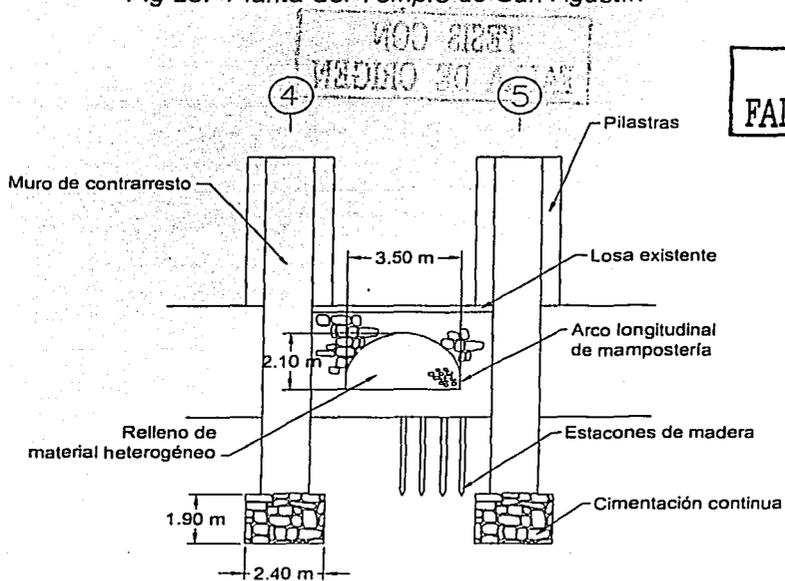


Fig 24. Corte longitudinal A-A' de la cimentación del Templo de San Agustín

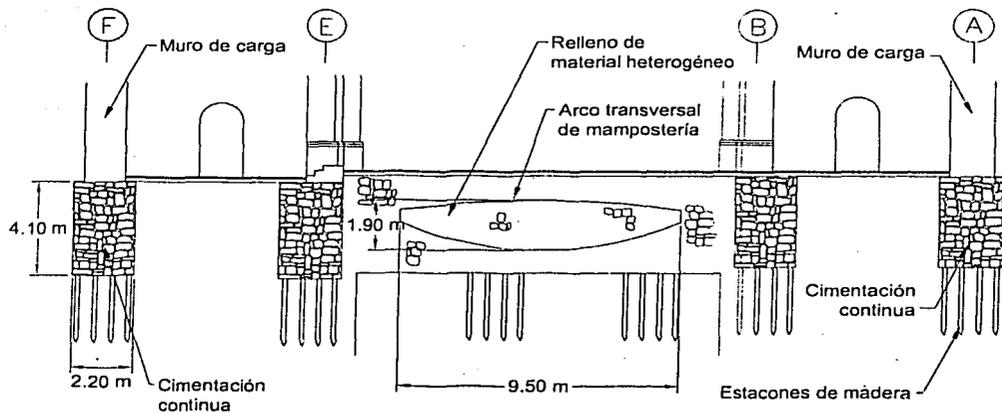


Fig 25. Corte transversal B-B' de la cimentación del Templo de San Agustín.

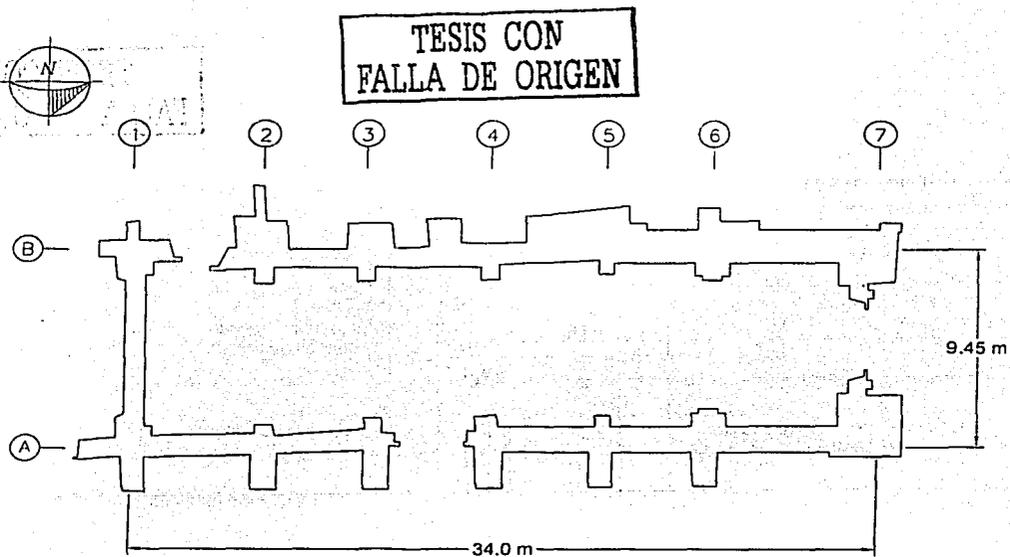


Fig 26. Planta del Templo de San Antonio Abad

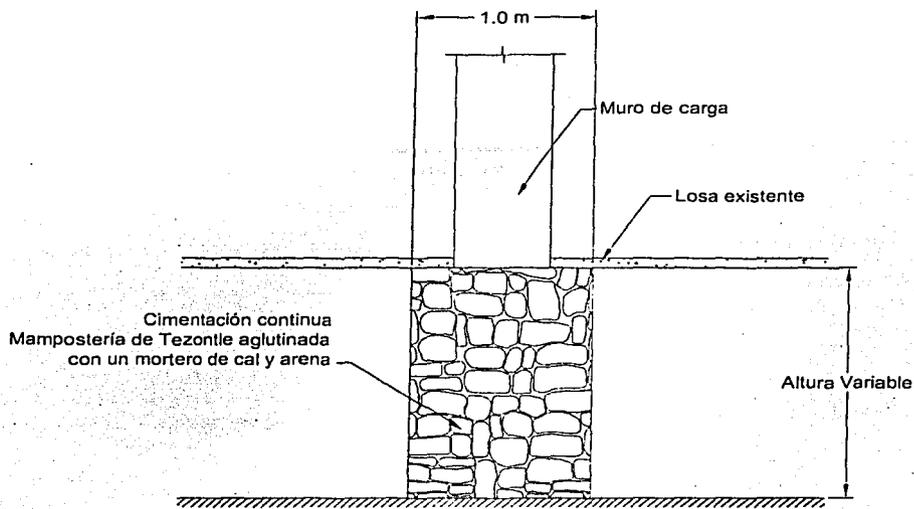
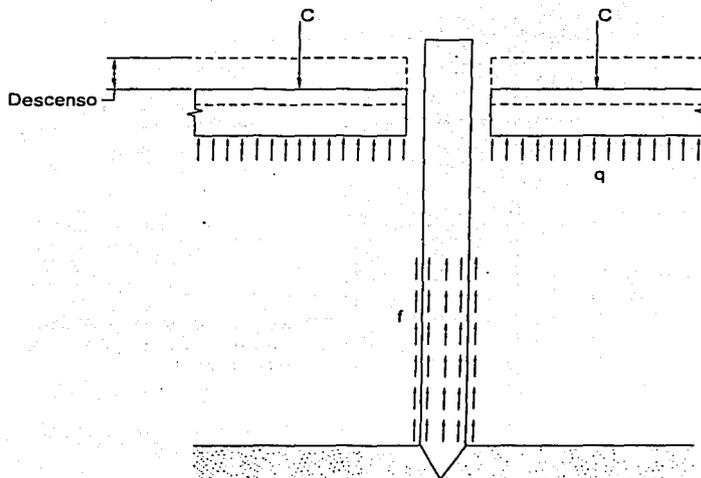


Fig 27. Esquema de la cimentación original del Templo de San Antonio Ábad



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Fig 28. Pilote de fricción negativa

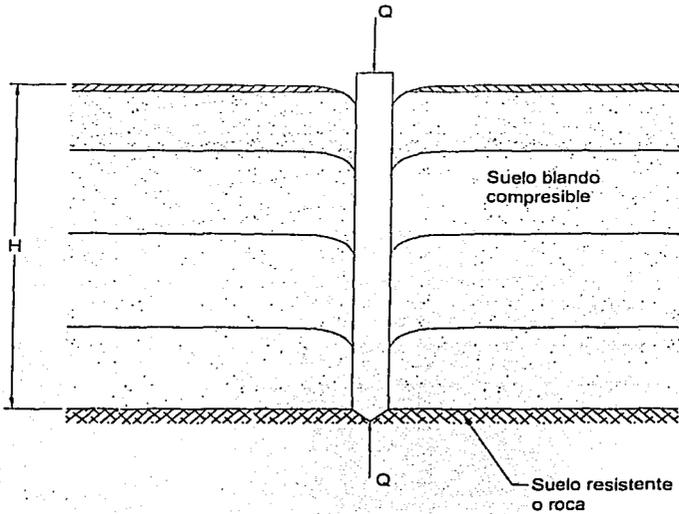


Fig 29. Pilote de punta

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

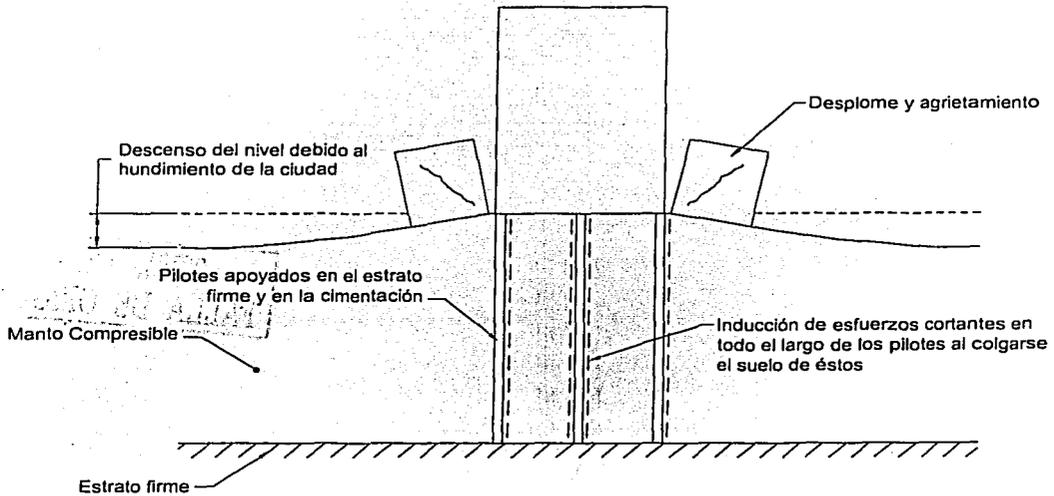


Fig 30. Desplomos y agrietamiento de edificios adyacentes a uno cimentado con pilotes.

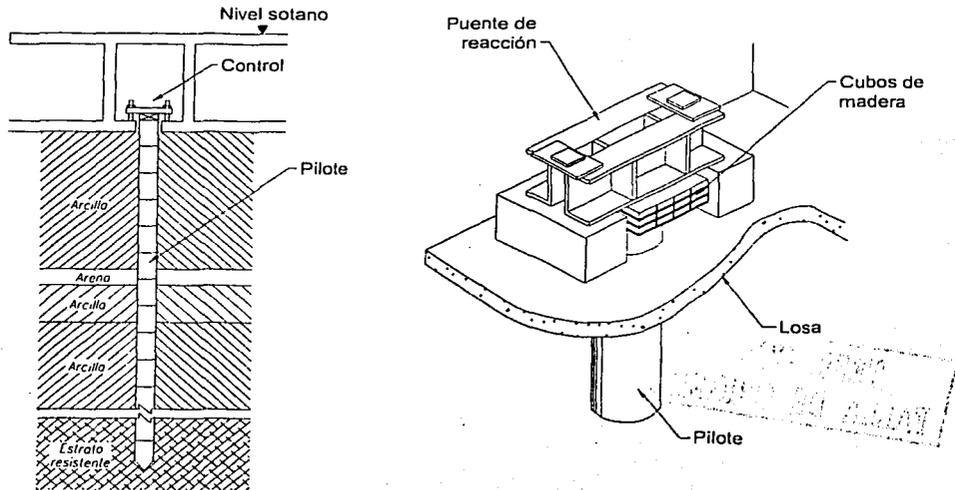


Fig 31. Esquema de un pilote de control

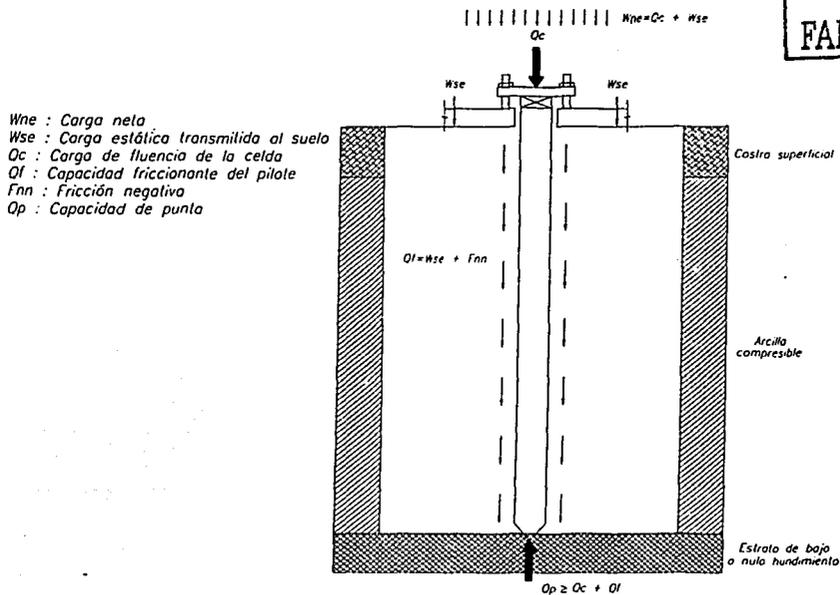
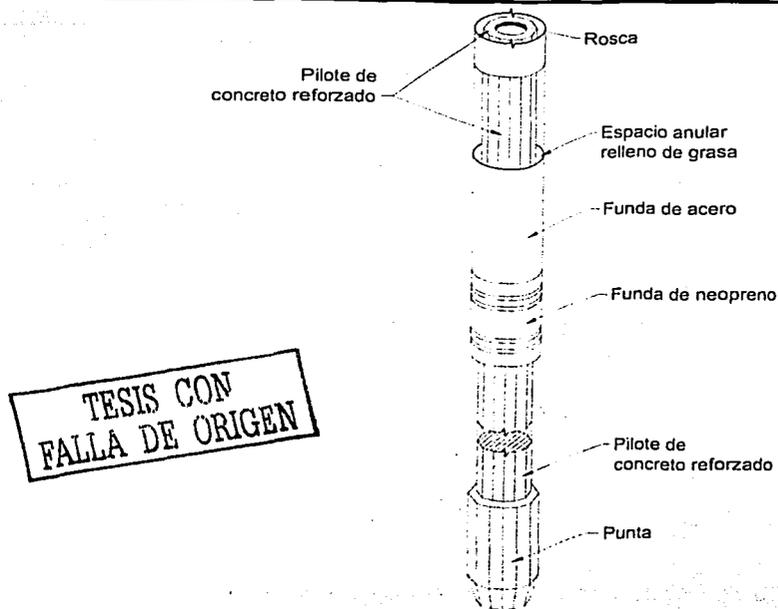


Fig 32. Fuerzas actuantes y resistentes en un pilote de control



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig 33. Esquema de un pilote con funda antifriccionante.

