



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**EVOLUCIÓN DE LAS CIMENTACIONES EN LA ZONA DE LAGO DE LA CIUDAD
DE MÉXICO.**

T E S I N A

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
ESPECIALISTA EN GEOTÉCNIA**

PRESENTA:

ING. DANIEL MARTÍNEZ OVIEDO.

DIRECTOR DE TESINA: M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN.

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F.

NOVIEMBRE 2012

CONTENIDO

1. Antecedentes.	6
1.1. Marco Histórico.	10
1.2. Crecimiento Poblacional.	10
2. Características del suelo en la zona de lago de la ciudad.	13
2.1. Geología del Valle de México.	13
2.2. Evolución Hidrológica del Valle.	17
2.3. Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México.	23
2.4. Características Estratigráficas de la zona de Lago.	26
2.5. Hundimiento Regional.	28
2.6. Composición General del tipo de cimentaciones en la zona de lago de la ciudad.	32
3. Cimentaciones en la época prehispánica.	41
3.1. Gran México – Tenochtitlán.	41
4. Cimentaciones en la época colonial.	45
4.1. Templo de San Agustín.	45
4.2. Catedral y Sagrario Metropolitano.	48
5. Cimentaciones a mediados del siglo XIX a principios del siglo XX.	57
5.1. Monumento a la Independencia.	58
5.2. Palacio de Bellas Artes.	63
5.3. Monumento a la Revolución.	69
6. Cimentaciones de mediados del siglo XX a principios del siglos XXI.	75
6.1. Edificio de la Lotería Nacional.	75
6.2. Torre Latinoamericana.	77
6.3. Palacio de los Deportes.	81
6.4. Torre Mayor.	83
7. Conclusiones.	86
Bibliografía.	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Conformación de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. 6

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Localización Geográfica de la Zona Metropolitana del Valle de México y el Área Que ocupa dentro de la Cuenca. 9

Figura 2. México-Tenochtitlán a la llegada de los españoles. *Museo de Antropología*. 11

Figura 3. Evolución de la población en la Ciudad de México. *Cabrera*. 12

Figura 4. Localización del Eje Neovolcánico Transversal dentro del entorno Geológico Mexicano. *Federico Mooser*. 13

Figura 5. Mapa Geológico de la Cuenca de México. *Federico Mooser*. 14

Figura 6. Estratigrafía de la planicie lacustre de la Ciudad de México, y su relación con los cambios de clima. *Tamez González*. 15

Figura 7. Máxima extensión del sistema lacustre de la Cuenca de México. 16

Figura 8. Geología y Morfología de la Cuenca. *Federico Mooser*. 17

Figura 9. Sistema Lacustre del Valle de México hacia 1521. *Salinas Cesareo*. 18

Figura 10. Tajo de Nochistongo. *DDF*. 21

Figura 11. Zonificación Geotécnica de la ciudad de México, *RCDF NTCC 2004*. 24

Figura 12. Perfil estratigráfico en la Zona de Lago, corte Poniente-Oriente. *Pilotec*. 28

Figura 13. Contornos de la zona lacustre afectada por el hundimiento. *Pilotec*. 30

Figura 14. Hundimiento Regional de la zona lacustre. *Pilotec*. 31

Figura 15. Registro del hundimiento Regional, Monumento a la Revolución. *TGC Geotecnia, Martínez Oviedo*. 31

Figura 16. *Zapatillas de Cimentación*. *Martínez Oviedo*. 33

Figura 17. Losas de Cimentación. *Martínez Oviedo*. 33

Figura 18. Cajones de Cimentación. *Martínez Oviedo*. 34

Figura 19. Cajones y Pilotes de fricción. *Martínez Oviedo*. 35

Figura 20. Cajones y Pilotes de Punta. *Martínez Oviedo*. 36

Figura 21. Pilotes de Control. *González Flores*. 37

Figura 22. Pilotes de Punta Penetrante, <i>Martínez Oviedo</i>	37
Figura 23. Pilotes entrelazados, <i>Martínez Oviedo</i>	38
Figura 24. Pilotes con funda. <i>Martínez Oviedo</i>	39
Figura 25. Inclusiones. <i>Martínez Oviedo</i>	39
Figura 26. Pilas de agregado Compactado. <i>Geopier</i>	40
Figura 27. Templo Mayor. <i>Museo del Templo Mayor</i>	42
Figura 28. Etapas constructivas y cimentación del Templo Mayor. <i>Luis Miguel Zúñiga</i>	43
Figura 29. Cimentación de Chinampas en el Lago de Texcoco y Xochimilco. <i>Martínez Oviedo</i>	44
Figura 30. Sistema de Agricultura Intensiva a través de Chinampas. <i>Museo del Templo Mayor</i>	44
Figura 31. Templo de San Agustín, adaptado como Biblioteca Nacional, <i>UNAM</i>	45
Figura 32. Cimentación del Templo de San Agustín. <i>Santoyo Villa</i>	46
Figura 33. Curvas de igual velocidad de hundimiento diferencial en mm/año para el periodo 1975 a 1978, <i>Investigación UNAM</i>	47
Figura 34. Fachada del Templo de San Agustín. <i>Martínez Oviedo</i>	48
Figura 35. Distribución de Templos Prehispánicos en el área de la Catedral Metropolitana. <i>Santoyo Villa</i>	48
Figura 36. Isométrico tomando en cuenta el punto de referencia "A" de la distribución Templos Prehispánicos en el área de la Catedral Metropolitana. <i>Santoyo Villa</i>	49
Figura 37. Cimentación Sagrario Metropolitano. <i>Santoyo Villa</i>	50
Figura 38. Corte estratigráfico Poniente-Oriente bajo la Catedral y Sagrario Metropolitanos. <i>Santoyo Villa</i>	50
Figura 39. Vista en planta y corte, cimentación de la Catedral Metropolitana. <i>Santoyo Villa</i>	51
Figura 40. Incrementos de dimensiones de fustes y muros durante la construcción. <i>Santoyo Villa</i>	52
Figura 41. Infraestructura subterránea circundante a la Catedral. <i>Santoyo Villa</i>	53
Figura 42. Predicciones del comportamiento piezométrico bajo la Catedral. <i>Santoyo Villa</i>	54
Figura 43. Sistema de Lumbreras para subexcavación bajo el templo. <i>Santoyo Villa</i>	55

Figura 44. Catedral y Sagrario Metropolitano 2012. Martínez Oviedo.	56
Figura 45. Cimentación tipo "Steel grillage", Adamo Boari.	58
Figura 46. Construcción de losa de cimentación. Sánchez Mejorada.	59
Figura 47. Hincado de pilotes. Sánchez Mejorada.....	60
Figura 48. Cimentación del Monumento a la independencia y perfil estratigráfico de cono eléctrico. Santoyo Villa.	61
Figura 49. Comportamiento de la cimentación del Monumento a la Independencia ante el fenómeno de Hundimiento Regional. Auvinet Guichard, Martínez Oviedo.	62
Figura 50. Monumento en la actualidad y detalle talud ajardinado para desnivel por hundimiento regional. Martínez Oviedo.....	63
Figura 51. Proyecto del nuevo Teatro Nacional. Adamo Boari.	64
Figura 52. Plataforma y emparrillado de cimentación del Teatro Nacional. Adamo Boari..	65
Figura 53. Detalle de etapas constructivas del nuevo Teatro Nacional. Adamo Boari.....	66
Figura 54. Campaña de Inyección 1910-1913. Santoyo Villa.	67
Figura 55. Campaña de Inyección 1924-1925. Santoyo Villa.	68
Figura 56. Palacio de Bellas Artes en la actualidad. Martínez Oviedo.....	69
Figura 57. Proyecto Original del Palacio Legislativo, Museo de la Revolución Mexicana....	69
Figura 58. Registro de campo de pozo a cielo abierto, exploración Geotécnica. Emile Bernad.	70
Figura 59. Registro volumétrico de muestra obtenida en campo después de secado en horno, (contenido de agua). Emile Bernad.	71
Figura 60. Parrilla de acero en cimentación del Monumento a la Revolución. Martínez Oviedo.	72
Figura 61. Presidente Francisco I. Madero presente en obras del Palacio Legislativo. Museo de la Revolución Mexicana.	72
Figura 62. Proyecto del Monumento a la Revolución presentado por Carlos Obregón. Museo de la Revolución Mexicana.	73
Figura 63. Monumento a la Revolución Mexicana en la actualidad. Martínez Oviedo.....	74
Figura 64. Estructura de cimentación del edificio de la Lotería Nacional. Santoyo Villa. ...	75
Figura 65. Expansiones registradas durante la excavación para la cimentación del edificio de la Lotería Nacional. Cuevas.....	76

Figura 66. Edificio de la Lotería Nacional durante su construcción. <i>Cuevas</i>	76
Figura 67. Edificio de la Lotería Nacional en la actualidad. <i>Martínez Oviedo</i>	77
Figura 68. Cimentación de la Torre Latinoamericana. <i>Santoyo Villa</i>	78
Figura 69. Torre Latinoamericana en construcción. <i>Auvinet Guichard</i>	79
Figura 70. Torre Latinoamericana en la actualidad. <i>Martínez Oviedo</i>	81
Figura 71. Palacio de los Deportes durante su construcción. <i>Auvinet Guichard</i>	81
Figura 72. Palacio de los Deportes, movimientos verticales de la cimentación del 3 de agosto de 1967 al 5 de Julio de 1968. <i>Auvinet Guichard</i>	82
Figura 73. Esquema de la cimentación de la Torre Mayor. <i>Oscar Henry</i>	83
Figura 74. Excavación de la cimentación de la Torre Mayor. <i>Oscar Henry</i>	84
Figura 75. Torre Mayor, vista durante su construcción y en la actualidad. <i>Auvinet Guichard, Martínez Oviedo</i>	85

1. ANTECEDENTES.

La ciudad de México y su área Metropolitana (ZMCM), constituyen la segunda mayor concentración de población del mundo, sólo después de la ciudad de Tokio; lo que la convierte en la ciudad más poblada del continente Americano. La capital del país cuenta con una población que supera los 20 millones de habitantes, su crecimiento descontrolado a lo largo del siglo XX y principios del XXI es el resultado de un complejo proceso histórico y de la voluntad política de centralizar el poder.

La ciudad es sede de los poderes de la unión y concentra el mayor número de negocios y actividades comerciales; también es sede de la mayoría de las instituciones públicas y privadas, así como de los más importantes centros de salud y planteles de educación superior del país.

Su área metropolitana está formada administrativamente por las 16 delegaciones que forman el Distrito Federal, además de 59 municipios del Estado de México y 1 más del Estado de Hidalgo.

TABLA 1. CONFORMACIÓN DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO			
Entidad	Delegación o Municipio	Extensión Territorial (km ²)	Población (hab.)
Distrito Federal	Álvaro Obregón	96.17	727,034.00
	Azcapotzalco	33.60	414,711.00
	Benito Juárez	26.63	385,439.00
	Coyoacán	54.40	620,416.00
	Cuajimalpa	77.29	186,391.00
	Cuauhtémoc	32.44	531,831.00
	Gustavo A. Madero	94.07	1,185,772.00
	Iztacalco	23.30	384,326.00
	Iztapalapa	116.13	1,815,786.00
	Magdalena Contreras	74.58	239,086.00
	Miguel Hidalgo	46.99	372,889.00
	Milpa Alta	228.41	130,582.00
	Tlalpan	312.00	650,567.00
	Tláhuac	83.45	360,265.00
	Venustiano Carranza	33.42	430,978.00
	Xochimilco	122.00	415,007.00
Subtotal		1,454.88	8,851,080.00

**EVOLUCIÓN DE LAS CIMENTACIONES EN LA ZONA DE LAGO DE
LA CIUDAD DE MÉXICO**

Entidad	Delegación o Municipio	Extensión Territorial (km ²)	Población (hab.)
Estado de México	Acolman	86.88	77,034.00
	Amecameca	46.57	48,421.00
	Apaxco	80.34	27,521.00
	Atenco	95.67	56,243.00
	Atizapán de Zaragoza	89.90	489,937.00
	Atlautla	13.49	27,663.00
	Axapusco	26.90	25,559.00
	Ayapango	36.63	8,864.00
	Coacalco de Berriozábal	35.50	278,064.00
	Cocotitlán	31.52	12,142.00
	Coyotepec	12.30	39,030.00
	Cuautitlán	42.50	140,059.00
	Chalco	234.72	310,130.00
	Chiautla	31.52	26,191.00
	Chicoloapan	60.89	175,053.00
	Chiconcuac	7.57	22,819.00
	Chimalhuacán	46.61	614,453.00
	Ecatepec de Morelos	186.90	1,656,107.00
	Ecatzingo	54.71	9,369.00
	Huehuetoca	161.98	100,023.00
	Hueypoxtla	80.34	39,864.00
	Huxquilucán	143.50	242,167.00
	Isidro Fabela	91.46	10,308.00
	Ixtapaluca	315.10	467,361.00
	Jaltengo	5.60	26,328.00
	Jilotzingo	143.66	17,970.00
	Juchitepec	149.56	23,497.00
	Melchor Ocampo	17.78	50,240.00
	Naucalpan de Juárez	184.00	833,779.00
	Nezahualcóyotl	63.74	1,110,565.00
	Nextlalpan	64.20	34,374.00
	Nicolás Romero	233.51	366,602.00
	Nopaltepec	87.94	8,895.00
	Otumba	143.42	34,232.00
Ozumba	49.21	27,207.00	
Papalotla	3.59	4,147.00	
La Paz	26.71	253,845.00	
San Martín de las Pirámides	70.00	24,851.00	
Tecámac	153.41	364,579.00	
Temamatla	28.42	11,206.00	
Temascalapa	168.26	35,987.00	

**EVOLUCIÓN DE LAS CIMENTACIONES EN LA ZONA DE LAGO DE
LA CIUDAD DE MÉXICO**

Entidad	Delegación o Municipio	Extensión Territorial (km ²)	Población (hab.)
Estado de México	Tenango del Aire	38.09	10,578.00
	Teoloyucán	31.52	63,115.00
	Teotihuacán	82.65	53,010.00
	Tepetlaotoc	172.38	27,944.00
	Tepetlixpa	46.68	18,327.00
	Tepotzotlán	43.50	88,559.00
	Tequixquiac	80.34	33,907.00
	Texcoco	418.69	235,151.00
	Tezoyuca	31.52	35,199.00
	Tlalmanalco	158.76	46,130.00
	Tlalnepantla de Baz	83.74	664,225.00
	Tultepec	19.02	91,808.00
	Tultitlán	71.10	524,074.00
	Villa del Carbón	289.49	44,881.00
	Zumpango	244.08	159,647.00
	Cuautitlán Izcalli	191.20	511,675.00
	Valle de Chalco Solidaridad	44.50	357,645.00
Tonanitla	17.11	10,216.00	
Subtotal		5,670.88	11,108,777.00
Entidad	Delegación o Municipio	Extensión Territorial (km ²)	Población (hab.)
Hidalgo	Tizayuca	100.20	97,461.00
Subtotal		100.20	97,461.00
Total		7,225.96	20,057,318.00

La gran ciudad capital está localizada en la región centro sur del país, más precisamente en la región centro del denominado Eje Neovolcánico Transversal y ocupa el sur-poniente la cuenca del Valle de México, **Fig. 01**.

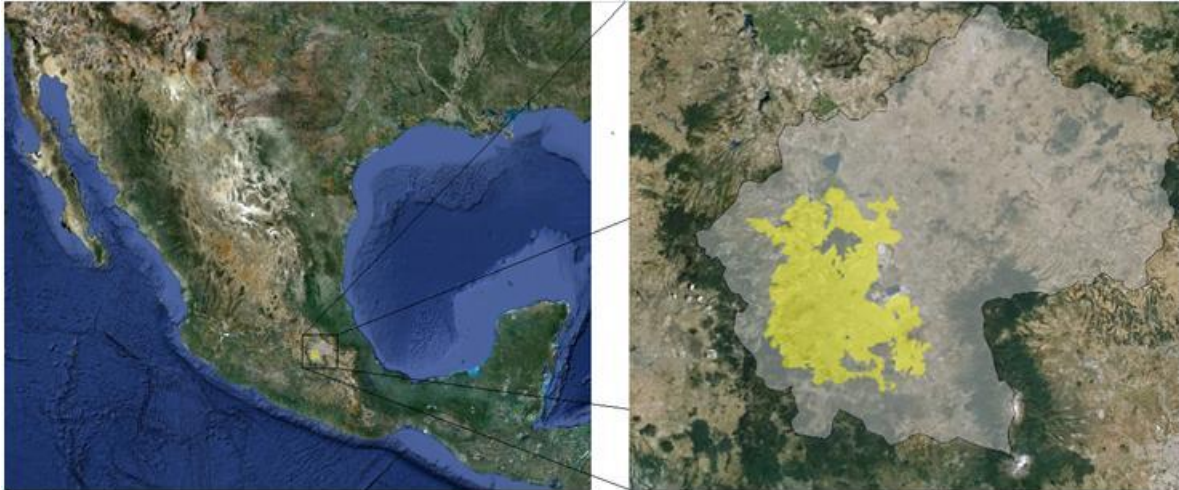


FIGURA 1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO Y EL ÁREA QUE OCUPA DENTRO DE LA CUENCA.

La cuenca del Valle de México es una unidad geográfica limitada al norte por las Sierras de Tepotzotlán, Tezontlalpan y Pachuca; al este por los llanos de Apan, los montes de Río Frío y La Sierra Nevada; al sur por las sierras de Chichinautzin y Ajusco y por ultimo al oeste, por las sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo.

La cuenca mide en la dirección norte sur unos 90 km y en la dirección este-oeste tiene un ancho, en la parte norte, de casi 100 km, mientras que en la parte sur sólo alcanza unos 50 km; su área es de aproximadamente 9,600 km². La elevación promedio de su planicie es de 2,240 msnm en la parte sur y de 2,390 msnm en la norte, las montañas que circundan la cuenca tienen una altura media de 3,000 m y su elevación más alta es el volcán Popocatepetl a 5,500 msnm. La cuenca abarca los territorios del Distrito Federal y partes de los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala; es tan grande que tiene diversos tipos de climas y su régimen pluvial varía zonalmente. Hoy, en la parte norte la lluvia media es de 40 mm, en cambio en el sur de la cuenca es hasta de 1,400 mm. Se puede decir que en la cuenca llueve durante todos los meses del año aunque en la época de estiaje las lluvias son locales y pequeñas. (*Santoyo Villa, 2005*).

Toda la cuenca de México se caracteriza en general por la intensa actividad volcánica, que tuvo lugar en el pasado, de la cual quedan aún vestigios en forma de un gran número de volcanes apagados y activos a nuestros días como el Popocatepetl.

Es interesante precisar que la cuenca del Valle de México está conformada por varias sierras y cadenas de montañas y que en su interior existen sierras aisladas, como la sierras de Guadalupe y Santa Catarina. A la parte plana de la cuenca se le denomina normalmente como el Valle de México. En el pasado fue un enorme lago que, al secarse, se dividió en varios cuerpos lacustres; estos lagos eran el Lago de Texcoco, México, Xochimilco, Chalco, Xaltocán y Zumpango. Actualmente solo existen pequeños vestigios de este sistema lacustre, pero los suelos originados por la existencia de estos lagos han creado un entorno complejo en materia de ingeniería de cimentaciones que, a través del tiempo, sus habitantes han tenido que aprender a convivir con los problemas que trae esta situación, desarrollando de forma potencial esta rama de la ingeniería geotécnica.

La ciudad de México ocupa la parte sur oeste del valle y es una Megalópolis que, como cualquier ciudad moderna, cuenta con grandes problemas entre los que destaca la endémica insuficiencia en el abastecimiento de agua potable. La falta de este vital líquido resulta paradójica si se considera que desde la época de la colonia se ha tenido el empeño de sacarla de la cuenca y urbanizar todos los vasos lacustres que existieron. La ciudad también tiene grandes problemas de contaminación ambiental, por el elevado número de vehículos que transitan diariamente por sus calles y avenidas; aunados a la intensa actividad industrial. Otra gran problemática de esta región del país tiene que ver con la seguridad pública y la movilidad urbana.

1.1. MARCO HISTÓRICO.

Desde la llegada de los seres humanos al valle de México, el territorio que actualmente ocupa la ciudad de México ha sido un punto medular en el desarrollo de las sociedades que han vivido en lo que hoy conocemos como México. A lo largo de su historia el valle ha sufrido severos cambios propiciados por la intensa actividad humana que se originó desde tiempos prehispánicos, donde el entorno ecológico era completamente diferente al de la ciudad que existe al día de hoy.

1.2. CRECIMIENTO POBLACIONAL.

Los restos más antiguos de ocupación humana proceden de sitios ribereños de lo que fue hace mucho tiempo el sistema lacustre. Los más antiguos indicios de ocupación humana de este territorio proceden de San Bartolo Atepehuacan (Azcapotzalco), y corresponden al período Cenolítico Inferior (9500-7000 a. C.).

Posteriormente, bajo el influjo o a la sombra de la cultura olmeca, en los tres primeros milenios a.C. se desarrollaron en el valle varias poblaciones que con el tiempo adquirieron gran importancia en la historia de Mesoamérica. Entre ellas están Tlatilco, localizada en la ribera norte del lago y, en las faldas de la sierra del Ajusco, Cuicuilco. Hacia el final del período Preclásico, una ciudad logró una gran hegemonía en el valle de México, la gran ciudad de Teotihuacán, localizada al noreste del lago.

Durante el período Clásico, Teotihuacán fue un imán que atrajo a la mayor parte de los pobladores de la cuenca lacustre, razón por la cual muchos antiguos pueblos preclásicos quedaron relativamente olvidados. Sin embargo, algunos de ellos tuvieron que sobrevivir como satélites del área nuclear teotihuacana. Azcapotzalco fue el más importante de ellos. En el oriente del lago, el cerro de la Estrella fue la sede de un pequeño pueblo teotihuacano cuyos restos se conocen desde hace mucho tiempo. (*Mazari, 1996*).

Durante la época de decadencia de Teotihuacán (siglo VIII), sus antiguos habitantes se fueron a radicar a las riberas del lago, donde fundaron pueblos como Culhuacán, Coyoacán y Copilco. Entre los siglos VIII y XIII, el territorio actual de la zona Metropolitana de la ciudad de México, fue el destino de varias tribus chichimecas. Años más tarde, la fusión de los toltecas y los colhuas dio lugar a la gran cultura tolteca, que dominó el valle de México y buena parte de Mesoamérica entre los siglos XI y XIII. Cuando cayó Tula, la capital de los toltecas, algunos grupos volvieron a radicar a Culhuacán, convirtiendo a esta población en el poder dominante en el sur del lago de Texcoco.

Hacia el siglo XIV habían llegado los últimos remanentes de los pueblos chichimecas que se establecieron en las orillas del gran lago. Los últimos en arribar fueron los mexicas, que luego de merodear por la ribera y ser mal recibidos en la mayor parte de los señoríos, finalmente se establecieron en el islote de México. En ese sitio fundaron Tenochtitlán, la más grande metrópoli que conoció Mesoamérica. En la ciudad se identificaban dos zonas principales comunicadas entre sí: Tenochtitlán y Tlatelolco que formaban un núcleo central, rodeado de núcleos satélites menores que alojaban a los pueblos vasallos de los mexicas: Azcapotzalco, Tlacopan, Culhuacán, Chalco, Xochimilco, Coyoacán, etc. El plano de estos núcleos muestra una traza ortogonal en sus calles y canales. **Fig. 02.**



FIGURA 2. MÉXICO-TENOCHTITLÁN A LA LLEGADA DE LOS ESPAÑOLES. MUSEO DE ANTROPOLOGÍA.

Las vías de comunicación más importantes de la ciudad mexicana son las cuatro calzadas que aún hoy en día parten del centro de la ciudad hacia las riveras más cercanas: Iztapalapa, al sur; Tlatelolco-Tepeyac, al norte; Tacuba, al poniente. Aunque el traslado de

mercancías y personas se realizaba principalmente por los canales que dividían los barrios existentes en la ciudad, estos canales funcionaban como avenidas que eran transitadas por canoas de carga. (Matos, 1996)

Tenochtitlán creció continuamente desde su fundación en 1325 hasta la llegada de los españoles. Cuando los españoles arribaron a la ciudad, ésta contaba con aproximadamente 190,000 habitantes, que en su mayoría perdió durante la guerra de conquista en 1521 y las epidemias provocadas por las enfermedades traídas de Europa. Así, la población se redujo a unos 50,000 habitantes, pero se recuperó posteriormente con el arribo de colonos españoles, hasta llegar a unas 70,000 personas. Durante la gran inundación de 1629 la capital del virreinato nuevamente perdió pobladores pues casi todos los españoles, unos 20,000, se trasladaron a Puebla, mientras que en México permanecieron cerca de 50,000. Se discute si la capital debe cambiarse a otro sitio como a Tacubaya o Zumpango pero finalmente no se decide mover la sede del poder virreinal. El argumento más importante para esta decisión fue que, aunque se perdieron casi todas las construcciones habitacionales, la gran inversión en edificios religiosos, iglesias y conventos, justificaba recuperar la ciudad.

El crecimiento reciente de la población en el área urbana hasta el año 2000 se muestra en la gráfica de la **figura 03**, en ella se puede observar la evolución de la población desde los años de la fundación de la ciudad mexicana, con los altos y bajos que ha tenido la población debido a la guerra de conquista, epidemias, inundaciones y la explosión demográfica del siglo XX. (Cabrera, 1996).

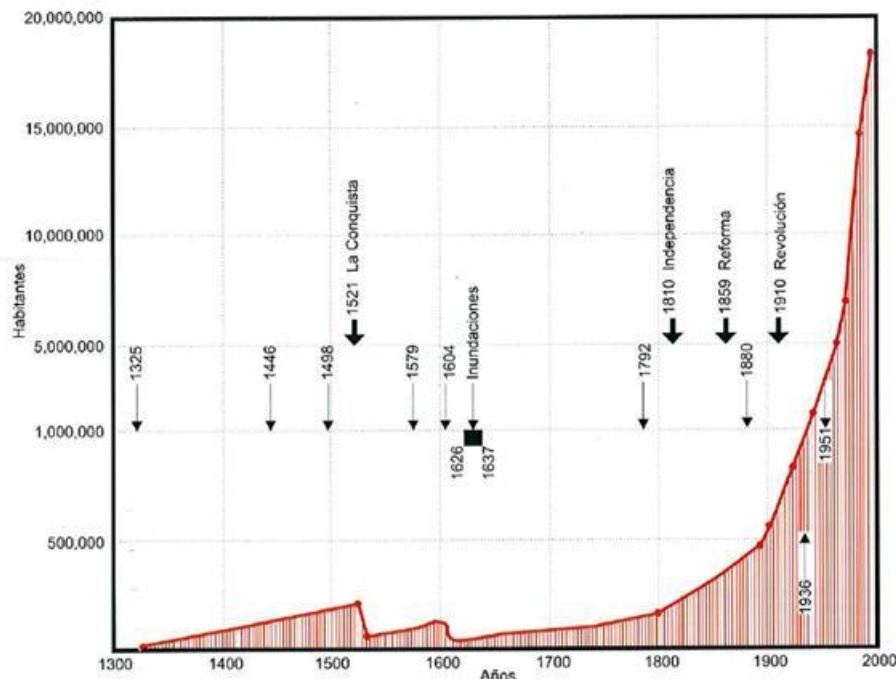


FIGURA 3. EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO. CABRERA.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO EN LA ZONA DE LAGO DE LA CIUDAD.

2.1. GEOLOGÍA DEL VALLE DE MÉXICO.

La condición actual del relleno Cuaternario de la cuenca de México es el resultado de procesos geológicos, volcánicos y tectónicos que inician en el Terciario Medio, a mediados del Oligoceno. Es entonces que, de acuerdo con los conocimientos actuales, puede fijarse el comienzo de la subducción de la placa de Cocos en el Pacífico, debajo de la masa continental meridional de México brotaron a través de una gran fractura de la corteza terrestre llamada Fracturamiento Clarión, que cruza nuestro país desde el Océano Pacífico hasta el golfo de México, tal fractura es el origen del conocido eje Neovolcánico Transversal y es a lo largo de este eje donde se encuentran los más grandes edificios volcánicos del país, como son: el Volcán de Colima, el Nevado de Toluca, el Popocatepetl y así, hasta el Pico de Orizaba y el Volcán de San Martín en Catemaco. Este proceso creó primero la fosa de Acapulco, foco principal desde entonces de la elevada sismicidad del Sur de México y provocó el levantamiento de la Masa Central meridional. La placa de Cocos al hundirse hasta una profundidad de unos 100 km en el Manto Superior, produjo una primera faja volcánica representada entre otras por las vulcanitas en el área de Temascaltepec, Taxco, Iguala y probablemente Oaxaca. Posteriormente, posiblemente por un cambio en el ángulo de subducción (ángulo más suave), la disolución de la placa produjo los magmas que han constituido a partir del Mioceno Medio el gran conjunto de rocas volcánicas que forman la moderno Eje Neovolcánico Transversal. **Fig. 04.**



FIGURA 4. LOCALIZACIÓN DEL EJE NEOVOLCÁNICO TRANSVERSAL DENTRO DEL ENTORNO GEOLÓGICO MEXICANO. FEDERICO MOOSER.

La Eje Neovolcánico Transversal representa una manifestación compleja en la que intervienen varios elementos que son:

- a) Elemento producido por subducción.
- b) Elemento de fracturamiento transcontinental.
- c) Fracturamiento del arco Tarasco.
- d) Fracturamiento Chichinautzin - Malinche - Chiconcuaco.
- e) Fracturamiento de Querétaro.
- f) Fracturamiento de la fosa de Colima.

