



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ARQUITECTURA

**“COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES EN EL
VALLE DE MÉXICO Y SU RELACIÓN CON EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO”**

T E S I S

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE MEDICINA

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

ARQUITECTA

PRESENTA:

VILLALBA ANDRADE CECILIA IRENE ASESORES:

**DRA. EN ARQ. OLIVEROS SUAREZ MERCEDES ARQ.
BARBOZA RODRIGUEZ ANGELINA ARQ. GONZALEZ
TEJEDA IGNACIO**



CAMPUS CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX | México Julio 2022

AGRADECIMIENTOS

Terminar este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo profesional de mis asesores, en especial de la Dra. Mercedes Oliveros, quien con paciencia y confianza en mis capacidades me motivó a realizar este trabajo.

Agradezco a los docentes de la Facultad de Arquitectura, por haberme compartido sus conocimientos a lo largo de mi preparación, especialmente al Arq. José Calvillo por acompañarme desde mis inicios en la carrera y despertar mi gusto por la construcción y al Arq. Ignacio Coeto por siempre darme su opinión sincera, su apoyo y orientación cuando lo necesité.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por poner a mi disposición el espacio y herramientas necesarias para mi desarrollo académico y personal.

DEDICATORIAS

El presente trabajo está dedicado a mis padres, por su amor, apoyo, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

A mi hermana Lucia, por ser mi compañera, guía y mi más grande inspiración.

A mis abuelos, por ser el pilar de nuestra gran familia.

A mis amigos, por siempre acompañarme, llenando mis días de experiencias y buenos momentos.

“La calidad de vida de una persona está en proporción directa a su compromiso con la excelencia, independientemente del campo de actividad elegido.”

Vince Lombardi

CONTENIDO

07 INTRODUCCIÓN

10 MARCO TEÓRICO

Desarrollo geológico

Suelos

Zonificación geológica

Hundimiento regional

Sismicidad

Cimentaciones

38 MARCO METODOLÓGICO

Tipología de edificaciones

40 MATRICES

44 ZONA I (Lomerío)

Caso 1

Caso 2

Caso 3

Caso 4

54 ZONA II (Transición)

Caso 5

Caso 6

Caso 7

Caso 8

64 ZONA III (Lago)

Caso 9

Caso 10

Caso 11

Caso 12

74 APLICACIÓN EN PROYECTOS
ARQUITECTÓNICOS ACTUALES

Torre Arcos Bosques II

Torre Mítikah

Torre BBVA Bancomer

Torre Reforma

92 CONCLUSIONES

94 GLOSARIO

96 BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de cimentaciones es uno de los más importantes y antiguos problemas en el proceso constructivo de las edificaciones del Valle de México, ya que se presentan dificultades superiores a las que se encuentran en otras grandes ciudades del mundo. Las causas principales de estas dificultades son las características del suelo, el hundimiento regional y la alta sismicidad.

Hoy en día, existe una gran demanda en el medio de la construcción, por lo que es importante que los arquitectos cuenten con conocimiento en diversas áreas para poder proponer soluciones óptimas y justificadas durante su ejercicio profesional en cualquier etapa del desarrollo de una obra y mejorar la comunicación entre los demás especialistas. Sobre todo en proyectos grandes, es necesario que el arquitecto esté familiarizado con las características y comportamiento del suelo, por medio del estudio de mecánica de suelos, para poder prever los posibles problemas que podrían presentarse durante la ejecución de la obra.

El proyecto arquitectónico y el diseño de la cimentación son las etapas críticas de cooperación entre profesionales de distintas especialidades, ya que el diseño dependerá de las características propias del edificio, de la naturaleza del terreno y su entorno.

Por lo anterior, el presente trabajo se presenta como herramienta y guía complementaria al estudio del comportamiento de cimentaciones que permita, especialmente a los alumnos de arquitectura, fundamentar sus propuestas en sus ejercicios académicos dentro del Valle de México.

Esta tesis es un esfuerzo para contribuir en el interés por conocer otras áreas como son la ingeniería y la geotecnia, que son de gran importancia durante la construcción y el desarrollo de un proyecto arquitectónico.

En la primera parte de este trabajo se realizó una recopilación e investigación de datos, que nos permitirán comprender y sustentar el análisis final del comportamiento de diferentes estructuras en cada una de las zonas en las que se divide el Valle de México.

En la segunda parte, se consideraron las características generales de cada una de las tres zonas y cuatro tipologías de edificaciones para el análisis de doce casos hipotéticos en terrenos con un subsuelo sin anomalías importantes, mostrando su posible comportamiento y algunas consideraciones importantes.

Finalmente, el marco geográfico de los proyectos arquitectónicos actuales, que se toman para el análisis de comportamiento, se incluye información sobre la ubicación, dimensiones, historia del predio y estructuras existentes. En cuanto al marco físico comprende la descripción de la naturaleza de los depósitos del suelo, su estado actual el historial de cargas que puedan modificar el análisis, proporcionando una visión amplia de las características y rasgos físicos del terreno.

La información de las propiedades geotécnicas y la distribución estratigráfica de los materiales del subsuelo, que complementan este trabajo se obtuvieron de sondeos geotécnicos (SCE, SPT, mixtos, etc.) provenientes de estudios de Mecánica de Suelos realizados en la Cuenca de México por diferentes empresas privadas, instituciones académicas y dependencias de gobierno.

Por último, hay que señalar que el presente trabajo no es un manual de diseño de cimentaciones, si no una herramienta de apoyo para el desarrollo académico y, por lo tanto, solo tienen por objeto fijar criterios y métodos de diseño y construcción de cimentaciones. El estudio geotécnico específico para un proyecto de edificación debe contener la información y las recomendaciones precisas para el correcto diseño del sistema de cimentación.

MARCO TEÓRICO

DESARROLLO GEOLÓGICO DEL VALLE DE MÉXICO

El Valle de México han sufrido una evolución significativa en los últimos siglos debido a las características del suelo y el crecimiento del área urbana. El área de estudio es muy compleja por su localización dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), el cual constituye uno de los rasgos más característicos de la geología de México debido a su alta actividad volcánica.

La superficie del Valle de México está compuesta por la Ciudad de México (13.9%) Estado de México (50%) y otras porciones de los Estados de Hidalgo, Tlaxcala y Puebla.¹

En él surgen rocas volcánicas que forman las sierras que rodean la **cuenca**, producto de procesos eruptivos y erosivos-acumulativos que han actuado durante los últimos 30 millones de años.

La condición actual del relleno de la Cuenca de México es el resultado de procesos geológicos, volcánicos y tectónicos que inician en el Terciario Medio. Es entonces que puede fijarse el comienzo de la subducción de la placa de Cocos en el Pacífico, debajo de la placa Norteamericana, donde se encuentran los más grandes elementos 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.²

Los principales rasgos físicos de la cuenca se han mantenido, sin embargo, ciertos elementos han presentado una evolución significativa debido al hudiemiento de la zona lacustre.

1 Universidad Autónoma Metropolitana, (2006). "Plan Institucional Hacia la Suatentabilidad", México, D.F., Recuperado de: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/141/htm/sec_7.htm

2 Aguayo, J.E. y Trápaga, R., (1996). "Geodinámica de México y minerales del mar", México, D.F., Fondo de cultura económica.



FIG 1. Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM). Su estructura está constituida por valles y cuencas, con altitudes variables, gobernada por sistemas de fracturas y de fallas de tensión, por lo que es sísmicamente activa.

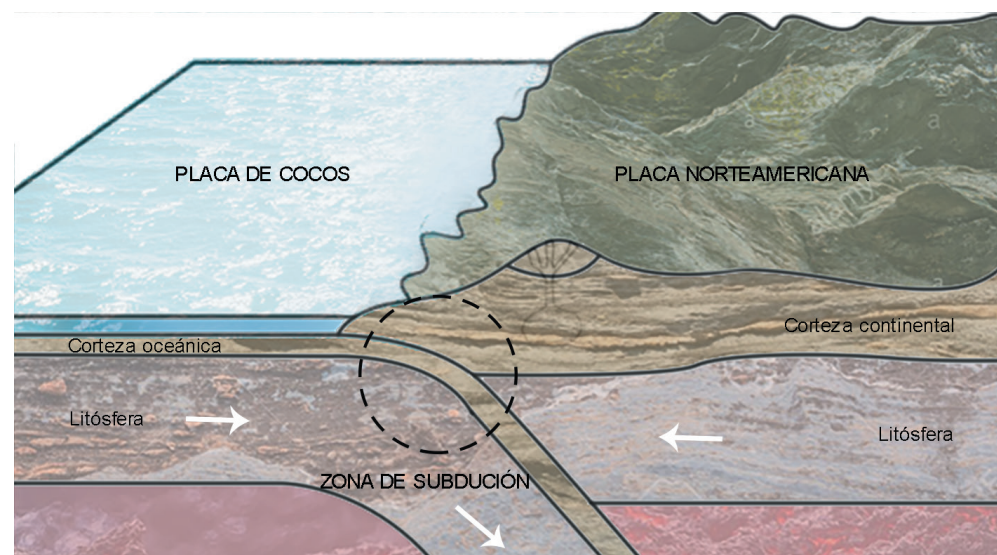


FIG. 2. Subducción de la placa de Cocos en el Pacífico.