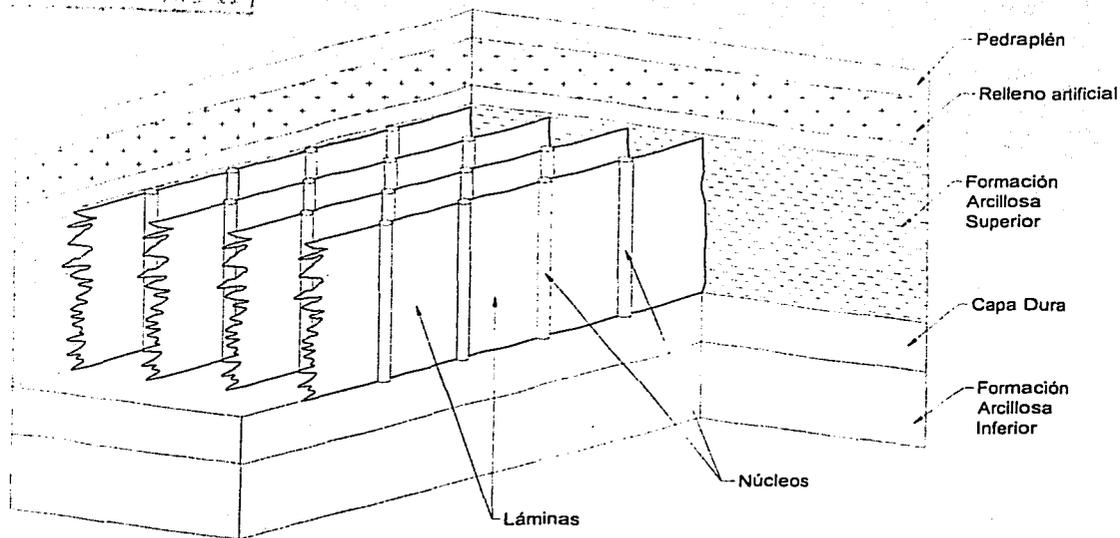


Fig 34. Estructura de mortero inyectado

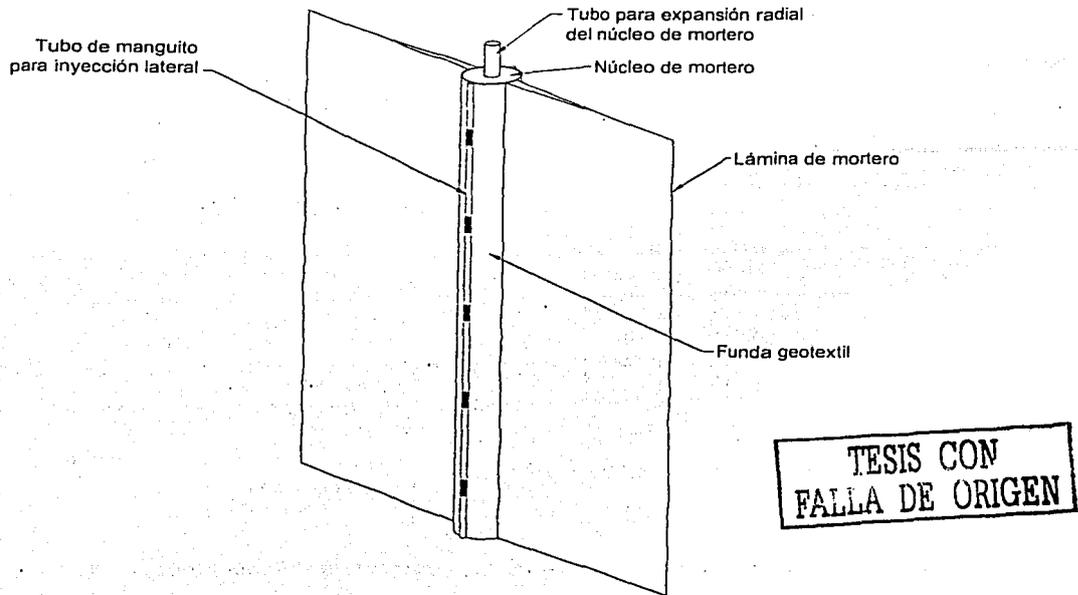


Fig 35. Núcleo con láminas laterales de mortero inyectado

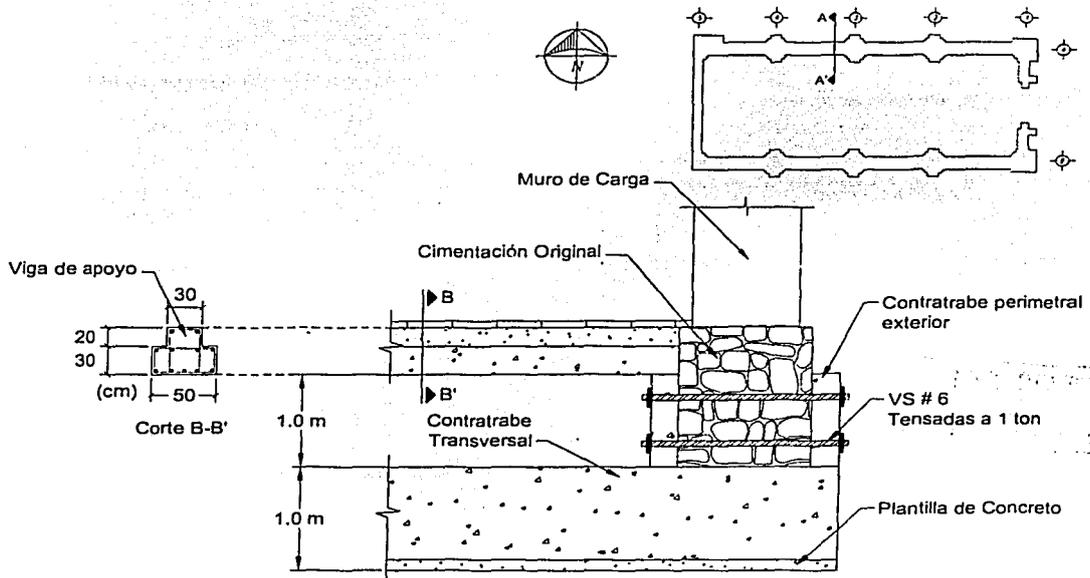


Fig 36. Corte transversal A-A' de la recimentación de la Capilla de las Ánimas

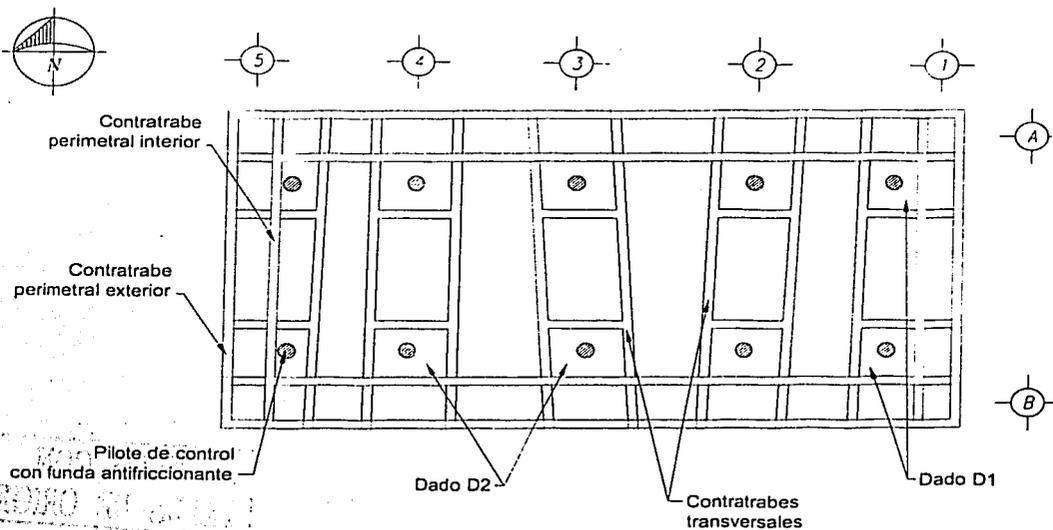


Fig 37. Distribución de los pilotes de control con funda antifriccionante en la Capilla de las Ánimas

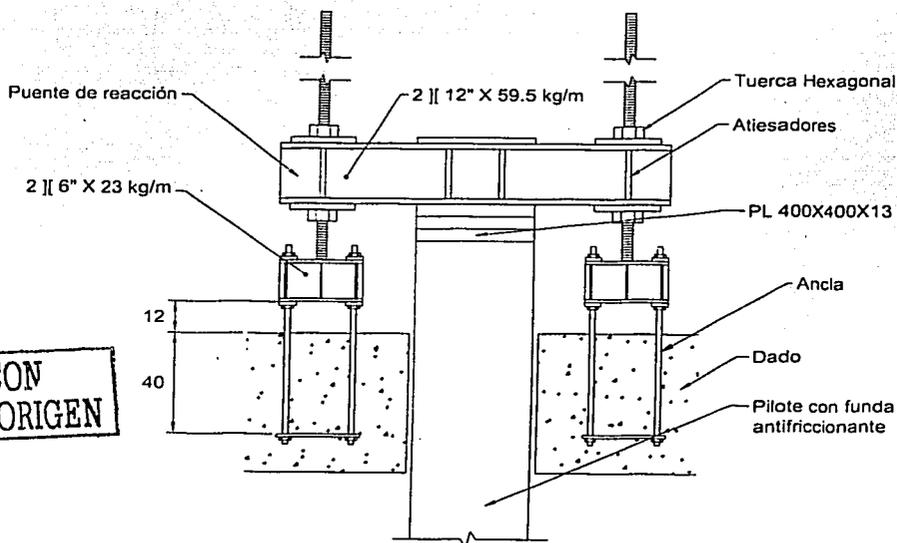


Fig 38. Esquema de un pilote de control con funda antifriccionante en la Capilla de las Ánimas

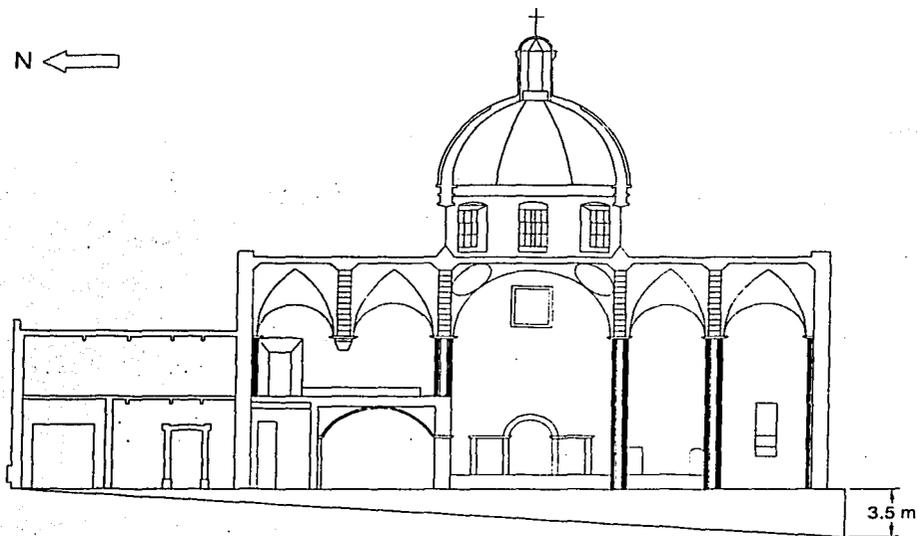


Fig 39. Corrección diferencial del Templo de Capuchinas

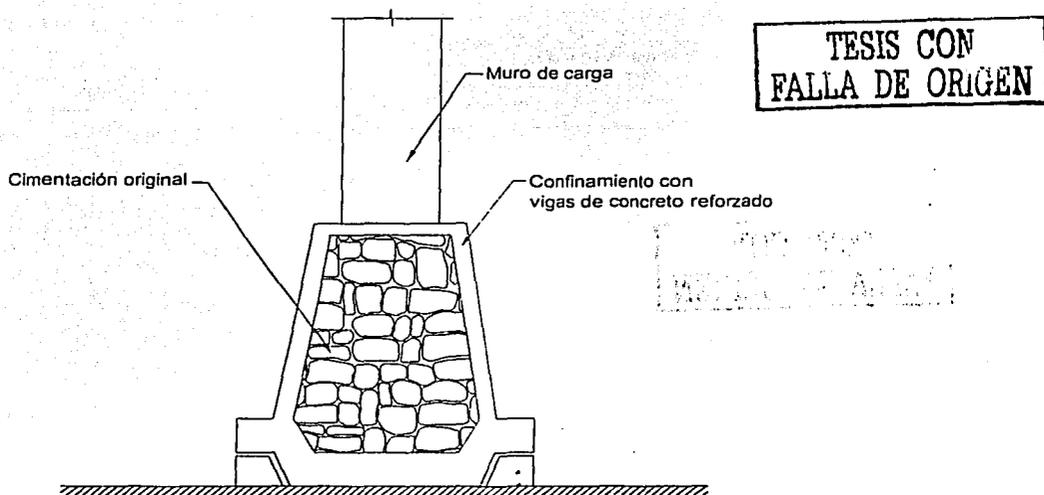


Fig 40. Confinamiento de la cimentación original de la Capilla de las Capuchinas

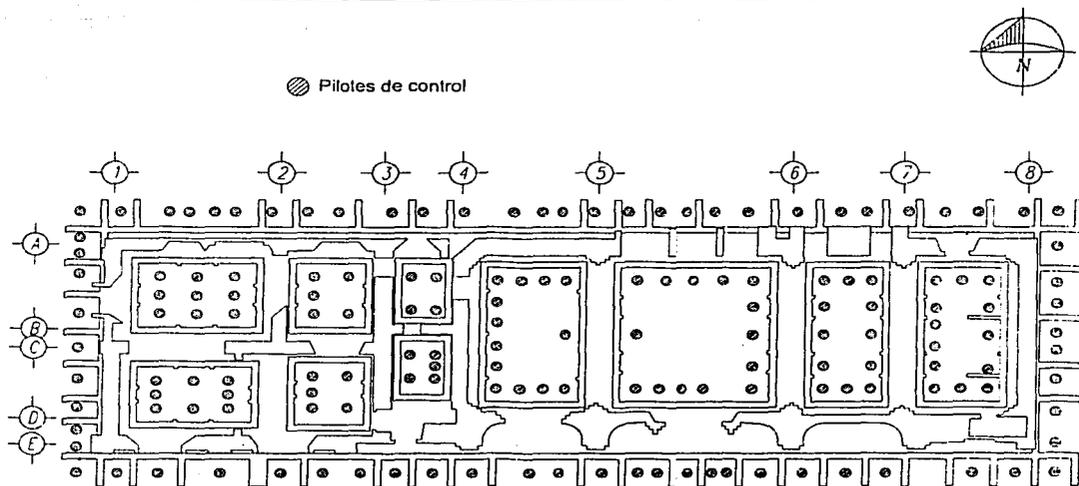
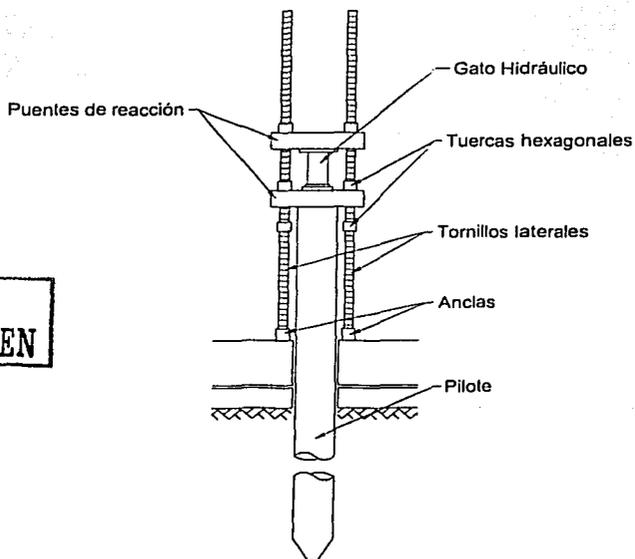