En el centro de dicha faja donde se localiza la Cuenca de México que hace 500 mil años, el valle de México era muy diferente a la cuenca cerrada que conocemos hoy en día, en esos tiempos era una cuenca abierta hacia el valle de Cuernavaca, limitada al norte, al oriente y al poniente por antiguas cadenas montañosas, volcánicas, que hoy afloran de la planicie lacustre. Las aguas de esta cuenca escurrían hacia la sur, a lo largo de dos ríos casi paralelos, ubicado uno al pie de las sierras Nevada y de Río Frío, que limitan la cuenca por el oriente, y otro al pie de las sierras de Las Cruces y de Tepoztlán, al poniente. Finalmente, las aguas escurrían hasta el Océano Pacífico. Pero con el paso de los siglos se inició un largo proceso de erupciones volcánicas, principalmente de lavas basálticas. (Mooser, 1975). **Fig. 05.**

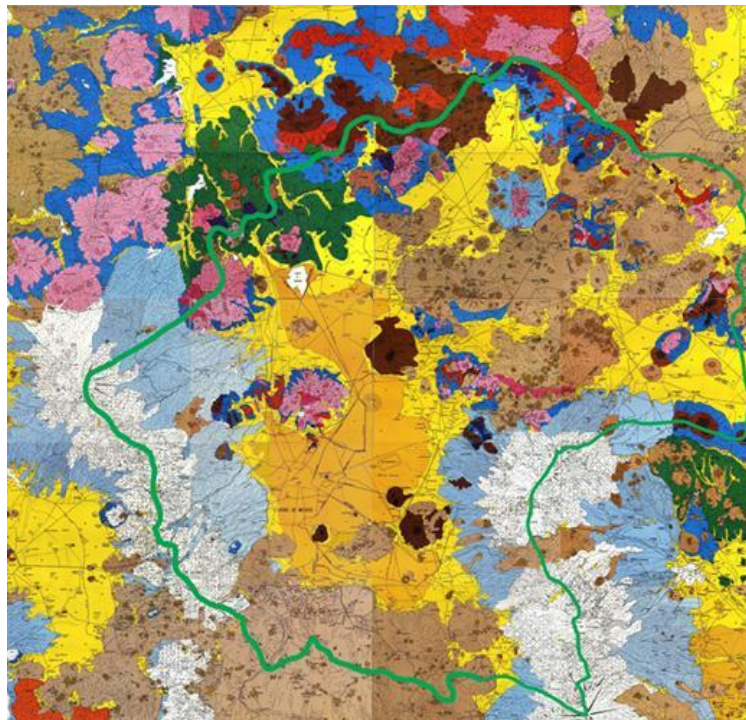


FIGURA 5. MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DE MÉXICO. FEDERICO MOOSER.

Como resultado de este largo proceso de actividad volcánica, fue como nació entre el Volcán del Ajusco y el Popocatepetl, hace ya varias centenas de miles de años, una nueva cadena montañosa, la sierra del Chichinautzin, que hoy separa a los valles de México y Cuernavaca y que excede los 3,500 metros de altura. Se formó así una gran presa natural que cerró la antigua cuenca abierta y dando pie al origen un gran lago. Simultáneamente, se inició un largo proceso de azolvamiento gradual del fondo de la cuenca en cuyos valles se depositaron los productos de la erosión transportados por los ríos o glaciares, descendiendo desde las montañas hasta los lagos. Estos depósitos de limos, arenas y gravas, derivados

de la erosión, tanto de las antiguas cenizas endurecidas como de las cenizas más recientes, son materiales más o menos permeables, que constituyen los acuíferos profundos de los que hoy extraemos casi dos terceras partes del agua potable que consumimos diariamente en el área metropolitana. (Tamez, 1997).

La generación y depositación de las arcillas lacustres, que cubren a los depósitos permeables profundos, constituye un proceso geológico que se explica en la **figura 06**.

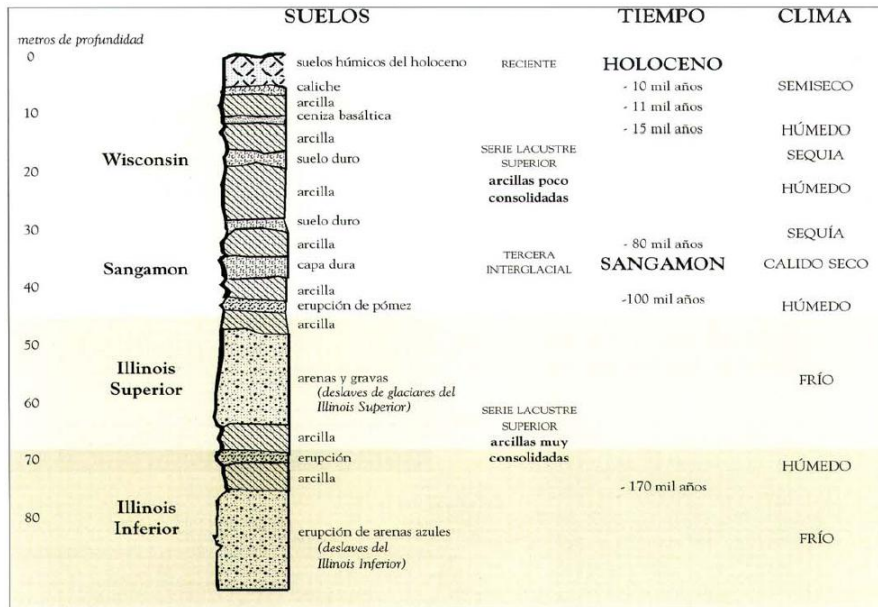


FIGURA 6. ESTRATIGRAFÍA DE LA PLANICIE LACUSTRE DE LA CIUDAD DE MÉXICO, Y SU RELACIÓN CON LOS CAMBIOS DE CLIMA. TAMEZ GONZÁLEZ.

Este proceso de depositación de las arcillas lacustres comenzó hace aproximadamente 170 mil años, durante los cuales la actividad volcánica en el Valle de México parece haber disminuido, pero donde ocurrieron importantes cambios del clima asociados con dos períodos de glaciación. La cuarta glaciación, que duró los últimos 80 mil años, mejor conocida como Glaciación Wisconsin, fue precedida por los últimos 70 mil años correspondientes al final de la tercera glaciación, conocida como Glaciación Illinois, que duro 200 mil años. Estos dos periodos glaciares estuvieron separados por un periodo de 20 mil años de un clima cálido-seco, denominado Interglaciario Sangamon. Cada periodo glacial está precedido de un interglaciario de clima cálido-seco, que gradualmente se va tornando cálido-húmedo, después templado-húmedo y finalmente frío. Durante el tiempo frío avanzan los glaciares, para volverse a retraer al calentarse gradualmente el clima nuevamente, hasta llegar al siguiente periodo interglaciario, y así sucesivamente.

Durante los tiempos de climas húmedos, templados o cálidos, se propició en las laderas del valle el desarrollo intenso de vegetación, cuyos residuos orgánicos, al ser descompuestos por la acción de los microorganismos del suelo, generaron abundante bióxido de carbono que, en combinación con el agua y el oxígeno del aire, crearon las condiciones propicias para la descomposición química de los minerales que constituyen las cenizas volcánicas, transformándolas en arcillas coloidales (finísimas partículas minerales de tamaño microscópico), que fueron erosionadas por las lluvias y transportadas por los ríos

hasta la zona de los lagos donde, en presencia de agua salada con un alto contenido de sodio, se produjo la asociación de las partículas coloidales, que estaban en suspensión en el agua, para formar grumos (flóculos) de estructura muy hueca, pero de tamaño y peso suficiente para favorecer su lenta sedimentación en el fondo del lago. Este proceso de floculación de las partículas coloidales, en presencia de alta concentración de sodio, parece ser la causa del desarrollo de una estructura sumamente porosa de los depósitos de arcilla lacustre, que cubren la mayor parte de la superficie plana del Valle de México. Por el contrario, en los tiempos de clima seco, la carencia de agua inhibió la generación de materia vegetal y con ello se redujeron importante la acción microorgánica y la producción de bióxido de carbono; en tales condiciones de escasez de agua y de gas carbónico, se minimizó el proceso de generación de arcilla por descomposición química de las cenizas volcánicas de las laderas del valle. **Fig. 07.**

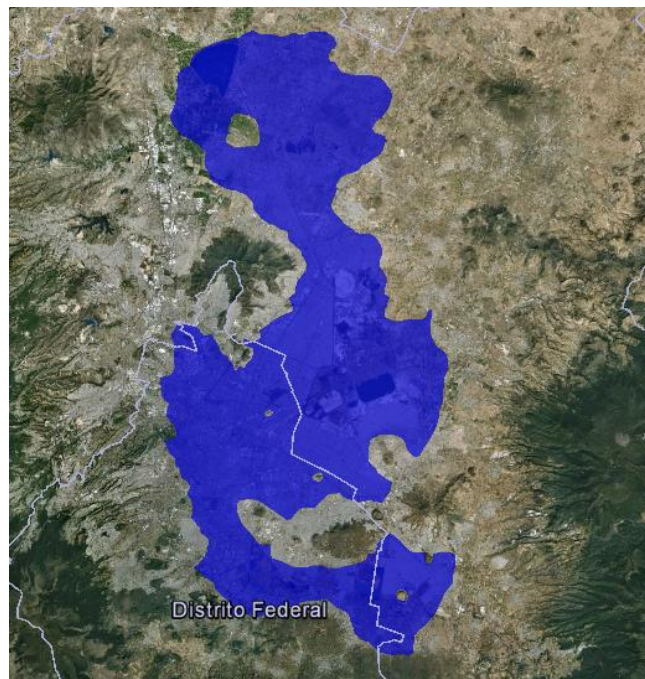


FIGURA 7. MÁXIMA EXTENSIÓN DEL SISTEMA LACUSTRE DE LA CUENCA DE MÉXICO.

Por otra parte, la escasa lluvia y la fuerte evaporación redujeron el volumen de los lagos y su área se contrajo considerablemente, dejando una gran parte de la superficie del fondo de los lagos expuesta a la desecación del suelo por los rayos solares. Este fenómeno se manifiesta en la presencia de estratos endurecidos intercalados entre los estratos de arcilla, que reflejan periodos de sequía alternados con largos periodos de clima húmedo. Para dar una idea de la alta porosidad de la estructura floculenta de los depósitos de arcilla saturada, expresada en términos simples, basta mencionar que, en los estratos más profundos de los depósitos de arcilla, donde esta se encuentra más comprimida por el propio peso de las capas superiores, la relación entre el volumen ocupado por el agua y el volumen ocupado por las partículas de arcilla es de 4:1; es decir que, de cada cinco litros de suelo, cuatro litros son de agua y uno de partículas de suelo; en el otro extremo de la escala, en los estratos superiores menos comprimidos, esta relación llega a valores promedio de 7:1; ósea que, por cada ocho litros de suelo, siete litros son de agua. (Mooser, 2005).

Estas cifras que podrían parecer fantásticas, son sin embargo, la realidad de las arcillas lacustres del valle, razón que explica sus propiedades de alta plasticidad, muy baja resistencia, muy alta compresibilidad y también muy alta expansibilidad.

En relación a los lagos pleistocénicos y recientes, puede establecerse una división en dos:

a) lagos formados en las partes bajas, que constituyeron vasos de evaporación y por ello fueron salobres; se trata de los lagos de Xaltocán y Texcoco.

b) lagos que se formaron al pie de la sierra de Chichinautzin, que fueron nutridos continuamente por manantiales prolíficos y que por ello fueron de agua dulce. **Fig. 08.**



FIGURA 8. GEOLOGÍA Y MORFOLOGÍA DE LA CUENCA. FEDERICO MOOSER.

2.2. EVOLUCIÓN HIDROLÓGICA DEL VALLE.

La identificación de antiguas playas del enorme lago que existió en el valle de México, permite inferir que en los periodos geológicos de mayor precipitación llegó a tener unos 80 km de norte al sur y unos 45 km de oriente a poniente. (**Fig. 09**). Las islas más importantes eran las de Tenochtitlán, Tlatelolco, Nonoalco, Mixhuca y Tlalpan. Alimentaban al lago numerosos ríos, decenas de arroyos y gran cantidad de manantiales; siempre fue poco profundo y su fondo ascendió gradualmente a la medida que se depositaban materiales.

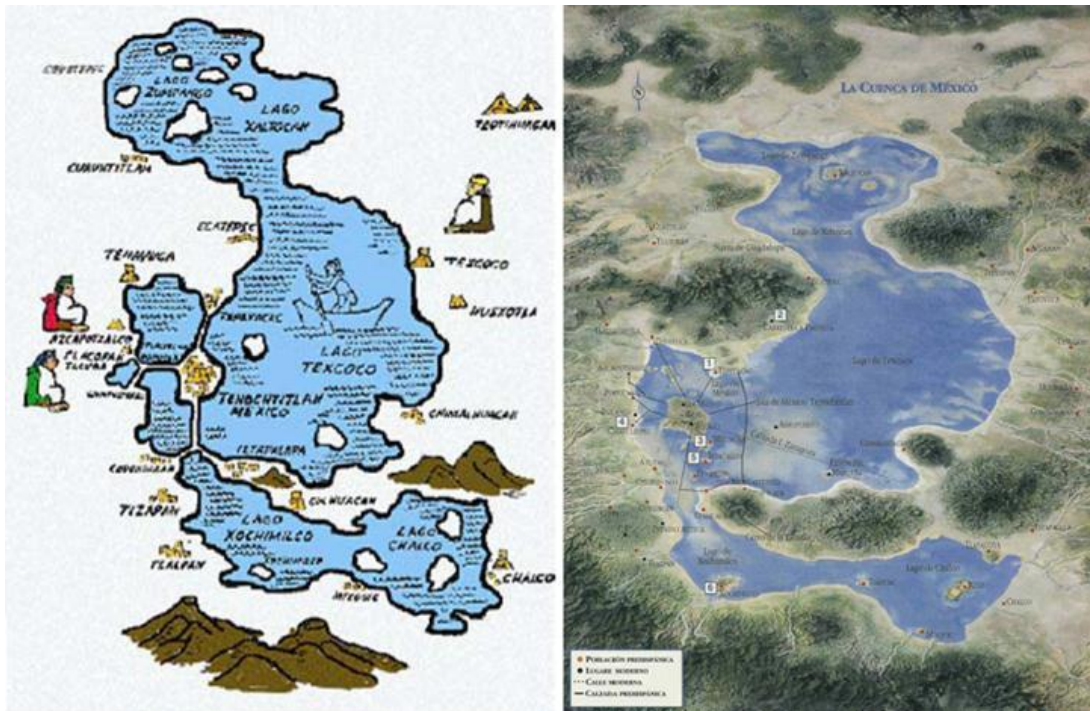


FIGURA 9. SISTEMA LACUSTRE DEL VALLE DE MÉXICO HACIA 1521. SALINAS CESAREO.

La parte más profunda es lo que ahora conocemos como el lago de Texcoco, razón por la cual se concentró la salinidad en su vaso que, según lo midió Humboldt, tenía una densidad relativa de 1.025, similar a la del agua del mar, con 33,000 ppm de sales.

Entre los 30 ríos que alimentaban al lago, ocho son los principales. Los que históricamente han tenido los mayores crecientes por precipitaciones de temporales son los ríos del poniente como el de Cuautitlán, Tepotzotlán y el de la Magdalena Contreras. El primero fue el más temido por los españoles porque fue el causante de las grandes inundaciones del siglo XVII. En orden de importancia le siguen los ríos de Tlalnepantla, Los Remedios, Texcoco, Amecameca y Tlalmanalco.

Dentro de la cuenca afloraban numerosos manantiales con abundante gasto; unos diez brotaban en Chalco y Xochimilco, otros seis al poniente y unos cinco en el norte y poniente, además de otros varios de aguas termales como el que se encuentra en las faldas del cerro del Peñón. La gran variedad de los llamados ojos de agua permitió clasificarlos de la manera siguiente:

- a) de agua dulce, como los de Chapultepec, Xochimilco, Churubusco, Coyoacán y Santa Fe.
- b) los de aguas salobres o amargas, como los de Iztapalapa.
- c) de aguas termales como el ya mencionado del Peñón de los baños y el de Guadalupe.

Otros manantiales importantes fueron el de Pantitlán donde se creía que existía un sumidero u ojo de mar, y el de Tozpátatl que probablemente se ubicó a un costado de la

Catedral Metropolitana y abastecía de agua potable a la naciente México-Tenochtitlán. (Ajofrin, 1763).

Durante la época colonial la ciudad mexicana fue destruida por los invasores europeos casi en su totalidad, conservando algunos rasgos de su traza original. La Ciudad de México se llenó de suntuosas construcciones de pesada cantera, el centro de la ciudad era objeto de constantes *hermoseamientos* (como las remodelaciones del Zócalo, o la pavimentación de las calles, a costa de los viejos canales); en las orillas la gente vivía en casas de bahareque, el cual es un sistema de construcción de viviendas a partir de palos entretejidos con cañas, zarzo o cañizo, y barro, esta técnica ha sido utilizada desde épocas remotas para la construcción de vivienda en pueblos indígenas de América asentados sobre cenagales.

La ciudad virreinal fue objeto de varias inundaciones, las perturbaciones ciclónicas simultáneas en ambos litorales que hacen factible que en zonas del altiplano mexicano ocurran ocasionales lluvias de intensidad extraordinaria, como las que afectaron a Tenochtitlán en 1449 y 1498. Este riesgo obligó a los mexicanos a construir un ingenioso sistema de diques de control hidráulico del que formaban parte las calzadas de acceso a la ciudad, con puentes y compuertas que operaban conforme se requería. El dique más importante fue el de Nezahualcóyotl que, de 12.6 km de longitud y 6.07 m de ancho, partía del pueblo de Atzacolco y llegaba a Iztapalapa. Este sistema resultó muy dañado a causa de la destrucción de los diques que la protegían durante el sitio de Tenochtitlán por parte de los españoles, aunque fue reparado parcialmente, esto no impidió nuevas inundaciones en los años de 1555, 1579, 1604 y la mayor 1629. Estos hechos motivaron a que los españoles y criollos que habitaban la ciudad vieran a los lagos como una amenaza de la naturaleza y desconfiaban de los indígenas que conocían y operaban el sistema de control. Por eso surgió el empeño de abatir el nivel de los lagos y fue Francisco Gudiel, quien propuso en 1555 canalizar los ríos Cuautitlán y Tepotzotlán a un tajo en el puerto de Huehuetoca dando salida hidráulica al valle por el río Tula y se eliminaría el exceso de agua que aportaban estos dos ríos al sistema lacustre.

Las obras iniciaron en 1607 bajo la dirección jesuita y de Enrico Martínez; las excavaciones de 13.3 km de longitud duraron 4 años y en ellas trabajaron 29,650 indígenas, así como 3,556 mujeres preparando las comidas. El tajo de entrada en Zumpango tenía 7,500 varas de longitud y 13 varas de profundidad. Para la construcción del socavón, que se extendía por 670 varas más, se abrieron 42 lumbreras, siendo la más profunda de 57 varas. El tajo de salida tenía una longitud de 780 varas, siendo la equivalencia la siguiente: 1 vara= 0.835 metros. Toda la excavación del túnel se hizo con herramientas de mano y se dice que durante la excavación perecieron miles de indígenas. Al término de esta obra se presentaron problemas cuando sobrevino la primera creciente del río Cuautitlán ya que inexplicablemente el túnel se dejó sin recubrimiento, lo cual provocó colapsos locales que obturaron el túnel cuando se saturaron los materiales tobáceos que atravesaba.

El súbdito holandés Adrián de Boot, conocedor de la operación de los canales de su país natal, fue enviado en 1614 por el Rey Felipe III a Diego Fernández, 13° Virrey de la Nueva España, también con la misión de resolver el problema hidráulico de la ciudad. A principios de 1620 presentó su proyecto que consistía en mantener los lagos, construir diques y canales navegables, pero mejorados con los ingenios y bombas que se usaban en Holanda.

A diferencia de Enrico Martínez, de Boot creía que los ríos del sur eran los causantes de las inundaciones aunque, al parecer, aceptaba concluir el desagüe de Huehuetoca, para evitar los riesgos de las crecidas de los ríos Cuautitlán y de las Avenidas de Pachuca.

El 14° Virrey, Diego Carillo, Marqués de Gelves, trató de aclarar las diferencias de opinión entre Martínez y de Boot respecto a cuáles ríos eran los causantes de las inundaciones, para lo cual ordenó cerrar la entrada al tajo en 1623 y reconstruir algunas albarradas, con el objeto de comprobar de dónde provenía la mayor cantidad de agua. La consecuencia de esta decisión fue el mayor desastre que haya sufrido la ciudad de México.

El 22 de septiembre de 1629, luego de 36 horas de lluvia, la ciudad amaneció anegada y duró en esta situación durante 5 años pues las precipitaciones de 1631 y 1634 acrecentaron aún más los niveles del lago. Las aguas subieron más de dos metros, teniendo como consecuencia más de 20,000 personas muertas y la destrucción de muchas edificaciones importantes, lo que explica la ausencia de elementos arquitectónicos del siglo XVI en la ciudad. La epidemia que se desató orilló a que la mayoría de los habitantes españoles se mudaran a la ciudad de Puebla. Para rehabilitar la ciudad se reconstruyó el importante dique de Ahuizotl al que en adelante se le conoció como albarradón de San Lázaro.

Durante esta gran inundación, el Virrey solicitó a Enrico Martínez la solución definitiva al problema del drenaje general para lo cual propuso excavar una salida del valle a un nivel que permitiera la expulsión del agua del lago por gravedad. En 1637 comenzó la rehabilitación del desagüe bajo la dirección del jesuita Fray Luis López, quien durante 15 años abrió 3,587 varas y recortó el socavón, en un peligroso trabajo donde murieron de nuevo cientos de indígenas que transformaron el túnel original a un tajo abierto de 1,252 metros de largo y más de 25.00 m de profundidad máxima. Además, se profundizó toda la conducción en 1.67 m varas a lo largo de todas sus 15,030 metros de longitud. Entre 1665 y 1675 las obras quedaron a cargo del Padre Manuel Cabrera, quien abrió otras 2,196 varas de canal y desazolvó todo el tajo.

A pesar de todos estos trabajos ocurrieron inundaciones en 1707, 1714, 1747 y 1764. En 1767, con la expulsión de los jesuitas de la Nueva España, se decidió revisar todo el sistema de drenaje y elaborar nuevos proyectos. Uno de ellos, que nunca se intentó, consistía en abrir otro socavón al sur de la laguna de Chalco, hacia el valle de Cuernavaca.

Hacia 1774, Don Joaquín Velázquez de León, fue encargado de dictaminar sobre cuál era el mejor sistema de desagüe para la ciudad. De sus observaciones y mediciones topográficas concluyó que los proyectos de Enrico Martínez habían sido los más acertados. También demostró que para que el agua fluyera en un canal se requería de una inclinación de 0.5 varas por cada 100 de longitud, lo cual lo llevó a afirmar que la salida por Nochistongo debería estar 200 varas por debajo de la superficie (167 metros), pues estimó la distancia entre Nochistongo y Texcoco en 33.5 km.

El Tribunal del Consulado de la ciudad de México (unión de comerciantes) se encargó de los trabajos del tajo y de reconstruir el dique de San Cristóbal, para contener las aguas de Zumpango. El Arq. Francisco de Garay fue nombrado Maestro Mayor del Real Desagüe en 1783 con lo cual las obras que realizaba el Tribunal del Consulado quedaron a su cargo. Se

excavó otro canal y otro socavón pequeño para aliviar la laguna de Zumpango. A esa estructura se le llamó el Canal de Guadalupe, pero desgraciadamente su eficiencia fue muy reducida. A pesar de las acertadas recomendaciones de Velázquez de León, se decidió abrir lo que quedaba de socavón y transformarlo en el tajo abierto de Nochistongo (**Fig. 10**). En 1789 se completó el tajo el cual funcionó con cierta eficiencia a partir de ese año. Finalmente se cumplió el propósito original de Enrico Martínez y las aguas del río Cuautitlán se desviaron hacia Nochistongo, sin llegar al sistema lacustre.



FIGURA 10. TAJO DE NOCHISTONGO. DDF.

Como ya se mencionó, la pendiente del tajo no permitió aprovecharlo integralmente como elemento de desagüe por lo cual el problema persistió y apareció otro proyecto, el del Arq. Ignacio Castrera quién se encargó del plano regulador de la Ciudad y del drenaje del valle a comienzos del siglo XIX. A petición del Virrey Iturrigaray, Alexander von Humboldt revisó ese proyecto en 1804. El erudito alemán centró su interés en los aspectos hidráulicos y concluyó que "la ciudad correrá siempre riesgos, mientras no se abra un canal directo al lago de Texcoco". Sin embargo, el nivel topográfico del drenaje requerido era muy profundo, lo cual hacía de ese canal y ese túnel una obra prácticamente imposible de construir en aquella época y que por ello el peligro continuaría estando latente.

Durante el periodo comprendido de 1880 y 1910, denominado históricamente como el Porfiriato, la compañía inglesa S. Person and Son, se le adjudicó en 1890 el importante contrato de la excavación del Gran Canal de 41.5 km de longitud, con 5 a 6.5 metros de ancho, pendiente de 20 cm por kilómetro y taludes de 45°. Los consultores extranjeros fueron incapaces de prever los problemas geotécnicos de los suelos del valle de México, provocando que a la compañía constructora se le cancelara el contrato y el gobierno porfiriano encargó a la Junta Directiva del Desagüe concluir la obra en su fase final. Las formidables obras fueron inauguradas el 17 de marzo de 1900 y con frivolidad se declaró que la amenaza de inundación había desaparecido. Este sistema de túneles y canales

construidos desde la época virreinal, provocaron la desecación de la mayoría de la superficie cubierta por los lagos, dejando libre una gran superficie del antiguo lecho del lago, que en un principio se intentó usar como suelo de uso agrícola pero que con el paso de los primeras décadas del siglo XX, estos vastos espacios fueron rápidamente ocupados por la ciudad capital que ante su creciente población, demandaba más espacio para su desarrollo.

El nuevo orden político posterior a la revolución alentó el crecimiento de la ciudad, con el consecuente aumento del caudal de aguas negras. La explosión demográfica y la acelerada expansión urbana obligaron a expandir la red de drenaje y la apertura de más pozos de extracción de agua para uso humano, esto provocó la aceleración del fenómeno conocido como hundimiento regional, el cual será descrito a detalle más adelante.

La diferencia de niveles provocada por el hundimiento regional, entre lo que quedaba del lago en la zona de Texcoco y la ciudad, hizo retornar las amenazas de inundación. Así en 1937 la ciudad padeció nuevamente una inundación que se repitió en 1941, 1942, 1944. En respuesta a estas contingencias las autoridades decidieron abrir un segundo túnel en Tequixquiac. En esa misma época se construyeron 35 presas en todos los ríos del poniente para controlar sus avenidas, siendo las principales las de Tacubaya, río Hondo y Mixcoac, que en nuestros días han perdido su funcionalidad debido a que se encuentran azolvadas y tienen poco mantenimiento.

El sistema de drenaje heredado de la época porfiriana trabajó eficientemente hasta la década de 1930, a partir de ahí el fenómeno del hundimiento regional comenzó a afectar el sistema de forma más importante conforme la ciudad iba creciendo. Aunque su eficiencia se renovó cuando entro en funciones el segundo túnel de Tequixquiac, en 1949 ocurrió la última gran inundación que ha sufrido la ciudad. A partir de este evento se obligó a la instalación de varias centrales de bombeo para elevar el agua al Gran Canal y se reconoció que el hundimiento de la ciudad había reducido la efectividad del sistema de drenaje.

El hundimiento regional afecto diferencialmente al Gran Canal. En su tramo cercano a San Lázaro, por ejemplo, se hunde a unos 25 cm al año, mientras que en las cercanías del evaporador solar de Sosa Texcoco al nororiente de la ciudad, el hundimiento varía entre 2 y 3 cm al año. Esta pérdida gradual en la pendiente se ha recuperado parcialmente al sobrelevar sus bordos laterales hasta donde lo permite la baja capacidad de carga del suelo en la zona. Con estas tendencias de hundimiento, el Gran Canal está condenado a perder su funcionalidad. Sin embargo sigue siendo necesario para drenar las aguas de la ciudad.

Por la situación de un inminente de riesgo por inundaciones de nueva ocasión en la historia de la ciudad, a partir del año 1967 comenzó la construcción del sistema de Drenaje Profundo de la ciudad. Concebido y proyectado por el Ing. Raúl Ochoa como una red de túneles y con más de 135 km de longitud. La idea de un drenaje profundo radica en la construcción del sistema de túneles y conductos de aguas negras en estratos más competentes del suelo que son menos susceptibles al hundimiento regional, dicho sistema se deslumbra como la solución definitiva al problema a que se ha tenido por siglos en el valle de México, a la fecha se ha construido gran parte de este sistema que tiene como obras fundamentales el Túnel Emisor Central y el Túnel Emisor Oriente, este último en construcción. (*Musset, 1992.*)

2.3. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

Gran parte de la ciudad está desplantada sobre el fondo del lago de Texcoco, particularmente al oriente y al norte. Por otro lado, la zona poniente se desarrolla sobre las estribaciones de la Sierra de las Cruces y al sur, varias colonias están asentadas sobre las lavas emitidas hace aproximadamente 2,500 años por el volcán Xitle. Esta descripción permite imaginar los diversos problemas de cimentación que pueden plantearse en la capital, (SMIG, 1978).

Para jerarquizar dichos problemas, el área urbana se ha subdividido en tres grandes zonas (lago, transición, y lomas), con base en la información de sondeos y observaciones geológicas. **Fig. 11.** Las zonas de lago y lomas están bien definidas, aun cuando en la última pueden encontrarse formaciones tan diversas como lavas y abanicos aluviales. En cambio, en la zona de transición ha sido limitada en forma un tanto arbitraria, teniendo en cuenta la composición estratigráfica; su característica esencial es que, intercalada con estratos arenosos y limosos de origen aluvial tiene capas de espesor muy variable, de arcilla lacustre producto del incremento y decremento del nivel del lago a través del tiempo. En esta zona no es posible destacar los mantos compresibles superior e inferior, separados por la capa dura, que es típica en la parte ocupada antiguamente de forma permanente por el gran lago.

Además de la diferencia entre las zonas de transición y el lago, en esta última es posible distinguir áreas atendiendo a la historia de cargas, ya sea por construcciones en la superficie, o bien, por alteraciones de la presión en los acuíferos inducidas por bombeo.