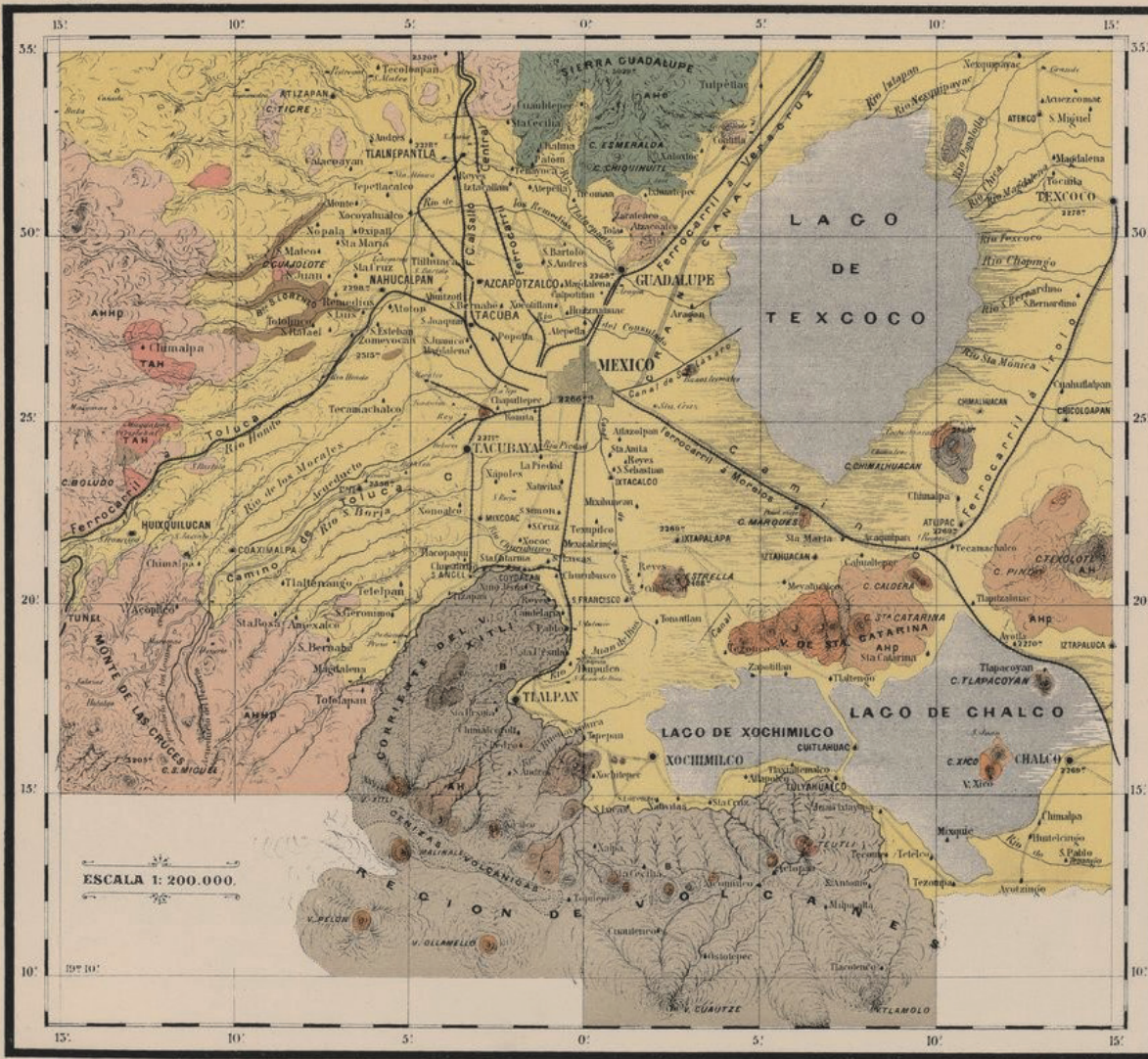
“El fondo de nuestro gran altiplano, dentro del cual se encuentra la gran Cuenca del Valle de México, está constituido por calizas mesozoicas de forma análoga a las de la gran Sierra Madre Oriental y sierras diseminadas dentro de la Mesa Central. Al formarse este fondo a principios de la era terciaria es cuando se inicia la historia geológica del Valle.”

Castillo y Ordóñez

COMISION GEOLOGICA MEXICANA

Ge D. 22084

Nº I. S.W de la Cuenca de México.



1. *Traqui-andesita de hornblenda*
 2. *Toba andesítica*
 3. *Brecha de pomez*
 4. *Toba pomosa fina*



1. *Andesitas hornblendicas e hiperstenicas*
 2. *Toba pomosa terciaria (Brecha de pomez)*
 3. *Toba cuaternaria con restos de Elephas, Equs. etc*
 4. *Capas de toba cuaternaria y aluvión*
 5. *Aluvión*

PLANO GEOLOGICO
PETROGRAFICO DE LA CUENCA DE MEXICO
REGION S. W.
 Formado por Antonio del Castillo, Director de
 COMISION GEOLOGICA MEXICANA
 Y
 EZEQUIEL ORDÓÑEZ
 Geólogo de la misma Comisión
 1895.

C Cuaternario. TAN Traqui-andesita de hornblenda. AHND Andesita de hornblenda e hiperstenica. AMC Deca. Andesita hornblendica con cuarzo. B Basalto y Labradorita. Brecha volcanica lapilli, bet. AHP Andesita de hiperstena. Toba andesitica. AH Andesita de hornblenda.

Eck. 94

FIG. 3 Plano geológico de la Cuenca de México (del Castillo y Ordóñez, (1983). Plano_geologico_y_petrografico_de_[...]Castillo_Patiño_btv1b53061550c_1.jpeg

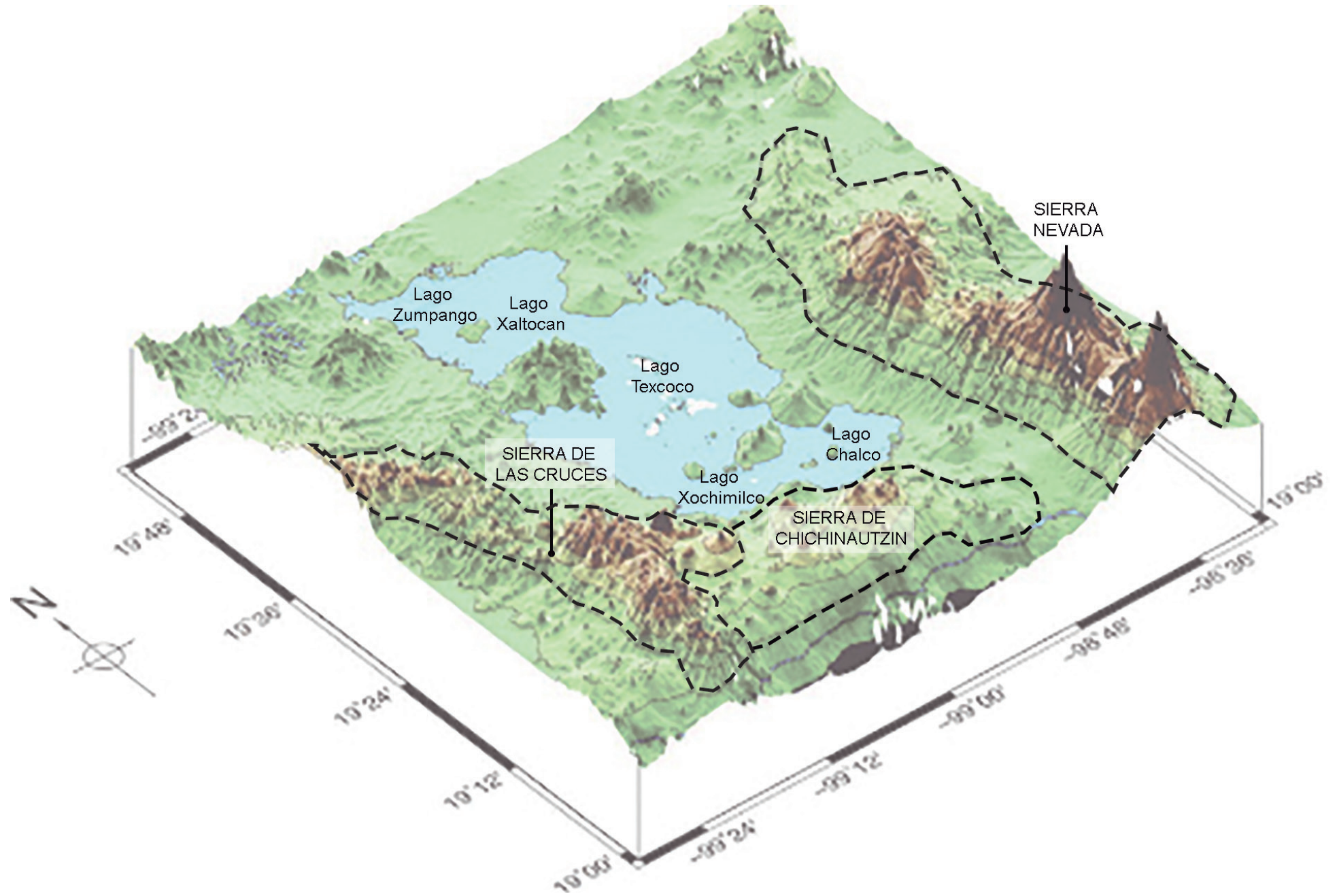


FIG. 4 Elevación topográfica del Valle de México, Sociedad Geológica Mexicana (2015).

Antiguamente, el centro de la Cuenca de México fue ocupado por el sistema de cinco lagos que se formaron hace unos 700 mil años, con la aparición de la Sierra del Chichinautzin, se cerraron los azolves de los ríos que corrían hacia el sur, produciendo una acumulación paulatina de **sedimentos**, rellenando parcialmente la cuenca hasta los niveles que conocemos hoy en día.³

El paisaje de la Cuenca del Valle de México puede ser dividida en dos regiones, la región norte (Lago Zumpango y Xaltocan) y la región sur (Lago de Texcoco, Xochimilco y Chalco), ambas están separadas por el estrecho formado entre la sierra de Guadalupe y el cerro de Chiconautla. Está limitado por la Sierra de las Cruces en su región oeste, por la Sierra Nevada en el este, por la Sierra de Chichinautzin en el sur, y por la sierra de Pachuca en el norte principalmente.