Fig 41. Distribución de los pilotes de control en la Capilla de las Capuchinas



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig 42. Esquema de un pilote de control de la Capilla de las Capuchinas

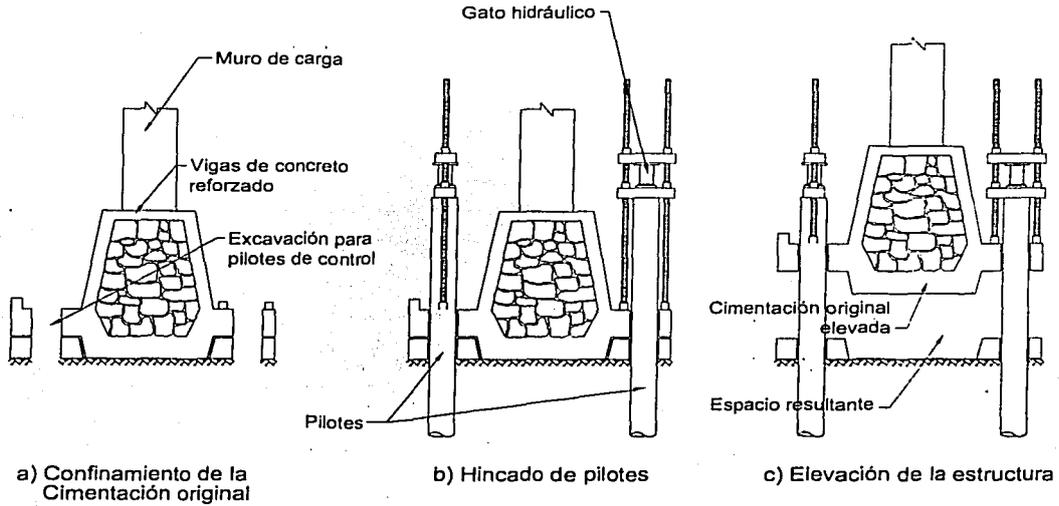


Fig 43. Proceso de rehabilitación de la Capilla de las Capuchinas

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

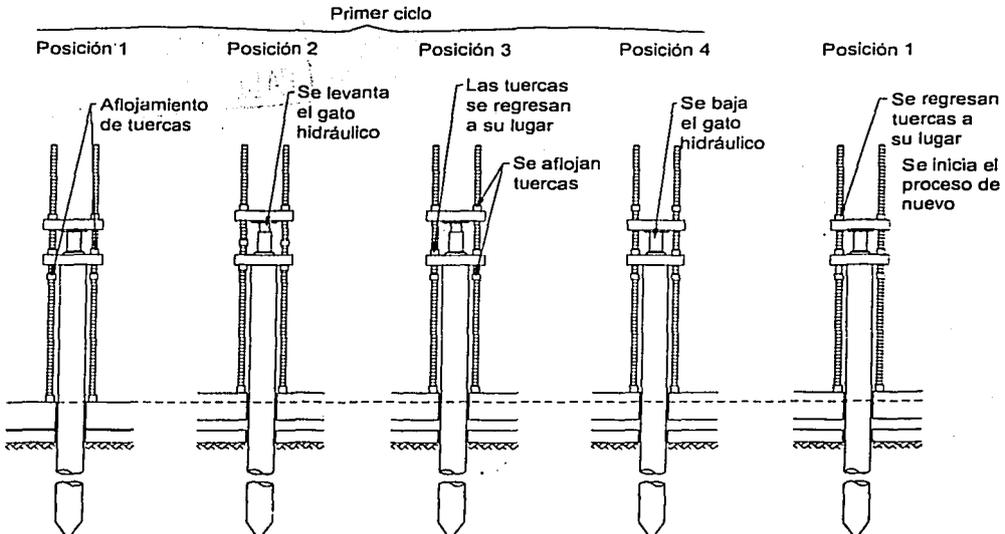


Fig 44. Ciclo de elevación de la Capilla de las Capuchinas

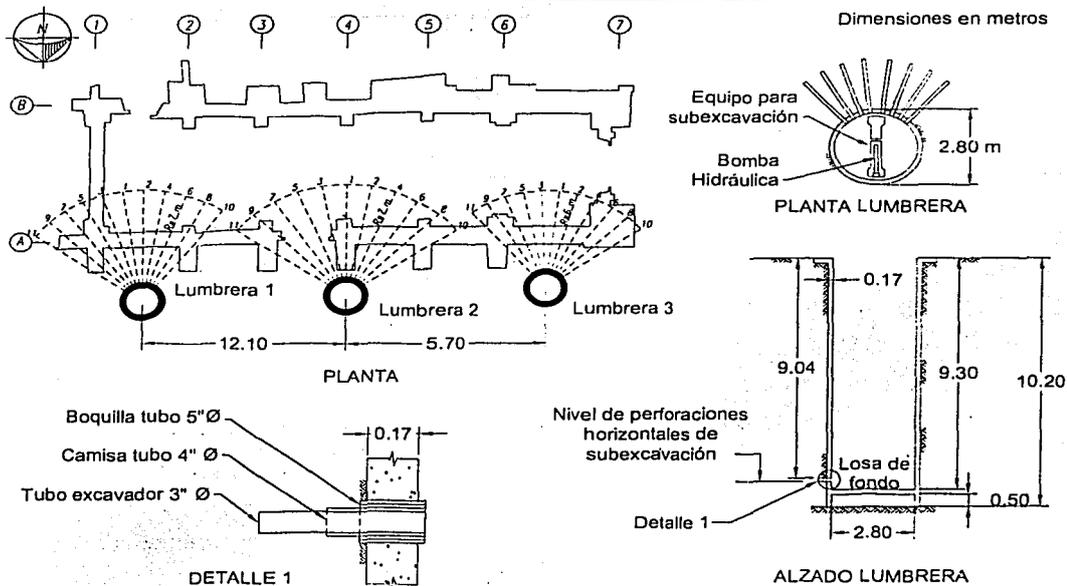


Fig 45. Distribución de lumbreras de subexcavación en San Antonio Abad

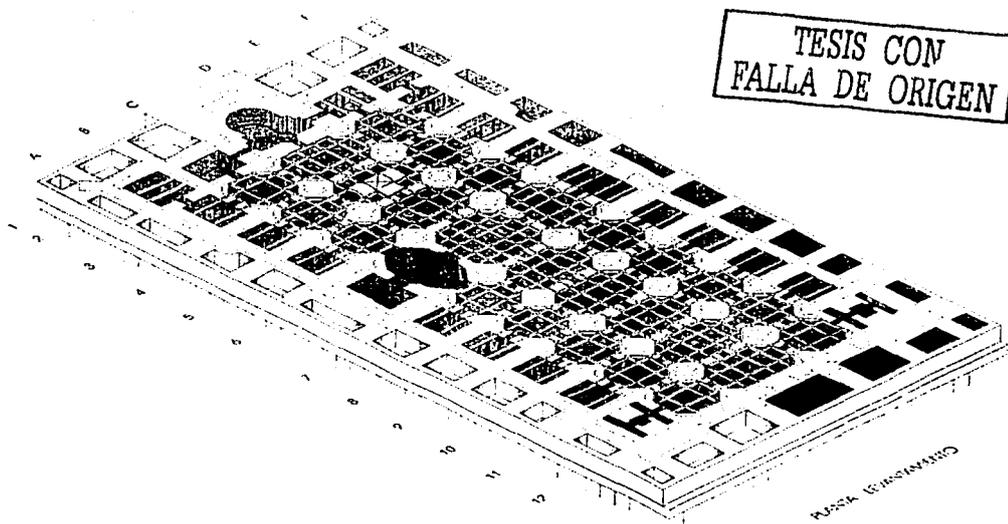
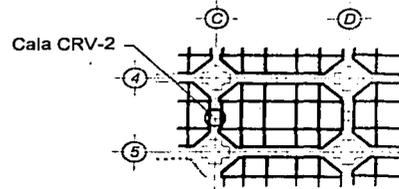


Fig 46. Esquema del refuerzo de la cimentación de la Catedral realizado en 1940

Dimensiones en centímetros

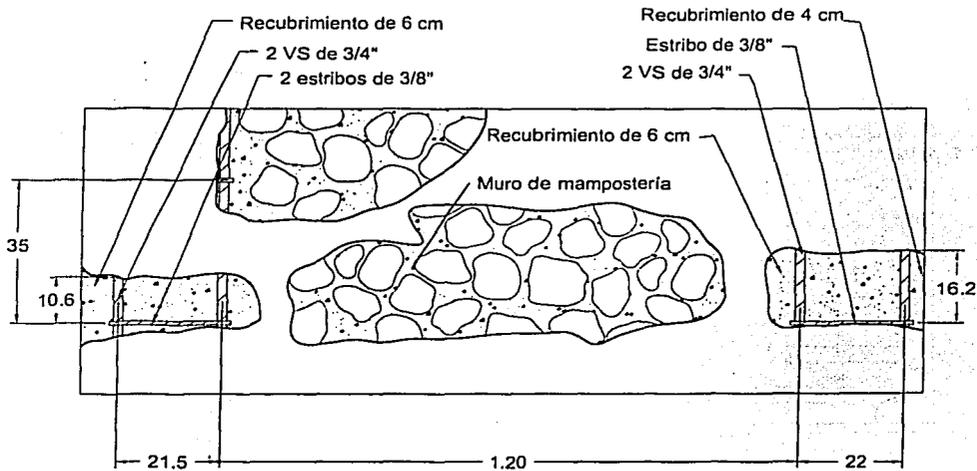
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Plano de localización



Vista Frontal

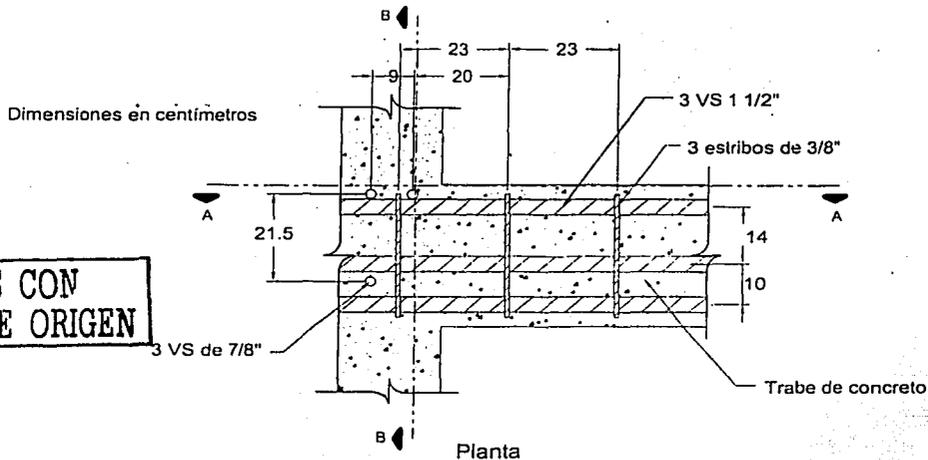
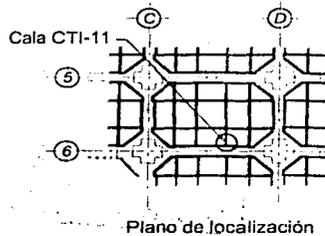


Elevación

Fig 47. Cala CRV-2 en refuerzo vertical de la cimentación



Vista del corte A-A



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

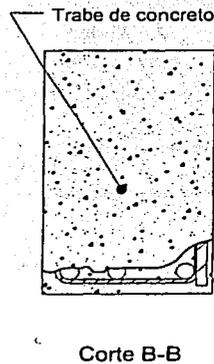
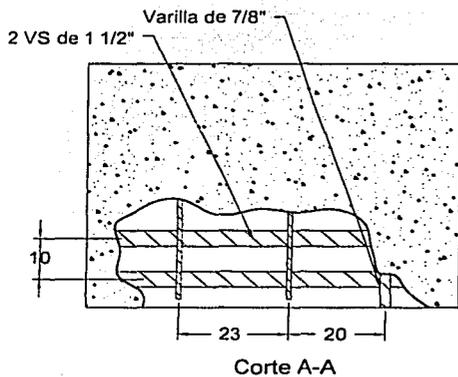
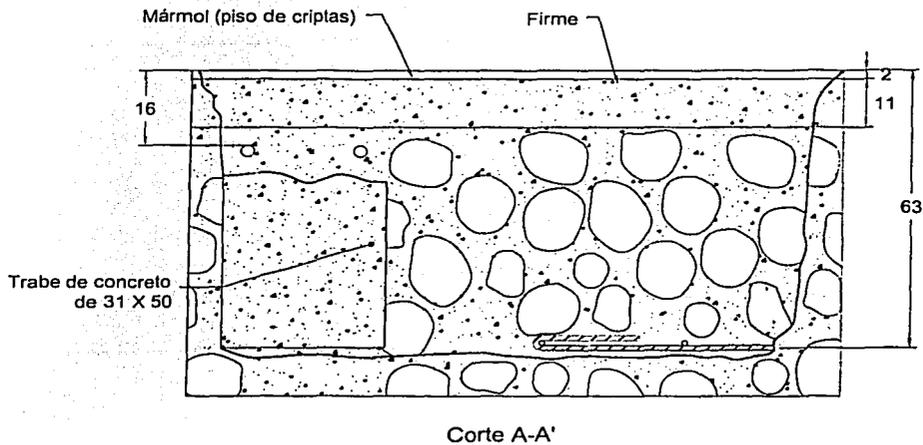
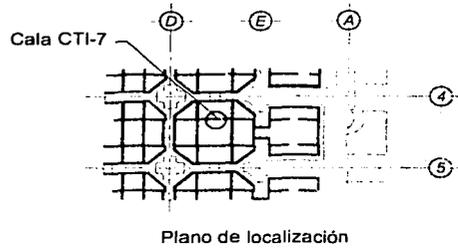
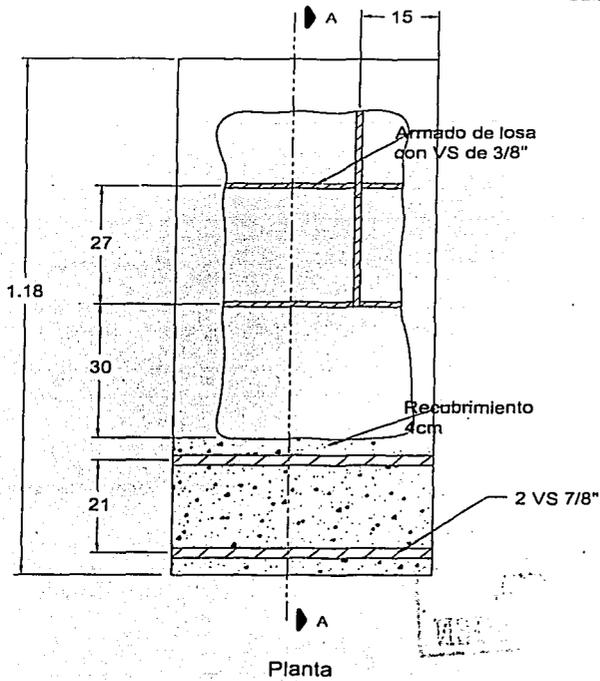


Fig 48. Cala CTI-11 en losa inferior de la cimentación

Dimensiones en centímetros



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig 49. Cala CTI-7 en losa inferior de la cimentación