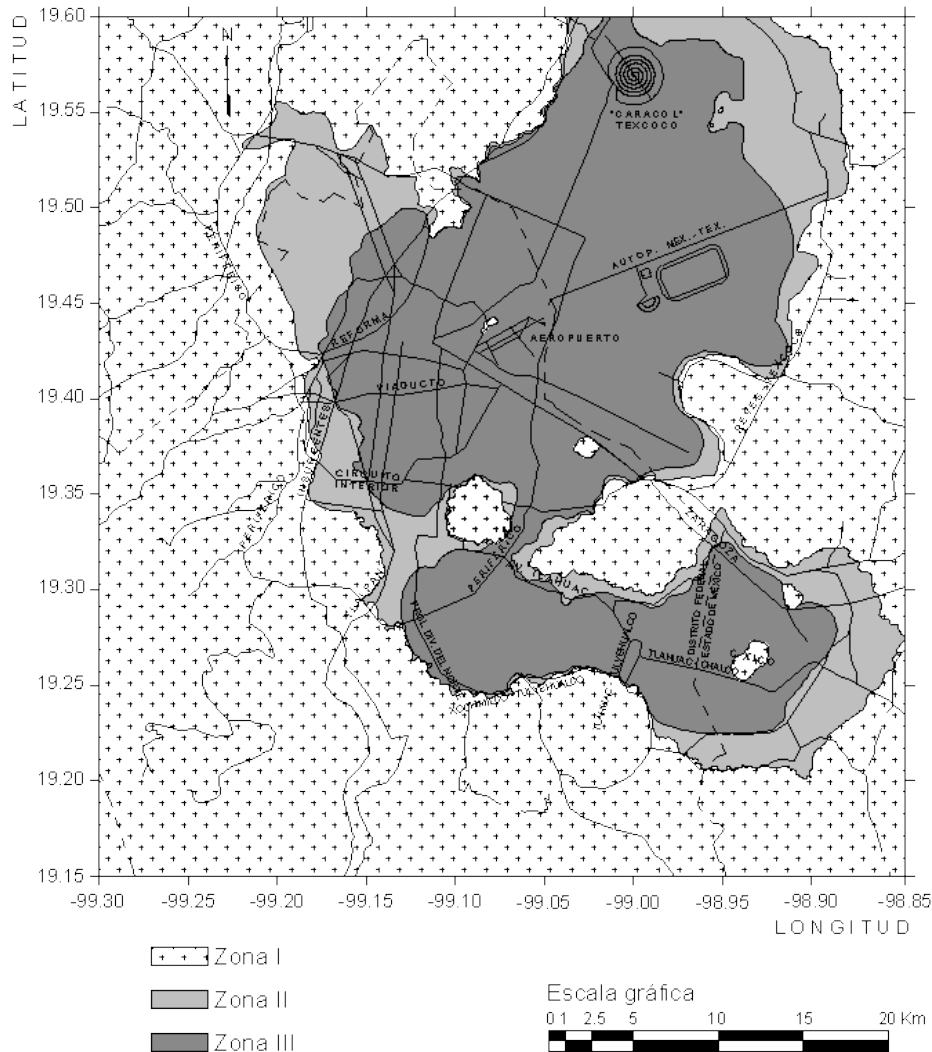


FIGURA 11. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO, RCD NTCC 2004.

La zona de lomas o zona I, como es denominada por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal en sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones. Esta zona incluye las faldas de las grandes serranías que limitan la cuenca, así como también las formaciones interiores, como la sierra de Guadalupe y Santa Catarina, formaciones más pequeñas y aisladas como el Peñón de los Baños y el Peñón del Marques y el cerro de la Estrella.

Está formada principalmente por rocas o suelos areno limosos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esa zona es frecuente la presencia de oquedades en las rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arenas y rellenos no controlados. Estos suelos son compactos, de alta capacidad de carga y baja deformabilidad, se incluyen los derrames de basalto del Pedregal. (*Gaceta Oficial G.D.F., 2004.*)

En esta zona se han detectado varios tipos de suelo que se pueden clasificar en seis grupos atendiendo a los problemas de cimentación y se mencionan a continuación:

- a) Tobas estables aún bajo acciones erosivas del agua, compuestas por mezclas de arena y grava en proporciones variables, cementados por una matriz de suelos finos con alta capacidad de carga. Estos suelos aparecen con mayor frecuencia al norte de la zona poniente y especialmente en la zona de lomas de Chapultepec.
- b) Tobas inestables bajo la acción erosiva del agua, compuestos en mayor proporción por arcilla de plasticidad media a alta con cementación pobre. Es muy probable que en esta zona hayan existido bosques que mantenían cierto equilibrio contra la erosión, se localizan principalmente al sur-poniente (Contadero y algunas barrancas de la zona de las Agilas).
- c) Suelos pumíticos, compuesto por espesores de entre 1 y 3 metros de arena pumítica limpia, que sufre rotura de granos si se someten a presiones de contacto altas.
- d) Rellenos, originados debidos al intenso crecimiento de la ciudad hasta estas zonas, mal compactados y con pésima calidad en los materiales, antiguamente eran barrancas. El ejemplo más claro es la zona urbana de Santa Fe.
- e) Suelos de origen eólico; los cuales existen al pie de la sierra de Guadalupe y se encuentran de forma eventual, formados por depósitos de arena suelta que sufren hundimientos bruscos bajo cargas dinámicas con espesores no mayores a los 4 m.
- f) Roca basáltica, abundan en gran parte de la zona sur como derrames de lava con distintos grados de Fracturamiento y oquedad, en los cuales se puede observar los tipos de basalto columnar y vesicular. Las partes sanas del basalto pueden llegar a tener las mayores resistencias encontradas en la zona lacustre.

La zona de transición o zona II, es una zona muy interesante ya que en esta zona ocurren cambios muy notables en la estratigrafía. En esta zona se encuentran superficialmente depósitos de arcilla o limo orgánico de la formación Becerra cubriendo a estratos muy compresible intercalados con capas de arenas, los cuales descansan sobre potentes mantos de arenas y grava. Esta definición está basada en los resultados de exploración entre las serranías del Poniente y la zona del antiguo lago. En el análisis de diversos sondeos se localizó que entre las Av. Miguel A. de Quevedo y el Viaducto Piedad, las capas de arena y grava compactas se detectan con claridad. No obstante hacia el norte, las capas de arcillas y arenas se localizan más allá de las profundidades de interés de los proyectos actuales de Ingeniería, por lo que no ha sido posible determinar la profundidad de los depósitos profundos, teniendo una alternancia de estratos de arena y arcilla por lo menos hasta una profundidad de 30 metros. (*Gaceta Oficial G.D.F., 2004.*)

Hacia el cerros del Tepeyac, de los Baños, el cerro de la Estrella y el Peñón del Marques, la longitud de la zona de transición y que separa la zona I de la III, es muy corta y reducida teniendo como resultado un cambio muy abrupto de la estratigrafía entre dos puntos muy cercanos. Esta situación ha provocado una problemática muy particular en las edificaciones que se desplantan en esta zona ya que sufren severos daños por asentamientos diferenciales extraordinarios, debido al cambio abrupto de la estratigrafía que pasa de materiales blandos y muy compresibles a materiales competentes propios de la zona de lomas, por lo tanto los primeros son afectados a causa del fenómeno de hundimiento regional provocando en primer instancia la aparición de un desnivel que hace notorio los límites entre ambos tipos de suelos para posteriormente generar grietas y fallas por tensión. Dos claros ejemplos de los daños que provoca esta situación pueden ser vistos en la antigua Basílica de Guadalupe a las faldas del cerro del Tepeyac y en el cajón superficial de la Línea A del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

2.4. CARACTERÍSTICAS ESTRATIGRÁFICAS DE LA ZONA DE LAGO.

La zona de Lago o zona III, se caracteriza porque en ella las arcillas blandas con grandes espesores. De acuerdo con la localización e historia de cargas se ha dividido en tres subzonas, atendiendo a la importancia relativa de dos factores independientes:

- 1) Espesores y propiedades de la costra superficial.
- 2) La consolidación inducida a cada sitio.

a) Lago Virgen (LV). Aunque a consecuencia de las acciones del hombre, ya no existen arcillas tan blandas como las que existieron hace 400 años, resulta razonable identificar como arcillas en condición virgen a las más blandas de lo que ahora es el vaso del ex lago de Texcoco. Sin embargo, como consecuencia del reciente desarrollo de esa zona las sobrecargas en la superficie se han incrementado e intensificado el bombeo profundo.

b) Lago Centro I (LCI). Corresponde al sector no colonial de la ciudad el cual se desarrolló a partir de principios de este siglo y ha estado sujeto a las sobrecargas generadas por construcciones pequeñas y medianas. Las propiedades mecánicas del subsuelo en esta zona representan una condición intermedia entre las del lago Virgen y las de lago Centro II. La resistencia de punta del cono eléctrico se ha incrementado por las sobrecargas.

c) Lago Centro II (LCII). Esta subzona está limitada por la antigua traza de la ciudad y en ella la historia de las cargas aplicadas en la superficie ha sido muy variable por lo cual se presentan las siguientes condiciones extremas: 1) Arcillas fuertemente consolidadas por rellenos y grandes sobrecargas de construcciones prehispánicas y coloniales; 2) Arcillas blandas, asociadas a lugares que han alojado y jardines durante largos periodos de tiempo, y 3) Arcillas muy blandas en los cruces de antiguos canales.(SMIG, 1978).

Costra superficial; en general está formada por tres subestratos, que constituyen una secuencia de materiales naturales cubiertos por un relleno artificial heterogéneo, a saber:

a) Relleno artificial; Constituido por restos de construcción y por relleno arqueológico principalmente de la antigua ciudad mexicana, su espesor varía de entre 1 y 7 m en el centro de la ciudad aunque debajo de la catedral en ocasiones excede los 15 m. Este relleno es de unos dos metros en el resto del Centro Histórico y casi inexistente a las orillas del lago.

b) Suelo blando; Se le puede describir como un depósito aluvial blando de tan pequeño espesor que a veces pasa desapercibido. Fue el último sedimento fangoso que se depositó en el fondo del lago; suele tener intercalados lentes de material eólico, que en muchos sitios quedó atrapado bajo el relleno superficial.

c) Costra seca; se formó como consecuencia de un descenso del nivel del lago durante el cual quedaron expuestas algunas zonas del fondo a los rayos solares con lo cual la costra seca quedó fuertemente consolidada.

Formación arcillosa superior (FAS); esta serie tiene un espesor que varía entre los 25 y 50 m. Aunque es muy uniforme, se pueden identificar cuatro estratos principales, de acuerdo con su origen geológico y con los efectos de consolidación inducida por sobrecargas

superficiales y por el bombeo profundo. Dichos estratos tienen intercalados lentes duros que se pueden considerar como estratos secundarios.

a) Arcilla preconsolidada superficial (APS); Este estrato superficial se ha endurecido por efecto del secado solar, por el ascenso capilar del agua, las sobrecargas externas y las que producen los rellenos. Los árboles también han contribuido a consolidarlo pues sus raíces absorben humedad, particularmente en las áreas pavimentadas en donde se dificulta la infiltración de agua pluvial. .

b) Arcillas normalmente consolidadas (ANC); Se localizan por debajo de la profundidad afectada por las sobrecargas superficiales y por arriba de los suelos consolidados consolidados por el bombeo profundo. Es importante aclarar que estos suelos se han identificado como normalmente consolidados para las sobrecargas actuales, porque continúan expuestas a un proceso de consolidación a partir de su condición inicial.

c) Arcilla consolidada profunda (ACP). El bombeo para abastecer a la ciudad de agua ha generado un fenómeno de consolidación, más significativo en las arcillas profundas que en las superficiales. Se debe aclarar que se trata de arcillas normalmente consolidadas en virtud de la pérdida continua de presión de agua que prevalece. Sólo en el remoto caso de que se recuperara la presión en el agua serían arcillas preconsolidadas.

d) Lentes Duros (LD); los estratos de arcilla están interrumpidos o intercalados por lentes duros que pueden ser costras de secado solar, arena basáltica o vidrio pómez cuyo espesor va desde unos centímetros hasta cerca de 2 m. Por lo general son marcadores de la estratigrafía lo cual permite diferenciar los estratos arcillosos, su presencia y la medición de su resistencia son de interés en la determinación de la hincabilidad de pilotes y en la determinación de la perforación previa necesaria. En general son más permeables que las arcillas, por lo que influyen en la velocidad de consolidación de estas, además que su presencia debe tomarse en cuenta en la definición del bombeo en excavaciones y para cuantificar la supresión. (*Santoyo Villa, 2005*)

Capa dura (CD); Es un depósito heterogéneo que se desarrolló en el período climático del interglaciar Sangamon en el cual predominan limos arenosos con algo de arcilla y ocasionales gravas. Tiene una cementación muy errática y su espesor, variable es muy delgada en la zona central del lago de Texcoco que no llegó a secarse por completo y alcanza unos 5 metros en lo que fueron sus orillas. A continuación se describen algunos de sus rasgos distintivos:

a) La complejidad estratigráfica de esta capa dura ha dificultado la extracción de muestras inalteradas que permitan definir confiablemente sus propiedades mecánicas. Sin embargo, en los últimos años, con el advenimiento del cono eléctrico como herramienta de exploración geotécnica ha revelado su complejidad y peculiaridades.

b) Tiene intercaladas, lentes de arcilla que se formaron en los ciclos húmedos del período interglaciar Sangamon. Analizando los registros de diversos sondeos, se ha inferido que durante la formación de esta capa ocurrieron dos ciclos de sequía los cuales endurecieron los materiales que quedaron expuestos durante ellos, generándose suelos limosos y limo-arenosos, a veces erráticamente cementados con carbonatos de calcio. Otra característica peculiar de la capa dura es su variabilidad en espesor y resistencia. En las épocas de mayor sequía las zonas centrales del lago, las más bajas, se expusieron parcial o intermitentemente a los rayos solares mientras que la exposición de las orillas durante estos períodos fue total. Consecuentemente, dentro de la actual zona urbana, el espesor de

la Capa Dura y su resistencia aumentan gradualmente, dentro el poniente y se reducen hacia el oriente. Adicionalmente, la erosión de causas superficiales adelgazó el espesor de la capa dura lo que también dio lugar a cierta erraticidad local.

c) La capa dura desempeña un papel muy importante en las cimentaciones profundas de la ciudad de México, ya que para muchas estructuras desempeña sirve como apoyo de pilotes de punta, de control y de punta penetrante.

Formación arcillosa inferior (FAI); Es una secuencia de estratos de arcilla separados por lentes duros, en un arreglo semejante al de la serie arcillosa superior. Su espesor es de unos 15 m al centro del lago y prácticamente desaparece en sus orillas.

Depósitos Profundos (DP); Constituyen una serie de arenas y gravas aluviales limosas, cementadas con arcillas duras y carbonatos de calcio. La parte superior de estos depósitos, de 1 a 5 m, está más endurecida que la inferior, en donde se encuentran estratos menos cementados y hasta arcillas pre consolidadas. **Fig. 12.**

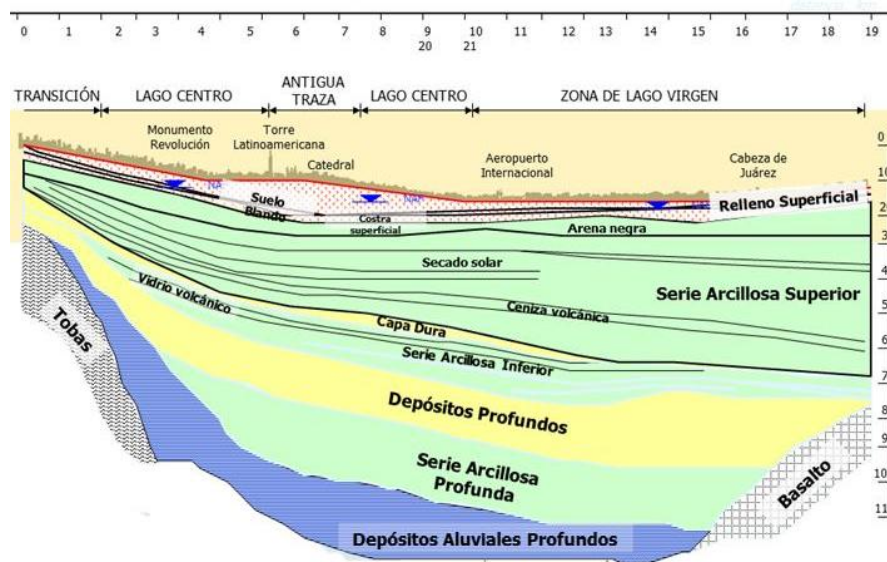


FIGURA 12. PERFIL ESTRATIGRÁFICO EN LA ZONA DE LAGO, CORTE PONIENTE-ORIENTE.

PILOTEC.

2.5. HUNDIMIENTO REGIONAL.

La extracción de agua de los acuíferos se califica como sobreexplotación cuando se saca un caudal mayor que la capacidad natural de recuperación. Tal abuso en una región genera dos severas consecuencias.

La inevitable reducción de agua extraíble, que llevada al límite puede agotar la fuente. Este exceso está ocurriendo en tantas regiones del mundo, que se ha transformado en una preocupación de la UNESCO, pues afecta a una larga lista de ciudades y regiones del orbe. También contribuye a reducir la producción agrícola mundial.

El descenso gradual pero continuo del nivel de los acuíferos provoca la disminución de la presiones del agua intersticial e incrementa el esfuerzo que actúa efectivamente en la parte sólida del suelo. Esto último desencadena el proceso de consolidación de los estratos de suelos blandos de toda la región afectada por el bombeo, lo cual se agrava con la disminución potencial del áreas de recarga de agua de lluvia provocada por la expansión de la mancha urbana. La manifestación principal de esta problemática son hundimientos de la superficie que casi siempre terminan por dañar a las construcciones y a las instalaciones municipales. (*Nabor Carrillo, 1969*)

Estas acciones provocan una consolidación inducida, provocada por los siguientes factores:

- a) La colocación de rellenos desde la época precortesiana, necesarios para la construcción de templos y viviendas, así como el desarrollo de zonas agrícolas.
- b) La apertura de tajos y tucanes para el drenaje de aguas pluviales y negras lo cual contribuyo al abatimiento del nivel freático, lo que a su vez incremento el espesor de la costra superficial y consolido la parte superior de la costra de arcilla.
- c) La extracción de agua del subsuelo, que ha venido consolidando progresivamente las arcillas, de los estratos más profundos a los superficiales.
- d) La construcción de estructuras, proporcionada por el reciente crecimiento urbano.

A partir de la segunda mitad del siglo XX los ingenieros y arquitectos de la ciudad de México empezaron a advertir que las calles aparentemente se alzaban y los edificios quedaban más bajos. Como consecuencia de ello eran frecuentes las inundaciones en cada época de lluvias. Pero además de ello, también notaron que el nivel de aguas freáticas se estaba levantando en casi un metro. Esto genero una gran controversia técnica, en la que personajes de la época sostenían que la Ciudad de México se hundía. Para probarlo se realizaron nivelaciones topográficas de una retícula de puntos dentro de la ciudad, tomando como referencia la Tangente Inferior de la Piedra del Sol denominado como "TICA", que en ese entonces se encontraba adherido a la torre poniente de la Catedral Metropolitana, con la falsa hipótesis de que ese punto no sufría hundimientos. **Fig. 13.**

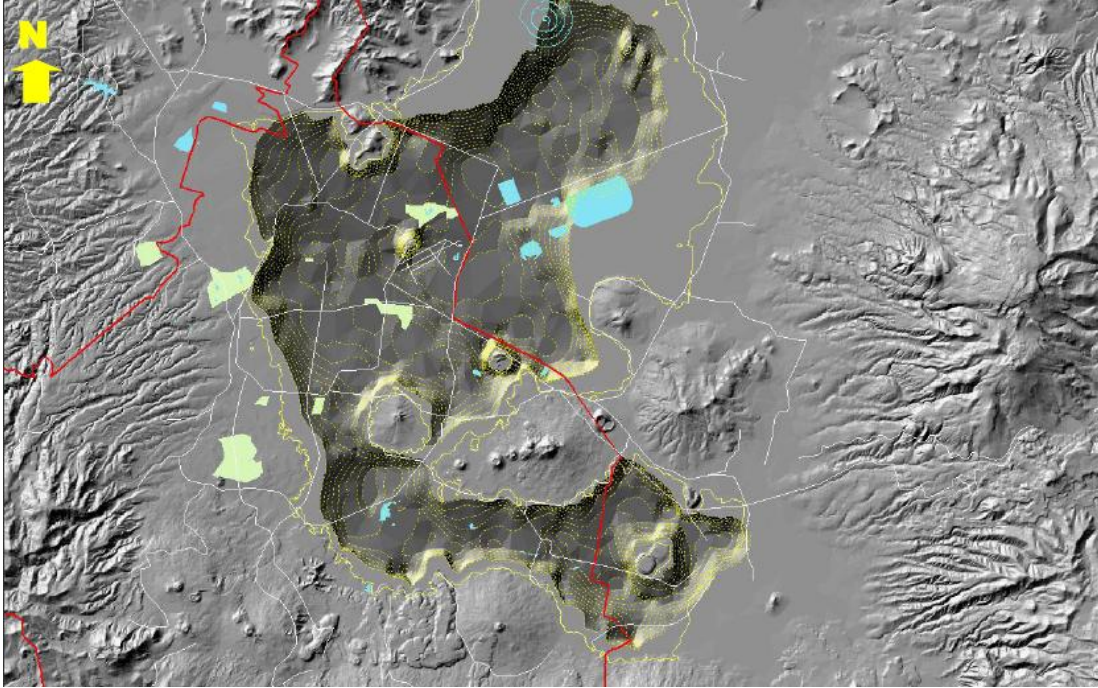


FIGURA 13. CONTORNOS DE LA ZONA LACUSTRE AFECTADA POR EL HUNDIMIENTO. PILOTEC.

La primera de esas nivelaciones se realizó bajo la responsabilidad del Profesor Javier Cavallari de la Academia de Juan Carlos, se llevó a cabo entre 1860 y 1861, con la ayuda de su alumno Antonio Torres Torija.

La segunda nivelación la hicieron en 1877 los ingenieros Francisco Jiménez y Benvenuto Gómez, a quienes se encargó también colocar 500 azulejos de referencia con la cota 10 m por debajo del nivel del TICA, pero fueron retirados por error al creer que existían errores de medición. (*Marsal, 1953*)

Para finales del siglo XIX los investigadores se percataron que el punto del nivel TICA se hundía también por lo cual se tuvo que buscar un banco de nivel nuevo con la certeza de que este nuevo punto no sufriera de hundimiento. Este nuevo nivel fue ubicado en la colona Atzacolco, cercano a Martín Carrera, con el cual se continuaron las nivelaciones. **Fig. 14.**

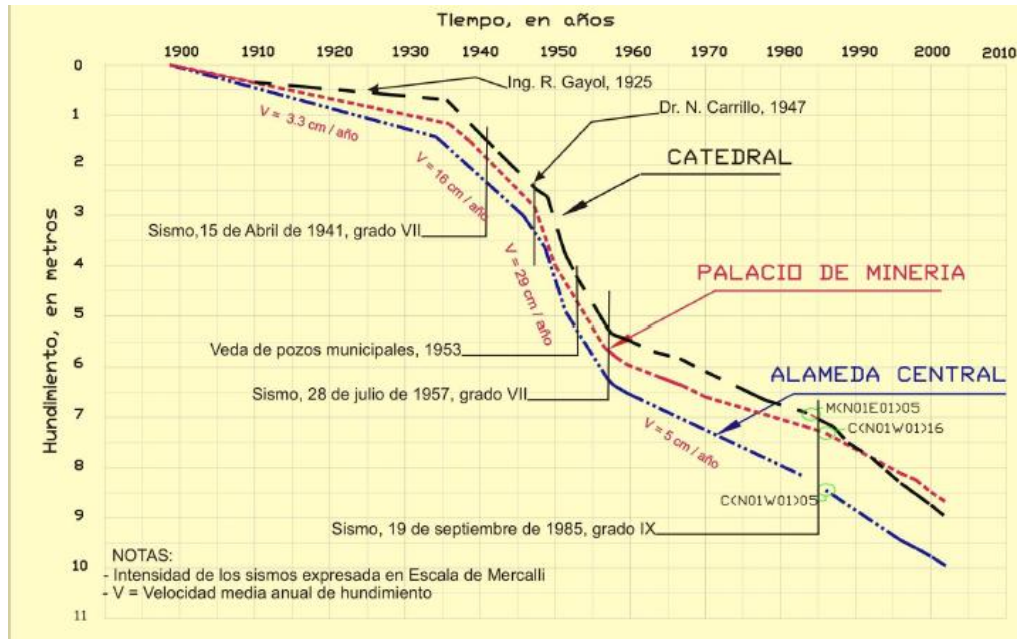


FIGURA 14. HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA ZONA LACUSTRE. PILOTEC.

El fenómeno del hundimiento regional tiene graves consecuencias en toda la zona de lago de la ciudad, dañando seriamente la infraestructura urbana subterránea, afectando el correcto comportamiento de las cimentaciones al inducir al suelo a un constante cambio de esfuerzos efectivos, el efecto de emersión en cimentaciones apoyadas en los estratos competentes y la presencia de fricción negativa en pilas, pilotes y cajones de cimentación.

Fig. 15.

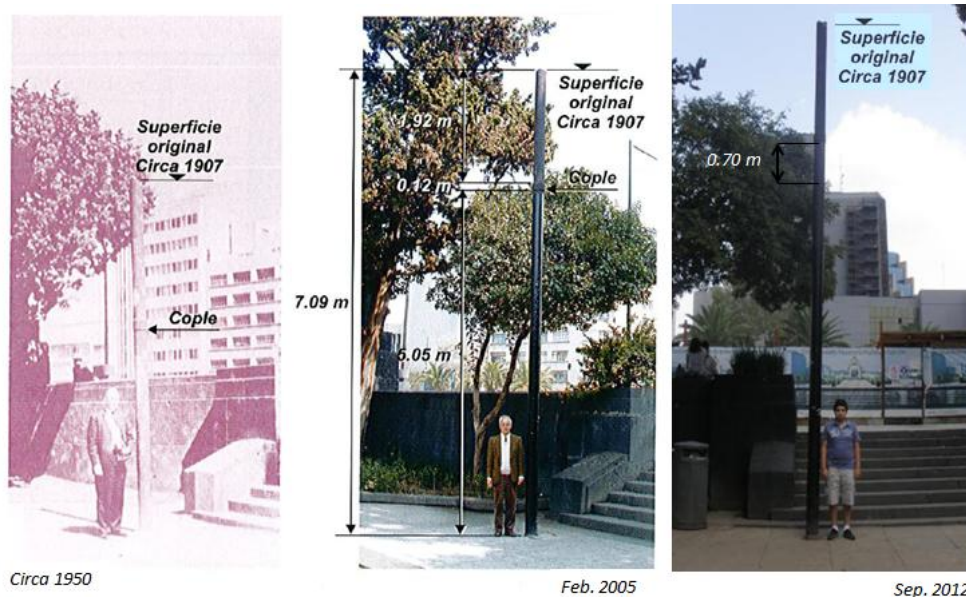


FIGURA 15. REGISTRO DEL HUNDIMIENTO REGIONAL, MONUMENTO A LA REVOLUCIÓN. TGC GEOTECNIA, MARTÍNEZ OVIEDO.

2.6. COMPOSICIÓN GENERAL DEL TIPO DE CIMENTACIONES EN LA ZONA DE LAGO DE LA CIUDAD.

Cimentación en la zona lacustre; La solución de la cimentación en las zonas lacustres de la cuenca depende del tipo y función de la estructura así como de las peculiaridades del subsuelo en cada sitio. De ellos a continuación se presentan algunos comentarios de carácter general, particularizando el comportamiento de esas cimentaciones durante los sismos de 1985 que hicieron evidentes los errores y aciertos.

a) Zapatas de piedra y concreto; Una zapata es una ampliación de la base de una columna o muro, que tiene por objeto transmitir la carga al subsuelo a una presión adecuada a las propiedades del suelo. Las zapatas que soportan una sola columna se llaman individuales o aisladas. La zapata se construye por debajo de un muro se llama zapata corrida o continua. Una forma especial de zapata combinada que se usa comúnmente en el caso de que una de las columnas soporte un muro exterior es la zapata en voladizo o cantiliver. Indudablemente, las zapatas representan la forma más antigua de cimentación. Hasta mediados del siglo XIX, la mayor parte de las zapatas eran de mampostería, se construían de piedra cortada y labrada a tamaños especificados, en contraste las zapatas de mampostería ordinaria se construían con pedazos de piedra de todos tamaños, unidos con mortero. En los primeros intentos para ampliar las áreas de las zapatas, sin aumentar el peso, se construían emparrillados de madera, y las zapatas convencionales de mampostería se colocaban sobre ellos. Con el advenimiento del concreto reforzado, poco después de 1900, las zapatas de emparrillado fueron superadas casi por completo por estas últimas, que al día de hoy son el tipo dominante. (Peck, 1995)

La elevación a la que se desplanta una zapata, depende del carácter del subsuelo, de la carga que debe soportar y del costo del cimiento. Ordinariamente, la zapata se desplanta a la altura máxima en que pueda encontrarse un material que tenga la capacidad de carga adecuada y para su excavación debe mantenerse seca mediante bombeo de achique mientras fragua el concreto reforzado. El asentamiento de una zapata depende de muchos factores, además de a presión ejercida en el subsuelo.