De igual manera, se puede dividir geológicamente en dos secciones fundamentales; por un lado, la zona alta del valle fue creada por continuas y prolongadas emisiones y erupciones de rocas volcánicas, mientras que la actual zona de lago se formó debido a procesos erosivos y acumulativos de grandes volúmenes de agua en el fondo del gran depósito.

Los sedimentos más gruesos (boleos, gravas y arenas) se depositaron en las riveras cuando la pendiente disminuía drásticamente y el río perdía fuerza, mientras que los limos y arcillas en suspensión alcanzaron mayores distancias y llegaron al centro del lago.

Estos depósitos intercalados al intemperizarse generaron arcilla altamente compresible. Por otro lado, las estructuras confinantes del lado oeste de la cuenca están directamente relacionadas con la estructura del subsuelo del área urbana de la Ciudad de México debido a que en esta zona se generaron gran parte de los procesos erosivos- acumulativos.

Actualmente, el crecimiento de la Zona Metropolitana generó grandes problemas, entre los que destaca el excesivo bombeo de agua en los estratos profundos para contrarrestar la insuficiencia del abastecimiento del agua potable, lo que causa agrietamientos y consolidaciones aceleradas de los sedimentos de los antiguos lagos.

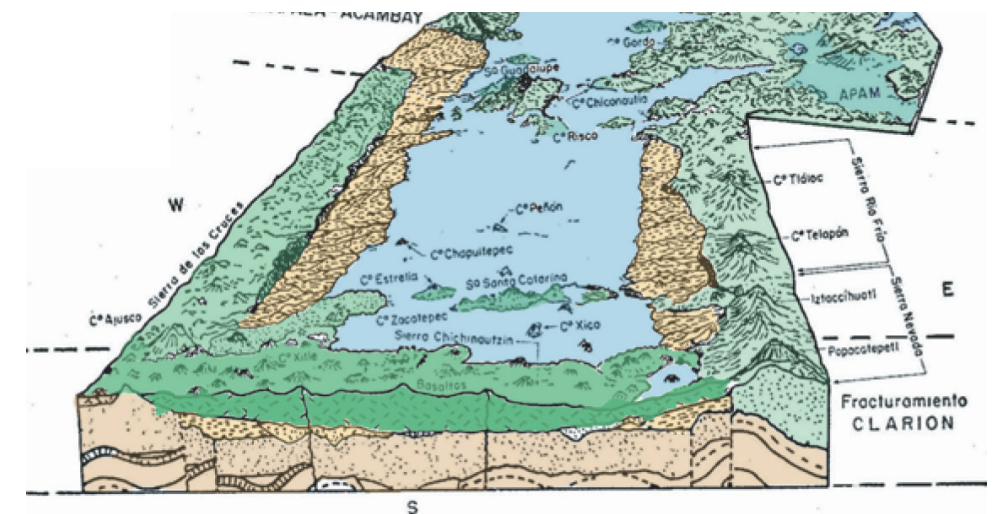
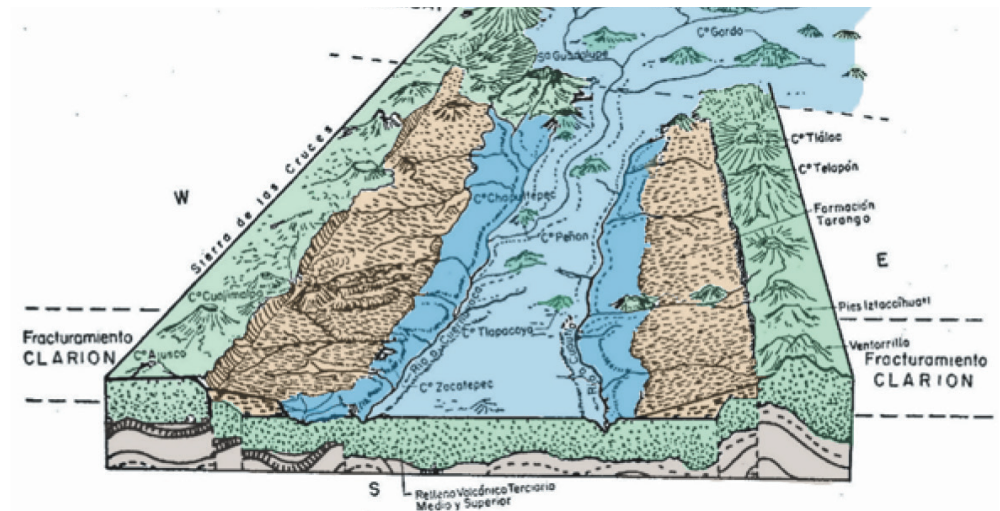


FIG. 5 Geología y morfología de la cuenca de México (Mooser, en Santoyo., 2005). Corte geológico de la cuenca, muestra la trayectoria de los ríos que corrían hacia el sur antes de la formación de la Sierra de Chichinautzin.

3 Instituto de Ingeniería UNAM Geología "Revisión y evaluación en geotecnia y estructuras para resolver la problemática del transporte aéreo en el centro del país" (2013) Convenio de Colaboración No. ASA-UNAM-13-002 Primer informe parcial

Inundaciones y desecación de los lagos

Antes de la llegada de los españoles, la cuenca se encontraba cubierta al norte, por los lagos de Zumpango y Xaltocan, cuando el nivel de agua crecía, desbordaba el exceso sobre el lago de Texcoco.

Nezahualcóyotl, séptimo rey de Texcoco, construyó dos obras hidráulicas notables: un acueducto en 1466, que permitió la conducción del agua potable de los manantiales de Chapultepec, y la albarrada de 16 kilómetros de largo, desde la Sierra de Guadalupe, hasta el cerro de la Estrella en Iztapalapa.⁴ Como consecuencia de su construcción, el Valle de México, quedó dividido en dos cuerpos de agua, al norte, donde se fundaría la ciudad, transformado por los aztecas en un lago de agua dulce, el Texcoco al centro, y al sur Xochimilco y Chalco al sur, que continuaron siendo de agua salada.

A la caída de Tenochtitlán en 1521, comenzó la desecación del Lago de Texcoco con el uso de técnicas e instrumentos prehispánicos, debido a las continuas inundaciones que la aquejaban.

A finales del siglo XVIII, se continuaron buscando soluciones para reducir las áreas lacustres, construyendo canales para recoger las aguas de distintos lagos, en las décadas de 1850 y 1860 el ingeniero Francisco de Garay participó en el proyecto de desagüe general de la cuenca de México a través del llamado Gran Canal y el túnel de Tequixquiac, con el propósito de disminuir el agua que se vertía al lago de Texcoco. Tal desagüe desembocaría al río Tula y a sus afluentes, y de esa manera conducir el agua 300 kilómetros, desde la cuenca hasta el Golfo de México.



FIG. 6 Lagos del Valle de México a principios del siglo XVI, obras de defensa (Cruickshank, 1998).

4 Suprema Corte de Justicia de la Nación (2007) "Competencia federal para regular la recarga del acuífero de la Ciudad de México con aguas residuales". México, Dirección General de la Coordinación de Compilación y Sistematización de Tesis, 107 p.

ÉPOCA DILUVIAL



COMIENZO DE SIGLO XVI



COMIENZO DE SIGLO XIX



AÑO 1889

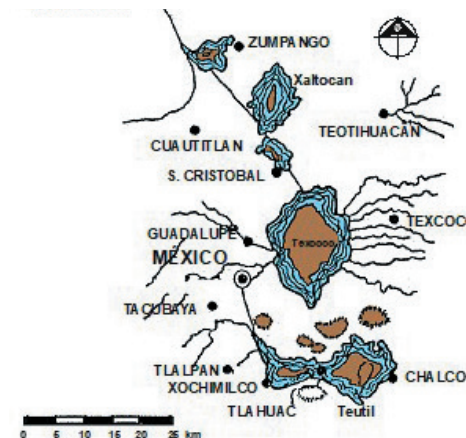


FIG. 7 Deseccación de los lagos del Valle de México. (Cruickshank, 1998). Imágenes extraídas de la Presentación de Proceso Constructivo: Muros Milán Abril 2015 del Ing. José Antonio Segovia Pacheco.



FIG. 8 Marca de la Inundación de 1629 Madero esquina con Molotínía (izquierda); Ciudad de México durante la inundación en 1950 (arriba). Ing. José Antonio Segovia Pacheco.

A finales del siglo XV, por falta de una tecnología adecuada para regular el flujo del agua y a causa de abundantes lluvias, la capital azteca sufrió una fuerte inundación, única de verdadera importancia en la época prehispánica.

En 1629 la ciudad tuvo la peor inundación de su historia.

En 1902 el problema de las inundaciones se presentó nuevamente, debido al crecimiento de la ciudad y su saturación de sus desagües, obligando a perforar nuevamente la cuenca con un nuevo túnel construido entre 1937 y 1942.

A principios del siglo XX, se desarrolló el sistema de abastecimiento de agua potable procedente de Xochimilco, la obra total se concluyó en 1912.

En los años setenta se determinó dar solución final al problema de las inundaciones a través de la construcción del Drenaje Profundo.

Actualmente el sistema de drenaje de aguas pluviales y residuales de la zona metropolitana, se compone de ríos entubados, vasos de regulación, el Gran Canal de Desagüe, interceptores, el Sistema de Drenaje del Lago de Texcoco y los emisores.