FIGURAS

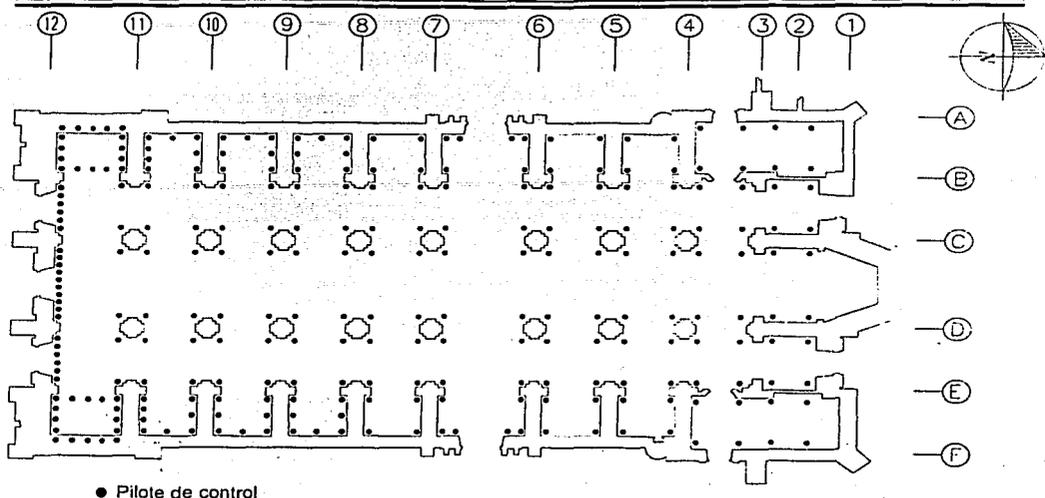


Fig 50. Localización de los pilotes de control en la Catedral según el proyecto original

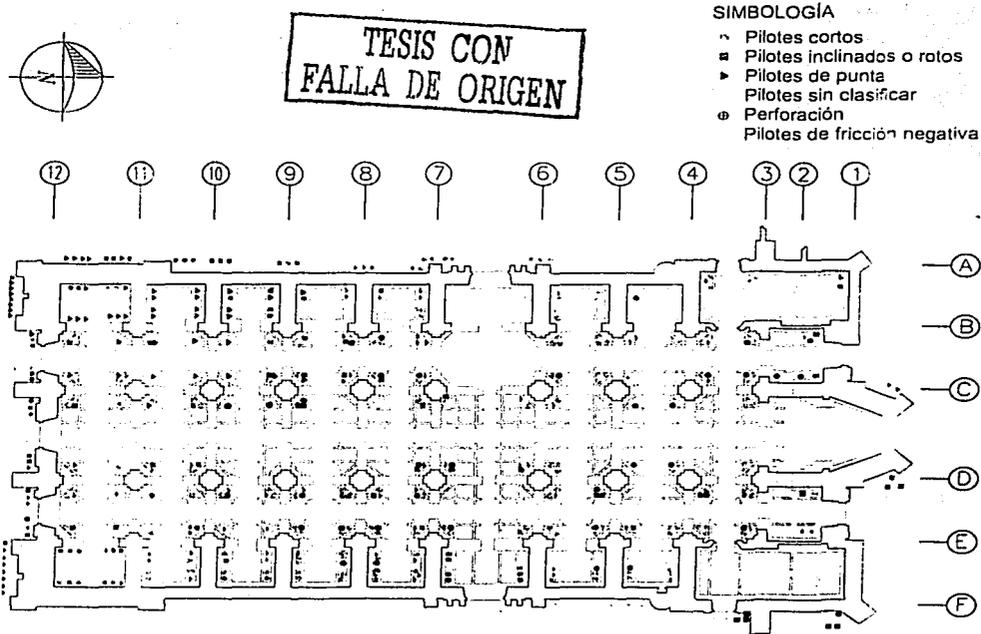


Fig 51. Localización de los pilotes de control en la Catedral Metropolitana

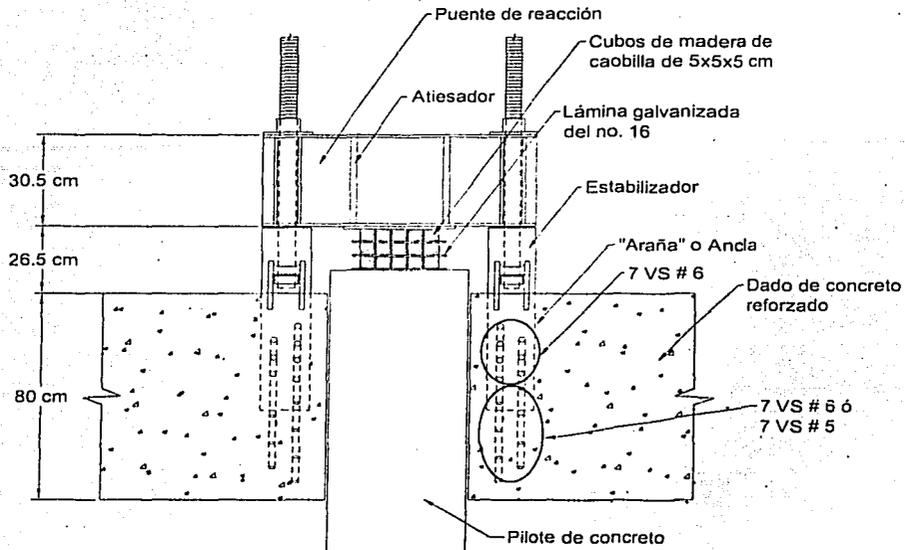


Fig 52. Esquema de un pilote de control en la Catedral Metropolitana

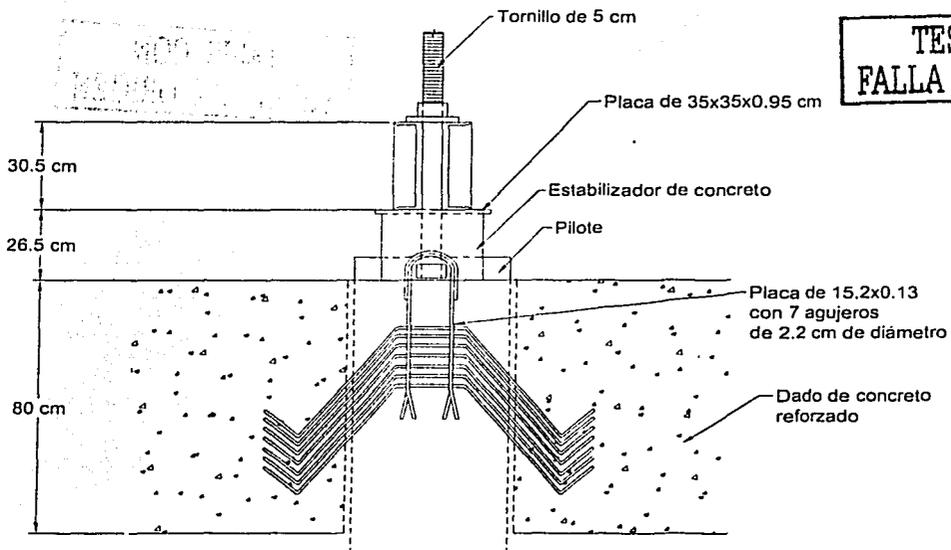


Fig 53. Esquema de una "Araña" ahogada en el concreto de un dado de la Catedral

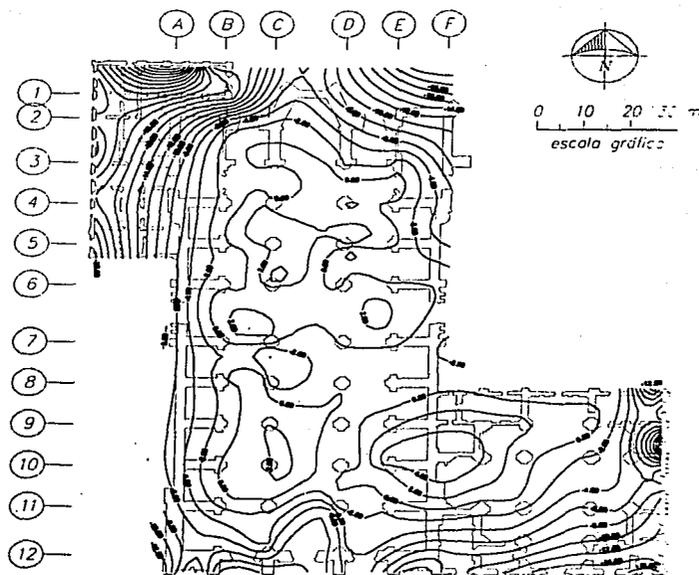
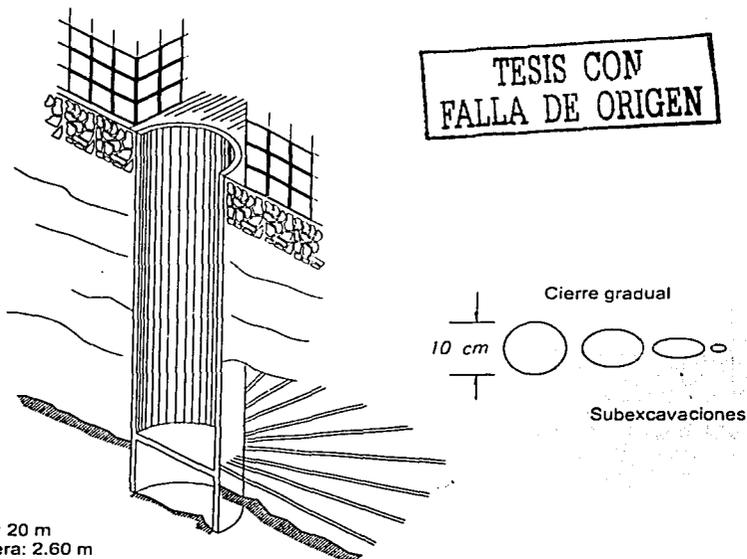


Fig 54. Configuración de velocidades anuales medidas de Ene 91 a Sep 91, en mm/año



Profundidad media: 20 m
Diámetro de lumbrera: 2.60 m

Fig 55. Esquema de una lumbrera de subexcavación en la Catedral Metropolitana

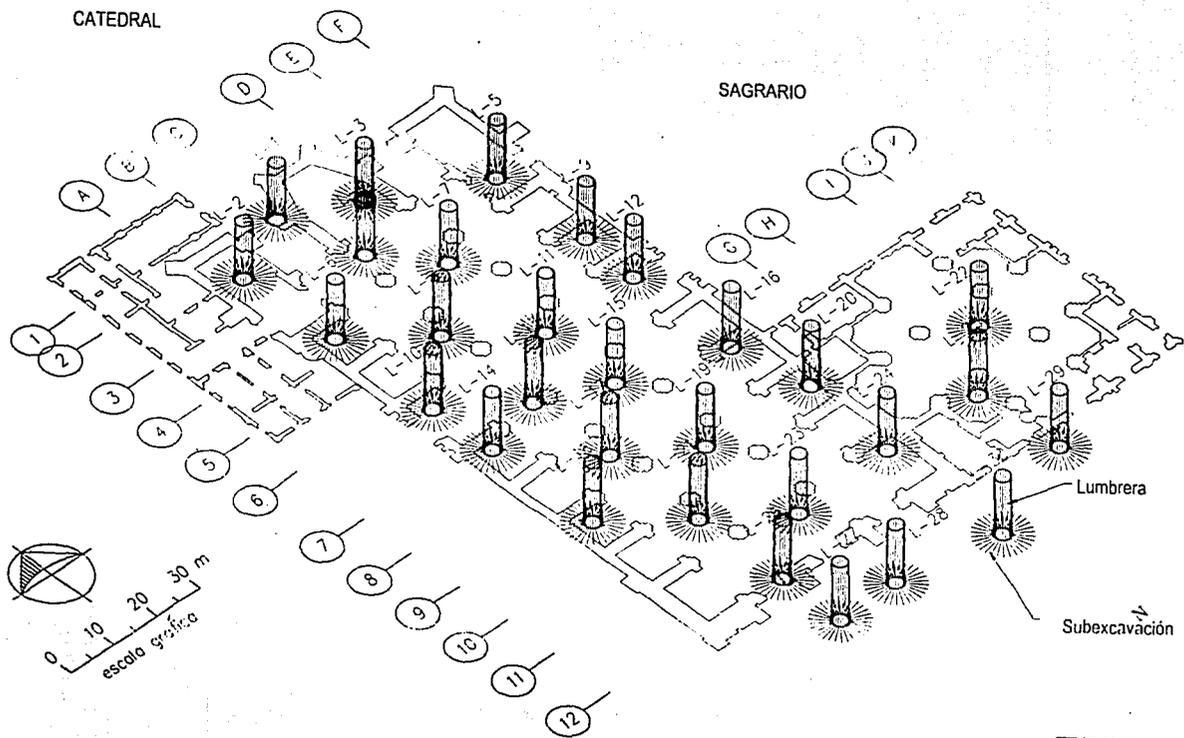
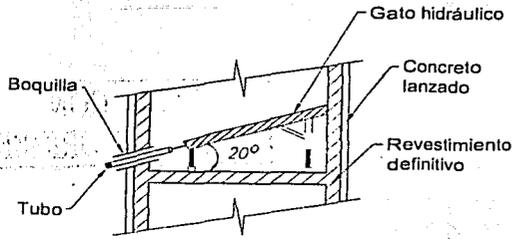
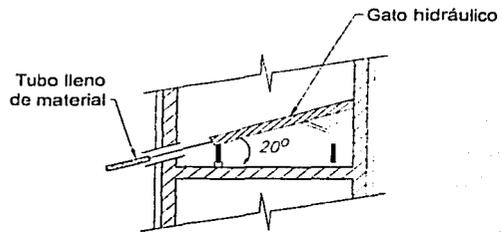


Fig 56. Distribución de lumbreras de subexcavación en la Catedral Metropolitana

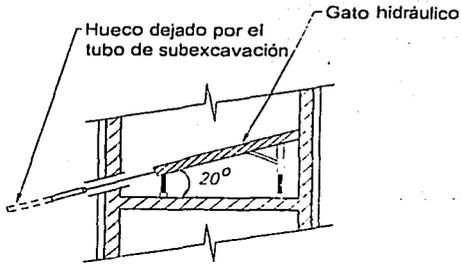
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