En la zona de lago se pueden adoptar desplantadas sobre la costra superficial, para estructuras ligeras de dos a tres pisos de altura como máximo. Se podría decir que durante los sismos de 1985 tuvieron pocos problemas de comportamiento. **Fig. 16.**

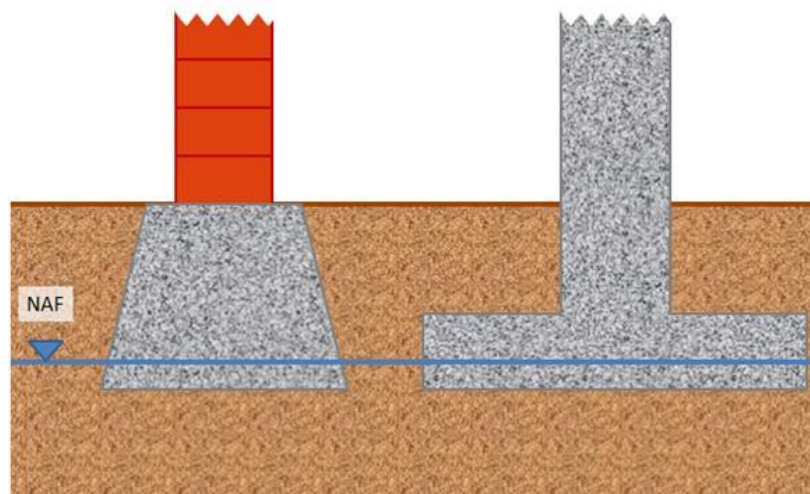


FIGURA 16. ZAPATAS DE CIMENTACIÓN. MARTÍNEZ OVIEDO.

b) Losas de cimentación; Una losa de cimentación es una zapata combinada que cubre toda el área que queda debajo de una estructura y que soporta todos los muros y columnas. Cuando las cargas del edificio son tan pesadas o la presión admisible en el suelo es tan pequeña que las zapatas individuales van a cubrir más de la mitad del área del edificio, es probable que la losa de cimentación sea más económica que las zapatas, (Peck, 1995). Las losas de cimentación se usan también para reducir el asentamiento de las estructuras situadas sobre depósitos muy compresibles. Se trata de cimentaciones someras que suelen complementarse con trabes construidas por arriba o por debajo de la losa. En la zona de lago existen edificios de tres y cuatro pisos cimentados así. En los sismos de 1895 muchos de ellos manifestaron problemas por la falta de rigidez del conjunto de trabes y losas. **Fig. 17.**

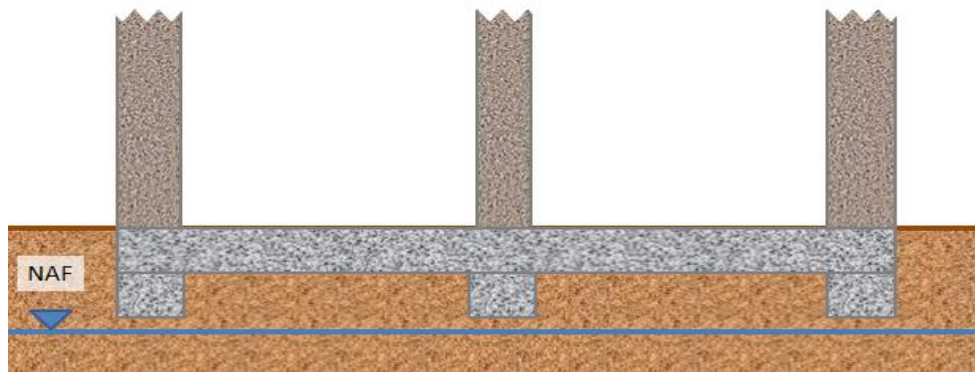


FIGURA 17. LOSAS DE CIMENTACIÓN. MARTÍNEZ OVIEDO.

c) Cajones de cimentación; Son las cimentaciones más usuales en estructuras de cuatro a seis niveles con frecuencia se busca que el peso del suelo extraído sea igual al de la estructura para lograr la compensación de la carga aplicada al terreno. Aunque conceptualmente este criterio es excelente, los cajones de cimentación frecuentemente se ven afectados por los problemas a causa de las expansiones y de la excentricidad de carga

o por aquellos debidos a distribuciones no uniformes de la deformidad del suelo (*Santoyo, 2005*). Es también importante mencionar que muchos de estos cajones se han construido con una losa superior de elementos fabricados (loseta y bovedilla), que carecen de la continuidad para formar un verdadero cajón estructural y por ello estas cimentaciones en realidad funcionan como losas simples de cimentación desplantadas a una mayor profundidad. Pocos edificios con este tipo de cimentación tuvieron problemas en los sismos de 1985, sin embargo, existen muchos centenares de ellos que tienen problemas de inclinación por la excentricidad de las cargas y exceso de peso no considerado en el diseño o bien, por hundimientos locales producidos por la existencia de árboles en la cercanía. **Fig. 18.**

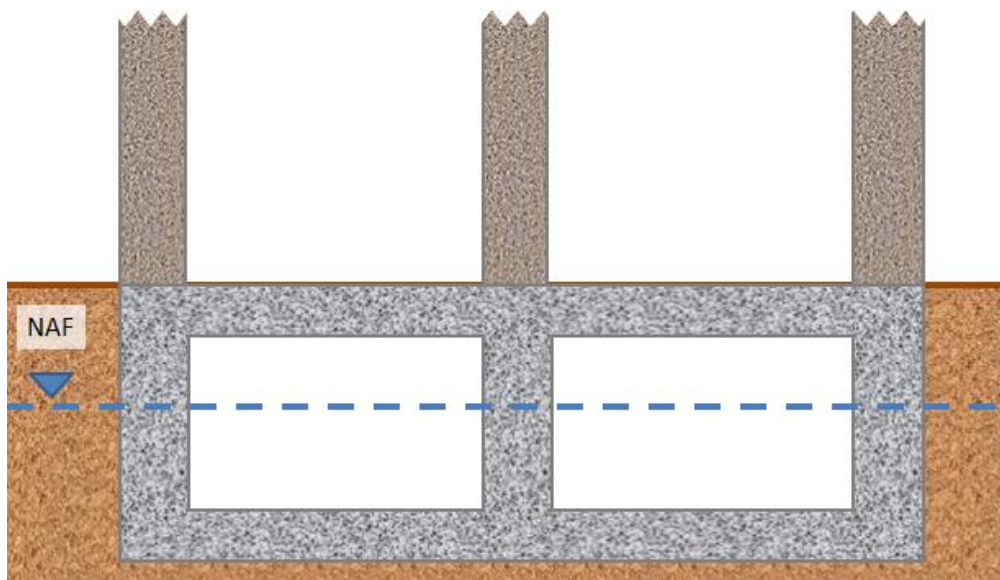


FIGURA 18. CAJONES DE CIMENTACIÓN. MARTÍNEZ OVIEDO.

d) Cajones y Pilotes de Fricción. Se utilizan principalmente en estructuras de cinco a doce pisos, un enorme número de este tipo de estructuras utilizan este tipo de cimentación. Los criterios para diseñarlos difieren dependiendo de las deformaciones permisibles y, consecuentemente, de la función tanto de los pilotes como del cajón. En los detalles de diseño hay todas las soluciones posibles, desde casos desde con un escaso número de pilotes a otros con un número excesivo de ellos (*Santoyo, 2005*). En las normas técnicas complementarias para el diseño de cimentaciones del reglamento de construcciones de 1957 privaba un criterio conservador pero conducían a un número indefinido de pilotes. En las de 1972 se permitía un número audaz de pilotes, porque desatinadamente se aceptaba la combinación de capacidades de carga de la losa y los pilotes siendo que las deformaciones de ambos elementos son incompatibles. Las cimentaciones así diseñadas fueron las que más fallaron durante los sismos de 1985 y quedaron tan desprestigiadas que muchos se referían a ellas como cimentaciones con pilotes "de ficción". Las normas técnicas del reglamento de emergencia de 1985 reflejaron las incertidumbres respecto al comportamiento de los pilotes de fricción que privaban después de la catástrofe y, consecuentemente, resultaron ser demasiado conservadores pues condujeron a un excesivo número de pilotes. Las normas de 1990 conllevan a un número racional de pilotes. Estos pilotes ha recuperado su credibilidad y se han vuelto a utilizar con frecuencia, una que queda pendiente optimizar sus dimensiones. **Fig. 19.**

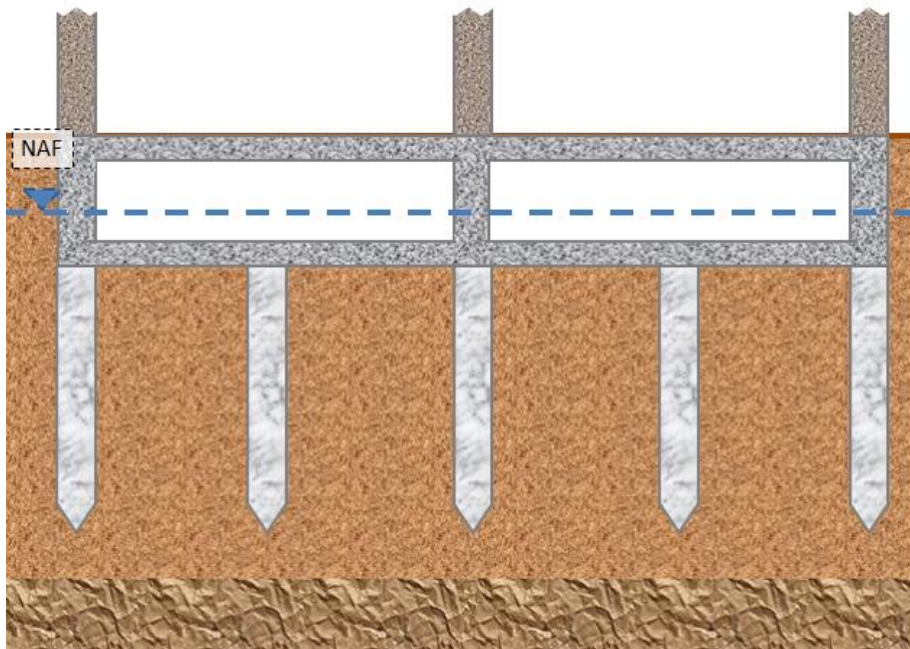


FIGURA 19. CAJONES Y PILOTES DE FRICCIÓN. MARTÍNEZ OVIEDO.

e) Pilotes de Punta. Usualmente se empleaban para cimentar estructuras de más de once pisos. Entre 1900 y 1950 se construyeron muchos edificios cimentados en pilotes de madera, casi todos apoyados sobre la capa dura. A partir de 1945 los pilotes de punta se apoyaban en la capa dura, posteriormente en los años 60's, edificios de más de doce niveles fueron desplantados con pilotes apoyados desde los depósitos profundos (Santoyo, 2005). Muchos edificios cimentados con pilotes de punta a la capa dura tuvieron muchos problemas durante los sismos de 1985, porque su periodo de vibración coincidió con el del sismo, principalmente en edificios de 8 a 14 niveles. La mayor incertidumbre que se tiene en los pilotes de punta se tiene con la aparición del fenómeno de fricción negativa, el cual consiste en que el suelo en proceso de consolidación provocado al bombeo regional, se adhiere a fuste del pilote y lo arrastra hacia abajo, lo cual produce la disminución de la capacidad efectiva del pilote. De acuerdo con algunos criterios de análisis, resulta drástica esta reducción y según otros criterios es menor. Las dudas al respecto solo pueden aclararse experimentalmente. **Fig. 20.**

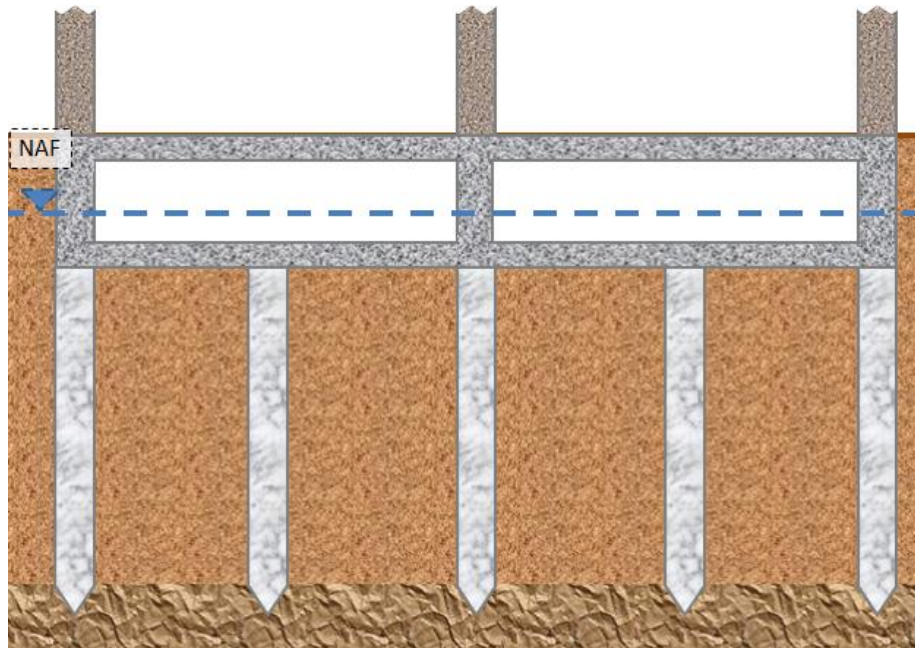


FIGURA 20. CAJONES Y PILOTES DE PUNTA. MARTÍNEZ OVIEDO.

f) Pilotes de control. Esta ingeniosa solución del Ing. Manuel González Flores corrige el problema de los edificios sobre pilotes de punta que se están quedando a desnivel con respecto al nivel del suelo que los rodea, porque facilita el descenso de las estructuras para mantener el contacto de la losa de desplante con el suelo al operar los mecanismos de control instalados en las cabezas de los pilotes, los cuales atraviesan libremente la losa de cimentación. Esta solución tiene dos importantes errores de origen:

1) el puente estructural de apoyo del pilote con la losa del edificio, tiene excesiva libertad de grado horizontal perpendicular al sentido del marco, esta situación provoca que al presentarse un sismo, las cabezas de los pilotes se botan de la estructura del control al no haber ninguna liga estructural que lo impida.

2) los aceros empleados en la estructura de control están casi siempre mal protegidos ante la corrosión de sótanos húmedos.

3) La estructura de control requiere de un mantenimiento cada cierto tiempo muy estricto, esto para ajustar el mecanismo que permite la penetración de la cabeza del pilote a la estructura y el recorte periódico de la misma cuando la carrera del marco ya es insuficiente, dado que en México el mantenimiento es casi nulo en edificaciones, esto provoca que el objetivo de la de este tipo de cimentación se anule.

Estos defectos se sumaron en 1985 y dañaron a un buen número de edificios y centrales telefónicas donde se usaron de manera común. **Fig. 21.**

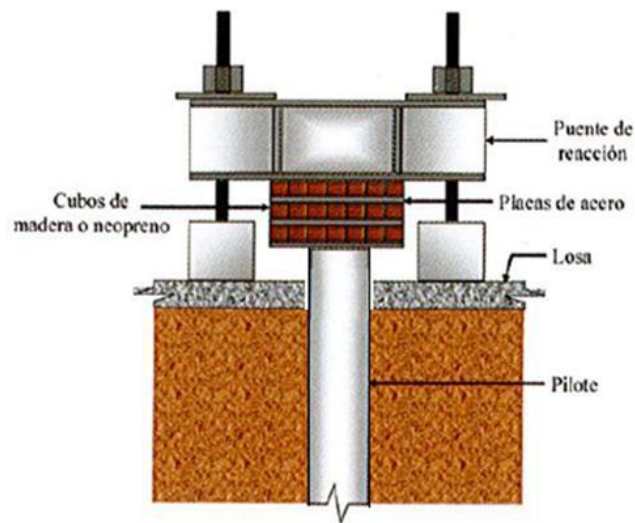


FIGURA 21. PILOTES DE CONTROL. GONZÁLEZ FLORES.

g) Pilotes de Punta penetrante. Fueron inventados por el Dr. Daniel Reséndiz, el fuste de estos pilotes tiene un diámetro reducido en la punta y cerca de ella, suele ser un tubo de acero de 2.00 a 4.00 de longitud y de 10 a 20 cm de diámetro con una punta cónica de 60°. Teóricamente, la punta de estos pilotes se diseña al límite para lograr que penetren en la capa dura y así, a diferencia de los pilotes de punta convencional, aprovechar la capacidad de fricción positiva que se desarrolla en el fuste de sección reducida. Sin embargo, esta optimización está limitada por la dificultad de determinar con precisión la resistencia última al corte de la capa dura y su variación en el área del edificio (Santoyo, 2005). El resultado es un diseño que puede ser incierto y que ha dado por resultado el abandono de este sistema. Varios de los pocos edificios que fueron construidos así, sufrieron graves problemas durante los sismos de 1985 lo cual justifica que se deba vigilar el comportamiento de todos los edificios así cimentados. **Fig. 22.**

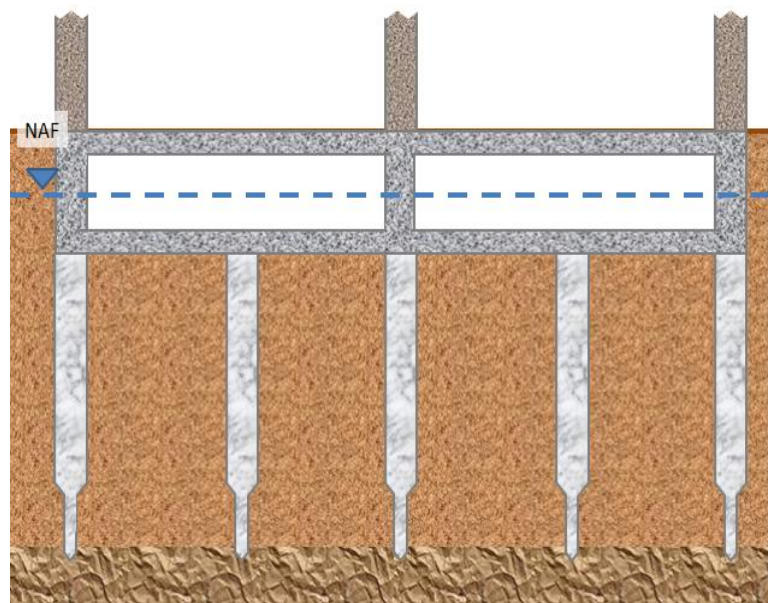


FIGURA 22. PILOTES DE PUNTA PENETRANTE, MARTÍNEZ OVIEDO.

h) Pilotes entrelazados. Este tipo de cimentación ha sido desarrollada por el Dr. Pablo Girault, quien los ideó y más los ha impulsado, este sistema se basa en el uso de pilotes de dos tipos. Los del primer tipo o "A", están ligados estructuralmente a la losa de cimentación y funcionan como pilotes convencionales de fricción positiva, mientras que los segundos, o tipo "B", se apoyan en un estrato duro y toman los arrastres producidos por la fricción negativa a través del fuste (Santoyo, 2005). **Fig. 23.**

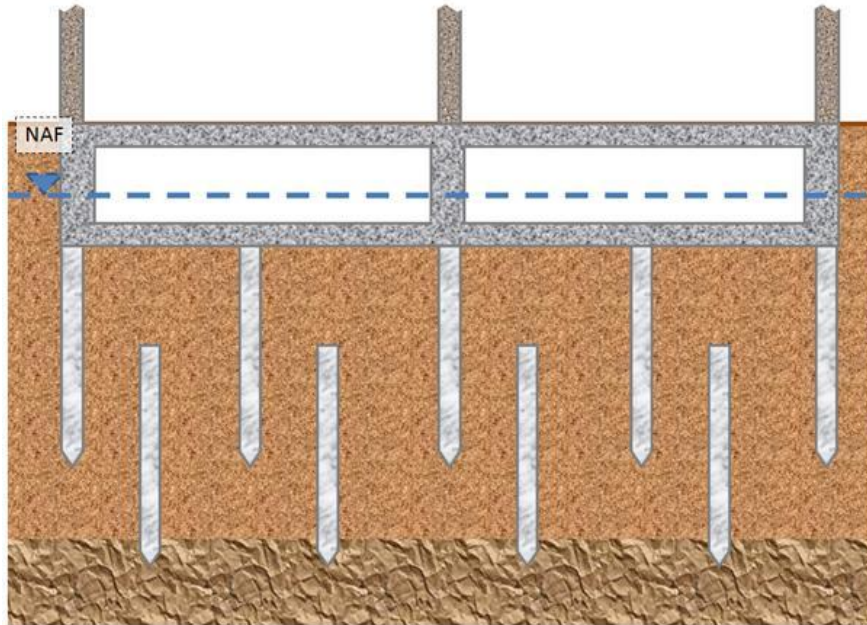


FIGURA 23. PILOTES ENTRELAZADOS, MARTÍNEZ OVIEDO.

i) Pilotes con funda. Estos pilotes han sido utilizados para eliminar la fricción negativa que reduce la eficiencia de los pilotes de punta; se les puede describir como pilotes de concreto octogonales con una funda de neopreno y coples aislados de acero; entre la funda y el concreto se aplica una capa de grasa mineral. Esta solución es más confiable que la tradicional de recubrir la superficie de los pilotes de punta con una capa de asfalto, porque este material envejece sobre todo en presencia de agua (Santoyo, 2005). **Fig. 24.**

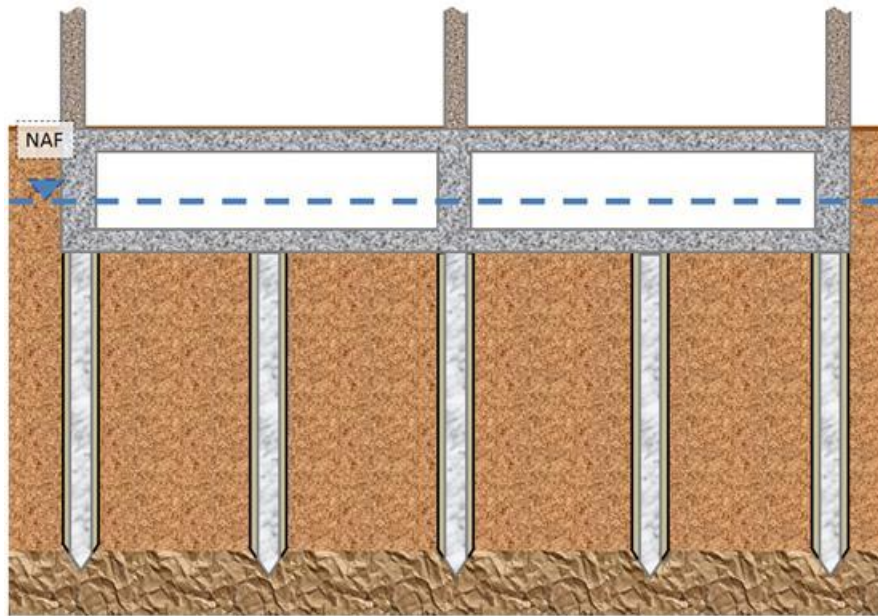


FIGURA 24. PILOTES CON FUNDA. MARTÍNEZ OVIEDO.

j) Inclusiones. Las Inclusiones se pueden definir como pilotes de diámetro reducido que se han empleado predominantemente en cimentaciones, estos tienen como principales características de no estar armados con acero de refuerzo, su procedimiento constructivo consiste en realizar un barreno de diámetro mínimo estabilizado con lodos bentónicos y colar el mismo con una mezcla de mortero, no están ligados estructuralmente a la estructura de cimentación original, ya sea losa, cajón o zapatas. Su objetivo es mejorar el suelo bajo las cimentaciones existentes y evitar los hundimientos diferenciales.

Fig. 25.

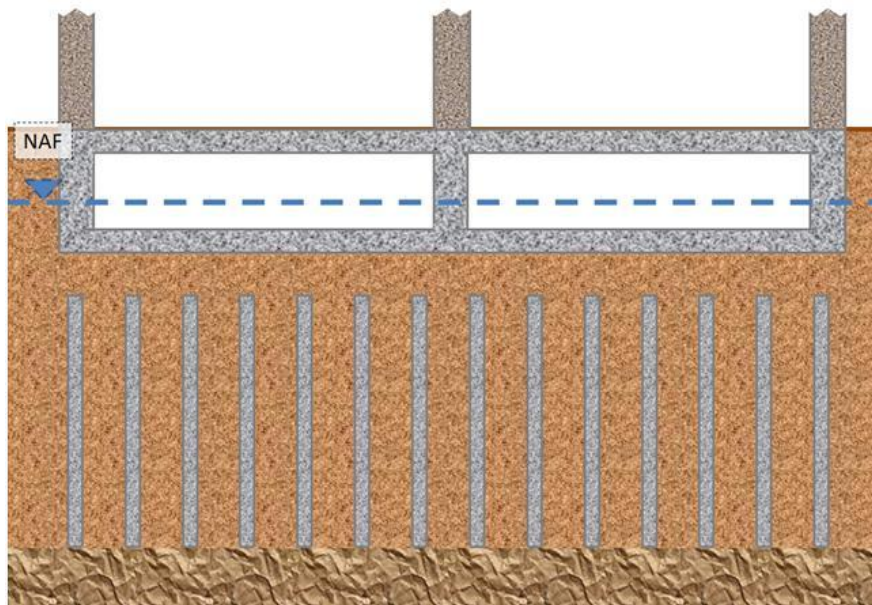


FIGURA 25. INCLUSIONES. MARTÍNEZ OVIEDO.

k) Pilas de Agregado Compactado. Este sistema desarrollado por Geopier en 1989 como una solución económica de cimentación intermedia para el apoyo de estructuras proclives al asentamiento, utiliza pilas de agregado (grava) apisonado para reforzar diferentes tipos de suelos, incluidos arcillas y limos de consistencia blanda a rígida, arena suelta a densa, limo orgánico, turba y relleno variable colocado sin control. El proceso único de instalación utiliza el pre-barrenado y la energía de apisonamiento por impacto vertical para construir las pilas. Este proceso constructivo resulta en elementos con una alta resistencia y rigidez, lo cual permite un control de asentamientos, y un aumento en la capacidad de carga. **Fig. 26.**

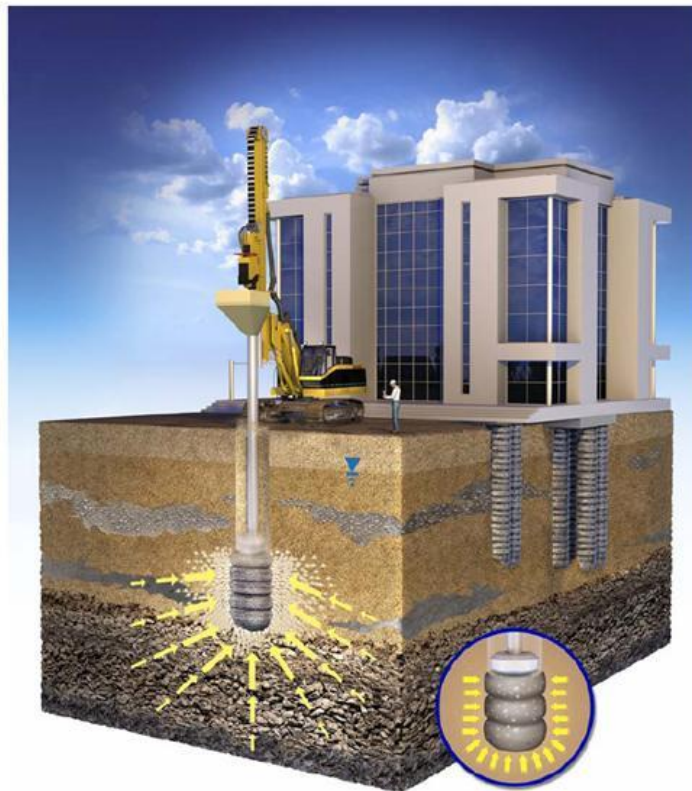


FIGURA 26. PILAS DE AGREGADO COMPACTADO. GEOPIER.

3. CIMENTACIONES EN LA ÉPOCA PREHISPÁNICA.

3.1. GRAN MÉXICO – TENOCHTITLÁN.

Al instalarse los Mexicas en el Valle de México, previo acuerdo concertado con los reyes de Texcoco, Coyoacán y Azcapotzalco, ocuparon el área inundable del lago; podían, además, tener acceso a tierra firme por caminos bien definidos hacia canteras y bosques como fuente de materiales para la construcción. Después de un lapso en que las edificaciones eran ligeras y adaptadas al ambiente lacustre, fueron los Mexicas creando zonas libres de inundación mediante rellenos artificiales, principalmente constituidos por fragmentos de roca, grava y arenas (Matos, 1996). Debido a la baja resistencia de los suelos en el fondo del lago, tuvieron que recurrir al uso de enramadas entre capas del relleno, esto como una versión antigua de la tierra armada, con objeto de evitar su penetración y la falla local del terreno. De este modo a través de la consolidación de las arcillas lacustres, fueron construyendo una extensa plataforma que cubrió toda el área ocupada por la antigua capital de los Mexicas, Tenochtitlán. De acuerdo a exploraciones recientes, los espesores del relleno variaron de 2.00 a 10.00 m, con máximos en la zona ocupada por el centro religioso, aproximadamente localizado en lo que ahora es el Zócalo de la Ciudad de México. La urbe Mexica se extendía hacia el Poniente ocupando los terrenos de la actual zona de Tlatelolco, donde quedó emplazada la hoy denominada Plaza de las Tres Culturas. Los límites de esta zona de la Ciudad, sobrecargada fuertemente por los rellenos arqueológicos, no son bien conocidos; por ejemplo, se sabe que uno de los accesos principales a la sede del centro ceremonial coincide con la calle de Tacuba; este camino fue construido también previo relleno del fondo lacustre, y por tal razón era a principios del siglo XX una franja hundida sobre la que el Ing. Roberto Gayol localizó el colector central de la ciudad.

Aun con estos métodos de cimentación adoptados por los Mexicas, el gran peso de los materiales empleados para la construcción de los templos del centro ceremonial, provocaban que cada gobernante de la ciudad desde la fundación de la misma, debía de renovar y agrandar los templos por motivos de pérdida de funcionalidad, estas remodelaciones eran beneficiadas por el constante crecimiento económico del imperio Mexica, así se borraban temporalmente los daños visibles provocados por los hundimientos diferenciales de gran magnitud que afectaban a sus edificaciones.

La profunda religiosidad de los mexicas los impulso a levantar sus notables templos de geometría piramidal, para los cuales adoptaron dos modelos estructurales. Unos eran unos simples montículos de adobes de lodo, otros tenían en su interior una retícula de muros de piedra, que confinaban a los rellenos de arcilla compactada. En ambos casos las caras externas que recurrían con piedras para dar la forma arquitectónica, las piedras se unían con excelentes morteros de cal y arenas puzolánicas, finalmente el exterior del templo lo cubrían con estuco decorado con murales policromos.

El recinto principal de Tenochtitlán estaba rodeado por un terraplén-muralla llamado "Coatepantli" que tenía unos 3.0 m de altura y 500 por 550 m en planta. En su interior hubo por lo menos cinco grandes templos, el más importante fue el dedicado a Huitzilopochtli y Tláloc, llegó a tener en la base 100 m por 80 m y posiblemente 36 m de altura. A esta

estructura hoy se le conoce como el Templo Mayor, de su exploración se sabe que tiene 7 etapas constructivas superpuestas, consecuencia de la tradición mexicana de construir nuevos templos sobre plataformas de relleno y montarlos a los que ya existían cubriendo la etapa más reciente a la última construida, colocando un relleno de arena y material orgánico. **Fig. 27.**

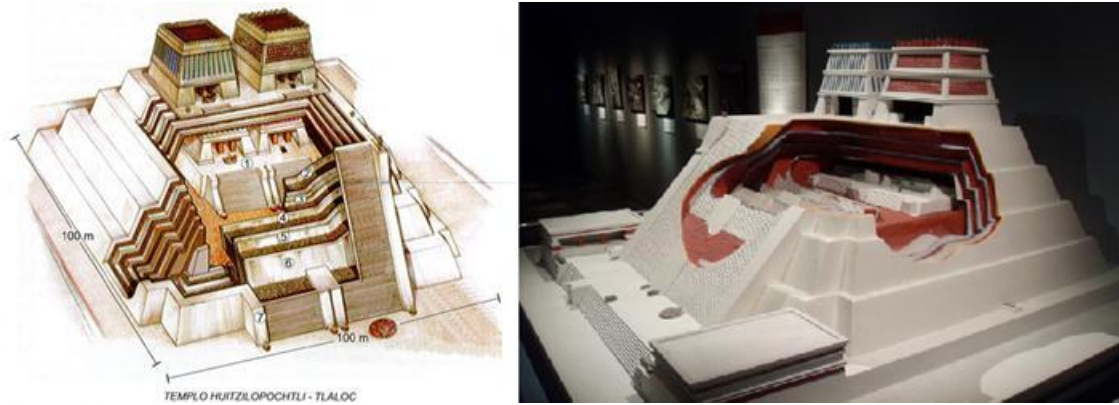


FIGURA 27. TEMPLO MAYOR. MUSEO DEL TEMPLO MAYOR.