SUELOS

El **suelo** se puede definir como la capa superficial de la corteza terrestre formada por la disgregación y descomposición de granos minerales y materia orgánica que pueden separarse por medios mecánicos comunes. Es considerado un material granular heterogéneo compuesto de diversas partículas que incluyen cantidades variables de **agua y aire**.⁵

Una **roca** es un agregado de uno o más minerales sólidos, con propiedades físicas y químicas definidas, que se agrupan de forma natural y no pueden separarse por medios mecánicos comunes. Se clasifican según su modo de formación u origen en tres grupos: **ígneas, sedimentarias y metamórficas**; y cada grupo contiene a su vez gran variedad de tipos de roca que difieren entre sí por su composición y textura.

Clasificación de suelos

Por tamaño de partículas

Suelos finos: se dividen en limos y arcillas, la diferencia reside en la forma, los limos son de forma esférica o cúbica y las arcillas de forma laminar.

Suelos gruesos: con arenas y gravas, en general son de forma esférica o cúbica.

Por sus deformaciones

Expansivos: son aquellos que aumentan su volumen al sufrir un incremento de humedad

Colapsables: son los que sufren asentamientos súbitos al aumentar la humedad

Licuable: los que ante movimientos horizontales se comportan como lo haría el agua.

Por historia de uso

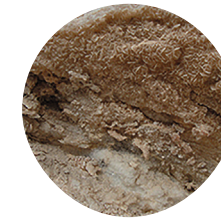
Normalmente consolidado: Cuando un suelo no ha sido sometido a esfuerzos superiores de los que provienen de la sobrecarga propia de su volumen.

Preconsolidado: Cuando el suelo ha sido sometido a un esfuerzo superior al que produce la sobrecarga del propio terreno



Roca Ígnea

Formadas por la acumulación y consolidación de lava, (magma enfriado en la superficie al ser expulsado)



Roca Sedimentaria o Estatigráfica

Formadas por la desintegración de rocas preexistentes, acumulación de minerales o por la compactación de restos vegetales y/o animales.



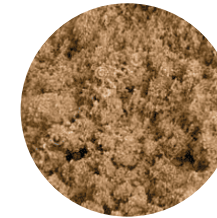
Roca Metamórfica

Transformación de rocas preexistentes que han sufrido ajustes estructurales y mineralógicos bajo ciertas condiciones físicas o químicas (altas presiones y temperaturas)



Grava

Son el componente más estable en presencia del agua, pero carece de cohesión en estado seco, por lo que requiere de limos y arcillas para formar una estructura firme en los suelos



Arena

Son granos minerales, no presenta grandes desplazamientos entre las partículas, pero poseen una fuerte fricción interna.



Limo

Constituyen la porción gruesa de la fracción microscópica de los suelos, tienen poca o ninguna plasticidad o cohesión.



Arcilla

Partículas de tamaño microscópico o submicroscópico, tienen alta plasticidad, cohesión y una gran capacidad de absorción.

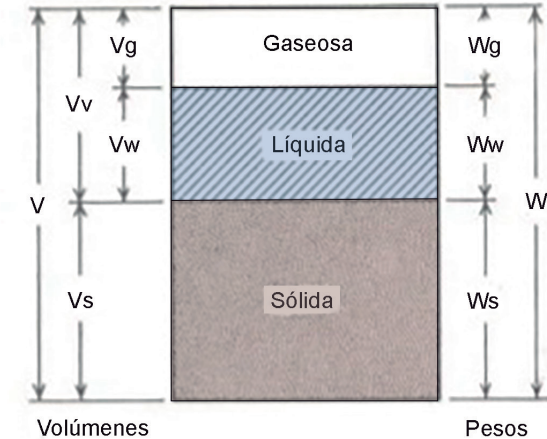
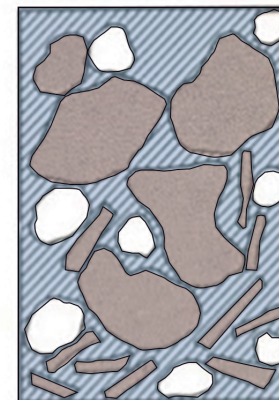
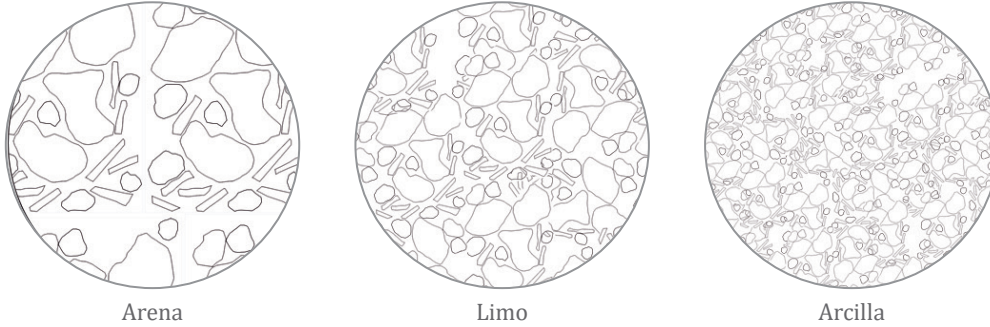


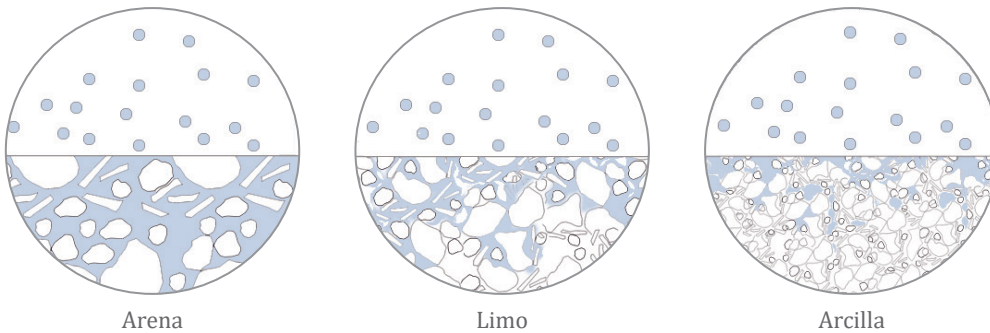
FIG. 9 Relaciones entre las fases de un suelo.

Propiedades de los suelos

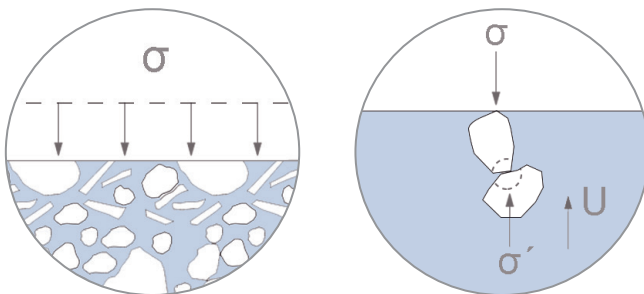
Porosidad: Porción de espacios ocupados por agua y aire que existen en la masa del suelo, ésta propiedad va ligada a la estructura del suelo.



Permeabilidad: Circulación de agua a través del suelo. Cuando los poros están totalmente llenos de agua se le llama suelo saturado.



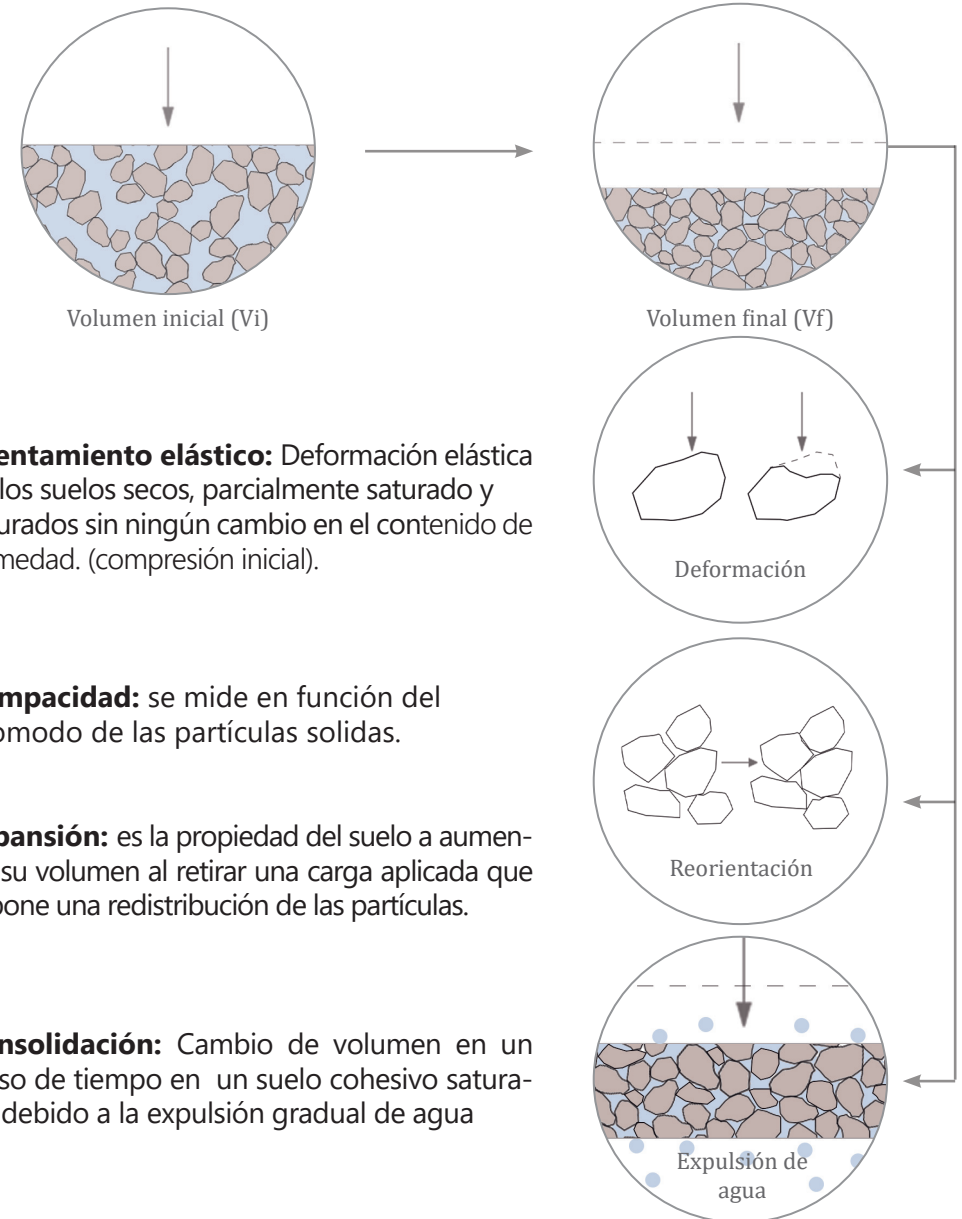
Cohesión: Unión de las partículas del terreno gracias a sus fuerzas internas, que dependen, entre otras cosas, del número de puntos de contacto entre ellas.