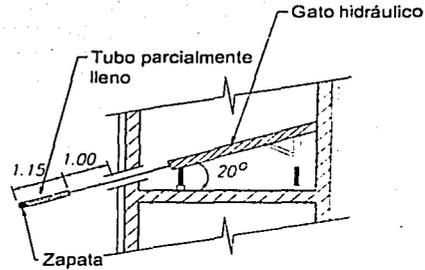
a) Arreglo general e hincado del tubo subexcavador



b) Hincado del primer tubo de subexcavación de 1.0 m de penetración

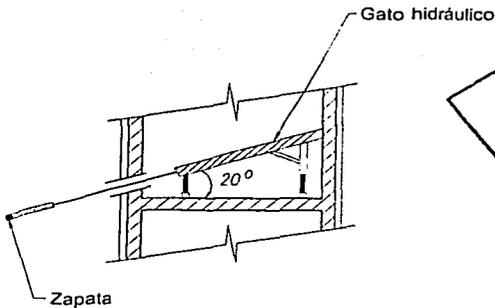


c) Retorno del primer tubo de subexcavación

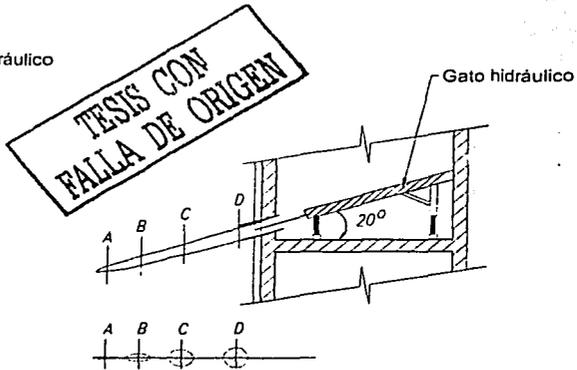


d) Hincado de 2 tubos de subexcavación 2.0 m de penetración

Nota: Esta operación se repite hasta hincar de 6 a 12 tubos



e) Hincado del sexto tubo de subexcavación 6.0 m de penetración



f) Proceso de deformación plástica de las penetraciones de subexcavación

Fig 57. Proceso de excavación

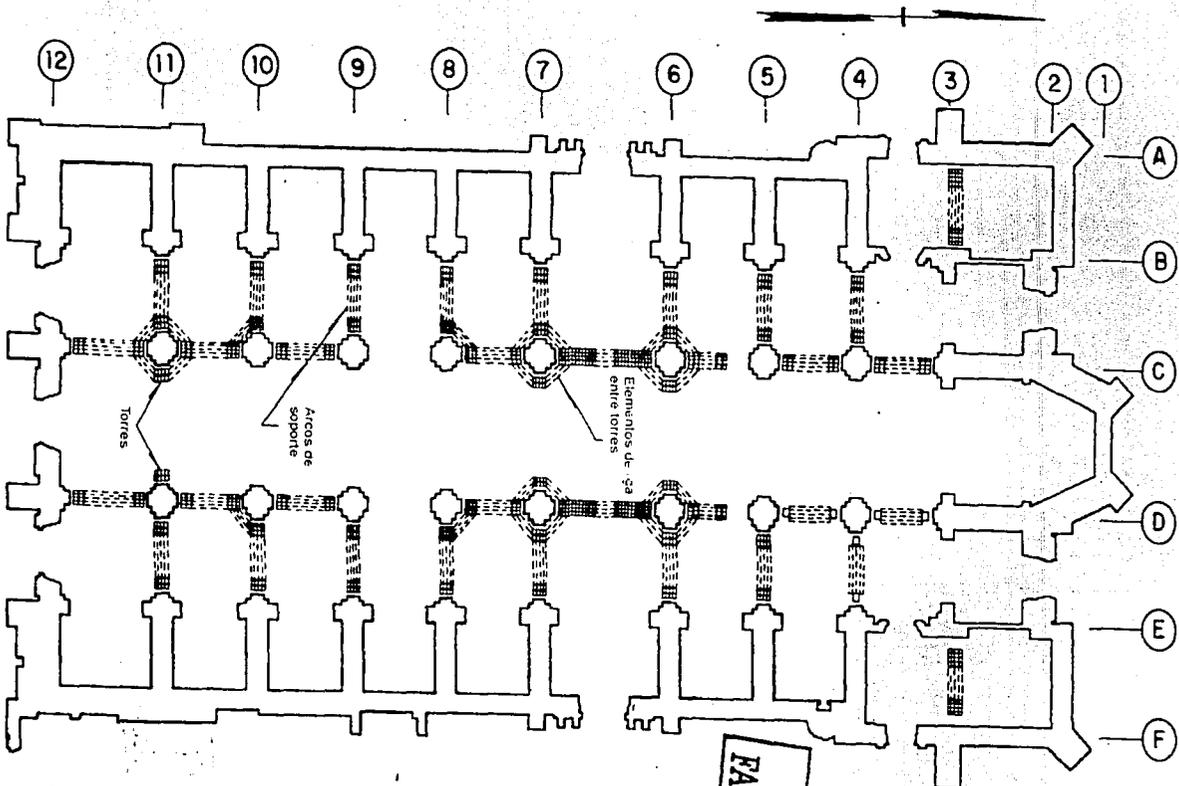


Fig 58. Apuntalamiento en la Catedral durante subexcavación

FIGURAS

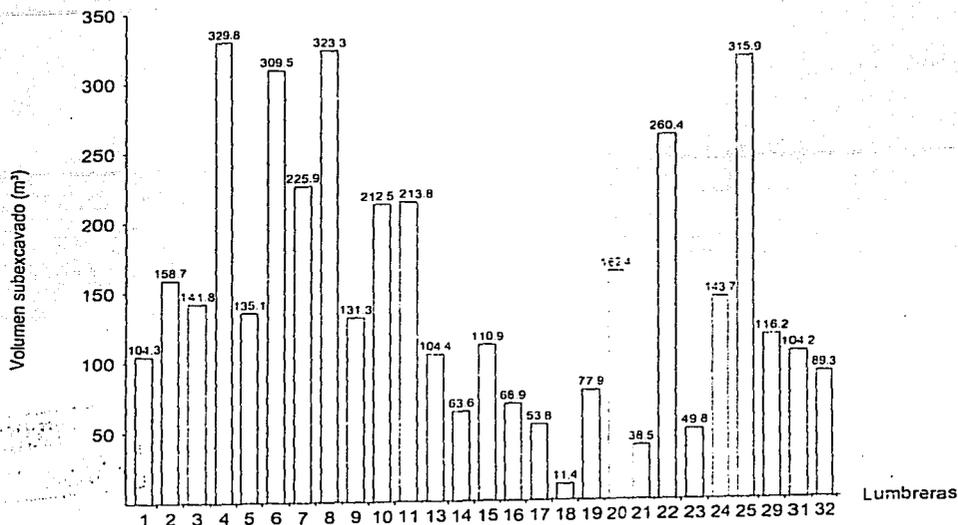


Fig 59. Volumen total subexcavado en Catedral por lumbrera durante el periodo de 1993 a 1998

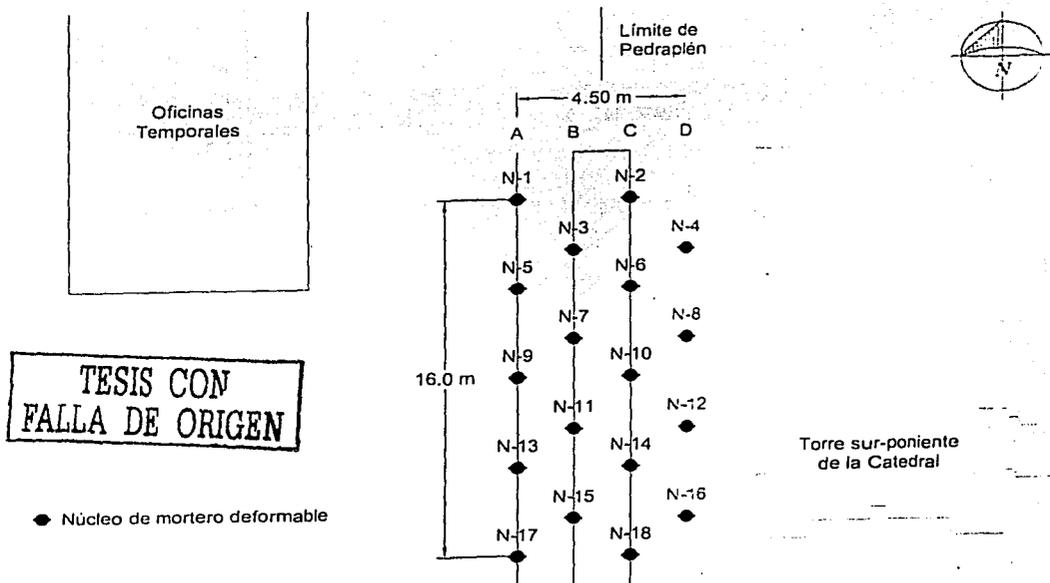
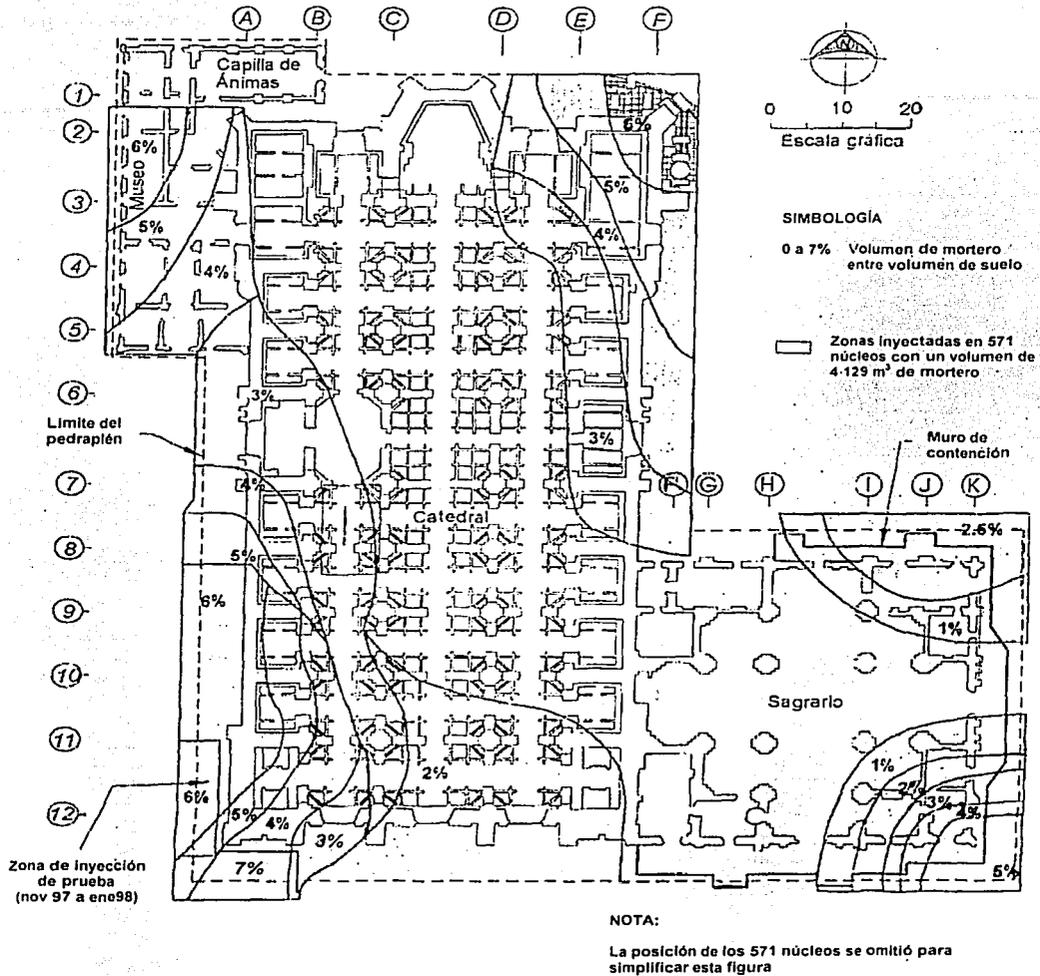


Fig 60. Zona experimental de endurecimiento en la Catedral



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Fig 61. Inyección del subsuelo de la Catedral Metropolitana

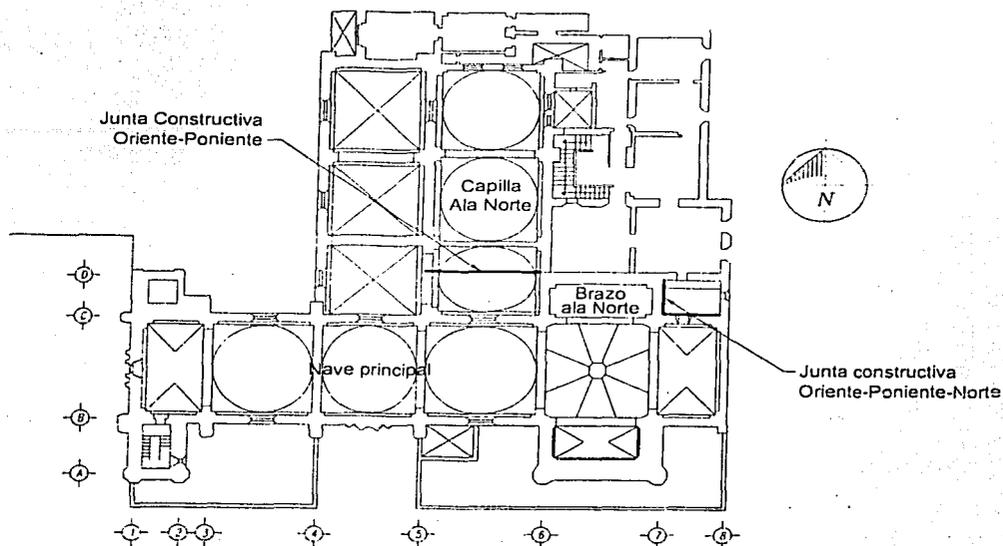


Fig 62. Localización de las juntas constructivas en el Templo de la Santa Veracruz

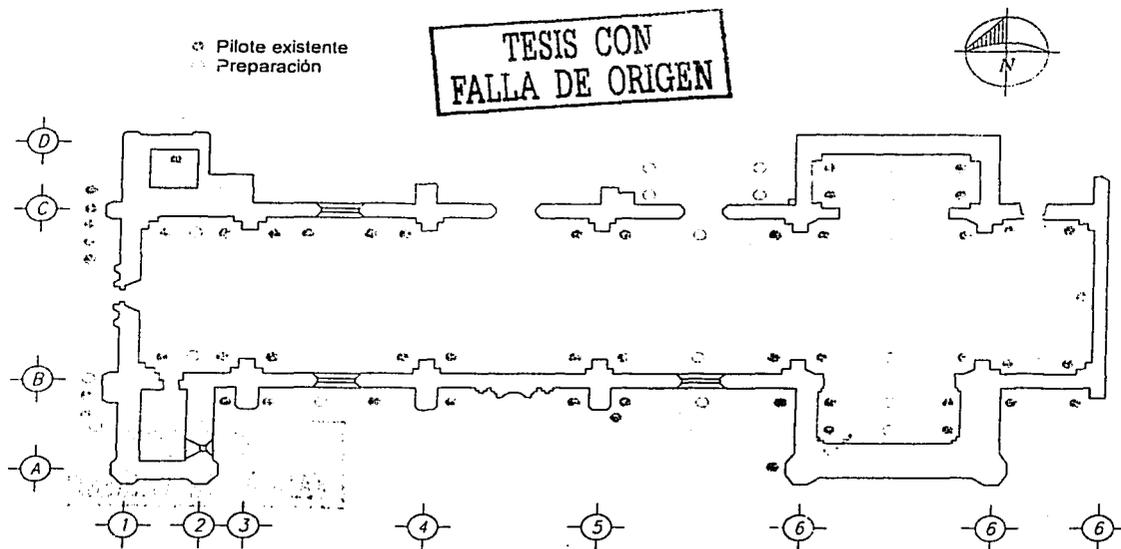


Fig 63. Localización de los pilotes de control en la Iglesia de la Santa Veracruz