Se podría especular que la deformación por la consolidación de las arcillas obligo a los Mexicas a reforzar sus construcciones mediante los muros mencionados, aun así, los asentamientos afectaban su geometría y funcionalidad. Así a la tradición religiosa de engrandecer los templos cada 52 años, se unió la necesidad práctica de repararlos.

Las exploraciones del Templo Mayor han permitido observar las estacas de cimentación que se usaron para eliminar la deformabilidad del fango del lago. De unos 3 m de longitud las estacas transmitían las cargas de la estructura a la costra superficial que subyace al fango del lago(Ovando, 1998).

La construcción de templos Mexicas fue posible en virtud de que se trató de un proceso gradual, en el que la arcilla se consolidó bajo el peso del relleno inicial de la plataforma y de cada una de las siete etapas de carga; consecuentemente la resistencia al corte de la arcilla aumentó hasta ser capaz de sostener el peso final del Templo Mayor, de más de 50 ton/m². La suma de los hundimientos, verdadera penetración del relleno y estructuras en la arcilla, se estima en cerca de 15 m. **Fig. 28.**

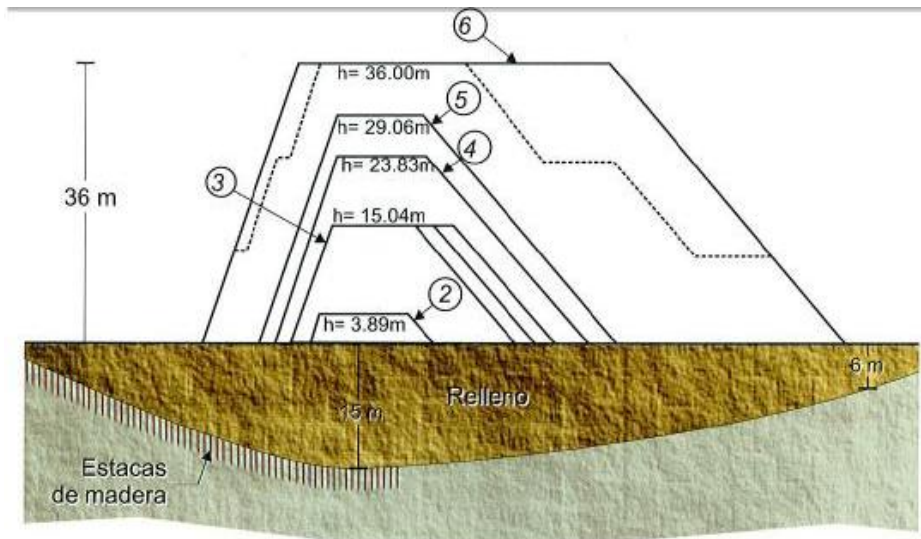


FIGURA 28. ETAPAS CONSTRUCTIVAS Y CIMENTACIÓN DEL TEMPLO MAYOR. LUIS MIGUEL ZÚÑIGA.

Cuando los Mexicas fundaron su ciudad, hacia el año de 1325, el área de la futura capital era poco prometedora para edificar una ciudad como la que llegó a existir, en la zona que ocupó centro ceremonial existían diversos islotes dispersos, los cuales fueron unidos entre sí, como ya se mencionó por diversos tipos de rellenos, sin embargo no existía tierra firme alguna en donde edificar vivienda y sembrar el alimento requerido para la población de la ciudad, esta problemática se resolvió con un sistema ingenioso de creación de plataformas de terreno ganado al agua llamado "chinampa".

Una chinampa (del chinamitl, seto o cerca de cañas) es un método mesoamericano antiguo de agricultura y expansión territorial que, a través de un armazón de troncos entrelazados y empotrados en el fondo lacustre, forman un perímetro el cual es relleno con suelo orgánico debidamente seleccionado, dicha plataforma es compactada y sembrada primeramente con árboles nativos que permiten, gracias a sus largas raíces, adquirir cierta estabilidad a la ya aportada por los troncos hincados, estas estructuras sirvieron de método para cultivar de forma extensiva maíz, flores, verduras y diversos productos agrícolas, para los Mexicas este método sirvió de manera perfecta, gracias a la poca profundidad del lago de México, para ampliar el territorio de la ciudad en la superficie de lagos y lagunas del valle; haciendo a México-Tenochtitlán una ciudad floreciente de forma tal que la ciudad podía crecer de forma planeada en torno al gran centro ceremonial.

Las chinampas, en ocasiones de considerables dimensiones, fueron ampliando el área de la ciudad, estas plataformas eran separadas unas de otras por una retícula bien definida de canales navegables que permitieron un flujo eficiente de personas y mercancías a través de la ciudad, además se construyó un sistema importante de puentes retractiles de madera que permitían conectar la ciudad en forma terrestre.

El sistema de chinampas es una técnica iniciada en época de los toltecas, aunque su máximo desarrollo se consiguió en el siglo XVI, gracias al perfeccionamiento mexica. Hacia 1519, esta técnica, por ejemplo, también ocupaba casi todo el lago de Xochimilco, y su

combinación con otras técnicas como la irrigación por canales y la construcción de bancales, permitió sustentar una población muy densa. **Fig. 29 y 30.**

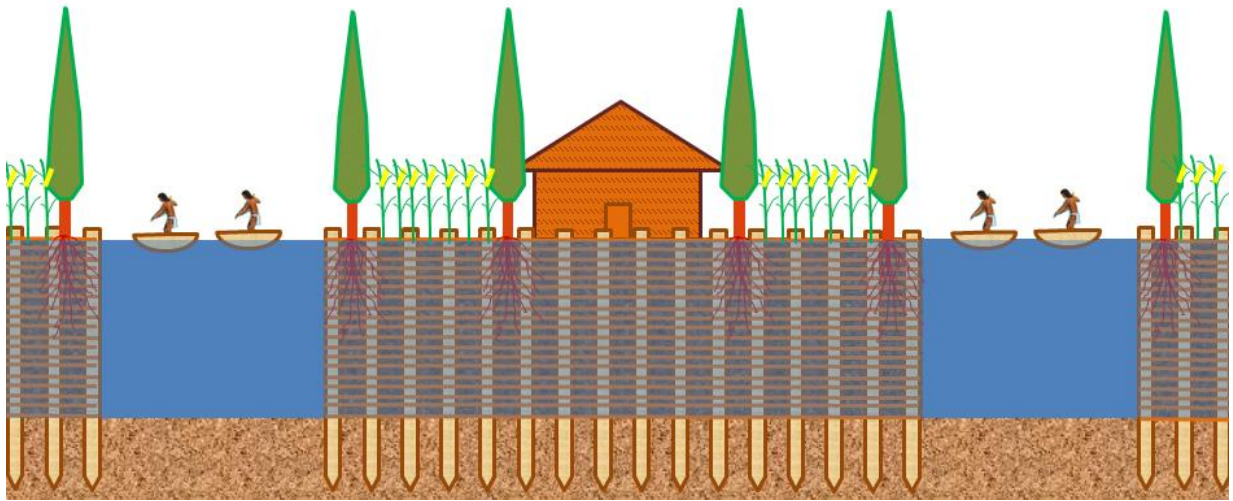


FIGURA 29. CIMENTACIÓN DE CHINAMPAS EN EL LAGO DE TEXCOCO Y XOCHIMILCO. MARTÍNEZ OVIEDO.

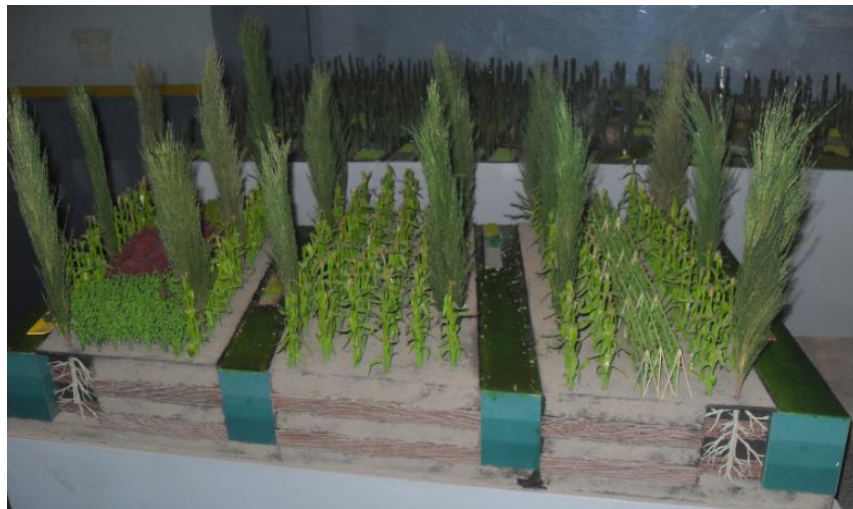


FIGURA 30. SISTEMA DE AGRICULTURA INTENSIVA A TRAVÉS DE CHINAMPAS. MUSEO DEL TEMPLO MAYOR.

Las chinampas también permitieron el asentamiento humano para vivienda, por lo regular una chinampa era ocupada por una familia, la cual construía su vivienda típica mesoamericana en forma de chozas de madera, y el resto del área ocupada era destinada a la agricultura, la cual debía preservar y dar mantenimiento.

4. CIMENTACIONES EN LA ÉPOCA COLONIAL.

La ciudad colonial se fundó sobre los restos de la ciudad Mexica. Las construcciones más importantes fueron los grandes templos cristianos, que como regla general se construyeron sobre los terrenos previamente ocupados por los templos prehispánicos, que fueron demolidos y en varios casos aprovechados como cimientos. También fue usual que los materiales recuperados fueran aplicados en las nuevas construcciones. En este periodo las inundaciones causaron severos daños. Dos de las más interesantes estructuras coloniales, desde el punto de vista geotécnico, son el templo de san Agustín y la Catedral Metropolitana, ambas concebidas por el alarife Claudio de Arciniega, con ingeniosas cimentaciones.

4.1. TEMPLO DE SAN AGUSTÍN.

San Agustín fue un convento de grandes dimensiones, cuya construcción comenzó probablemente en el año de 1540, localizado en una zona pantanosa donde se presume existió un cementerio Mexica y se desconoce si hubo algún templo. En la actualidad sólo queda la nave principal, la capilla anexa y la sacristía, las dos primeras se transformaron en 1884 en la biblioteca nacional. **Fig. 31.**



FIGURA 31. TEMPLO DE SAN AGUSTÍN, ADAPTADO COMO BIBLIOTECA NACIONAL, UNAM.

La cimentación del templo está constituida por una retícula de traveses de mampostería aligeradas con arcos, sobre estacas de madera. **Fig.32.** Las de menor dimensión se ubican en el eje longitudinal y bajo la nave central tienen arcos muy rebajados que unen las

pilastras. La retícula de arcos de cimentación tiene una altura que varía de 3.0 m en la parte nororiental a 4.0 m en la parte sur poniente. Los muros que cierran las capillas laterales funcionan como contrafuertes interiores y se apoyan sobre "zapatas" de mampostería, al igual que los muros perimetrales (Ovando, 1998). Las crónicas mencionan que el templo sufrió desplomos y un incendio, lo que obligó a su reconstrucción, la geometría de la cimentación permite inferir que también se recimentó.

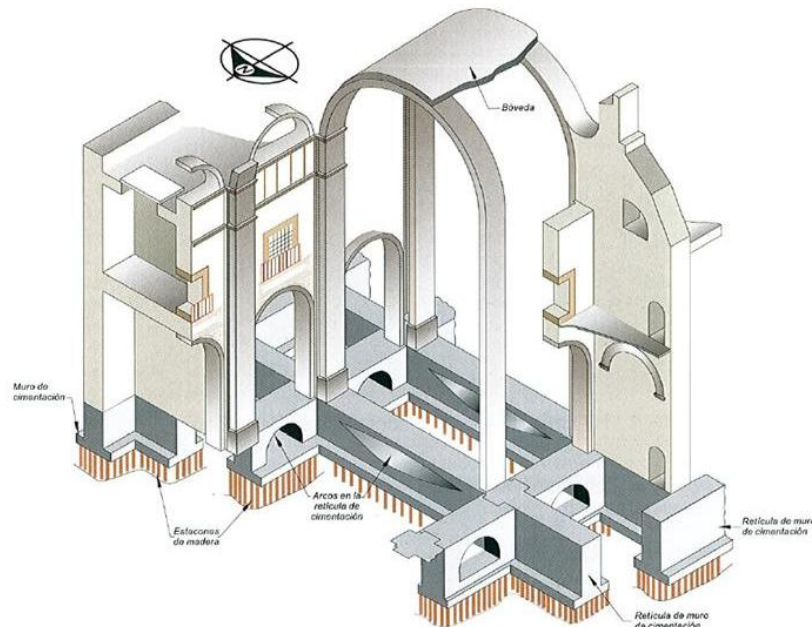


FIGURA 32. CIMENTACIÓN DEL TEMPLO DE SAN AGUSTÍN. SANTOYO VILLA.

Este edificio tiene una serie de deformaciones que se han presentado a lo largo de su vida que se presentan principalmente en las pilastras del templo de 17.5 m de altura, en la dirección norte-sur varían del 0.2 al 2.0 % y en la dirección este-oeste 3.0 al 5.4%. Por su parte, el centro de la cúpula está desplazado del centro de pilastras 1.31 m hacia el poniente y 0.31 m hacia el sur, equivalente a un desplomo del 3.4%; por lo que respecta al centro de la cúpula de la capilla ha tenido un movimiento de 0.85 m hacia el poniente y de 0.20 m hacia el sur, equivalente al 3.3 % del desplomo.

Dadas estas circunstancias, se decidió instrumentar la estructura del templo con el objetivo de monitorear la velocidad de asentamiento de la cimentación, se obtuvieron las velocidades de asentamiento diferencial, teniendo las menores al oriente del Templo y crecen hacia el poniente, hasta alcanzar en la esquina sur poniente de la capilla una velocidad del orden de 14.7 mm/año. En la **figura 33**, se muestran los hundimientos diferenciales acumulados y se anotan las velocidades de deformación anual, consecuentes del hundimiento regional registrado en el sitio de 10 cm/año.

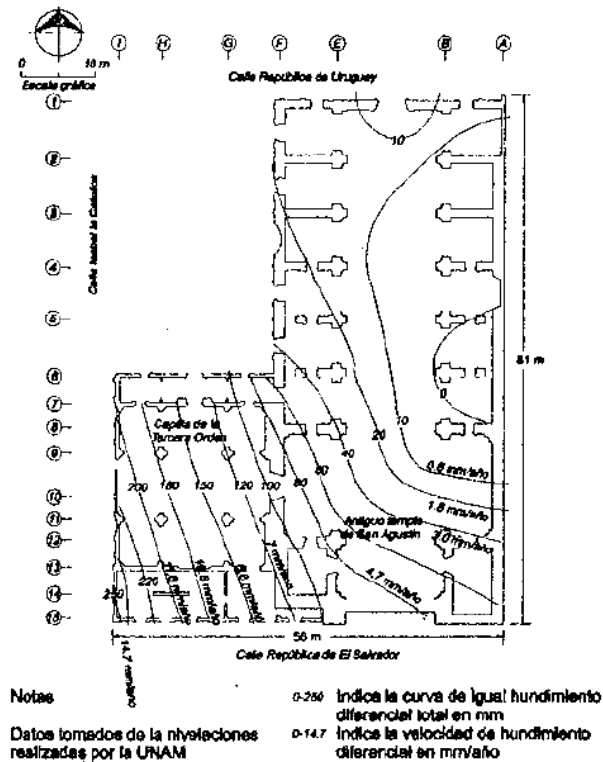


FIGURA 33. CURVAS DE IGUAL VELOCIDAD DE HUNDIMIENTO DIFERENCIAL EN MM/AÑO PARA EL PERIODO 1975 A 1978, INVESTIGACIÓN UNAM.

Con este monitoreo se ha pronosticado que debido a la disminución de la presión piezométrica futura, permite afirmar que el muro oriente del Templo descenderá en promedio 0.6 m, mientras que el muro poniente de la capilla lo hará a razón de 1.6 m. Por su parte, el extremo norponiente del jardín se asentará del orden de 2.0 m.

Estos asentamientos provocarán incrementos en los desplomos de las pilastras a valores al 5.0 %, con el consecuente incremento de fisuras en la estructura y sobre todo la disminución de la seguridad del edificio, por ello se hace necesario adoptar alguna acción que al menos reduzca la magnitud de estas intolerables deformaciones. Se han estudiado dos alternativas posibles, la instalación de 240 pilotes de control, y que se ha decidido por optar, que consiste de endurecer su subsuelo con un mejoramiento masivo. **Fig. 34.**



FIGURA 34. FACHADA DEL TEMPLO DE SAN AGUSTÍN. *MARTÍNEZ OVIEDO.*

4.2. CATEDRAL Y SAGRARIO METROPOLITANO.

La Catedral Metropolitana de la Ciudad de México se construyó sobre los restos del antiguo centro ceremonial Mexica, **Fig. 35 y 36**. Se trata de un templo de cinco naves: la central está limitada por 16 columnas y dividida por el coro en dos tramos; a sus lados corren las dos procesionales a lo largo del templo, entre las columnas y capillas; finalmente, la nave de capillas está definida por los muros del perímetro y por gruesos muros perpendiculares. La gran cúpula central gravita en cuatro columnas. Las dos grandes torres alcanzan los 60 m de altura. Las dimensiones generales del templo son: 60.6 m de ancho y 122.26 m de longitud, con un peso total de la estructura de 127,000 ton, teniendo una presión resultante de 17.2 ton/m².

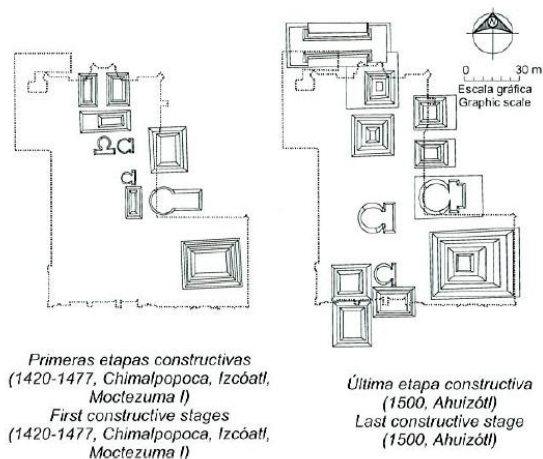


FIGURA 35. DISTRIBUCIÓN DE TEMPLOS PREHISPÁNICOS EN EL ÁREA DE LA CATEDRAL METROPOLITANA. *SANTOYO VILLA.*

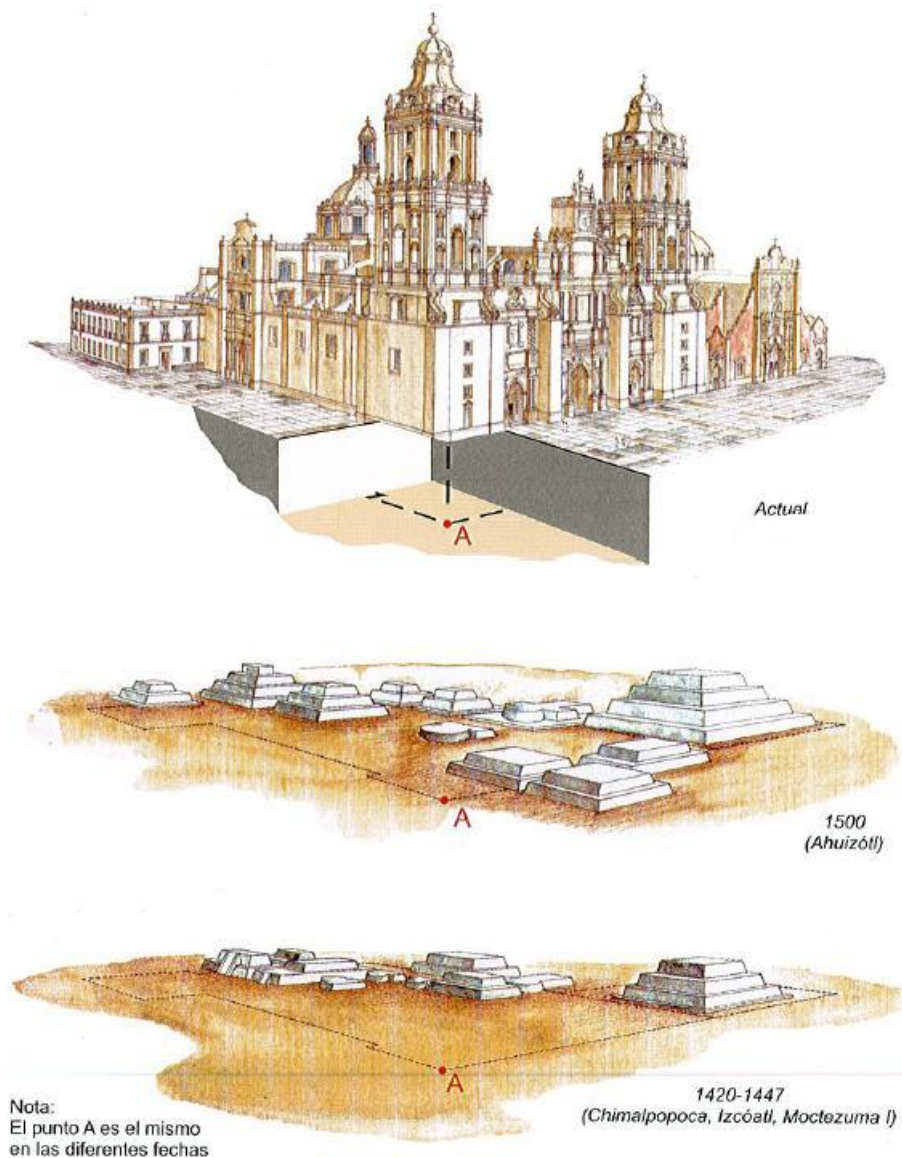


FIGURA 36. ISOMÉTRICO TOMANDO EN CUENTA EL PUNTO DE REFERENCIA "A" DE LA DISTRIBUCIÓN TEMPLOS PREHISPÁNICOS EN EL ÁREA DE LA CATEDRAL METROPOLITANA. SANTOYO VILLA.

Anexa a la estructura de la Catedral, se encuentra el Sagrario, el cual es un templo con planta de cruz griega, cuyos muros en las cuatro esquinas que soportan las bóvedas y constituyen el soporte de la bóveda principal; su cúpula descansa sobre las cuatro columnas centrales. Ocupa un área de 47.7 metros por lado, su peso es de aproximadamente 30,000 ton y una presión media transmitida al suelo de 13.2 ton/m². **Fig. 37.**

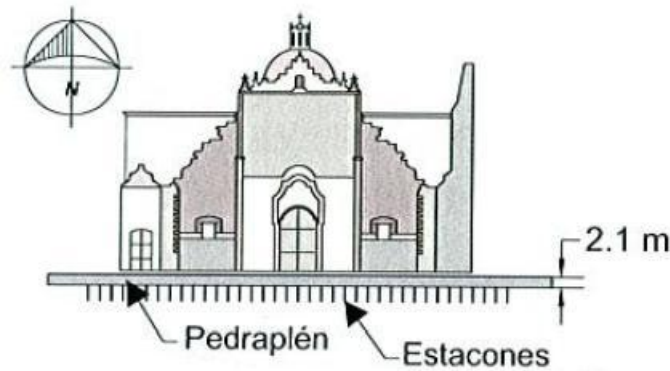


FIGURA 37. CIMENTACIÓN SAGRARIO METROPOLITANO. SANTOYO VILLA.

La información geológica, geotécnica e histórica del sitio permitió ratificar que la Catedral está sobre el islote original donde los Mexicas fundaron sus ciudad, el cual era sólo una pequeña elevación sobre el lago y que hubo, como ya se mencionó en la sección 2.2 del presente trabajo, un manantial en lo que hoy es el atrio poniente del templo. Gracias a una extenuante campaña de exploración hecha a partir de 1989 se puede decir que en la colindancia entre ambos templos el suelo presenta mayor resistencia ya que es el punto que ha recibido más carga de templos Mexicas, relleno arqueológico, del templo de Tonatiuh y de estas dos pesadas estructuras coloniales. En cambio, hacia ambos extremos del corte se observa que la resistencia se reduce casi a la mitad. Esta situación ha provocado que la parte sur de la Catedral se incline hacia el poniente y el Sagrario, hacia el oriente; este patrón de deformaciones explica las grietas históricas de lado poniente de la catedral y del lado oriente del Sagrario, en la **figura 38**, se muestra un corte estratigráfico que representa lo anterior.

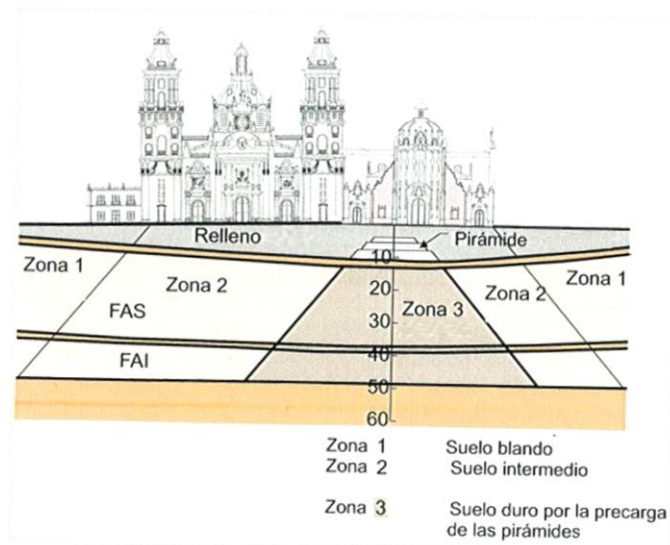


FIGURA 38. CORTE ESTRATIGRÁFICO PONIENTE-ORIENTE BAJO LA CATEDRAL Y SAGRARIO METROPOLITANOS. SANTOYO VILLA.

La construcción de la catedral inicio en 1573, partiendo del ábside, bajo la dirección del alarife Claudio de Arciniega, quien había participado también en las obras de la iglesia de

San Agustín, y por ello conocía los problemas del subsuelo, las bóvedas se concluyeron hacia 1667; la portada quedó terminada en 1675. Damián Ortiz de Castro finalizó las torres en 1792. Manuel Tolsá le dio perfil a la cúpula, vinculó todo el conjunto con balaustradas y pináculos que lo singularizan y completó la obra hacia 1813.

La superficie del terreno se reforzó mediante la hincada de 22,500 pilotes cortos de madera y encima de ellos se colocó una plataforma de mampostería que ocupa 140 m de largo y 70 m de ancho. Estas dimensiones son mayores que las que finalmente ocupó la Catedral pues originalmente se había concebido como un templo de siete naves y cuatro torres, una en cada esquina. El espesor de este pedraplén, que en promedio es de unos 90 cm, aumenta hacia el sur lo cual evidencia que los primeros constructores lo engrosaron en esta zona para compensar los hundimientos diferenciales que comenzaron a manifestarse desde las primeras etapas de su construcción. Sobre la plataforma se construyó una retícula de contratraves, también de mampostería, de 3.5 m de alto, 2.5 m de ancho y de hasta 127 m de largo (**Figura 39**). Esta retícula recibe a los muros, pilastras y columnas. El plano superior del pedraplén coincidía con el nivel de la plaza mayor y por encima de este punto, se levantaba la retícula de contratraves. La Catedral se elevó sobre ella, porque el alarife de Arciniega seguramente ya esperaba que se presentaran asentamientos de gran magnitud.

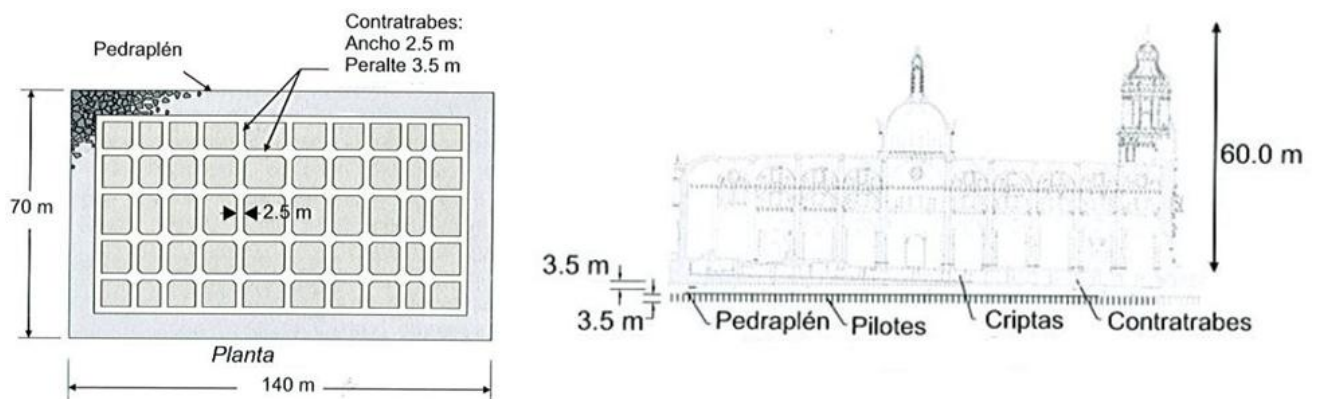
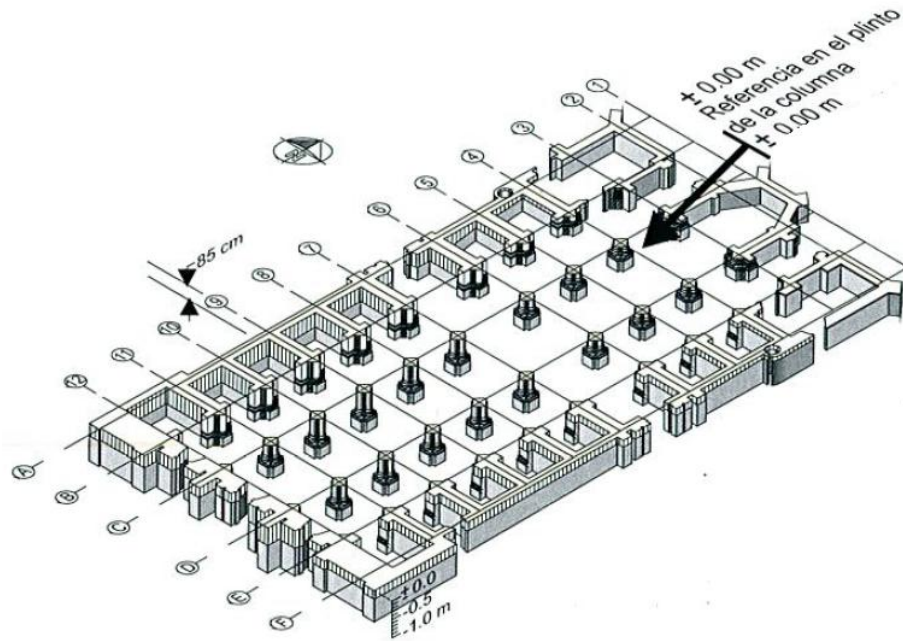


FIGURA 39. VISTA EN PLANTA Y CORTE, CIMENTACIÓN DE LA CATEDRAL METROPOLITANA. SANTOYO VILLA.