$$\sigma = \sigma' + U$$

σ = Esfuerzo total (resistencia)
 σ' = Esfuerzo efectivo (sólidos)
 U = Presión de agua de poro

Compresibilidad: Capacidad que tienen los suelos para disminuir su volumen bajo la acción de cargas. La alta compresibilidad de un suelo produce el asentamiento de los edificios.



Asentamiento elástico: Deformación elástica de los suelos secos, parcialmente saturado y saturados sin ningún cambio en el contenido de humedad. (compresión inicial).

Compacidad: se mide en función del acomodo de las partículas sólidas.

Expansión: es la propiedad del suelo a aumentar su volumen al retirar una carga aplicada que supone una redistribución de las partículas.

Consolidación: Cambio de volumen en un lapso de tiempo en un suelo cohesivo saturado debido a la expulsión gradual de agua

Exploración del suelo

Para poder conocer las propiedades y comportamiento del suelo es necesario realizar un **estudio de mecánica de suelos** que se realiza mediante exploración de campo y pruebas de laboratorio, siendo apoyada por el conocimiento geológico e histórico general y local que se tenga de la zona de interés.⁶

El método tradicional de exploración, consiste básicamente en obtener muestras de suelo (alteradas y/o inalteradas), llevarlas al laboratorio y determinar su **estratigrafía, propiedades índices y mecánicas**, para su uso en cálculos de capacidad de carga y asentamientos.

Este proceso se suele complementar con pruebas de campo, con las que se procede a estimar directamente las capacidades de carga o asentamientos a partir de sus resultados.

El estudio geotécnico tiene por finalidad conocer las características del terreno que soportará la obra tanto en su fase de ejecución definiendo:

- La naturaleza de los materiales a excavar
- Modo de excavación
- Los taludes a adoptar en los desmontes de la explanación
- La capacidad portante del terreno para soportar los rellenos y la estructura
- Los asientos que puedan producirse en un tiempo determinado

Pruebas de campo

Las pruebas se pueden realizar con o sin recuperación de muestras y se consideran indispensables para los suelos en los que el muestreo de tipo inalterado resulte difícil o deficiente y en construcciones extensas o con excavaciones profundas.

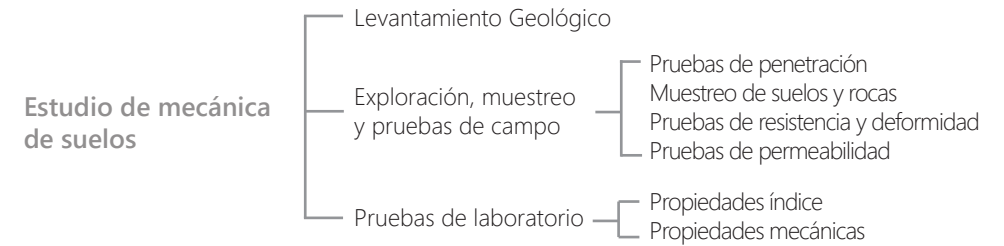
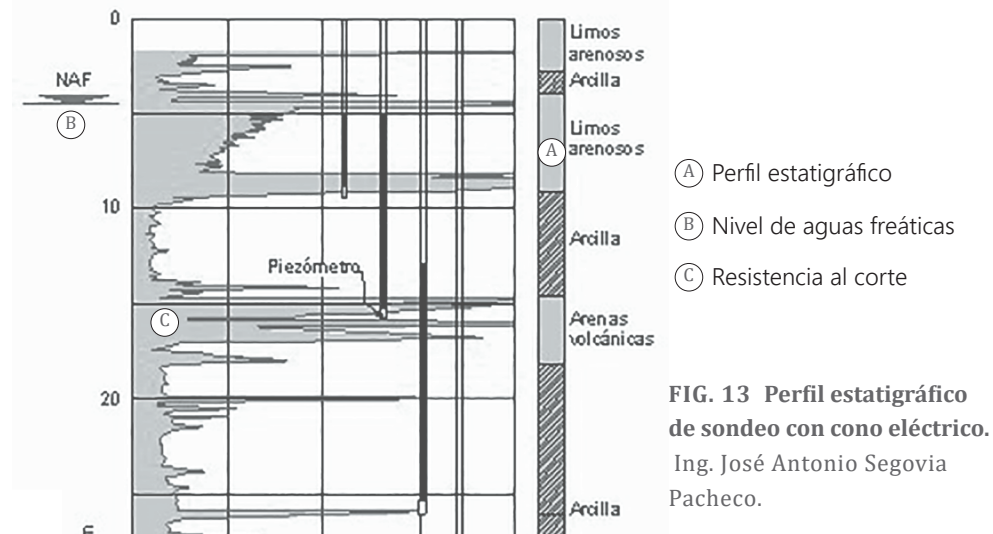
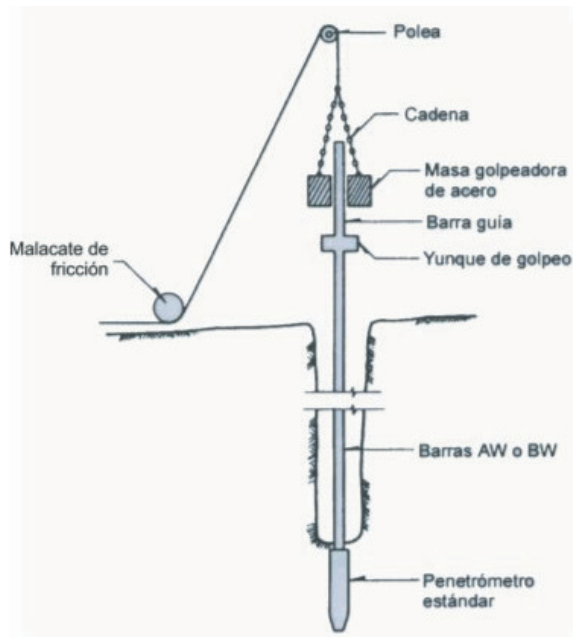


FIG. 10 Prueba de campo (izquierda), muestras para pruebas en laboratorio (derecha).



⁶ Duque, G., y Escobar, C.E., (2016), "Geomecánica: Origen, formación y constitución del suelo, fisicoquímica de las arcillas", Universidad Nacional de Colombia.



Nº de Golpes del SPT	Consistencia
< 2	Muy Blanda
2 - 4	Blanda
4 - 8	Media
8 - 15	Firme
15 - 30	Muy Firme
> 30	Dura



Muestra alterada (SPT)



Muestra inalterada (PCA)



Sondeo a rotación

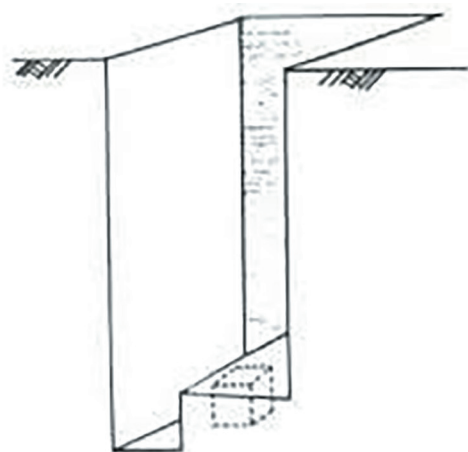


FIG. 11 Prueba de Penetración Estándar (arriba), Pozo a cielo abierto (abajo)

Prueba de Penetración Estándar (SPT)

Mide el número de golpes requeridos para lograr la penetración de un muestreador mediante un intervalo de profundidad. El uso de este método es muy común porque nos determina los principales parámetros mecánicos de los suelos. En caso de que se den 50 golpes y no se logre bajar 60 cm la prueba se suspende.

Muestras: Alteradas

Estatigrafía: Si

Tipos de suelo: Blandos y compactos

Limitantes: No es apto para suelos duros o rocosos; y en suelos extremadamente blandos puede ser ineficiente ya que se hunde por su propio peso.

Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC)

Se puede usar en lugar del método de penetración estándar.⁷

Muestras: Alteradas

Estatigrafía: Si

Tipos de suelo: Blandos

Limitantes: No es apto para suelos duros.

Pozos a Cielo Abierto

Los pozos se excavan con el fin de tomar muestras de cada estrato, para observar y levantar el perfil estratigráfico de sus paredes. Dichas excavaciones deben tener un área de 1.00 x 1.5m (como mínimo), con separaciones y profundidades variables. Se recomienda combinarlos con sondeos de penetración estándar o de cono.

Muestras: Alteradas o inalteradas

Estatigrafía: Si

Tipos de suelo: Blandos y duros

Limitantes: Nivel de aguas freáticas, profundidad y estabilidad de taludes.