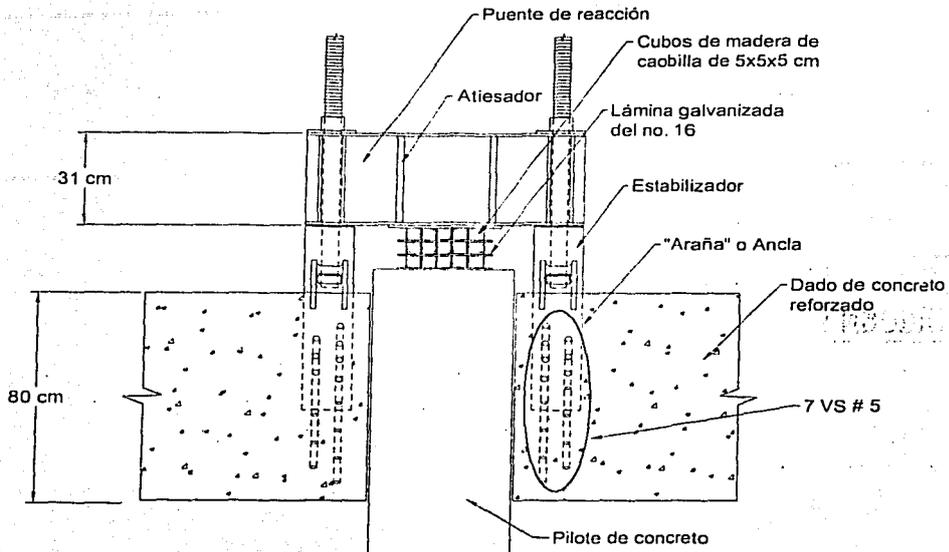


Fig 64. Esquema de un pilote de control en la la Iglesia de la Santa Veracruz

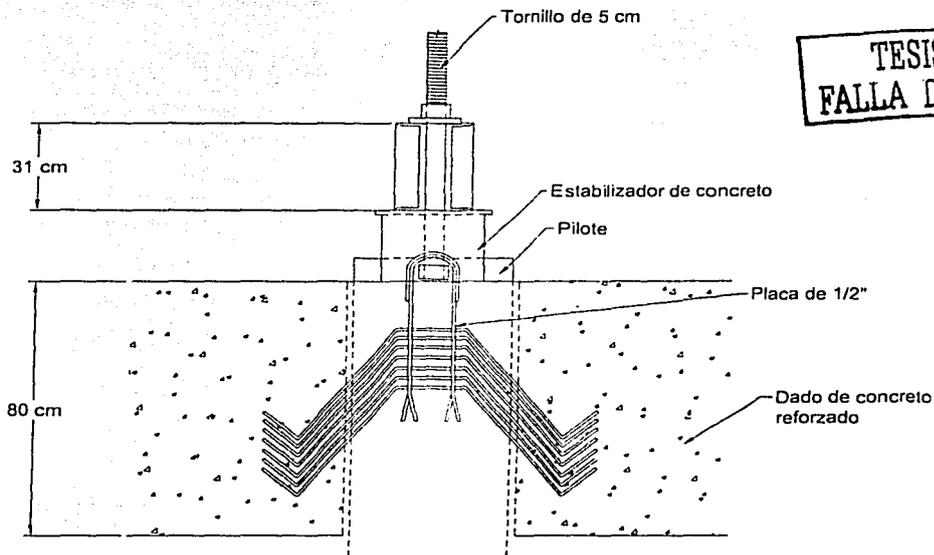


Fig 65. Esquema de una "Araña" ahogada en el concreto de un dado de la Iglesia de la Santa Veracruz

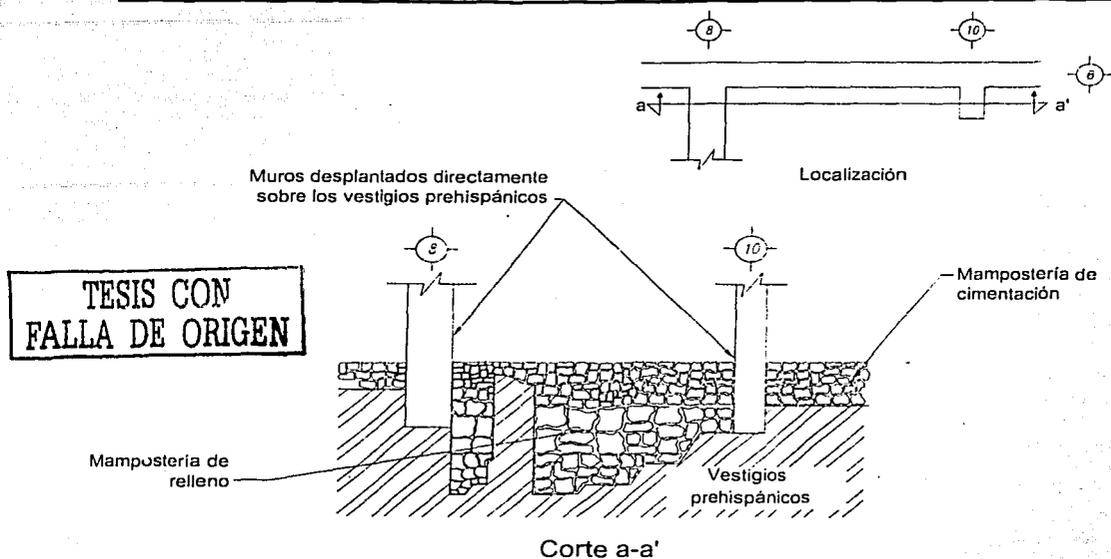


Fig 66. Condiciones de apoyo de la cimentación del Palacio del Ex-Arzbispado

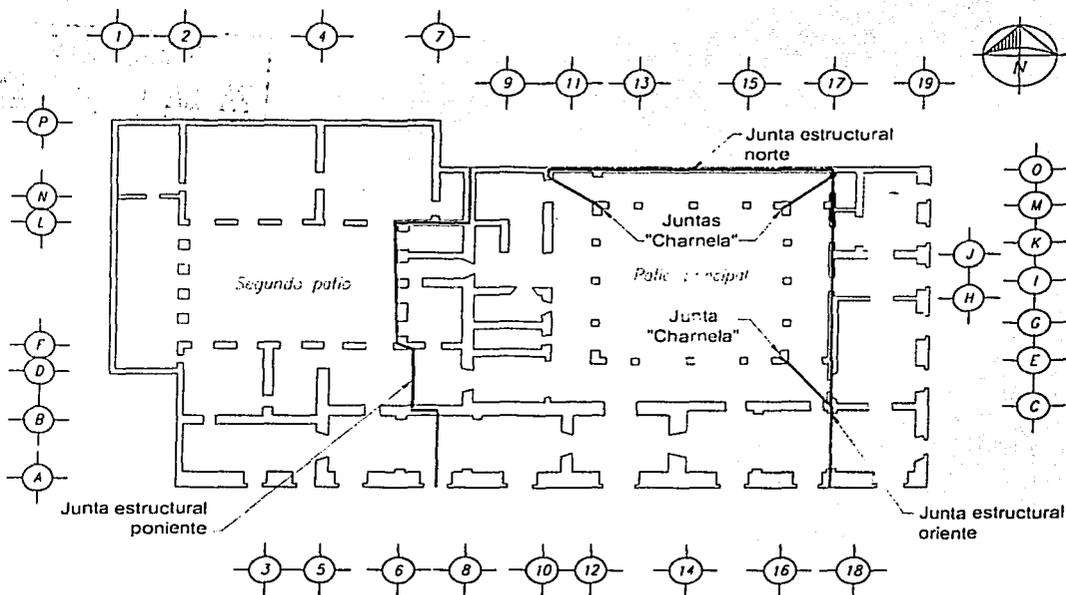


Fig 67. Localización de las Jutas Constructivas en el Palacio del Ex Arzbispado

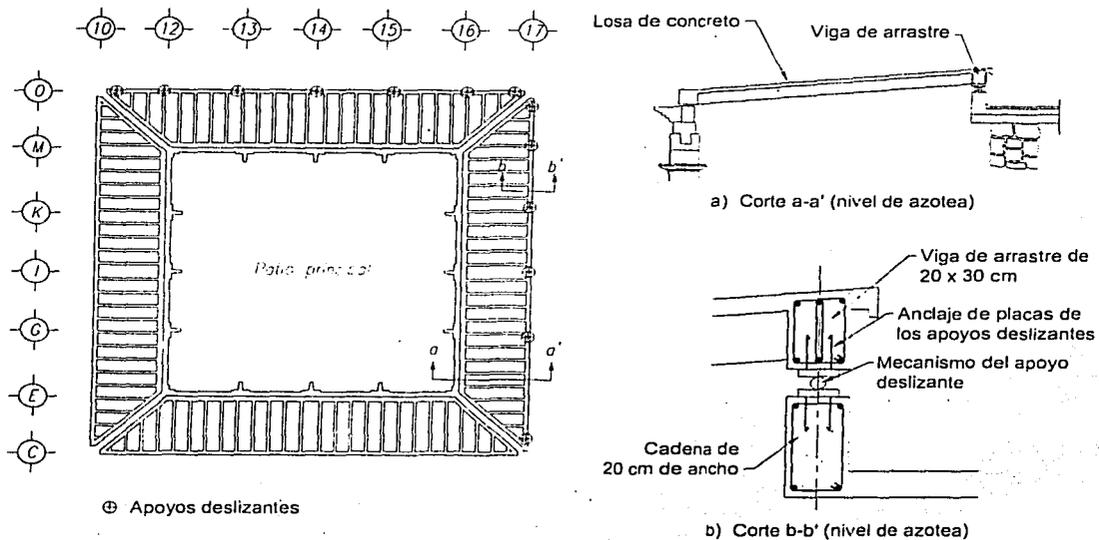


Fig 68. Ubicación de los apoyos deslizantes en el Palacio del Ex Arzobispado

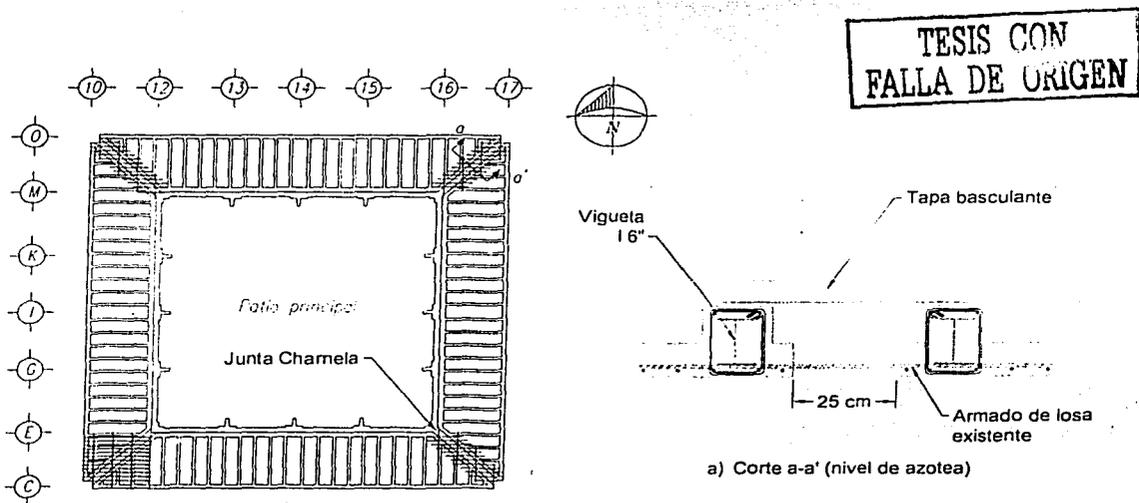


Fig 69. Ubicación de las Juntas Charnela en la planta de los corredores del Patio Principal

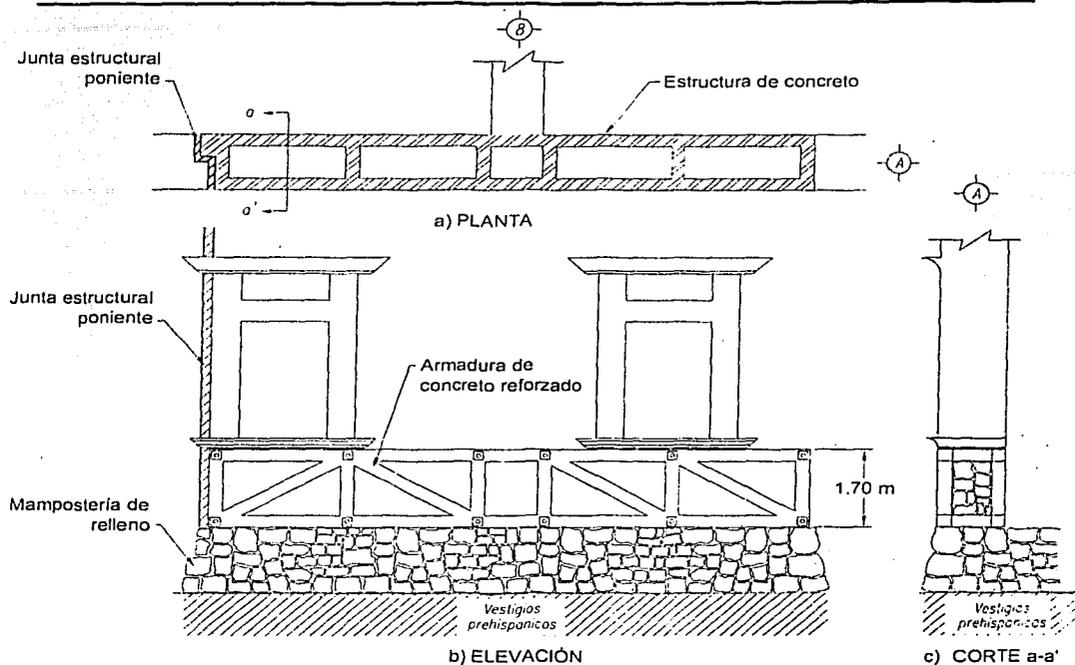


Fig 70. Confinamiento de la cimentación original mediante una estructura de concreto reforzado en el Palacio del Ex Arzobispado