Alrededor de la Catedral se construyeron otros edificios religiosos. El más notable y como ya se mencionó es la iglesia del Sagrario, construida directamente sobre la pirámide al dios sol, Tonatiuh. Para la construcción de este edificio, Lorenzo Rodríguez utilizó el mismo método de cimentación que la Catedral Metropolitana, reforzando el suelo con estacones de madera pero de menor diámetro. Encima de ellos también se construyó un pedraplén de mampostería de baja calidad, (Santoyo, 1998). El Sagrario se llevó a cabo entre 1749 y 1768. Posteriormente se construyó al norponiente la Curia y Capilla de las Ánimas y muchos años después al nororiente se levantó el Seminario, demolido en 1938.

La compresibilidad diferencial de los estratos de arcilla del subsuelo, originada por la consolidación inducida por los templos y estructuras mexicanas preexistentes en el sitio, causó asentamientos diferenciales desde el principio de la construcción. Estas deformaciones

acarrearon desajuste estructural, el cual se compenso durante la construcción modificando la altura de las columnas y muros para nivelar el arranque de las bóvedas. Se recurrió también a artificios arquitectónicos para disimular el efecto visual de los asentamientos, como darle a las cornisas niveles variables y utilizar en las dos torres bloques de cantera que gradualmente disminuyen su espesor. El análisis de los detalles geométricos del monumento permitió demostrar que durante la construcción de la Catedral, antes de completarlas bóvedas, la columna denominada como C-9 acumuló un hundimiento diferencial máximo de 85 cm con respecto al plinto de la pilastra C-3, que limite el ábside de planta poligonal. **Fig. 40.**



**FIGURA 40. INCREMENTOS DE DIMENSIONES DE FUSTES Y MUROS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN.
SANTOYO VILLA.**

En 1968 se construyó, a 16 m de profundidad, el Colector semiprofundo 5 de Mayo, que corre a lo largo de la fachada sur del Templo. Este túnel de drenaje, de acuerdo a mediciones piezométricas hechas en la zona, drena parte del agua del subsuelo, sobre todo de la parte suroriente del Sagrario. También en 1968 se inició con la línea 2 del Metro, que funciona igualmente, como otro dren en los lados norte y oriente de los templos. **Fig. 41.**

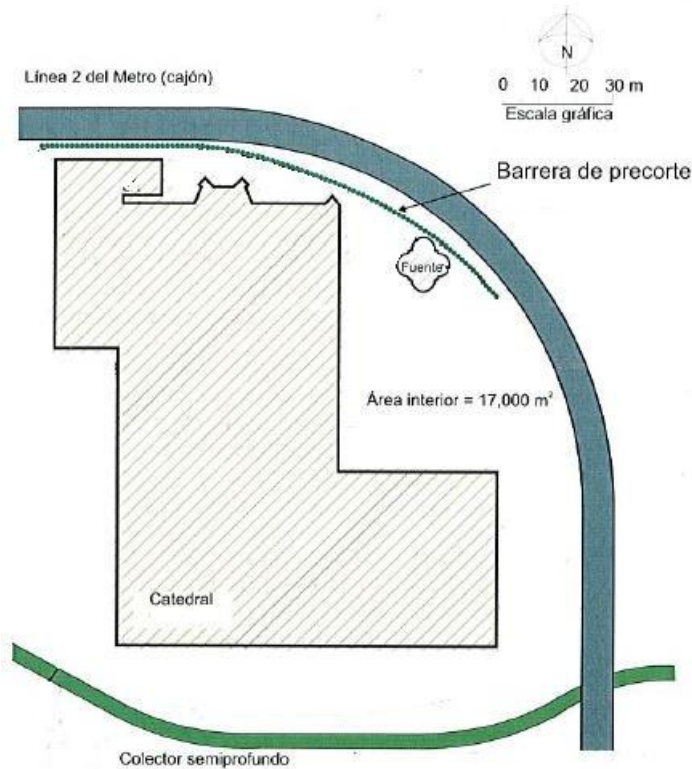


FIGURA 41. INFRAESTRUCTURA SUBTERRÁNEA CIRCUNDANTE A LA CATEDRAL. SANTOYO VILLA.

Con información de sondeos eléctricos se pudo definir la profundidad del contacto entre la costra natural y las arcillas blandas, superficie originalmente plana que, debido a la consolidación inducida por los templos prehispánicos, sufrió asentamientos en algunos puntos de hasta 10 m. Por eso, antes de la construcción de los templos coloniales, el sitio se niveló con rellenos para configurar un nuevo plano inicial (Ovando, 1998).. Pruebas de laboratorio hechas a muestras recuperadas del lugar (consolidación unidimensional) demostraron que las cargas aplicadas por algunas construcciones prehispánicas fueron en algunas eliminadas y en otras, incrementadas posteriormente por el peso de la Catedral y el Sagrario. Esta compleja historia de cargas dio origen a la heterogeneidad en las condiciones y propiedades del subsuelo que se detectó con ensayos de campo y laboratorio.

A partir la década de 1990, se han monitoreado las condiciones y niveles piezométricos a diferentes profundidades, los resultados de dicho monitoreo se muestran en la **figura 42**; se observa que entre 0 y 20 m de profundidad existe una tendencia hacia la hidroestaticidad que a partir de los 26.7 m comienza a registrarse pérdida de presión, del orden de 18 ton/m²; en la capa Dura a los 37.0 m, así como en los depósitos profundos a los 50.5 m el abatimiento es de 12 ton/m². En la misma figura se muestra dos predicciones de la posible condición piezométrica a largo plazo.

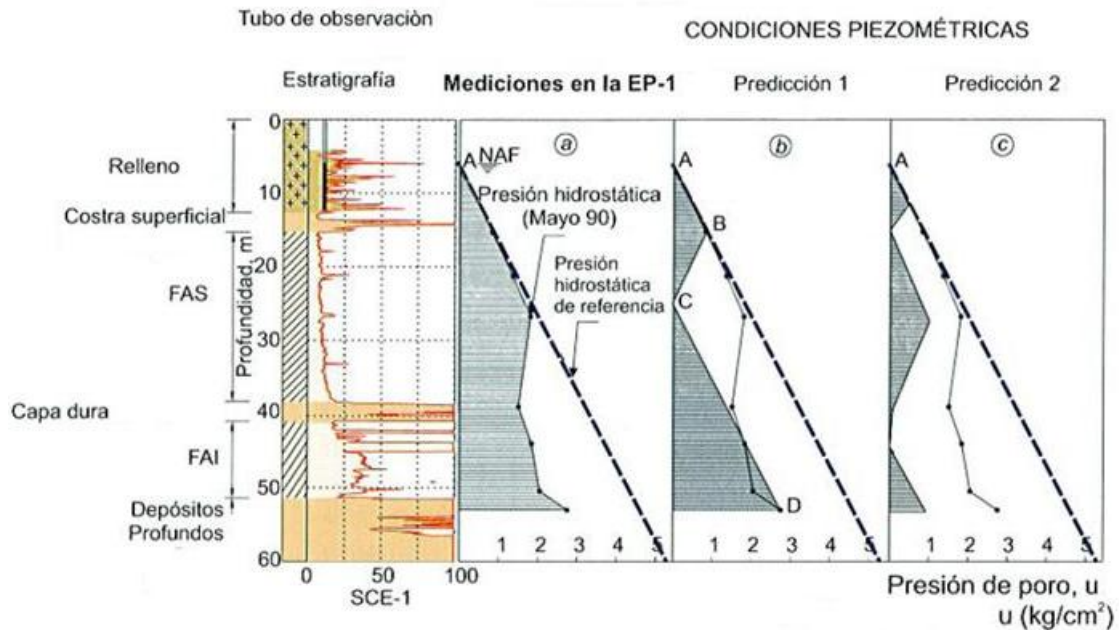


FIGURA 42. PREDICCIONES DEL COMPORTAMIENTO PIEZOMÉTRICO BAJO LA CATEDRAL. SANTOYO VILLA.

La configuración de los hundimientos diferenciales presentados se han acumulado desde 1573, en el inicio de la construcción, y hacia finales de 1989 se presentan del orden 2.40 m entre el ábside y la torre poniente. Los asentamientos medidos en los bancos de nivel profundos existentes en el atrio poniente de la Catedral han permitido definir la distribución en porcentaje de los principales estratos compresibles: la formación Arcillosa Superior aporta el 54%, la Inferior el 15% y las Arcillas Limosas profundas el 31%.

Actualmente se han hecho múltiples trabajos que han tratado de corregir los efectos de estos asentamientos diferenciales en estos monumentos, entre los que se destaca la subexcavación. Esta técnica tiene como objetivo corregir los desniveles y desplomos, haciendo descender las partes altas respecto a las bajas, mediante la extracción lenta y prolongada del suelo en que se apoya la cimentación. Esto se logra haciendo perforaciones radiales de pequeño diámetro, ejecutadas desde las treinta lumbreras que permiten el acceso a la frontera superior de la formación Arcillosa Superior, ubicadas a profundidades de 15 a 22 m. El volumen del suelo extraído fue de 4,220 m³. **Fig. 43.**

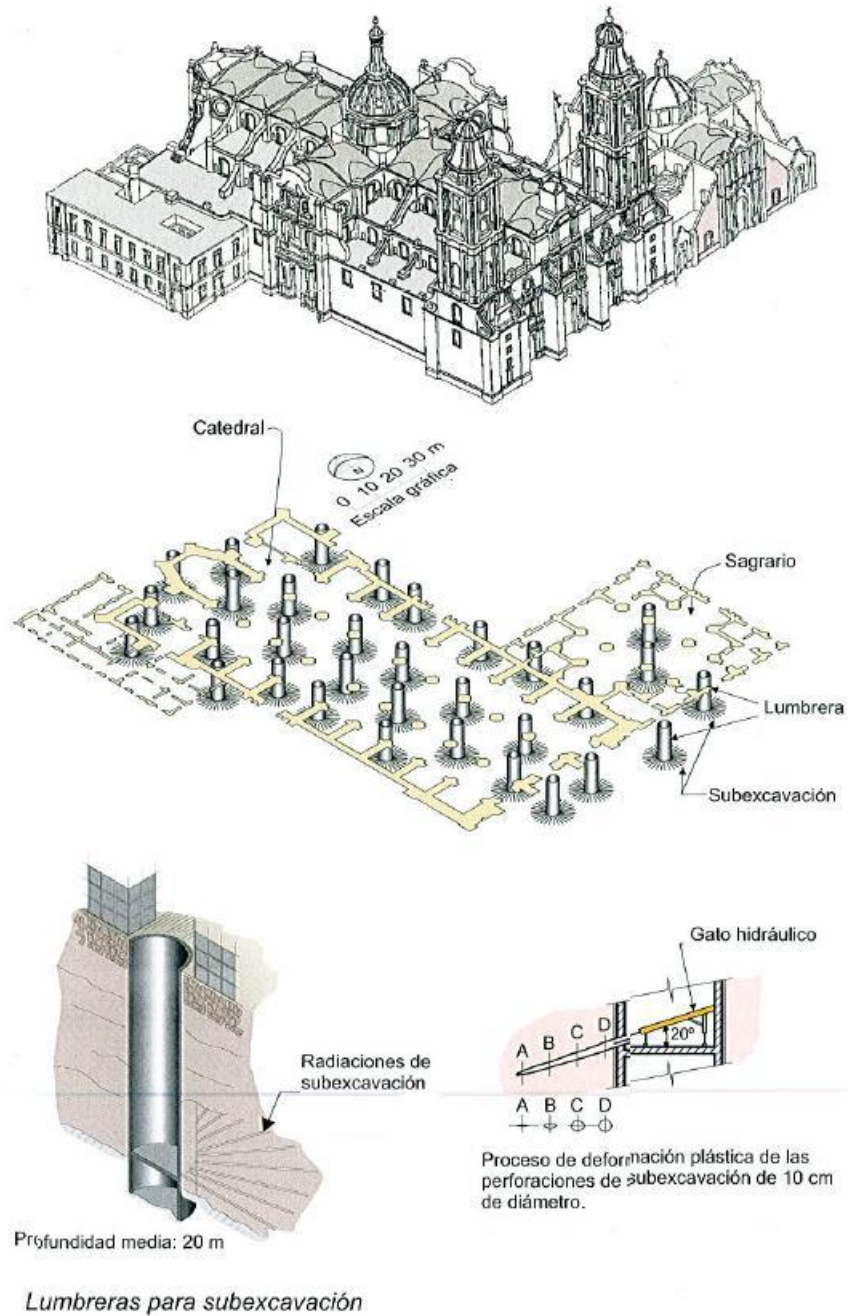


FIGURA 43. SISTEMA DE LUMBRERAS PARA SUBEXCAVACIÓN BAJO EL TEMPLO. SANTOYO VILLA.

Las correcciones logradas con la subexcavación después de casi cuatro y medio años de su inicio permitieron alcanzar las metas estructurales propuestas. Al detenerse la extracción de suelo, el hundimiento regional reanudará la generación de hundimientos diferenciales nocivos. Originalmente se había considerado que la subexcavación debería utilizarse periódicamente para reducir los nuevos hundimientos que aparecieran después de más de 25 años. **Fig. 44.**



FIGURA 44. CATEDRAL Y SAGRARIO METROPOLITANO 2012. MARTÍNEZ OVIEDO.

5. CIMENTACIONES A MEDIADOS DEL SIGLO XIX A PRINCIPIOS DEL SIGLO XX.

Entre 1840 y 1880 la construcción de edificios fue muy limitada, sin embargo, es el periodo donde se inicia el diseño racional de las cimentaciones con el liderazgo de los Arquitectos Lorenzo de la Hidalga y Javier Cavalari así como del Ing. Gonzalo Garita (*Katsman, 1993*). Los tres comprendieron que una carga de 5 ton/m² era la capacidad máxima del subsuelo de la ciudad e impulsaron soluciones de cimentación mediante losas que ampliaran el área de contacto y por ende la capacidad de carga aumenta y al mismo tiempo reducir los esfuerzos a valores tolerables.

El Arq. Lorenzo de la Hidalga fue un activo constructor de origen español que en 1843 levanto en la calle de Bolívar el teatro Santa Anna y que después cambio de nombre a Teatro Nacional. La cimentación consistió en una ingeniosa capa de arena que sustituyo la parte superior del sub suelo y que colocó en áreas reducidas confinadas con madera, basó su diseño en el ángulo de distribución de los esfuerzos y por ello logro una ampliación en la distribución de la carga. En su tiempo fue muy discutida su solución, pero el edificio permaneció en buenas condiciones hasta que fue demolido 60 años después. Debe aclararse que el sitio estuvo previamente consolidado por el convento de los Betlemitas.

De la Hidalga diseño y construyó la cimentación piloteada o zócalo de la que iba a ser la columna de la independencia en la Plaza Mayor, por lo que después el nombre popular de dicha plaza cambio a Zócalo.

El Arq. Javier Cavalari vino de Italia en 1857 y permaneció en el país durante siete años para enseñar procedimientos de construcción en la Academia de San Carlos. Tuvo dos importantes contribuciones técnicas:

- a) Se empeñó en realizar nivelaciones topográficas para demostrar que la ciudad se hundía por consolidación del subsuelo.
- b) Divulgo el empleo de la mezcla terciada de cal viva, ladrillo triturado y tierra para la construcción de plataformas de cimentación, que incluso se podían fabricar bajo agua.

El Ing. Gonzalo Garita, fue un Ingeniero Militar que diseño importantes cimentaciones, entre ellas dos edificios comerciales del centro histórico, El Centro Mercantil y el Palacio de Hierro, para los cuales utilizo zapatas de mampostería con dalas de concreto reforzado con rieles de ferrocarril. La cimentación de la casa Boker, mediante una losa de concreto reforzado con perfiles de acero, fue un trabajo pionero en 1898 de lo que se conocía como el método de cimentación Chicago, (**figura 45**). Más tarde colaboró con el Arq. Adamo Boari en la cimentación del Edificio de Correos y el Teatro Nacional (Palacio de Bellas Artes), aunque su solución para el segundo fue rechazada por Boari. También colaboró por con el Arq. Rivas Mercado para diseñar la segunda cimentación del Monumento a la Independencia.

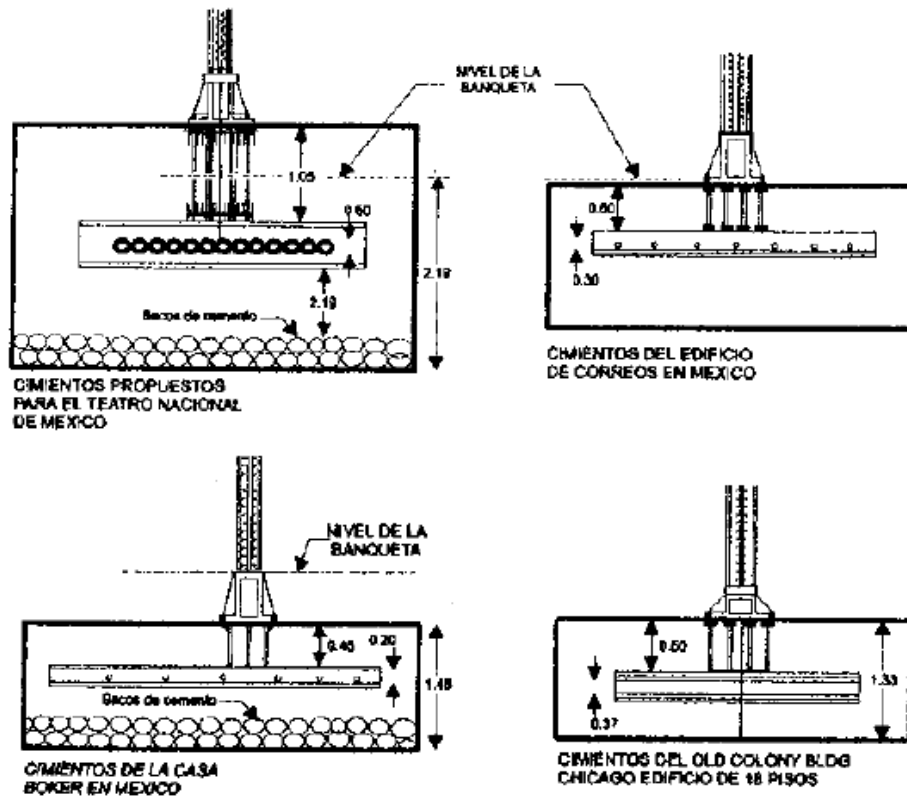


FIGURA 45. CIMENTACIÓN TIPO "STEEL GRILLAGE", ADAMO BOARI.

A finales del siglo XIX la ingeniería de cimentaciones tuvo fracasos, que terminaron por transformarse en importantes aportes técnicos. De los muchos interesantes casos de cimentación realizados desde finales del siglo XIX se describen dos casos que son particularmente ilustrativos: El Teatro Nacional, conocido ahora como Palacio de Bellas Artes y el del Monumento a la Independencia.

5.1. MONUMENTO A LA INDEPENDENCIA.

En 1899 se asignó al Arq. Antonio Rivas Mercado el diseño y dirección de la construcción de este monumento; la cimentación fue una losa de concreto reforzada con una doble parrilla de perfiles de acero, cuyas dimensiones fueron de 21 m por 21 m, posiblemente de 1.6 m de espesor. El conjunto cimentación-estructura pesaba 5,000 ton (con la aclaración que se le resto 60 ton, a fin de calcular el trabajo de flexión del concreto), lo que conduce a un esfuerzo en el contacto de casi de 10 ton/m², valor que duplicaba el esfuerzo que se consideraba máximo permisible en ese tiempo (Sánchez, 1990)

El trabajo de construcción de la cimentación y del pedestal se llevó a cabo entre Marzo de 1903 y Enero de 1906. Cuando la columna estaba casi a la mitad de su altura, 20.5 m, se inclinó 3.5%. Por ello se encargó a un grupo de ingenieros encabezado por Gonzalo Garita evaluar el problema. Su recomendación fue desmontar la columna, demoler la losa de

cimentación e implementar una nueva solución. En Julio de 1907 se inició el desmontaje de los bloques de mármol de la columna, después se demolió la base de concreto reforzado con explosivos.

La cimentación definitiva consta de unos 4,654 pilotes de madera con cabeza de concreto y una ataguía perimetral de acero. Posterior a la demolición se realizó una excavación circular de 46 m de diámetro y 3.5 m de profundidad; dentro de ella se hincó la tablestaca formando un círculo de 44 m de diámetro, empleando para ello 474 piezas de acero de 8 m de altura, 30 cm de ancho, las cuales se hincaron 50 cm por debajo del nivel de excavación, con lo que sus puntas quedaron a 12 m de profundidad del nivel de la calle. **Fig. 46.**

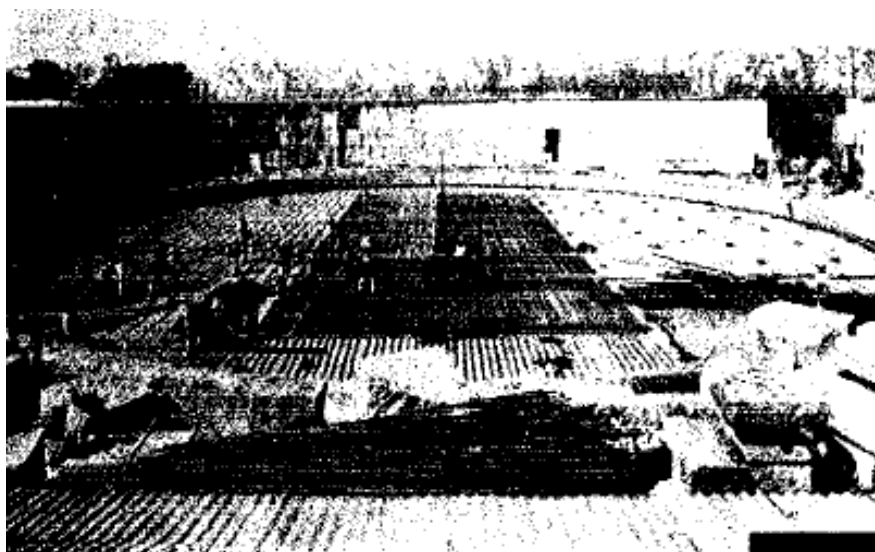


FIGURA 46. CONSTRUCCIÓN DE LOSA DE CIMENTACIÓN. SÁNCHEZ MEJORADA.

Los pilotes de madera son de ciprés americano importado de 30 cm de diámetro sin corteza, el primer tramo de cada pilote tenía 7 m y los demás 3.5 m en promedio; se unieron con juntas de pasador. Para cada pilote se registró la profundidad de hincado, el número de golpes del martillo de 2,000 libras (900 kg), la longitud de cada pieza, las alturas de caída del martillo, las penetraciones valuadas en pulgadas y las resistencias dinámicas en toneladas.

Una vez que cada pilote de madera alcanzaba la resistencia necesaria, se extraían el último o los dos últimos tramos, para sustituirlos con pilotes cortos de concreto, de 30 cm de diámetro y un metro de longitud. En los registros de construcción se consigna que con dos máquinas se hincaron: 98.043 km de pilotes de madera y 9,477 km de concreto. **Fig. 47.**

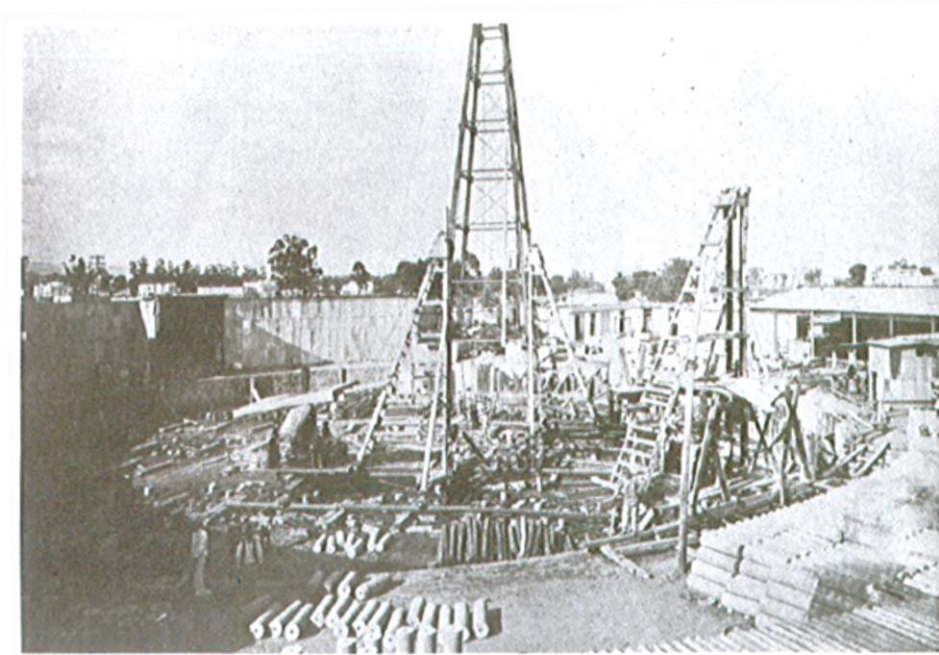


FIGURA 47. HINCADO DE PILOTES. SÁNCHEZ MEJORADA.

Para ligar a los pilotes se colocó un cilindro de concreto de 44 m de diámetro y 0.42 m de altura; para ello se terraplenó el espacio libre entre los pilotes, hasta 2 cm abajo del nivel de las cabezas, tendiéndose enseguida dos capas de concreto apisonado de 0.10 m de espesor, a ese nivel aproximadamente se doblaron las extremidades de las diferentes barras de acero y después se completó el cilindro. **Fig. 48.**

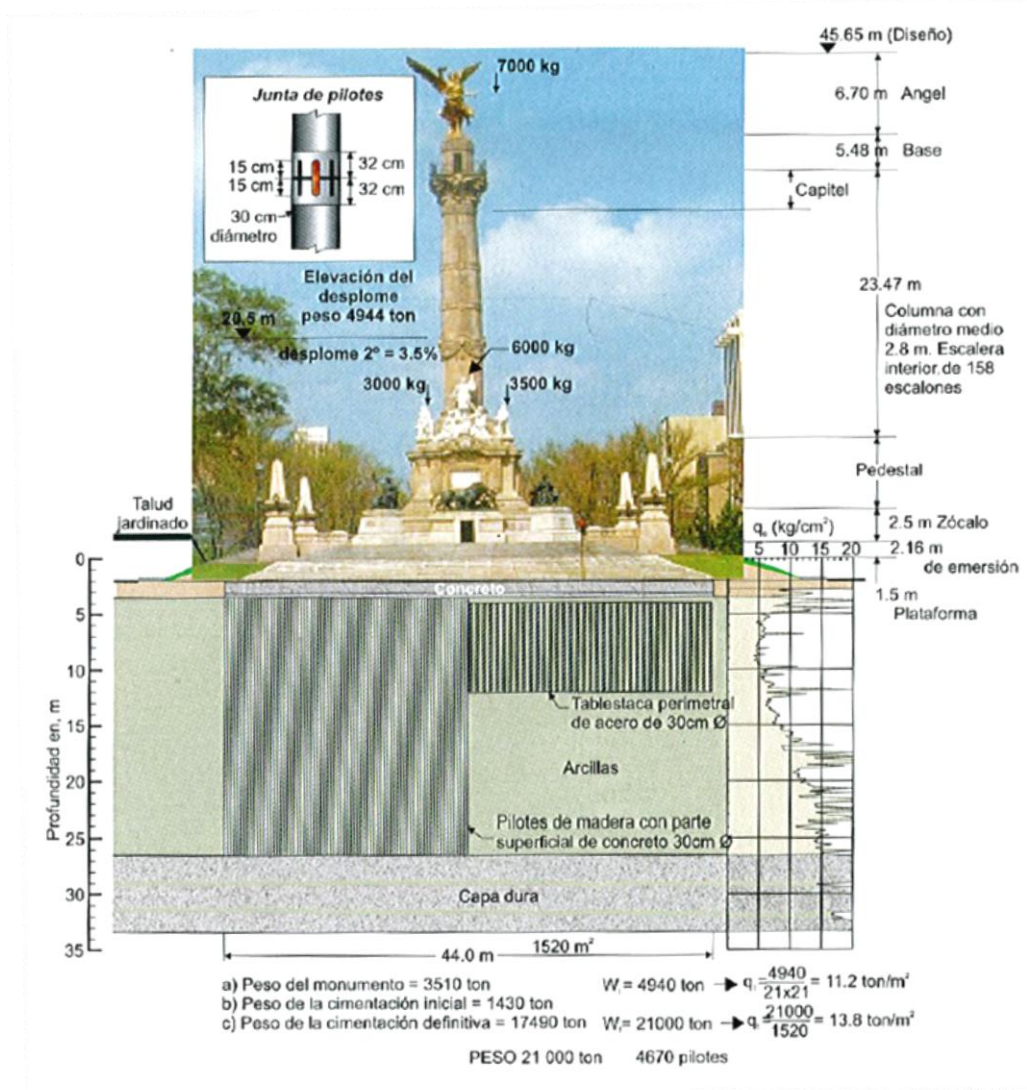


FIGURA 48. CIMENTACIÓN DEL MONUMENTO A LA INDEPENDENCIA Y PERFIL ESTRATIGRÁFICO COMO ELÉCTRICO. SANTOYO VILLA.