Configuración general del subsuelo

Costra superficial: En general está formada por tres subestratos, que constituyen una secuencia de materiales naturales cubiertos por un relleno artificial heterogéneo.

- 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, debajo de la catedral en ocasiones excede los 15 m.
- Suelo blando: Se le puede describir como un depósito aluvial blando de pequeño espesor. Fue el último sedimento fangoso que se depositó en el fondo del lago.
- Costra seca natural: 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.

Serie arcillosa superior (SAS): Esta serie tiene un espesor que varía entre los 25 y 50 m. Aunque es muy uniforme, se pueden identificar dos estratos principales, de acuerdo con su origen geológico y con los efectos de consolidación inducida por sobrecargas superficiales y por el bombeo profundo.

- Serie consolidada profunda (ACP): Se trata de arcillas normalmente consolidadas en virtud de la pérdida continua de presión de agua que prevalece. 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.
- Lentes Duros (LD): 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.

Capa dura (CD): Es un depósito heterogéneo en el cual predominan limos arenosos con algo de arcilla y ocasionales gravas. Tiene una **cementación** muy errática y su espesor es 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:

- La complejidad estratigráfica de esta capa dura ha dificultado la extracción de muestras inalteradas que permitan definir confiablemente sus propiedades mecánicas.
- Desempeña un papel muy importante en las cimentaciones profundas de la ciudad de México, ya que para muchas estructuras, sirve como apoyo de pilotes.

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 preconsolidadas.

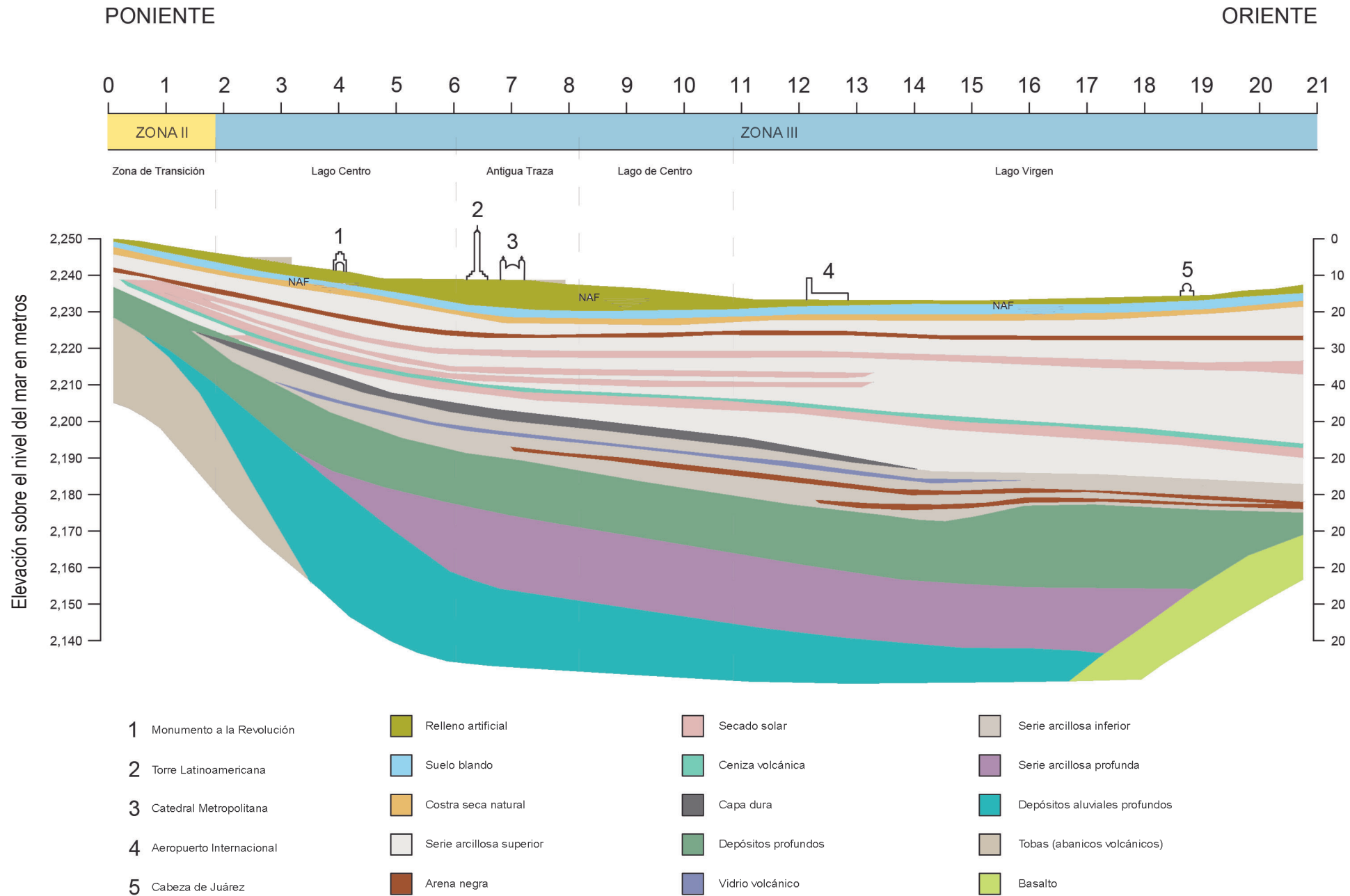


FIG. 12 Perfil estratigráfico del suelo en el Valle de México Asesores en Cimentaciones y Mecánica de Suelos. <http://fotonavegante.blogspot.com/p/geografia-geologia.html> Inio Segovia Pacheco.

ZONIFICACIÓN GEOLÓGICA

El área urbana del Valle de México se ha subdividido en tres grandes zonas principales (lago, transición, y lomas), con base en la información de sondeos y observaciones geológicas. En las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones, modificadas en 2017, las describe con las siguientes características generales:

a) **Zona I. Lomas**, formadas por rocas o suelos 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 esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos artificiales no controlados;

b) **Zona II. Transición**, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros;

c) **Zona III. Lacustre**, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.⁸

Esta zonificación solamente podrá usarse para definir la zona a la que pertenece un predio dado en el caso de las construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones someras.

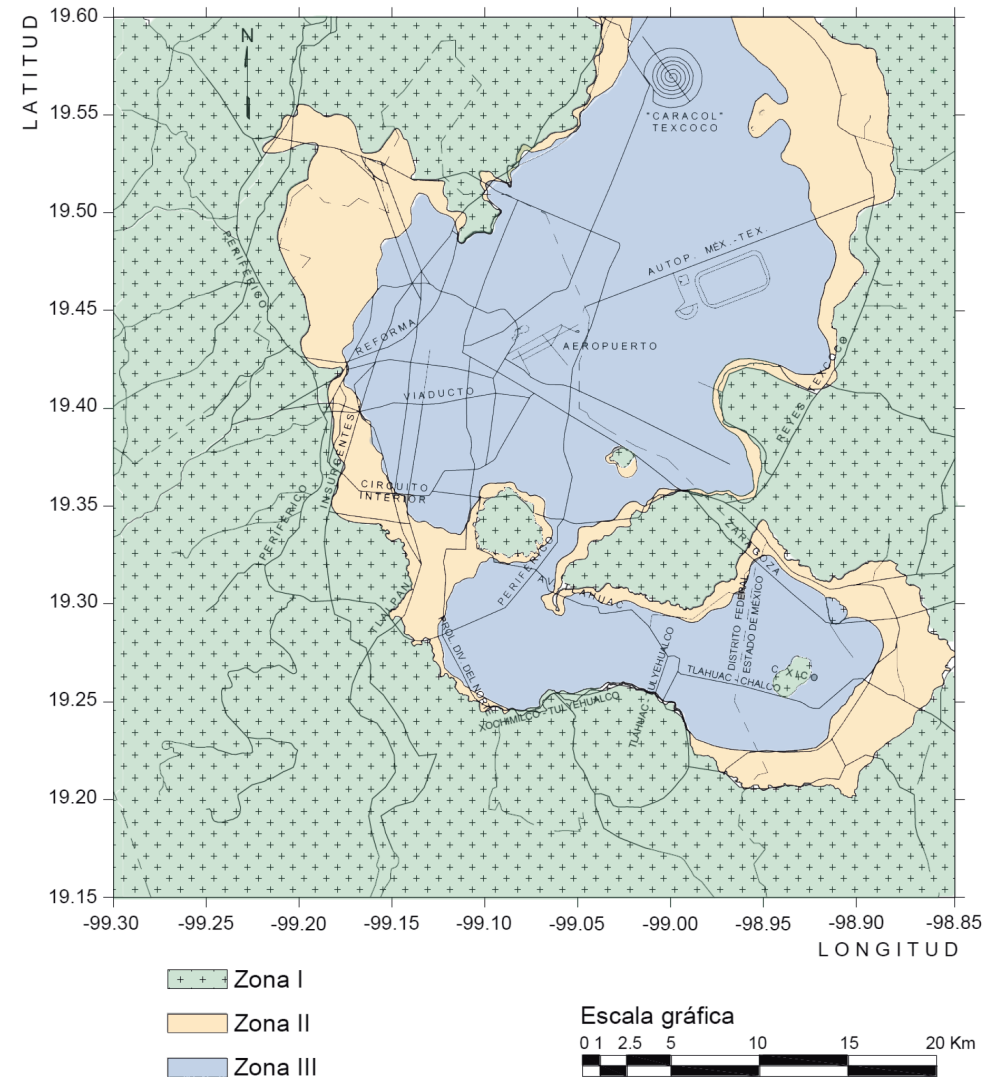


FIG. 13 Zonificación geotécnica de la Ciudad de México, (2017) Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones en el Distrito Federal.