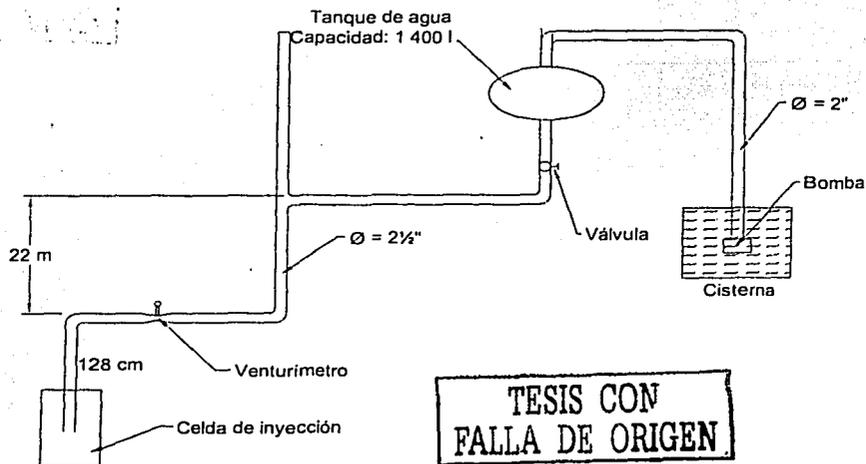


Fig 71. Esquema de un dispositivo de inyección instalado en el Palacio Nacional

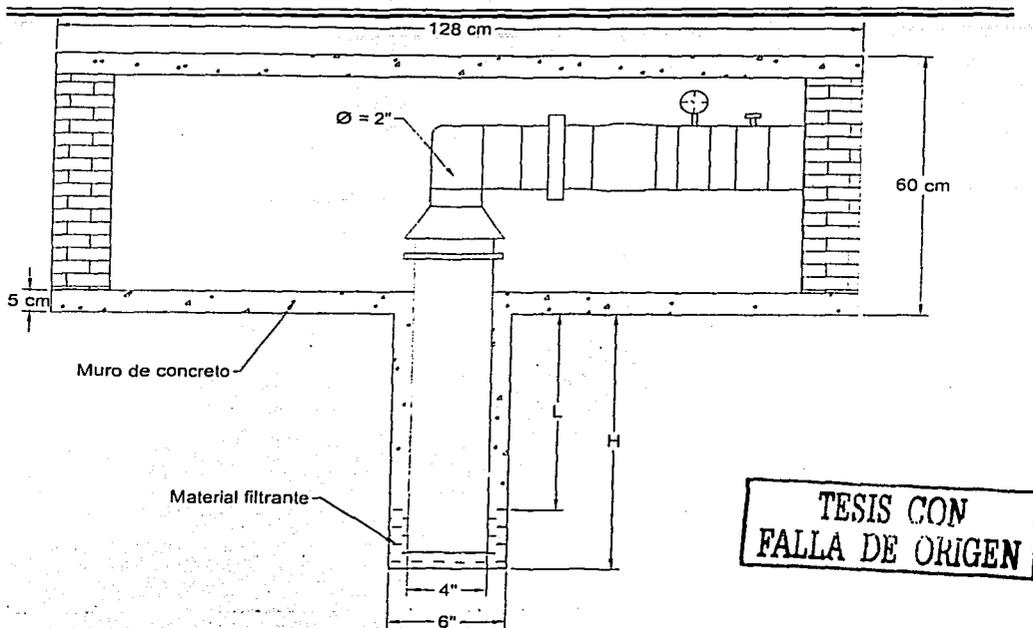


Fig 72. Detalle de una celda de inyección instalada en el Palacio Nacional

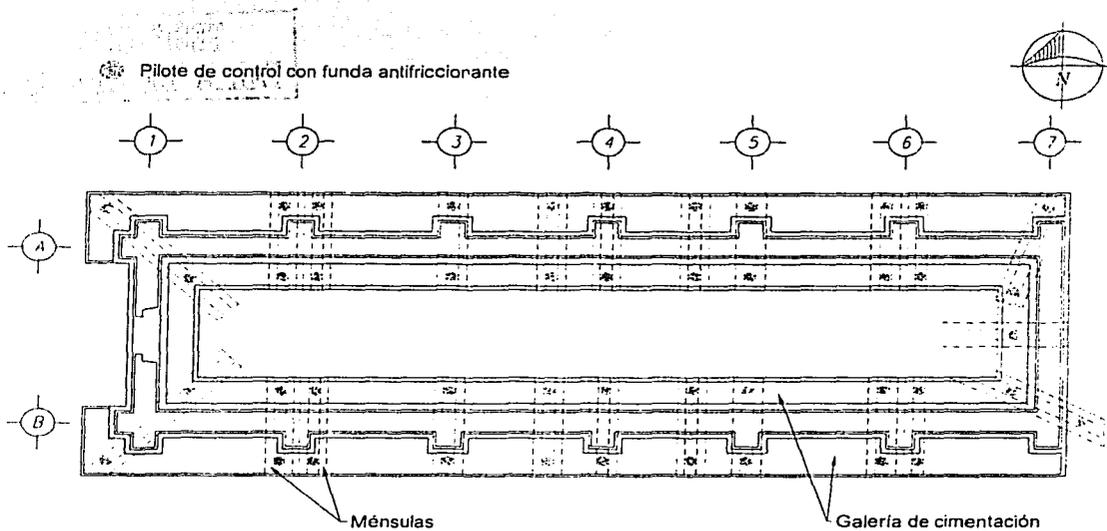


Fig 73. Localización de los pilotes de control con funda antifriccionante en la Biblioteca de Finanzas de la SHCP

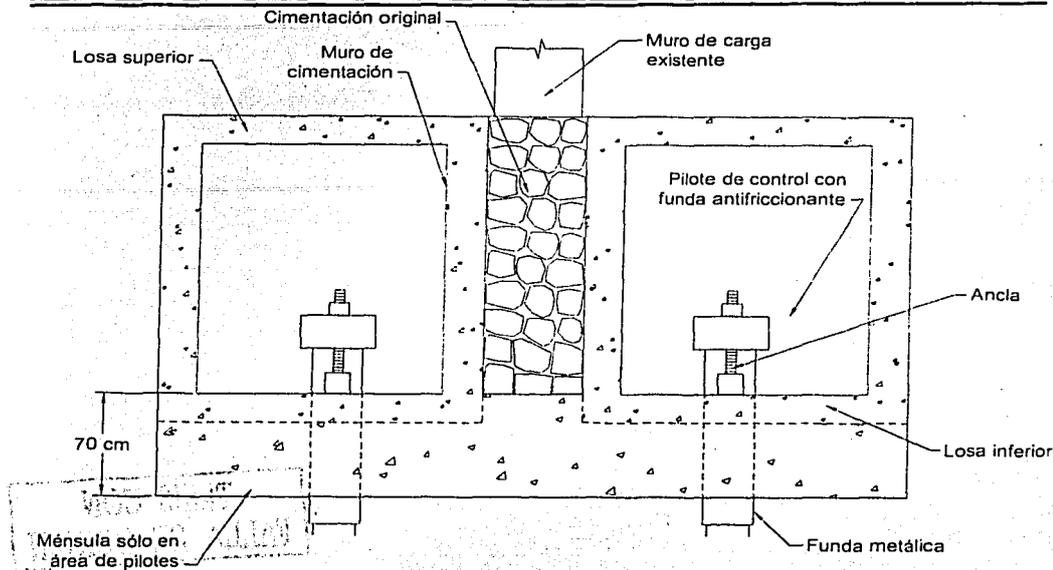


Fig 74. Arreglo de Mancuerna en la Biblioteca de Finanzas de la SHCP

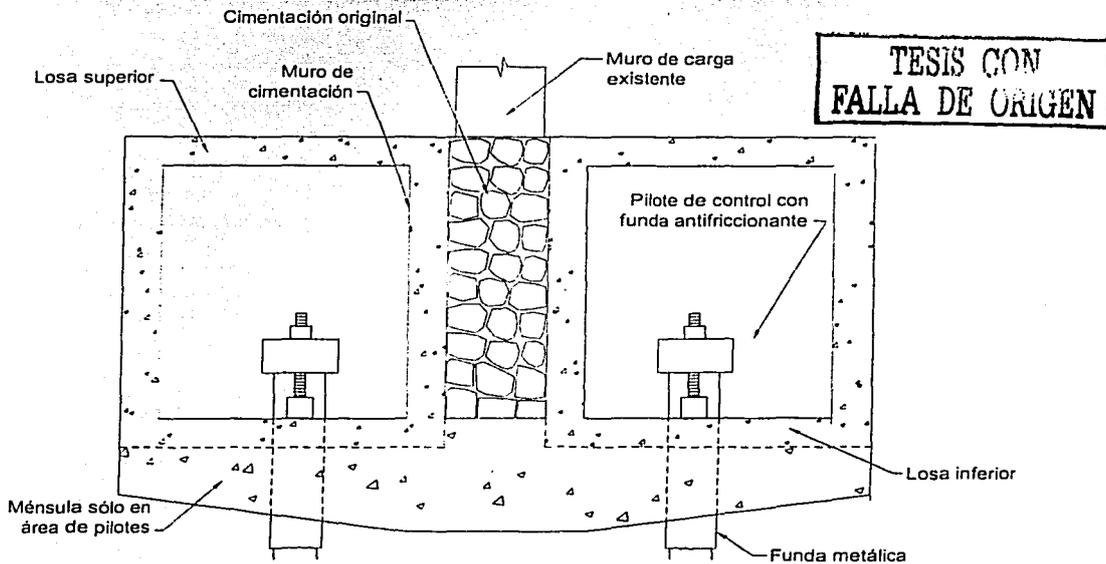


Fig 75. Esquema de un arreglo de mancuerna para los pilotes de control con funda antifriccionante en la esquina norponiente del Palacio Nacional

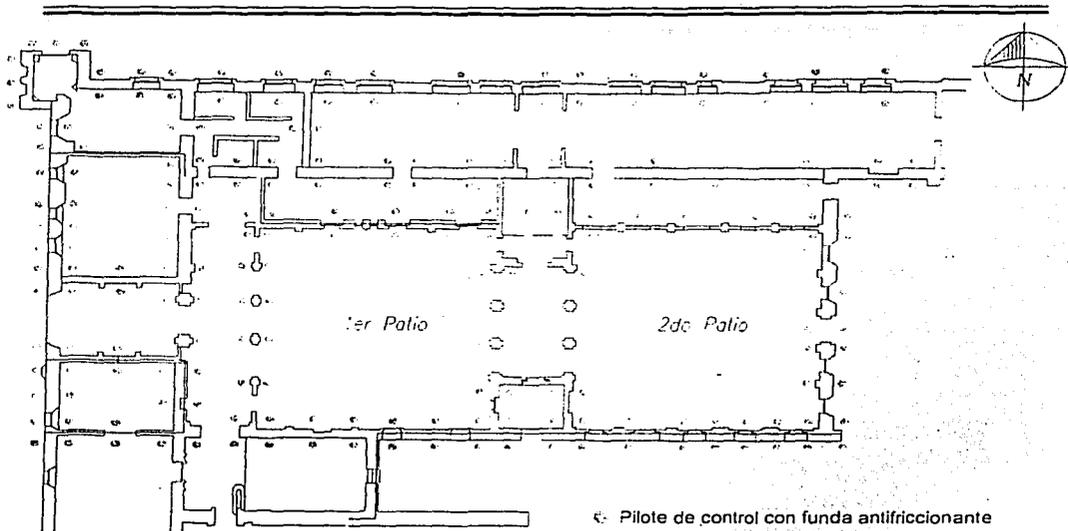
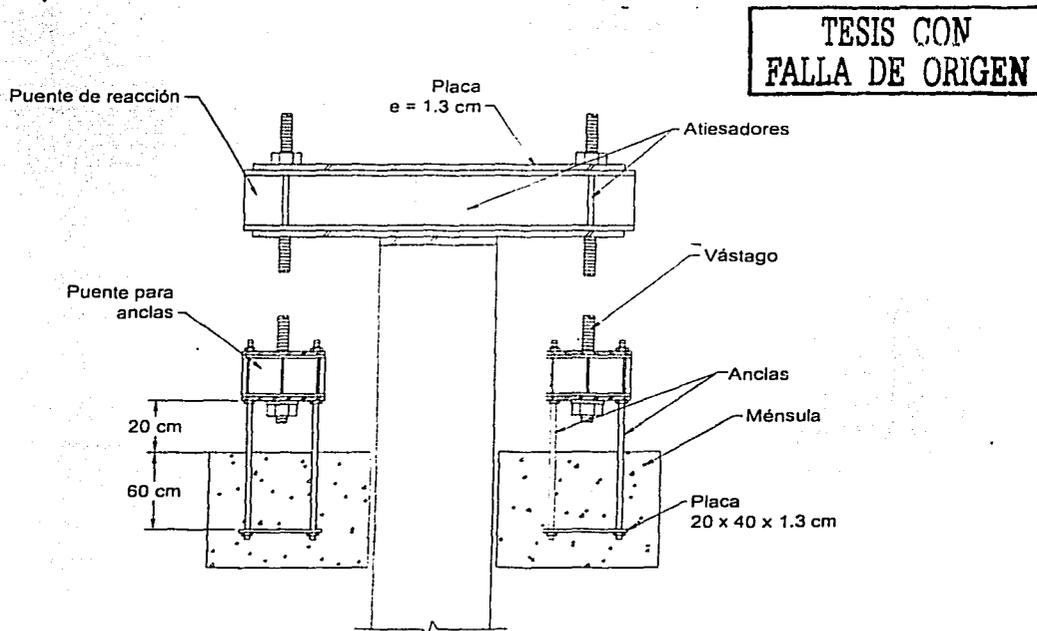


Fig 76. Localización de los pilotes de control con funda antifriccionante en la esquina norponiente del Palacio Nacional



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig 77. Esquema de un pilote de control con funda antifriccionante instalado en la esquina norponiente del Palacio Nacional

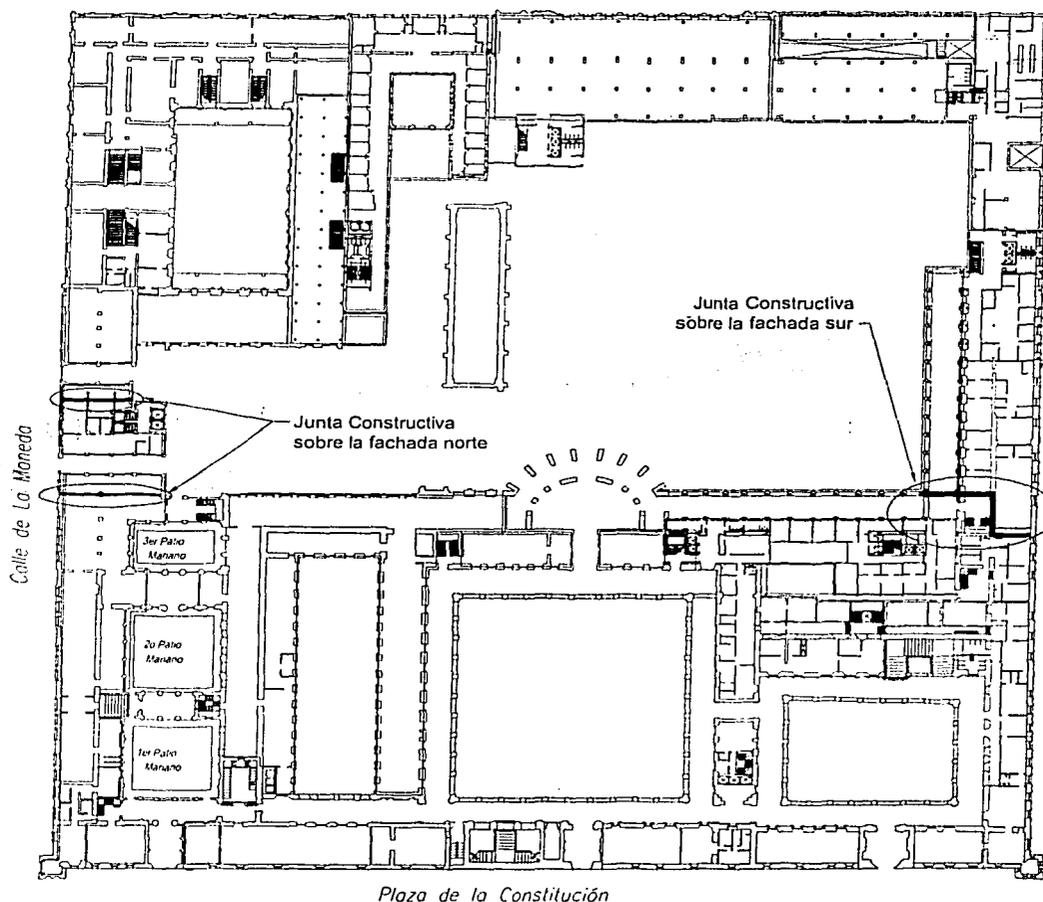
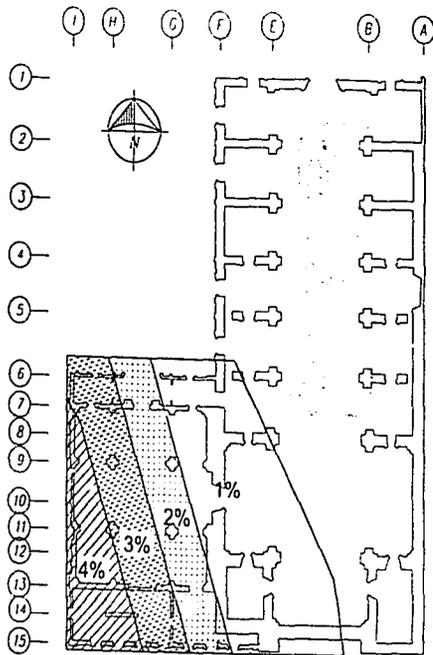


Fig 78. Ubicación en planta de las Juntas Constructivas en el Palacio Nacional

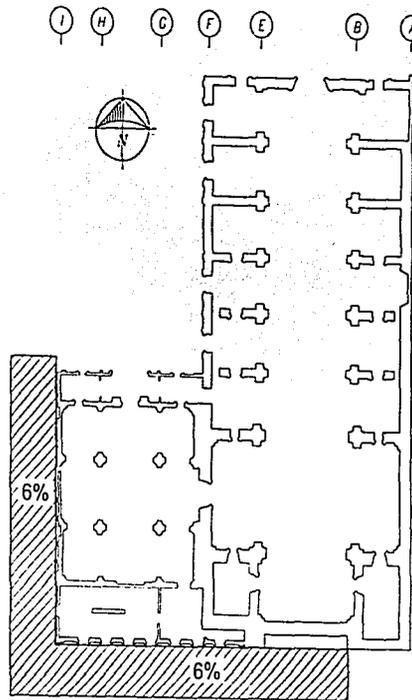
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