Establecido este gran bloque tapa de los pilotes, se formó el sólido de repartición de presiones de concreto, reforzado con una retícula de perfiles de acero, que consiste en:

- Un cilindro recto de base circular de 44 m de diámetro y un metro de altura.
- Un tronco de cono de tronco recto, de base inferior igual a las de dicho cilindro y cuya base superior tiene 21.2 m de diámetro y 0.95 m de altura.
- Un segundo cono de tronco recto, de base igual a la última de las citadas, de 1.55 m de altura y cuya base superior tiene 19.6 m de diámetro.

Posteriormente y tiempo después de la construcción del monumento, se evaluó la seguridad de la cimentación, para la geometría definitiva y los valores de las cargas y las condiciones de esfuerzo que resultan de ellas. Aplicando los criterios convencionales para pilotes de 23 m trabajando, apoyados de punta en la Capa Dura, e incluyendo el efecto de

la fricción negativa en el perímetro envolvente de los pilotes, conducen a un Factor de Seguridad de 36; este valor resulta absurdo, porque el exceso de pilotes transforma al suelo en un sólido reforzado que se apoya en la Capa Dura.

Considerando que el conjunto de pilotes transmita una carga de 25 ton/m² y que la capacidad de carga de las Arcillas inferiores a la Capa Dura es del orden de 100 ton/m², el factor se reduce a un valor de 4.0. (Santoyo, 1998).

Como consecuencia del desplante de los pilotes en la Capa Dura y de su elevada densidad, con separación entre ellos de 61 cm, se eliminó por completo la aportación que la deformabilidad de la Formación Arcillosa Superior pudiera aportar al monumento. Por ello el hundimiento regional no se manifiesta en toda su magnitud, aunque sufre las deformaciones que ocurren en los estratos más profundos. **Fig. 49.**



FIGURA 49. COMPORTAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DEL MONUMENTO A LA INDEPENDENCIA ANTE EL FENÓMENO DE HUNDIMIENTO REGIONAL. AUVINET GUICHARD, MARTÍNEZ OVIEDO.

Esta condición origina que la columna tenga menor asentamiento que todos los edificios que lo circundan y por ello parece emerger y crecer lo cual se disimula con un jardín en talud, que también incrementa el peso sobre la cimentación. Actualmente el talud ha emergido más de 2 m de altura y sin duda seguirá creciendo. A pesar de todo esto, la seguridad del monumento seguirá siendo confiable. **Fig. 50.**



FIGURA 50. MONUMENTO EN LA ACTUALIDAD Y DETALLE TALUD AJARDINADO PARA DESNIVEL POR HUNDIMIENTO REGIONAL. MARTÍNEZ OVIEDO.

5.2. PALACIO DE BELLAS ARTES.

Una vez que se decidió construir el nuevo Teatro Nacional, en el año de 1901, se encargó al Ingeniero Gonzalo Garita buscar un terreno para el nuevo edificio, así como supervisar su construcción, en tanto que el arquitecto Adamo Boari se le encomendó la realización del proyecto Arquitectónico. Garita encontró que el predio del antiguo convento de Santa Isabel era ideal; sugirió la ampliación de la calle de 5 de Mayo y se encargó de las demoliciones, fraccionamiento de terrenos, entrego los lotes a quienes los fueron arrendando y hasta de vender los materiales de demolición del antiguo Teatro.

Para este pesado edificio, la cimentación se resolvió a través de una plataforma rígida de acero y concreto con una escasa profundidad de excavación, la cual en el año de 1908, al iniciar la construcción de la estructura del edificio acusó un drástico descenso y giro, por ello, debió complementarse con una ataguía e inyecciones de cemento y cal líquidas. Esto último indudablemente influyó para detener el proceso de hundimiento. Con los años y posterior intervención, regularizó el comportamiento de la cimentación (*Ovando, 1998*). Parte consubstancial a este edificio, será desde entonces, su proclividad a hundirse debido en parte a su mal elección al resolver su cimentación. A parte de lo anterior, el Arq. Boari decidió levantar una estructura de acero, la cual por el exterior forró de concreto y a su vez con mármol tallado. Al interior, en cambio, pretendía combinar el concreto con hierro y cerámica. El resultado está a la vista, un pesado edificio que se hundió. **Fig. 51.**

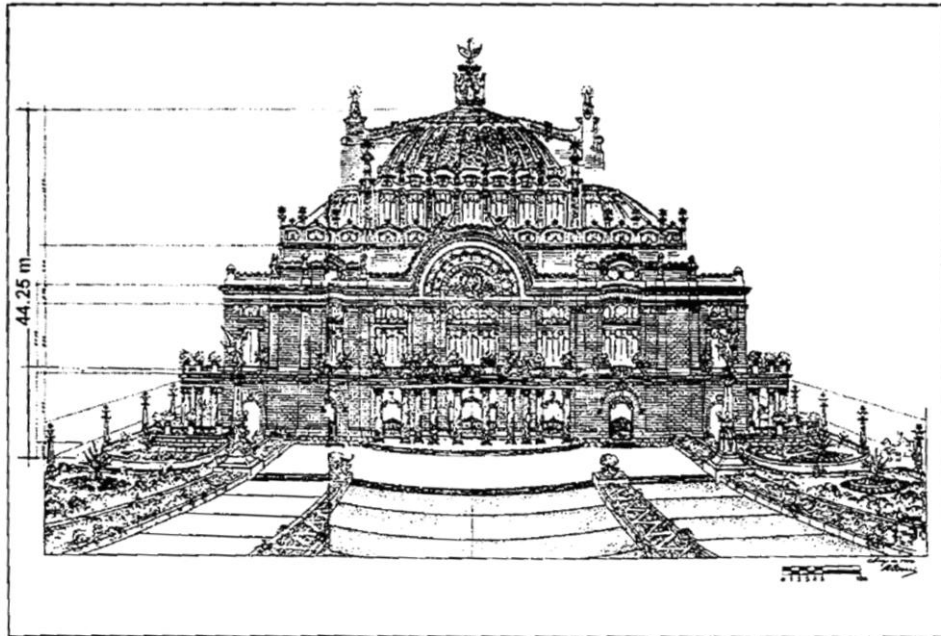


FIGURA 51. PROYECTO DEL NUEVO TEATRO NACIONAL. ADAMO BOARI.

Moyotla era el nombre con que los Mexicas conocían la zona donde actualmente se erige el Palacio, subsecuentemente ya en la época de la colonia, en este lugar se instaló el tianguis de Juan Velázquez, las casas de Doña Catalina de Peralta y el convento de Santa Isabel. Moyotla significa tierra con mosquitos, toponimia que de entrada ya nos indica su carácter de ribera lacustre, pantanosa y zona que, al inundarse y desecarse cíclicamente, debió estar atestada de dichos insectos.

Durante las recientes excavaciones en la plaza frontal del Palacio (1993-1995), se encontraron a 7.20 m., arcillas "bentoníticas y permeables", las cuales se asocian a la existencia en ese lugar de un islote, así como el lecho del lago con una pronunciada pendiente orientada de este a oeste y un desnivel que varía 7 m. En una capa anterior entre los 3 y 6 metros, se hallaron infinidad de vestigios que documentaron la fase de ocupación prehispánica. Se descubrieron múltiples restos de presencia humana en el sitio, entre estos hallazgos de encuenras estructuras tipo dique y terraplenes por medio de los cuales se ganaba terreno al lago; incluso con un embarcadero y postes de amarre, así como un talud para romper el oleaje.

Adamo Boari entregó el 12 de Marzo de 1904 su proyecto. El diseño de la estructura y cimentación fue responsabilidad del Ing. William H. Brikmire; lamentablemente su informe estructural del Teatro no se ha localizado, solo se conoce el arreglo de las vigas de acero de su cimentación. En cuanto a la carga que trasmite al suelo es en general de 10 ton/m² y de 12 ton/m² para la zona de escenario.

En noviembre de 1904, se inició la construcción con excavaciones a 2.4 m en la parte sur y de 3.5 en la parte norte, se destruyeron los cimientos de lo que fue la torre del convento en el lado sureste del edificio, durante la excavación no se encontró el nivel Freático.

Para resolver el problema de los hundimientos se consultó a W. Birkmire, quien recurrió al Ing. John O'Rourke. Ambos recomendaron dar estanqueidad al sitio, mediante una ataguía perimetral de acero de 7.6 m, separada unos 3 m de la losa de cimentación. Entra la ataguía de acero y la losa de cimentación, O'Rourke propuso una liga estructural de celdas de concreto armado, que no se realizó. **Fig. 52.**

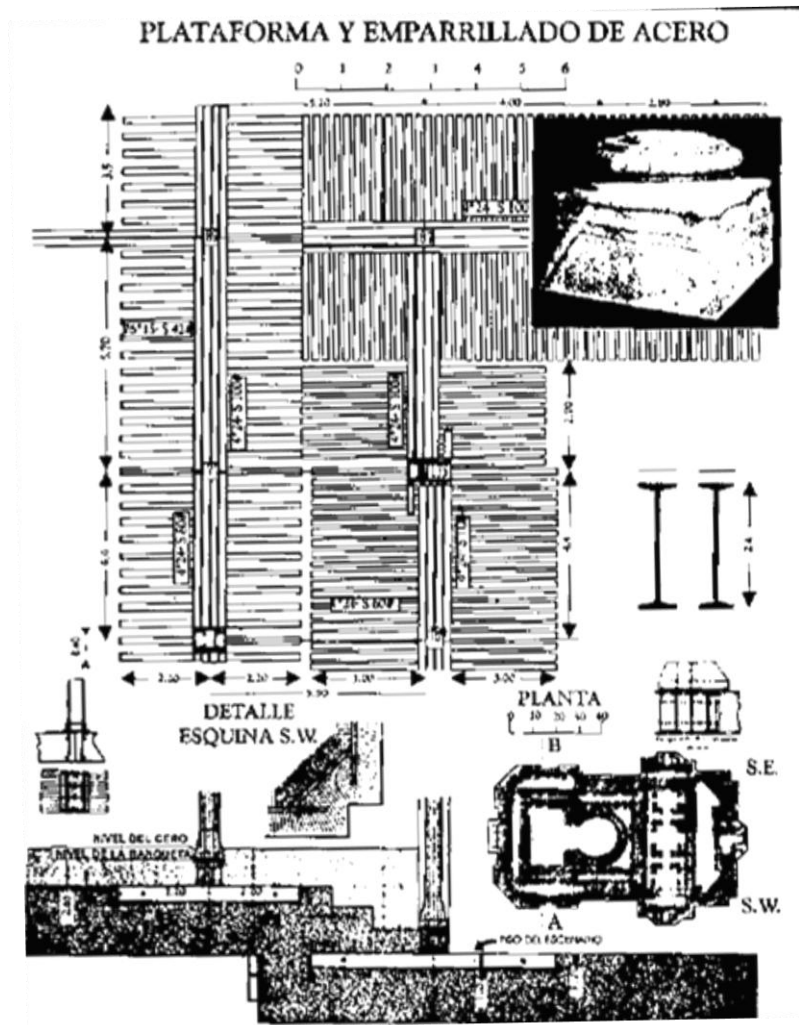


FIGURA 52. PLATAFORMA Y EMPARRILLADO DE CIMENTACIÓN DEL TEATRO NACIONAL. ADAMO BOARI.

La **Fig. 53** muestra dicha tablestaca y el pozo artesiano de 270 m de profundidad, cuya tapa sirvió de referencia topográfica para evaluar el hundimiento regional y su profundidad de influencia. La figura también muestra el análisis simplificado que hizo Boari que para estimar que el Teatro se hundiría 1.461 m (*Santoyo, 1998*).

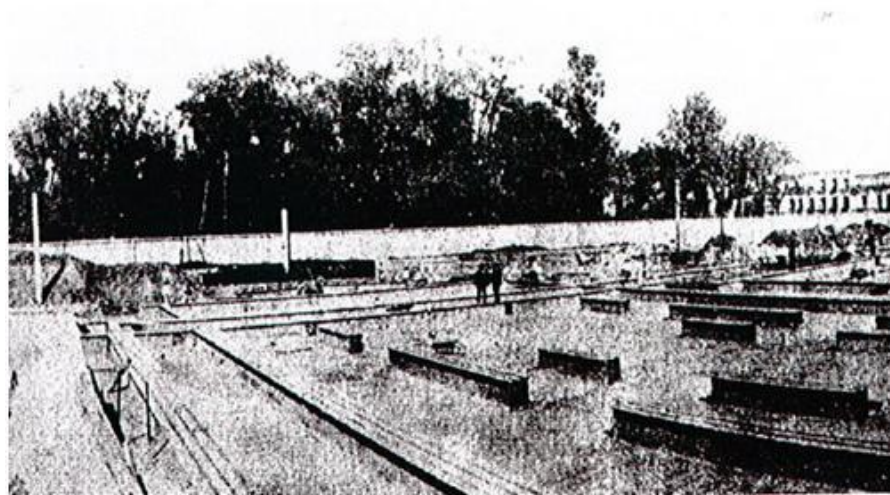


FIGURA 53. DETALLE DE ETAPAS CONSTRUCTIVAS DEL NUEVO TEATRO NACIONAL. ADAMO BOARI.

Como la tablestaca no tuvo efecto apreciable y los hundimientos diferenciales seguían acumulándose, se optó por inyectar morteros en el subsuelo, con el objeto de endurecerlo.

Entre 1910 y 1913, se define que el total de sacos de cemento fue de 60,650 unidades, lo que implica 3,032 ton de cemento, valor que supera en 457 toneladas al consignado a los informes. La distribución de las inyecciones realizadas en los años de 1910 a 1913, en donde se advierte que hubo 48 puntos de inyección, lo cual difiere de los 39 que se citan en varios de los documentos. **Fig. 54.**

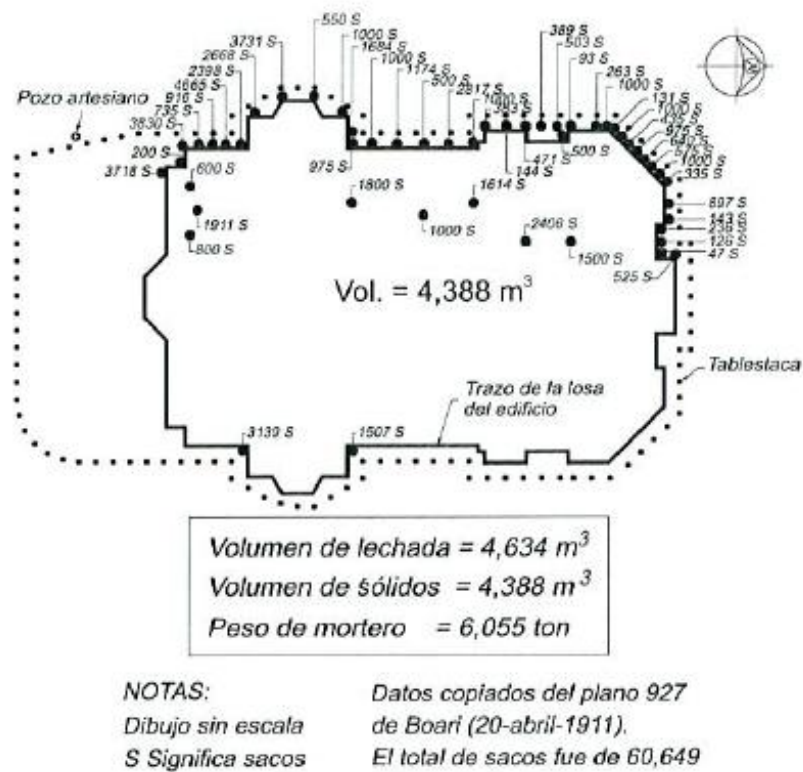


FIGURA 54. CAMPAÑA DE INYECCIÓN 1910-1913. SANTOYO VILLA.

En Abril de 1919 se inició una inyección experimental que concluyó en 1921, se le puede considerar como una investigación experimental de Barioso y Álvarez. Ellos realizaron pruebas de inyección en dos sitios, del lado oriente y del poniente, entre 3.50 y 12.00 m de profundidad, se aplicaron presiones de hasta 120 lb/pulg²; llama la atención que para demostrar la influencia del trabajo recurrieron a pruebas de penetración dinámica hincando pilotes de madera con una masa de 670 kg, con altura de caída de 3.0 m.

Entre 1924 y 1925 se ejecutó una nueva campaña de inyección, esta ocasión se llevó a cabo al exterior de la ataguía, se inyectó un total de 3,500 m³ de mortero, aunque se desconoce cuánto se inyectó en el interior. Considerando que conservaran la misma relación entre las aéreas exterior e interior, el volumen de mortero pudo ser del orden de 1,900 m³.

Fig. 55.

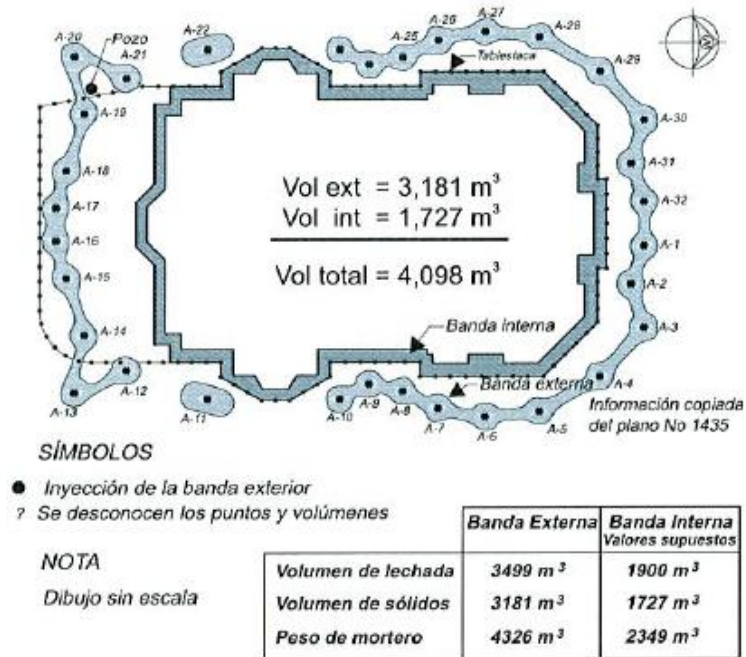


FIGURA 55. CAMPAÑA DE INYECCIÓN 1924-1925. SANTOYO VILLA.

Las características de esta última inyección son las siguientes; la relación del volumen inyectado, corregido por la pérdida de volumen del mortero al volumen del suelo modificado es del orden de 5.6%. La relación entre el peso del mortero inyectado y el edificio de 87,450 toneladas, resulta del 15%, magnitud que indudablemente genera algún incremento en los hundimientos, considerando que los esfuerzos aplicados aumentaron en 0.8 ton/m².

La inyección del subsuelo del teatro ha sido injustamente calificada como un trabajo que no tuvo consecuencias benéficas, porque las mediciones de asentamientos hasta 1925 hacen patente que a pesar de que se continuo hundiéndose se logró la uniformidad que explica su buen comportamiento estructural. El comportamiento actual del palacio de Bellas Artes seguramente ratificara la afirmación anterior.

La información topográfica recopilada hasta 1925 demuestra que este caso de la Ingeniería Geotécnica, más que histórico es actual, porque la potencialidad de la inyección de suelos es una de las técnicas para enfrentar algunos problemas de monumentos y edificios afectados por el hundimiento regional de la Ciudad de México. **Fig. 56.**



FIGURA 56. PALACIO DE BELLAS ARTES EN LA ACTUALIDAD. MARTÍNEZ OVIEDO.

5.3. MONUMENTO A LA REVOLUCIÓN.

Fue en 1897 cuando el Gral. Porfirio Díaz decreto que, por medio de la Secretaria de Obras Públicas, se emitiera una convocatoria para el concurso de construcción de un nuevo recinto que albergara el Palacio Legislativo Federal. El fallecimiento del ganador del concurso, el arquitecto italiano Pietro Paolo Quaglia en 1898, obligo a organizar un segundo concurso en 1903 que se tuvo que declarar desierto (*Museo de la Revolución Mexicana, 2012*). Finalmente se comisionó en 1904 al arquitecto francés Emile Bérnard para que elaborara el proyecto que se presentó ese mismo año. Fue entonces cuando se realizó el estudio de mecánica de suelos para la zona. **Fig. 57.**



FIGURA 57. PROYECTO ORIGINAL DEL PALACIO LEGISLATIVO, MUSEO DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA.

Auxiliado por el ingeniero Maxime Roisin, Emile Bernard desarrollo en 1904, con los medios de la época, unas investigaciones cuidadosas del subsuelo y del nivel freático, y llevo a cabo pruebas de carga. Se excavo un pozo a cielo abierto de 8.95 metros de profundidad donde se obtuvieron muestras a partir de 5.5 m. **Fig. 58.**

Pozo de sondeo: — 1.^m. 60. X 2.^m. 50.
 Con objeto de examinar el estado real del subsuelo, se excavó este pozo hasta 8.^m. 95. de profundidad y hemos reconocido las capas siguientes:

Cenajo, 2. ^m . 20.	
Humus, 0. ^m . 30.	
Arcilla abigarrada parda gris, 0. ^m . 11.	
Espetate, 0. ^m . 07.	
Arcilla verde clara, 0. ^m . 18.	Densidad: 1.499
Arena gris (seca) y negra (húmeda), 0. ^m . 25.	id. — 1.480.
Arcilla verde con detritos vegetales, 2. ^m . 16.	id. — 1.16.
Arena negra, 0. ^m . 02.	
Arcilla gris parda, 1. ^m . 38.	id. — 1.13.
id. — parda rojiza, 0. ^m . 53.	id. — 1.14.
id. — color chocolate arenosa, 0. ^m . 13.	id. — 1.16.
Arena negra, 0. ^m . 13.	id. — 1.45.
Arcilla gris parda 0. ^m . 49.	id. — 1.14.
id. — color chocolate arenosa, . . .	id. — 1.16.

FIGURA 58. REGISTRO DE CAMPO DE POZO A CIELO ABIERTO, EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA. EMILE BERNAD.

En el laboratorio, Bernard realizo otro experimento, sencillo pero muy ilustrativo, con una muestra extraída a 7 m de profundidad. Descubrió la reducción drástica de volumen que puede presentar la arcilla lacustre del Valle de México por secado. **Fig. 59.**

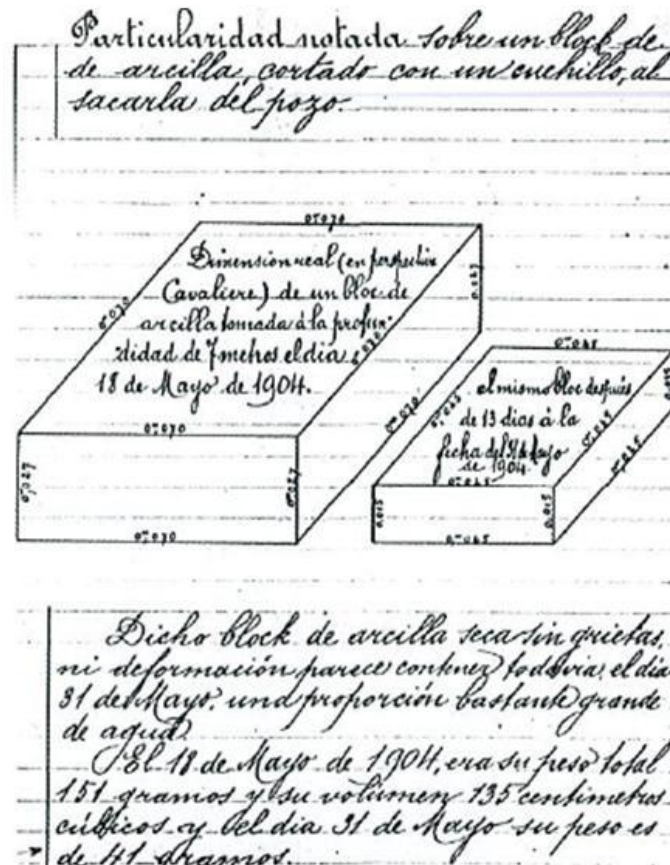


FIGURA 59. REGISTRO VOLUMÉTRICO DE MUESTRA OBTENIDA EN CAMPO DESPUÉS DE SECADO EN HORNO, (CONTENIDO DE AGUA). EMILE BERNAD.

Después de considerar otras alternativas, incluyendo el mejoramiento del suelo con tubos metálicos hincados, Bérnard considero adecuada la construcción de un emparrillado metálico que descansará sobre una plataforma de concreto y una superestructura mixta metal-mampostería. Propuso que el espesor de la plataforma no rebasara los 60 cm para no sobre cargar el terreno. Anotó por otra parte que "con la indeformabilidad de la armadura metálica es posible prevenir esfuerzos excepcionales en cualquier punto de la construcción pero no es posible impedir el descenso de ella" (Auvinet, 2010). Además, con plena conciencia del fenómeno de interacción suelo-estructura aclaró: "Inevitablemente habrá siempre un trabajo interno en el conjunto edificio-tierra, tanto más notable cuanto más profunda se haga la cimentación." Ante "la imposibilidad absoluta de prever cual sería el asentamiento definitivo del edificio", Bérnard propuso prevenirse "colocando a un nivel de 1.2 m a 1.5 m más alto que el definitivo, repartiendo este nivel entre una rampa que se construyese en la plaza y las calles próximas y una banquetta con graderías de escalones inclinados". Consciente de que el suelo puede presentar grandes variaciones volumétricas bajo carga, Bérnard debió reconocer que no supo prever ni la magnitud ni la evolución de los asentamientos.

El terreno del Palacio se consolidó por 17,000 pilotes de madera y concreto, Sobre estos, en el área de la cúpula, se tendió una plataforma de concreto y sobre esta plataforma se construyó un emparrillado de vigas de acero. El primero se componía de 90 vigas de 0.30

metros de peralte por 45 metros de longitud; el segundo, en sentido contrario, de 60 vigas de 432 metros de longitud y más de 2 metros de peralte, con peso de 42 ton cada una; y el tercero de 42 vigas similares de 45 ton cada una. Estas traveses se transportaron desde Nueva York en tres partes y se ensamblaron en el terreno. **Fig. 60.**



**FIGURA 60. PARRILLA DE ACERO EN CIMENTACIÓN DEL MONUMENTO A LA REVOLUCIÓN.
MARTÍNEZ OVIEDO.**

La primera piedra del palacio fue colocada el 23 de Septiembre de 1910 y la estructura metálica se empezó a elevar. El problema más inmediato al que se enfrentó fue el inicio del fenómeno de asentamientos pero la obra avanzaba (*Museo de la Revolución Mexicana, 2012*). Sin embargo, la renuncia forzada del presidente Díaz, el 24 de Mayo de 1911, condujo a un letargo prolongado de las obras y, a pesar de los esfuerzos del presidente Madero para dar un nuevo giro e impulso a la construcción, se abandonó la construcción en 1912. **Fig. 61.**



**FIGURA 61. PRESIDENTE FRANCISCO I. MADERO PRESENTE EN OBRAS DEL PALACIO
LEGISLATIVO. MUSEO DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA.**

La estructura de que iba a ser uno de los edificios más suntuosos de la ciudad, permaneció abandonada durante varios lustros de guerra civil. Hacia 1919 la estructura llena de escombros y maleza, con daños ocasionados por el hundimiento de las crujías laterales. Empero la estructura de la gran cúpula, la cual no presentaba hundimientos importantes y permanecía estable pero se pretendía demolerla. Para evitarlo, en 1932 el arquitecto Carlos Obregón Santacilia propuso aprovechar la estructura de la cúpula para erigir un monumento a la Revolución Mexicana. **Fig. 62.**

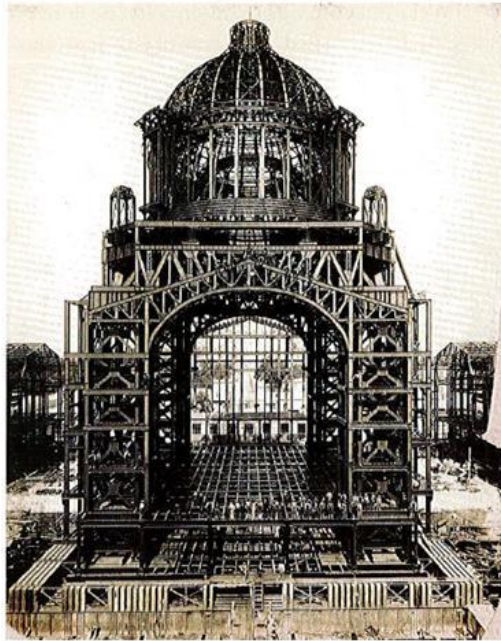


FIGURA 62. PROYECTO DEL MONUMENTO A LA REVOLUCIÓN PRESENTADO POR CARLOS OBREGÓN. MUSEO DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA.

Manteniendo las dimensiones de la estructura metálica de la cúpula, Obregón Santacilia creó una obra original que combina la espacialidad con una concepción volumétrica de carácter masivo y con la integración de elementos art déco con motivos nacionalistas. La obra duro cinco años, de 1933 a 1938. El monumento, que está considerado como una obra pionera de la transición mexicana hacia la modernidad, con el paso del tiempo también se ha convertido en mausoleo de próceres revolucionario: dentro de sus pilares descansan los restos de Francisco I. Madero, Venustiano Carranza, Francisco Villa y Lázaro Cárdenas. **Fig. 63.**



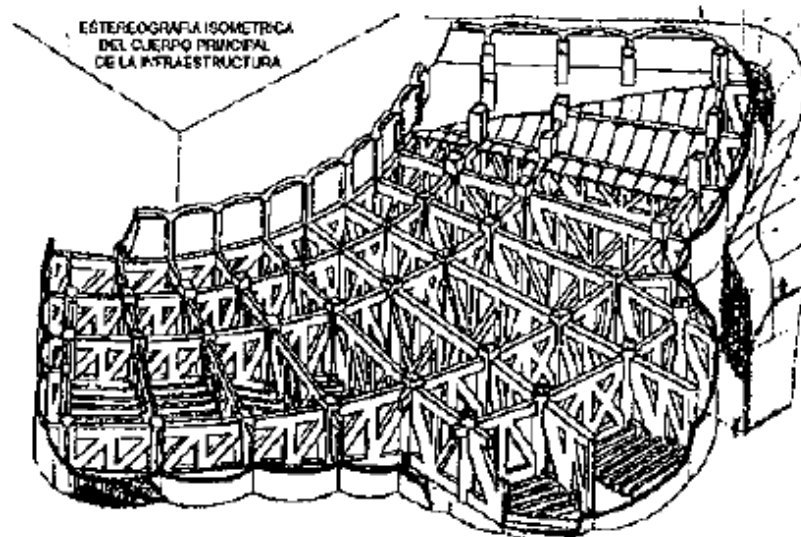
FIGURA 63. MONUMENTO A LA REVOLUCIÓN MEXICANA EN LA ACTUALIDAD. MARTÍNEZ OVIEDO.