8 Gaceta Oficial de la Ciudad de México, (2017) "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones". México, CDMX.

La Norma nos menciona que los predios ubicados cerca de las fronteras entre dos de las zonas se supondrán ubicados en la más desfavorable. En cualquier otro caso, la zona se definirá a partir de exploraciones directas del subsuelo.

La división geotécnica del Distrito Federal en tres zonas (Lomas, Transición y Lago), planteada inicialmente por Marsal y Mazari en 1959, es generalmente, el más utilizado por su sencillez. Sin embargo, se sabe que se trata de una zonificación simplificada, ya que existen numerosos sitios particulares donde la estratigrafía local difiere significativamente de la considerada como típica en el mapa de zonificación actual como veremos más adelante.

El estudio de la distribución espacial de las propiedades del subsuelo del valle de México se ha realizado a base de análisis de profundidad, espesores de los estratos típicos del subsuelo y depósitos profundos. El contenido del agua es la propiedad que más destaca, debido a las correlaciones que presenta con el tipo de material sólido y sus propiedades mecánicas.

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, 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 comprensibles superior e inferior, separados por la capa dura, que es típica en la parte ocupada antiguamente por el gran lago.

Además de la diferencia entre las zonas de transición y el lago, en esta última es posible diferenciar 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.

Es importante mencionar que el suelo de la cuenca está en constante cambio debido a la alteración en el contenido de agua y la consolidación del manto arcilloso, por lo que es necesaria una actualización progresiva de la zonificación.

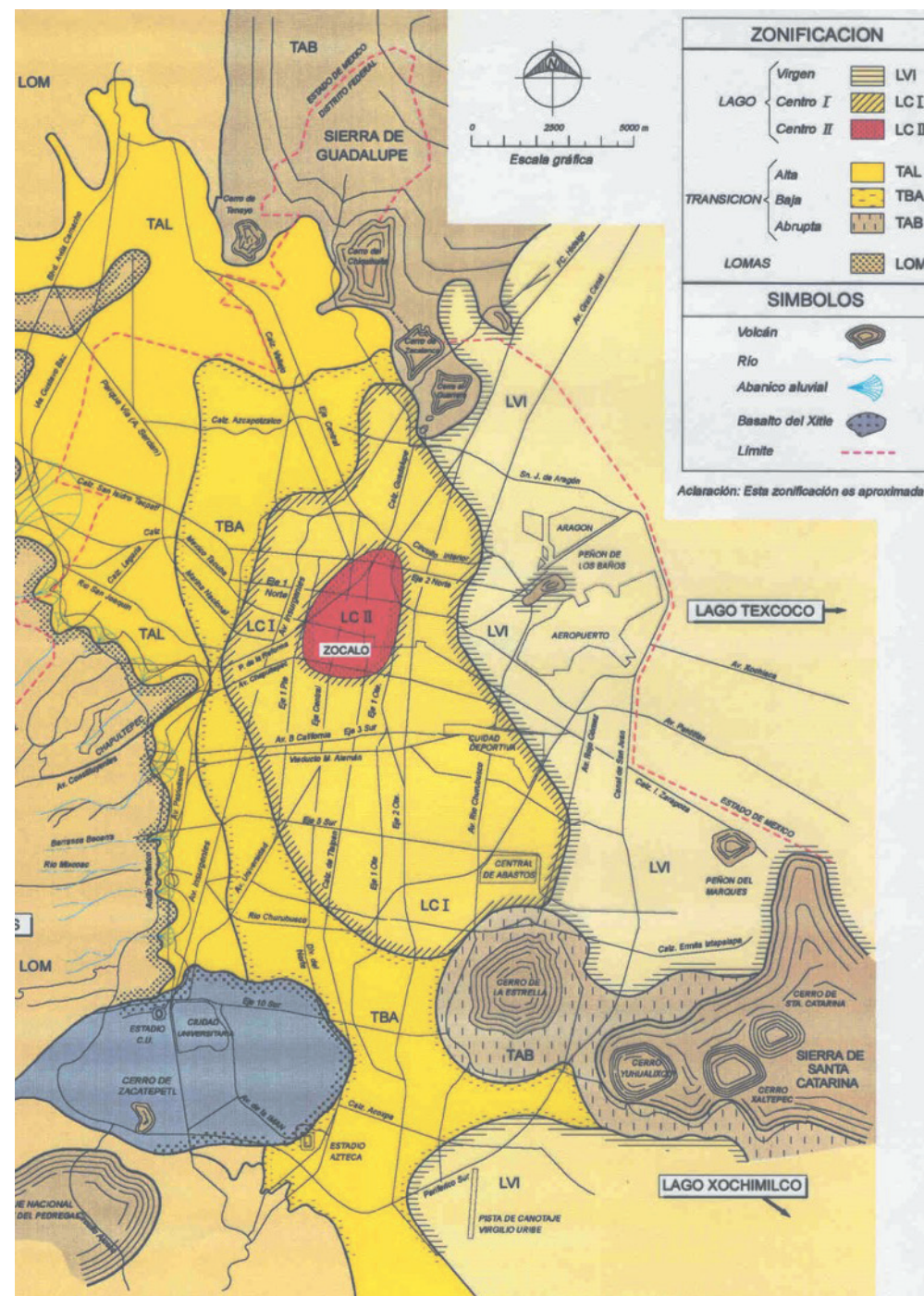


FIG. 14 Zonificación geotécnica detallada. Ing. José Antonio Segovia Pacheco.

HUNDIMIENTO REGIONAL

La extracción de agua de los **acuíferos**, que es el material que se localiza debajo en los depósitos profundos genera dos severas consecuencias dentro del valle de México, la inevitable reducción de agua extraíble y la consolidación de los depósitos arcillosos de origen lacustre que constituyen al valle.

Actualmente, las Normas Técnicas para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTC, 2017), muestran un mapa donde se indican las curvas de profundidad similar a los depósitos profundos, estos valores se asocian con el espesor de los suelos compresibles.

El incremento de los esfuerzos efectivos provocados por la disminución de la presión del agua, genera un cambio en las propiedades dinámicas del suelo, reflejándose en una reducción de las deformaciones ante cargas permanentes impuestas y en un aumento de la resistencia al esfuerzo cortante.

En un estudio realizado por el Centro de Investigación Sísmica, se observó que el periodo dominante de vibración y la respuesta dinámica del suelo pueden cambiar fuertemente con el tiempo, por lo que algunas estructuras ubicadas en suelos con periodo de vibración largo, pueden estar sujetas a aceleraciones sísmicas mayores que aquellas para las que fueron diseñadas.⁹

El fenómeno del hundimiento regional persiste, causando daños serios en la infraestructura urbana subterránea, agrietamiento del suelo en las zonas de transición y afectaciones en el correcto comportamiento de las cimentaciones, presentando la emersión en aquellas apoyadas en los estratos competentes y la presencia de fricción negativa en pilas, pilotes y cajones de cimentación.

Cabe señalar que actualmente los sitios que presentan mayores hundimientos, ya no se ubican en la antigua traza de la Ciudad; ahora se localizan en varios sitios del oriente y del sur del Valle de México, éstos sitios corresponden a las zonas donde el subsuelo presenta mayores espesores de arcilla.

9 Aguilar H. R., Galicia M., Pérez-Rocha L. E., Avilés J., Vieitez L. y Salazar M. "Cambios en los espectros de diseño sísmico del Valle de México debidos al hundimiento regional". Centro de Investigación Sísmica, A.C. México, D.F.

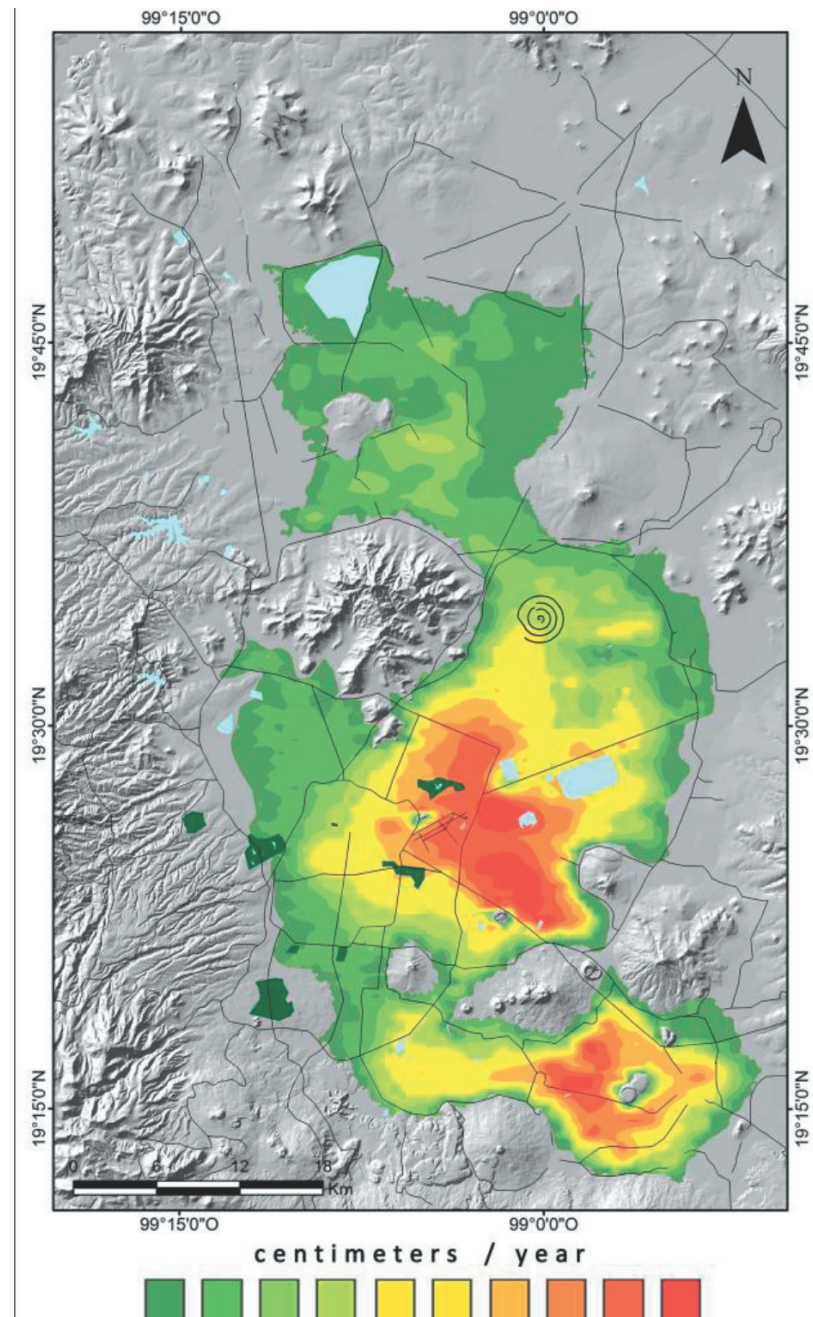


FIG. 15 Mapa de velocidades de hundimiento. (Auvinet, 2015). Periodo 1999-2008 en la zona lacustre.