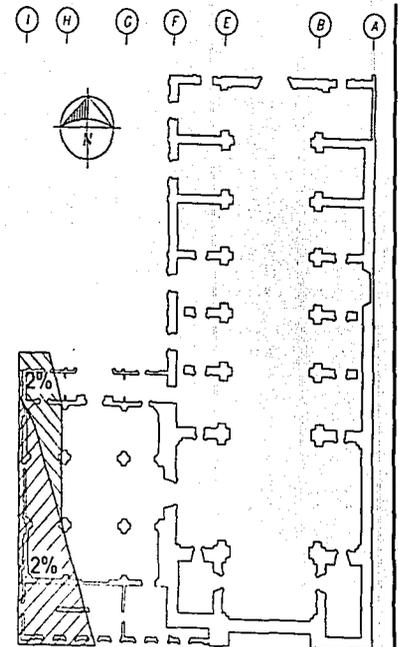
Área = 1816 m²

Primera etapa de inyección
(8 de febrero de 1999 a 30 de abril de 1999)



Área = 330 m²

Segunda etapa de inyección
(22 de octubre de 2001 a 8 de febrero de 2002)



Área = 302 m²

Tercera etapa de inyección
(11 de febrero a 4 de marzo de 2002)

Fig 79. Etapas de inyección de mortero en el Templo de San Agustín

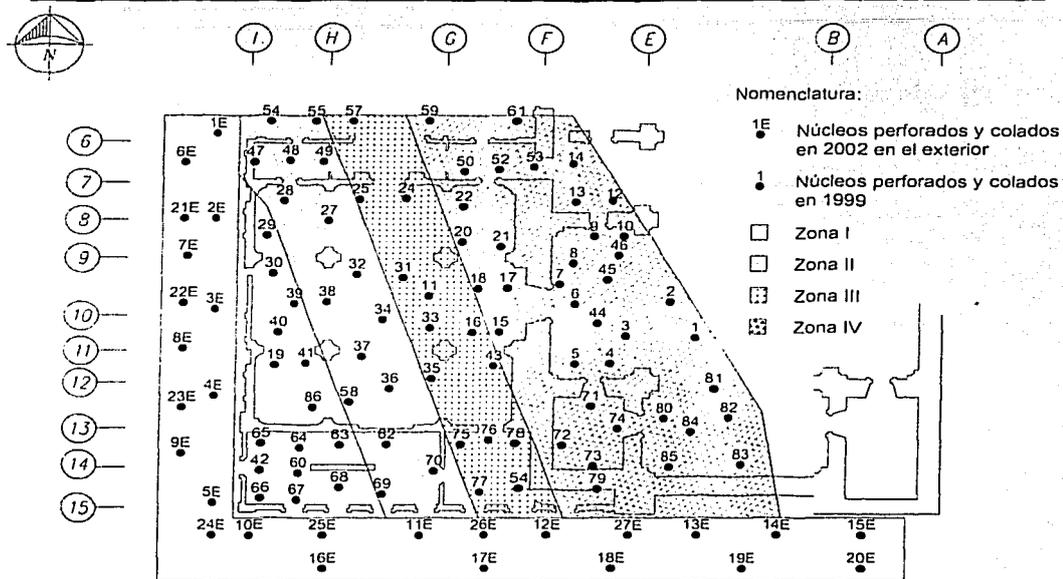


Fig 80. Ubicación de los núcleos de inyección en el Templo de San Agustín

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

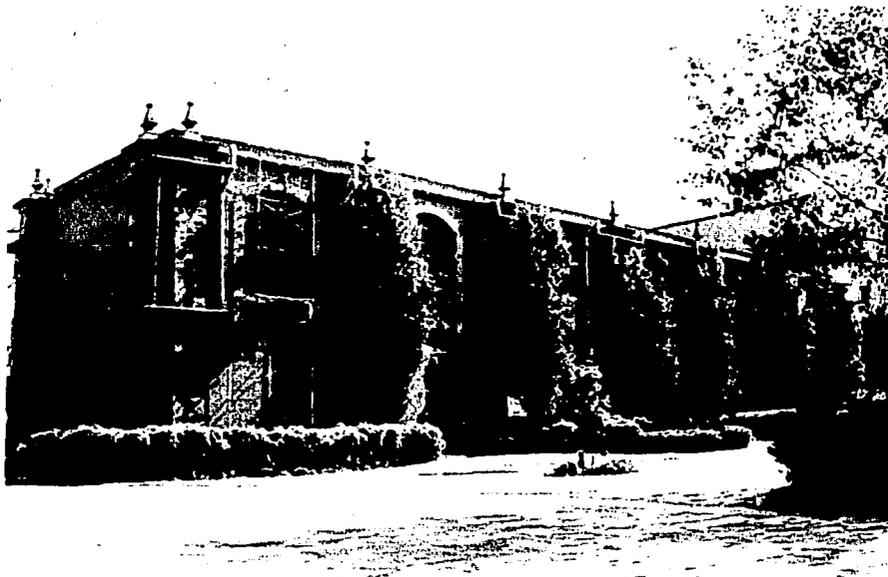


Foto 1. Biblioteca de Finanzas de la SHCP



Foto 2. Fachada principal de la Capilla de las Capuchinas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Foto 3. Fachada principal de la catedral Metropolitana



Foto 4. Fachada principal de la Iglesia de la Santa Veracruz



Foto 5. Fachada principal del Palacio del Ex Arzobispado

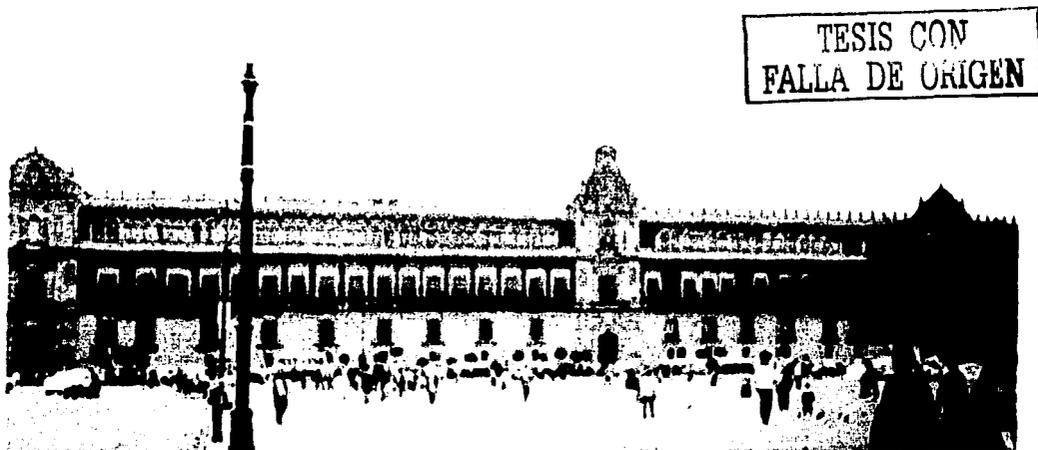


Foto 6. Fachada principal del Palacio Nacional

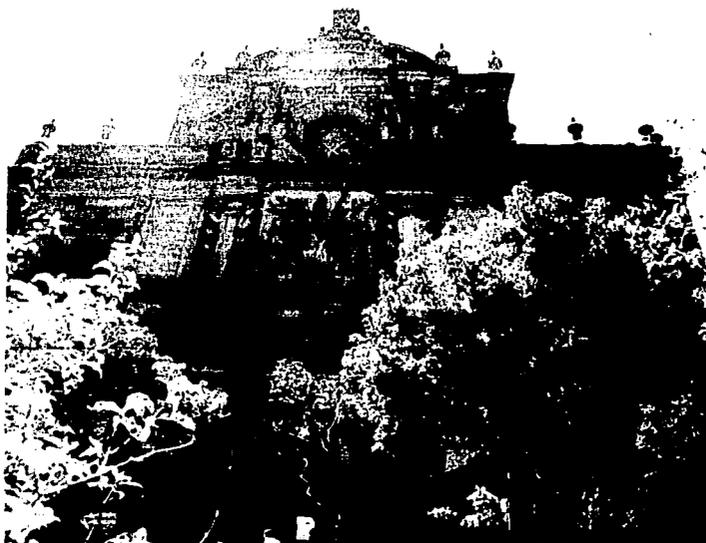


Foto 7. Fachada principal del Templo de San Agustín



Foto 8. Arco de cimentación del Templo de San Agustín

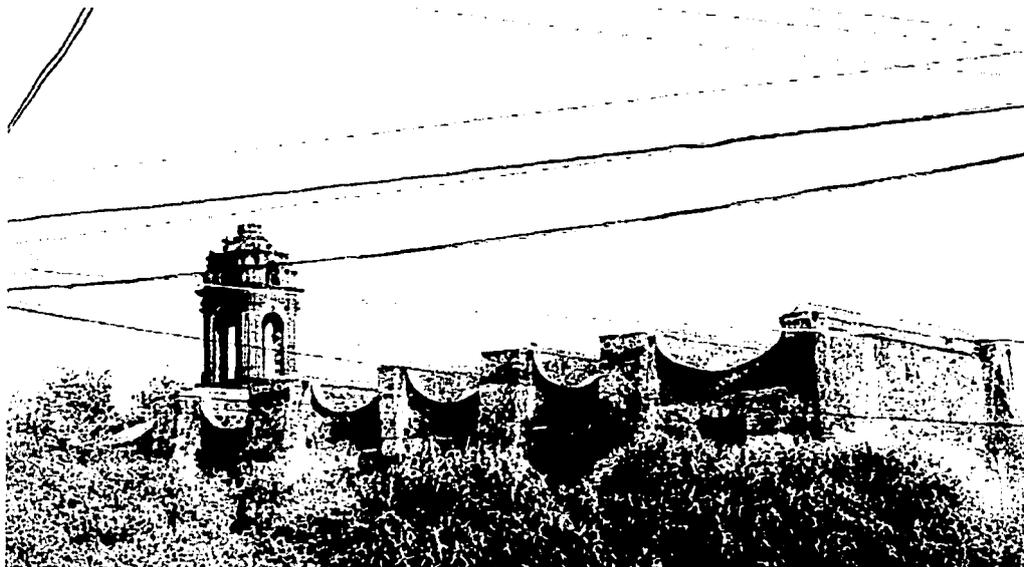


Foto 9. Templo de San Antonio Abad



Foto 10. Pilote de control con funda antifriccionante instalado en la Capilla de las Ánimas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Foto 11. Refuerzo en la cimentación de la Catedral Metropolitana en 1940

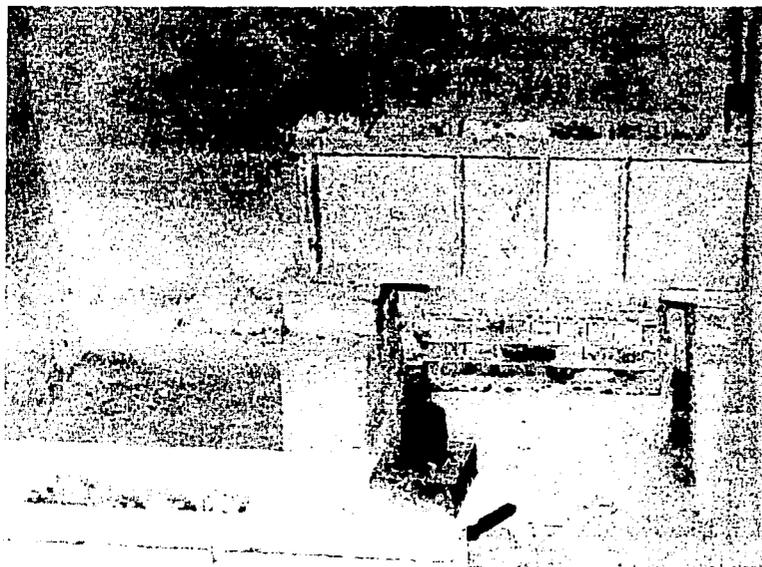


Foto 12. Pilotes de control instalados en la Catedral Metropolitana

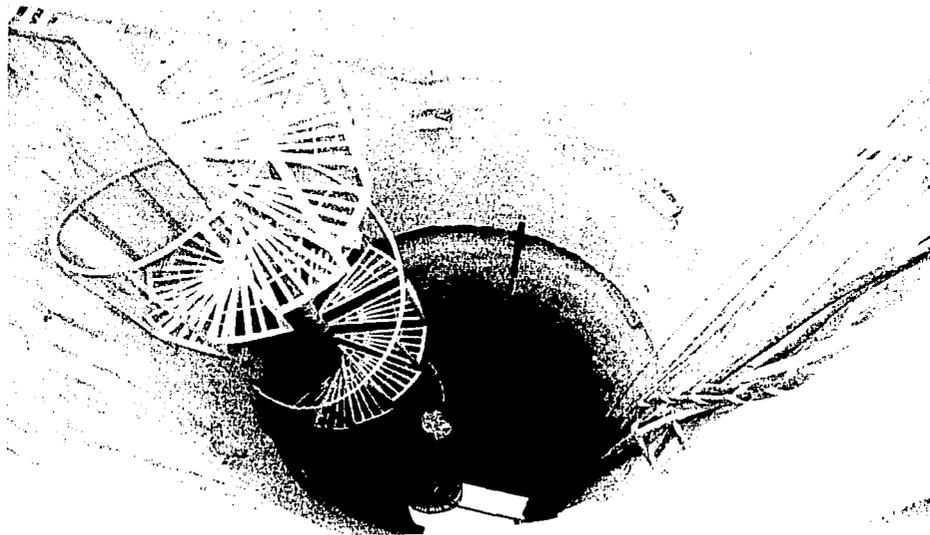


Foto 13. Lumbreira construida en la Catedral Metropolitana



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Foto 14. Junta constructiva en la fachada sur del Palacio del Ex Arzobispado

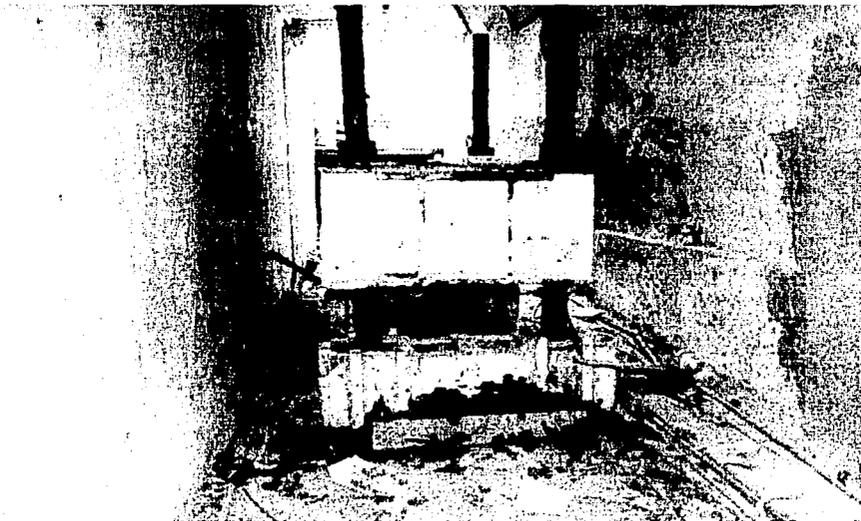


Foto 15. Pilotes de control con funda antifriccionante instalados en la zona norponiente del Palacio Nacional



Foto 16. Junta constructiva sobre la fachada Norte del Palacio Nacional