6. CIMENTACIONES DE MEDIADOS DEL SIGLO XX A PRINCIPIOS DEL SIGLOS XXI.

Hacia principios del siglo XX, la ciudad de México alcanzo una población de un millón de personas, después hacia mediados de este siglo la población aumento a 5 millones para finalmente alcanzar más de 20 millones de habitantes, incluyendo su área metropolitana. Esta población requiere de un abastecimiento muy alto de agua de casi $70 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales más de las dos terceras partes se extraen del subsuelo, lo que mantiene activo el fenómeno del hundimiento regional, que debe ser tomado en cuenta para el diseño de las cimentaciones actuales. De estas se describen los casos de los edificios de la Lotería Nacional, Palacio de los Deportes, la Torre Latinoamericana y la Torre Mayor.

6.1. EDIFICIO DE LA LOTERÍA NACIONAL.

Esta es una estructura formada por una torre con dos sótanos, planta baja, dieciséis pisos y azotea, además de un auditorio con planta baja y dos sótanos (**Fig.64**). Los sismos de Septiembre de 1985 le causaron algunas fisuras en columnas y trabes.



**FIGURA 64. ESTRUCTURA DE CIMENTACIÓN DEL EDIFICIO DE LA LOTERÍA NACIONAL. SANTOYO
VILLA.**

En la zona de la Torre varía de 12.0 a 13.3 ton/m^2 , debido que existen diferentes niveles de excavación; en cambio bajo el auditorio la presión media es de 11.6 ton/m^2 , aunque existe un lastre permanente de agua en el cajón inferior que aplica 3.9 ton/m^2 . La faja central tiene una compensación media de 3.7 ton/m^2 . Con los datos anteriores se obtiene

en la Torre 0.6 ton/m² de sobre compensación y en el auditorio 2.5 ton/m², lo cual provocó expansiones durante la construcción de 0.4 a 1.0 m. **Fig. 65.**

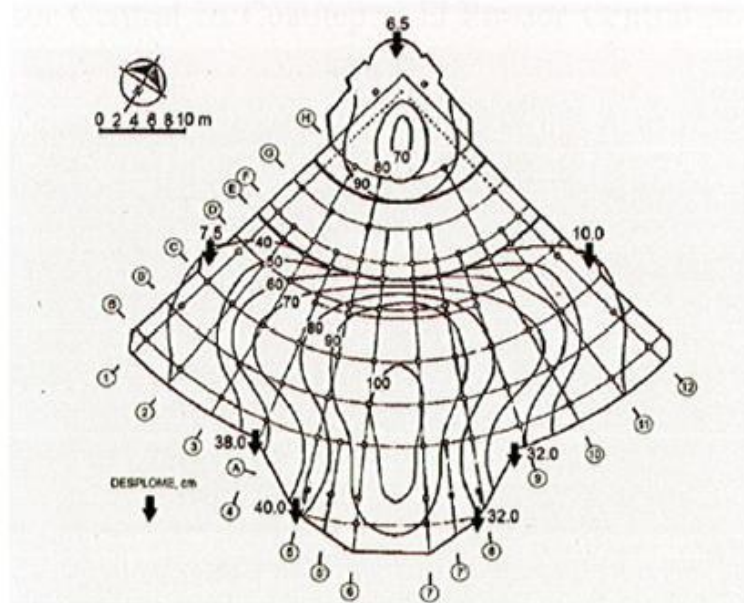


FIGURA 65. EXPANSIONES REGISTRADAS DURANTE LA EXCAVACIÓN PARA LA CIMENTACIÓN DEL EDIFICIO DE LA LOTERÍA NACIONAL. CUEVAS.

La carga de re compresión en la torre representa el 95% de la descarga por excavación, por lo que los asentamientos estimados son de 115 cm al centro de la torre y de 96 cm en los extremos. El asentamiento diferencial es de 19 cm y ocasiona una distorsión angular de 0.54%, lo que se traduce en una inclinación del edificio de 35 cm. Las inclinaciones medidas fueron de 32 y 40 cm, lo que indica que las inclinaciones actuales de la Torre se generaron principalmente por el efecto de re compresión durante la construcción del edificio. **Fig. 66.**

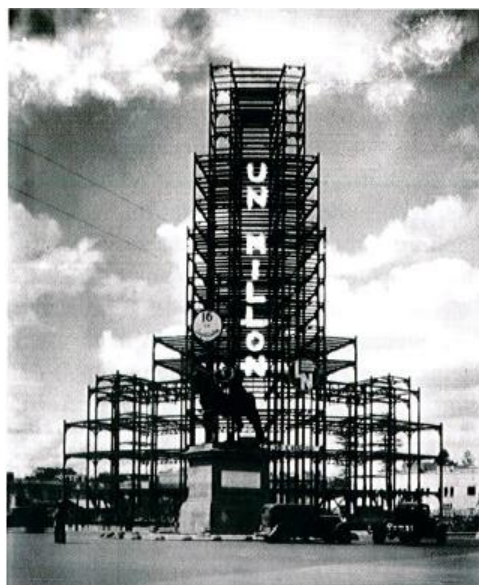


FIGURA 66. EDIFICIO DE LA LOTERÍA NACIONAL DURANTE SU CONSTRUCCIÓN. CUEVAS.

El esfuerzo inducido por el efecto sísmico en el borde de la cimentación, para el potencial de momento máximo de volteo de 57,760 ton-m, es de 4.7 ton/m² (Santoyo, 1998). Por su parte la capacidad de carga estimada para una cohesión media de 2.7 ton/m², es de 22.0 ton/m², lo que genera un factor de seguridad FS de 4.6 en la orilla más desfavorable.

En cuanto a la inclinación de la Torre no representa un problema de inseguridad estructural y la funcionalidad de la estructura. **Fig. 67.**



FIGURA 67. EDIFICIO DE LA LOTERÍA NACIONAL EN LA ACTUALIDAD. MARTÍNEZ OVIEDO.

6.2. TORRE LATINOAMERICANA.

Esta estructura, de 43 pisos, es una de las más altas de la ciudad de México, en pleno centro histórico de la ciudad en la esquina de la calle de Madero y eje Central. El predio en donde actualmente se levanta la Torre Latinoamericana fue ocupado antiguamente por la casa de animales del Tlatoani Mexica Moctezuma II , y tras la conquista, se construyó el antiguo Convento de San Francisco.

Posteriormente, ya a mediados del siglo XX, el predio fue adquirido por la compañía de seguros "La Latinoamericana". Dicha empresa planteo la idea de construir el rascacielos más alto del mundo fuera de E.U.A. Para este ambicioso proyecto se contrató a un grupo de profesionales: el Dr. Leonardo Zeevaert, el Arq. Augusto H. Álvarez, el Arq. Alfonso González Paullada.

El Dr. Zeevaert planteo una extenuante campaña de exploración Geotécnica que consistió en lo siguiente:

- Sondeos con muestreo inalterado hasta 50m, en el sitio del edificio.
- Instalación de piezómetros a 18.00, 28.00, 33.00 y 50.00 m, en el lugar se construcción, en la banqueta circundante y en la Alameda Central.

- Instalaciones de bancos de nivel profundos en el lugar y en la Alameda.

Después del estudio, el Dr. Leonardo Zeevaert llegó a la conclusión de proyectar una cimentación y estructural que crearía paradigmas en la ingeniería moderna, ya que muchas personas creían imposible lograr construir un rascacielos en la zona de lago de ciudad. Fue necesario hincar 361 pilotes especialmente diseñados, hasta una profundidad de 33 metros para cimentar la torre. Se colocó una cimentación compensada de concreto que permite que la carga que trasmite el edificio sea casi equivalente a la carga que ejercía el volumen de suelo que ocupaba ese lugar, esto es independientemente del soporte que le proporcionan los pilotes, los cuales son fundamentales ante el efecto de sismos aplicando su Teoría desarrollada "Interacción suelo Estructura". Esta metodología de análisis, original de México, fue la primera de su tipo en el mundo y sigue siendo utilizada por todos los constructores de rascacielos para zonas de alto riesgo sísmico (Auvinet, 2010).

Para soportar el peso total del edificio, se construyó una estructura rígida de acero con un peso de 3, 200 toneladas; que dan forma a 3 sótanos y a 43 pisos que se elevan a 134 metros, más una antena de 54 metros, totalizando 188 metros sobre el nivel de la calle, con una superficie construida de 27.700 metros cuadrados de cristal y 3, 200 metros de lámina acanalada de aluminio; la instalación sanitaria por sí sola pesa 50 toneladas y existen más de 4.000 lámparas para iluminación.

Tiene un cajón de sótano de 13.0 m de profundidad. Se apoya en pilotes de extremo ensanchado, desplantados a una profundidad de 33.5 m en una capa delgada de arena, muy densa, situada entre depósitos de arcilla lacustre excepcionalmente compresibles los pilotes están hincados en la capa dura a 33.5 m de profundidad. **Fig. 68.**

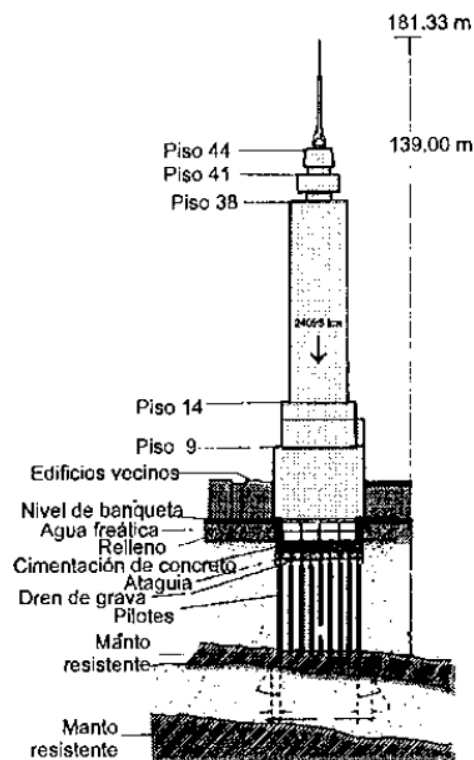


FIGURA 68. CIMENTACIÓN DE LA TORRE LATINOAMERICANA. SANTOYO VILLA.

Este cajón es solo para función estructural, a diferencia de los cajones actuales que lo aprovechan como estacionamiento de vehículos. Los pilotes son del tipo "Botton Button", constituidos por una punta pre colada de concreto de alta resistencia, la cual fue hincada con un tubo de acero de diámetro interior de 35 cm y pared de 1.9 cm. Las puntas y fundas fueron hincadas con un martillo de 15,000 libras pie/golpes del martillo. Los pilotes se colocaron desde una excavación de 2.5 m.

La tablestaca perimetral le dio mucha seguridad a la excavación, que en su tiempo fue la de mayor profundidad, fue de madera tipo Wakefield, con puntas forradas con lámina de cobre. Se diseñó para seguridad de los edificios colindantes y pos su impermeabilidad permitió introducir en cuatro pozos el agua que se extraía, para evitar la expansión excesiva que se presenta en todas las excavaciones de la ciudad, la presión hidrostática en la arcilla subyacente se redujo por bombeo de pozos, drenando capas delgadas de arena que se encuentran intercaladas en la arcilla; para evitar los asentamientos en las zonas vecinas, el agua se inyectó por una zanja llena de grava a pozos de inyección situados inmediatamente después del lado exterior del tablestacado que contenía la excavación. El éxito obtenido en la ejecución de esta cimentación, sin dañar las estructuras adyacentes demuestra la potencialidad de la mecánica de suelos, (Santoyo, 1998).

En el diseño de la cimentación de la Torre Latinoamericana se aplicó el "principio de sustitución de masas" (más conocido como flotación), considerando el desplante del cajón, aunque los pilotes fueron calculados para soportar la carga total, estos no trabajan en condiciones estáticas.

El peso total del edificio, incluyendo la cimentación es de 24,100 ton, esto se traduce a que en el desplante de la cimentación se transmite 24.1 ton/m². El análisis de supresión arrojó los siguiente; 10.0 ton/m² x 1,000 m² = 10,000 ton, mientras que para la fricción negativa en los muros es de 1,500 ton. **Fig. 69.**



FIGURA 69. TORRE LATINOAMERICANA EN CONSTRUCCIÓN. AUVINET GUICHARD.

El peso total de los 361 pilotes es de 2,200 toneladas con una fatiga en la punta de 34.5 ton/m².

Con esta información se concluye que el factor de seguridad de los pilotes, trabajando de punta, es de 2.9 y que los suelos de la Segunda Formación Arcillosa el factor de seguridad es de 2.16.

Una característica importante de los pilotes instalados en esta cimentación, es la baja fatiga que transmiten al terreno debido a la forma de la cabeza y que tiene valores de 34 ton/m² para cargas de 50 ton/m².

La capacidad de carga del manto resistente, según fue comprobada con el estudio de las propiedades de dicho manto, dando del orden de 100 ton/m², con un factor de seguridad de 3 aproximadamente para garantizar que la punta no penetre en este estrato.

Hay aspectos importantes a comentar de la operación de la Torre son los siguientes:

- Bajo el nivel del desplante de la cimentación se inyecta agua con presión de 10 ton/m² y gasto de 13 m³/día, para asegurar la permanencia de la componente de flotación.
- Es interesante aclarar que la reglamentación para el criterio actual para evaluar la fricción negativa conduce a valores mucho mayores, hoy se considerarían hasta 17,000 ton. Esta diferencia reduciría el factor de seguridad de 2.16 a 1.3, considerando, además, la eventual suspensión en la inyección de agua.
- La losa de la planta baja está equipada con un sistema mecánico para ajustar su posición porque al estar apoyada la cimentación en pilotes de punta, al paso de los años por efecto del hundimiento regional ha comenzado a sobre salir del terreno general y de requerir de escalones de acceso, aunque esta emersión ha sido menor de lo esperado. Lo anterior se explica por la consolidación de la Segunda Formación Arcillosa, bajo la capa dura más la consolidación de estratos arcillosos de esta última. Aunque tampoco se descarta la posibilidad de la penetración gradual de los pilotes dentro de la capa dura.

La cimentación ha tenido un comportamiento satisfactorio durante los sismos de 1957 y 1985, demuestran que también su diseño sísmico es confiable. Considerando el reglamento actual, el diseño de una Torre similar conduciría a una cimentación apoyada en los depósitos profundos. **Fig. 70.**



FIGURA 70. TORRE LATINOAMERICANA EN LA ACTUALIDAD. MARTÍNEZ OVIEDO.

6.3. PALACIO DE LOS DEPORTES.

Un compromiso adquirido por México en Baden-Baden, Alemania, en 1963, al solicitar y aceptar la organización de los Juegos Olímpicos de 1968, sometió a los Ingeniero Civiles una intensa presión para realizar en un plazo muy corto, las audaces obras que concibieron los arquitectos y las adaptaciones a las ya existentes. Entre las obras nuevas destacaron la Alberca y Gimnasio Olímpico y el Palacio de los Deportes. Este último, fue diseñado por el Arq. Félix Candela para albergar hasta 20, 000 personas durante las competencias de basquetbol. **Fig. 71.**



FIGURA 71. PALACIO DE LOS DEPORTES DURANTE SU CONSTRUCCIÓN. AUVINET GUICHARD.

Se trata de una estructura de planta circular de 180 m de diámetro con 77, 000 ton de peso. La cubierta, en forma de casquete esférico, descansa en dos sistemas de arcos circulares de acero apoyados en la zona perimetral de la cimentación. El predio elegido para la obra, en la Magdalena Mixhuca, se localiza en una de las zonas con suelos más compresibles de la zona de Lago. Para soportar la estructura se optó por una cimentación sobre 1, 407 pilotes de concreto con punta de acero apoyada en la primer capa dura. La losa nervada de la cimentación se diseñó con la idea de que se construyera una segunda línea de defensa, introduciéndose así una cierta redundancia que aumentaba considerablemente la confiabilidad de la cimentación. Se recomendó revisar el diseño estructural de la losa para asegurar que podría tomar por contacto prácticamente toda la carga de la estructura, aunque con esfuerzos en el acero próximos al de fluencia. Además, previendo que uno de los efectos de la fricción negativa en la porción superior de los pilotes sería la eventual eliminación de la presión de contacto entre losa y suelos, dicha losa se diseñó también para trabajar sin el soporte del terreno. Con objeto de evitar expansiones excesivas por descarga, la pista central fue lastrada con concreto. Para un buen control de la obra, se recurrió a las pruebas de campo y a la instrumentación. Se realizaron pruebas de carga en 35 pilotes. Además, se midieron los desplazamientos horizontales y verticales inducidos en el suelo por el hincado de pilotes, las excavaciones y las deformaciones del suelo y de la estructura y después de la construcción (Gabriel Auvinet, 2010). Por efecto de la hincado de pilotes, el terreno de la zona anular de las tribunas se elevó más de 15 cm.

La **figura 72**, muestra por otra parte las pequeñas deformaciones que presentó la cimentación después de la construcción. El buen comportamiento de esta estructura, de dimensiones poco comunes, que ha rebasado ya los 45 años de existencia, muestra que los criterios empleados, basados en los principios generales de la mecánica de suelos y en conceptos desarrollados localmente, han sido adecuados.

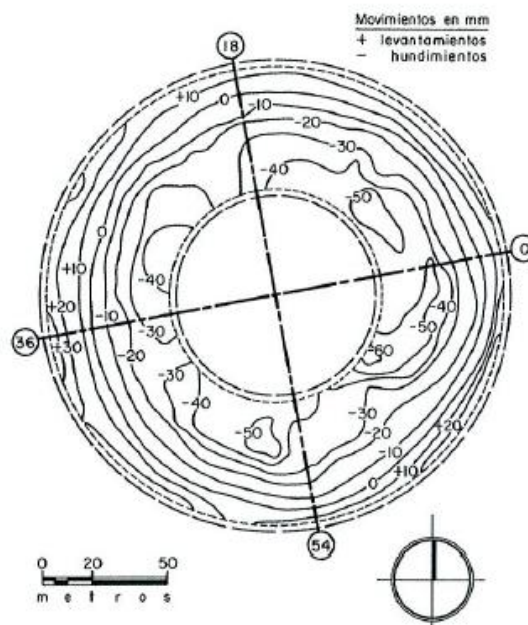


FIGURA 72. PALACIO DE LOS DEPORTES, MOVIMIENTOS VERTICALES DE LA CIMENTACIÓN DEL 3 DE AGOSTO DE 1967 AL 5 DE JULIO DE 1968. AUVINET GUICHARD.

6.4. TORRE MAYOR.

La Torre Mayor el edificio más alto de México construido a la fecha, está ubicada sobre la avenida Paseo de la Reforma casi al cruce con el circuito interior, en el límite poniente de la Zona de Lago, este edificio cuenta con 55 niveles a partir del nivel de banqueta con 225 metros de altura y 4 niveles de sótanos, alojados dentro de un cajón con un área en planta de 80 x 80m y una profundidad de 16 m.

Su construcción inicio a finales de la década de los 90's llegando a su término en el año de 2003 con un costo de 300 millones de dólares, la exploración Geotécnica del predio llevo a una profundidad de 80 metros, y se decidió desplantar pilas en la segunda capa dura, en total se construyeron 251 pilas con un diámetro variable de 1 a 1.5 m diámetro, llevadas hasta profundidades de 46 y 52 metros. Las pilas están ligadas estructuralmente a una losa de 3.5 m de peralte. La cimentación se construyó en el año de 1998, teniendo un comportamiento adecuado, ya que se ha enfrentado a dos sismos de magnitud mayores a 7.0 ° Richter. **Fig. 73.**

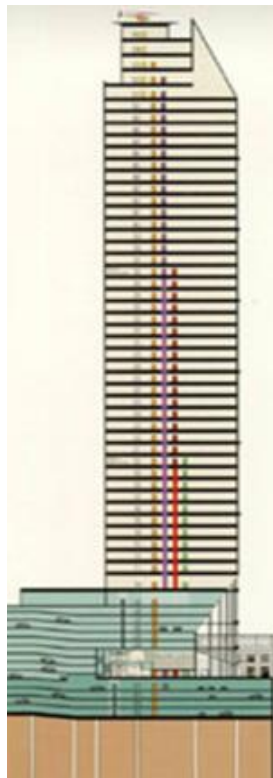


FIGURA 73. ESQUEMA DE LA CIMENTACIÓN DE LA TORRE MAYOR. OSCAR HENRY.

La cimentación se inició en enero de 1999 con la demolición de las antiguas estructuras y la extracción de antiguos pilotes, en algunos casos de madera.

Una vez despejada el área de trabajo se inició la perforación y excavación de los barrenos para las pilas utilizando una máquina de tipo rotatoria montada sobre grúas. La cimentación para la torre es una combinación de sistemas conformado por pilas y losas que forman el

cajón de estacionamiento (*Henry, 2010*). El edificio esta cimentado con pilas llegando al estrato duro mejor conocidos como depósitos profundos superando los 40 metros de profundidad, pasando de largo la primera capa dura.

El sistema de losa de cimentación de concreto reforzado que se encuentra en el desplante del cajón de estacionamiento, conecta a todo el sistema de pilas con los muros del cajón de 80 cm de espesor. Para la contención del empuje del suelo de la excavación a cielo abierto, se construyo un muro ademe de tipo milan de 60 cm de espesor y 22 metros de profundidad, con paneles de longitud variable de entre 2.5 y 6.0 m y dejando una viga metalica ahogada en cada junta. Estas piezas sirvieron posteriormente para soldar en ellos los elementos estructurales del sistema de apuntalamiento.

Ademas del muro perimetral fueron construidos un par de muros intermedios para dividir el area de excavacion en tres partes, empleando tablestacas precoladas de 60 cm de peralte y 1.00 m de longitud, las cuales fueron colocadas mediante perforacion previa, a la misma profundidad que el muro perimetral, esto con el onjetivo de evitar expansiones exesivas durante la excavacion y la optimizacion del apuntalamiento disminuyendo la longitud de los perfiles metalicos requeridos.

El muro Milan de 60.00 cm fue complementado con un muro de acompanamiento de 20.00 cm, que fue colado despeus de la excavacion, completando el muro del cajon de cimentacion de 80.00 cm. **Fig. 74.**



FIGURA 74. EXCAVACIÓN DE LA CIMENTACIÓN DE LA TORRE MAYOR. OSCAR HENRY.

Además, desde el comienzo de las excavaciones fueron dispuestas varias referencias topográficas, puntos de nivelación en calles, banquetas y edificios, así como bancos de nivel profundos y superficiales, puntos para desplomes de edificios colindantes, referencias sobre los muros Milán, inclinómetros para medir la variación con la profundidad de los movimientos horizontales y diversas estaciones presiométricas para observar la evolución de la presión del agua en el subsuelo a diferentes niveles y diferentes etapas de construcción.

El trabajo desempeñado durante los trabajos de excavación de la cimentación del proyecto fue realizado de manera muy certera ya que no se tuvieron comportamientos inaceptables de los edificios e instalaciones colindantes y circundantes, gracias al correcto procedimiento constructivo elegido, protegido por la correcta instrumentación instalada.

- El volumen total excavado fue de 97,900 m³.
- 251 pilas construidas.
- 57 tableros de muro Milán construidos.
- 168 tablestacas precoladas.

La losa de cimentación tiene un volumen de concreto de 12,572 m³ y 1,526 toneladas de acero. **Fig. 75.**



**FIGURA 75. TORRE MAYOR, VISTA DURANTE SU CONSTRUCCIÓN Y EN LA ACTUALIDAD. AUVINET
GUICHARD, MARTÍNEZ OVIEDO.**

7. CONCLUSIONES.

La Ciudad de México es conocida y considerada a nivel mundial como un gran Laboratorio de Mecánica de Suelos a escala real, debido a la gran complejidad de sus suelos y el gran número de edificaciones y monumentos importantes, donde a lo largo de siglos, la Ingeniería de Cimentaciones ha encontrado un lugar de intenso desarrollo, generando así innovadoras soluciones para la construcción y buen comportamiento de cimentaciones de una gran variedad de edificaciones.

Una ciudad fundada con motivos puramente religiosos por los Mexicas y refundada en el mismo lugar como demostración del poder Español al subyugar a un pueblo, si esta ciudad se hubiera fundado con los conocimientos Geotécnicos mínimos de hoy en día, hubiera sido reubicada por obvias razones.

Desde mi particular punto de vista, es muy importante conocer la historia del desarrollo de esta importante rama de la Ingeniería, la geotecnia en nuestro país ha aportado con gran relevancia y prueba de ello se puede leer en el presente trabajo, muchos proyectos de gran importancia para la ciudad y que hoy en día son símbolos de la misma, no tuvieron un adecuado proceso de exploración, análisis y construcción que en nuestros días sería parte de un desarrollo elemental y ya establecido a seguir para poder proyectar y diseñar en esta ciudad una obra civil de cualquier relevancia. Sin embargo se tiene que considerar que en tiempos pasados la Ingeniería Geotécnica era casi desconocida e inexistente, para lo cual se utilizó con frecuencia el método de prueba y error para dar soluciones de cimentación, llegando a tener errores graves llegando a situaciones de falla o teniendo un mal comportamiento a largo plazo, pero de no haber existido tales errores muchos conceptos que conocemos hoy en día del comportamiento de cimentaciones no se habrían desarrollado, por lo menos no como lo conocemos ahora.

Conociendo así el pasado, se tienen los argumentos necesarios para no cometer los errores de aquellos tiempos, se puede demostrar así que por más que el desarrollo de la Ingeniería de Cimentaciones en la ciudad tenga avances tecnológicos importantes como en los últimos tiempos, tales como el mejoramiento en exploración de los suelos, avance en la calidad de ensayos a muestras, pruebas in situ de mayor calidad y herramientas computacionales cada vez más poderosas de análisis Geotécnico, no se deben olvidar los conceptos más básicos que muchas veces son los más importantes.

Sin duda en el futuro, la ciudad requerirá de más infraestructura y construcción de edificaciones de todo tipo, como el desarrollo de edificaciones verticales de gran altura debido a la escases de espacios disponibles en el centro de la ciudad, un ejemplo claro se ha dado en los últimos años en la zona de Reforma, donde actualmente se están construyendo dos torres de dimensiones y altura similares a la Torre Mayor, para ello el Ingeniero Geotecnista deberá estar preparado de la forma más completa posible, combinando los conocimientos técnicos, las herramientas modernas posibles y la experiencia de aquellas personas que han contribuido al desarrollo de la Mecánica de Suelos.

BIBLIOGRAFÍA.

Federico Mooser, **Mapa geológico del valle de México. Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal**, Dirección General de Obras. México D.F. 1975.

Eduardo Matos M., **Templo Mayor Guía Oficial**, INAH. México D.F. 1996.

A. Musset, **El agua en el Valle de México**, Centro de estudios Mexicanos y Centroamericanos, Editorial Pórtico. México D.F. 1992.

E. Santoyo, Efraín Ovando Shelley, Federico Mooser, Elvira León Plata. **Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México**, TGC geotecnia. México D.F., 2005.

Peck, Hanson, Thornburn. **Ingeniería de Cimentaciones**, Limusa Noriega Editores. México D.F., 1995.

E. Tamez, Enrique Santoyo, A. Cuevas. **La catedral Metropolitana y la Sagrario de la ciudad de México- Corrección al comportamiento de sus Cimentaciones**, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos-SEDESOL. México D.F. 1992.

Katsman, **Arquitectura del siglo XIX en México**, Editorial Trillas, México D.F., 1993..

Raúl J. Marsal, **Notas sobre el Diseño y Construcción de Cimentaciones en el Distrito Federal**, Comisión Federal de Electricidad. México D.F. 1986.

Ángel Borja Navarrete, José Luis Buendía, Fernando Islas, Manuel Larrosa, Gerardo Muñoz. **30 Años de Hacer Metro**, Empresas ICA. México D.F. 1997.

El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, Simposio 10 de Marzo de 1978, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México 1978.

Sánchez Mejorada de Gil, **La columna de la Independencia**, Editorial Jilguero. México D.F., 1990.

Nabor Carrillo. **El hundimiento de la ciudad de México y Proyecto Texcoco**, Secretaria de Hacienda y Crédito Público, México 1969.

Gaceta Oficial del G.D.F. **Reglamento de Construcción del D.F., Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones**, G.D.F. México D.F. 2004.

E. Santoyo, E. Ovando, J. A. Segovia. **Evolución de las Cimentaciones de Edificaciones en la Ciudad de México**, TGC Geotecnia, México 1998.

E. Santoyo, E. Ovando, Xavier Guzmán, O. Cuanalo, O. de la Torre. **Palacio de Bellas Artes Campañas de Inyección del Subsuelo**. TGC Geotecnia, México 1998.

Gabriel Auvinet Guichard y Edgar Méndez Sánchez. **Obras son Amores, El Siglo de la Mecánica de Suelos.** Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México D.F. 2010.

Enrique Santoyo Villa y Efraín Ovando Shelley. **Catedral y Sagrario de la Ciudad de México, corrección geométrica y endurecimiento del subsuelo.** TGC Geotecnia y CONACULTA. México 2008.

Oscar Henry Castro Almeida. **Diaporama "La Torre Mayor",** Universidad Autónoma Metropolitana. México D.F. 2010.

Leonardo Zeevaert. **Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions.** Van Nostrand Reinhold Company. New York 1983.

Geotecnia, número 222. Diciembre 2011-Febrero 2012, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. México 2012.

Geotecnia, número 223. Marzo-Mayo 2012, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. México 2012.

Geotecnia, número 224. Junio-Agosto 2012, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. México 2012.