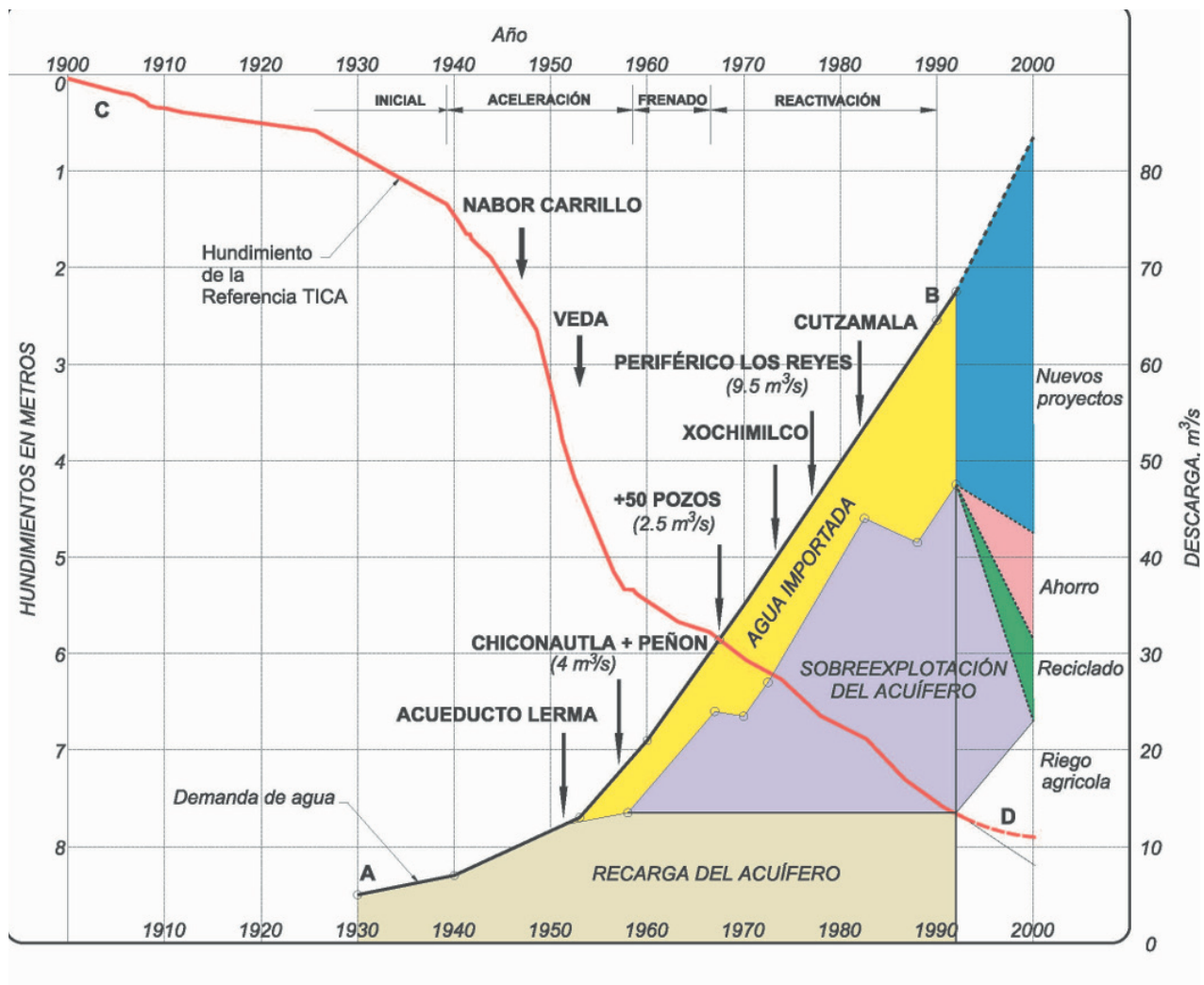


FIG. 16 Relación entre el hundimiento regional en el Centro Histórico y la extracción de agua del subsuelo del Valle de México (Tamez, 1992).

FIG. 17 Emersión aparente por cimentación en pilotes en punta en la Columna de Independencia; hundi-miento diferencial y re cimentación del Templo de las Capuchinas (abajo).



SISMICIDAD

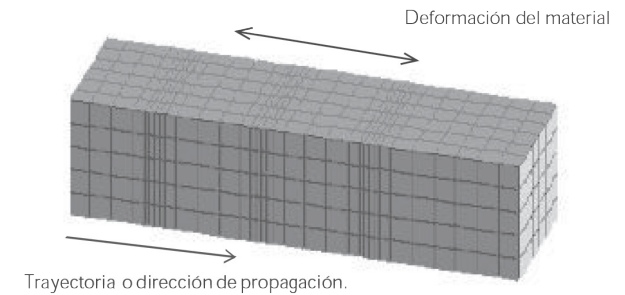
Se entiende por sismo a las **vibraciones** de la Tierra ocasionadas por la propagación, en el interior o en la superficie de ésta, de varios tipos de ondas elásticas.¹⁰

En el transcurso de los años, el Valle de México se ha visto afectado por varios eventos sísmicos de elevada intensidad debido, como ya vimos anteriormente, a su localización geológica. En los límites entre placas, donde éstas hacen contacto, se generan fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento de una respecto a la otra, generándose grandes esfuerzos en el material que las constituye, si dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia del material, ocurre una ruptura violenta y la liberación repentina de la energía acumulada, generando la propagación de ondas sísmicas.

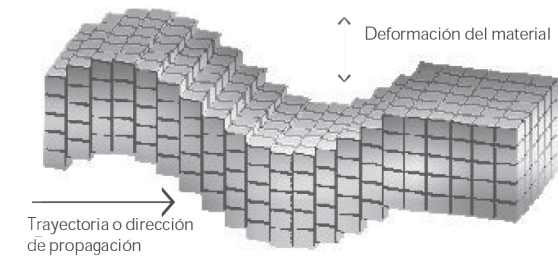
Ondas sísmicas

Al ocurrir un sismo, tres tipos básicos de ondas producen la sacudida que se siente y causa daños:

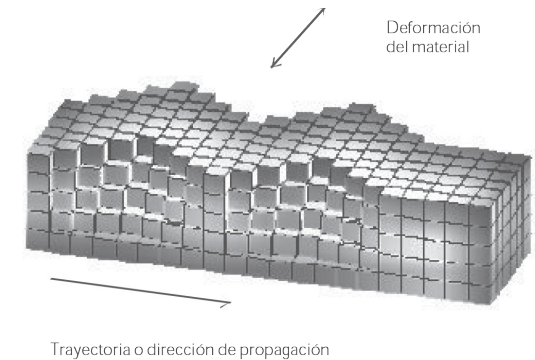
- **Onda primaria u onda P:** Es la más rápida de éstas, cuya velocidad varía dependiendo del tipo de suelo. Alternadamente comprime y expande la roca, en la misma dirección de su trayectoria, por lo que genera cambios de volumen transitorios. Genera un efecto de retumbo que hace vibrar paredes y ventanas.
- **Onda secundaria u onda S:** Mientras se propaga, deforma el material lateralmente respecto de su trayectoria. Sacude la superficie del terreno vertical y horizontalmente. Este es el movimiento responsable del daño a las construcciones, en zonas cercanas al epicentro e incluso a distancias considerables.
- **Ondas superficiales:** Se propagan por la parte más superficial de la corteza terrestre, viajan con menor velocidad a las ondas internas; y se pueden clasificar en dos grupos:
 1. Ondas Love: Deforman el suelo similarmente a las ondas S, aunque únicamente en dirección horizontal.
 2. Ondas Rayleigh: Producen movimiento vertical, similar al de las olas marinas.



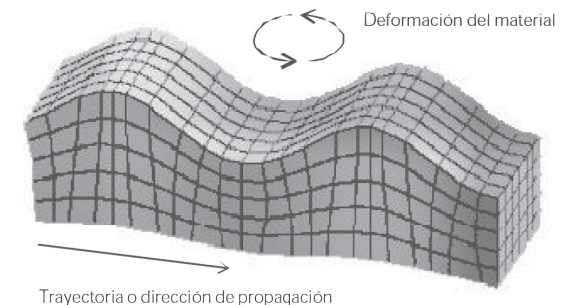
Onda primaria u onda P



Onda secundaria u onda S



Onda Love



Onda Rayleigh

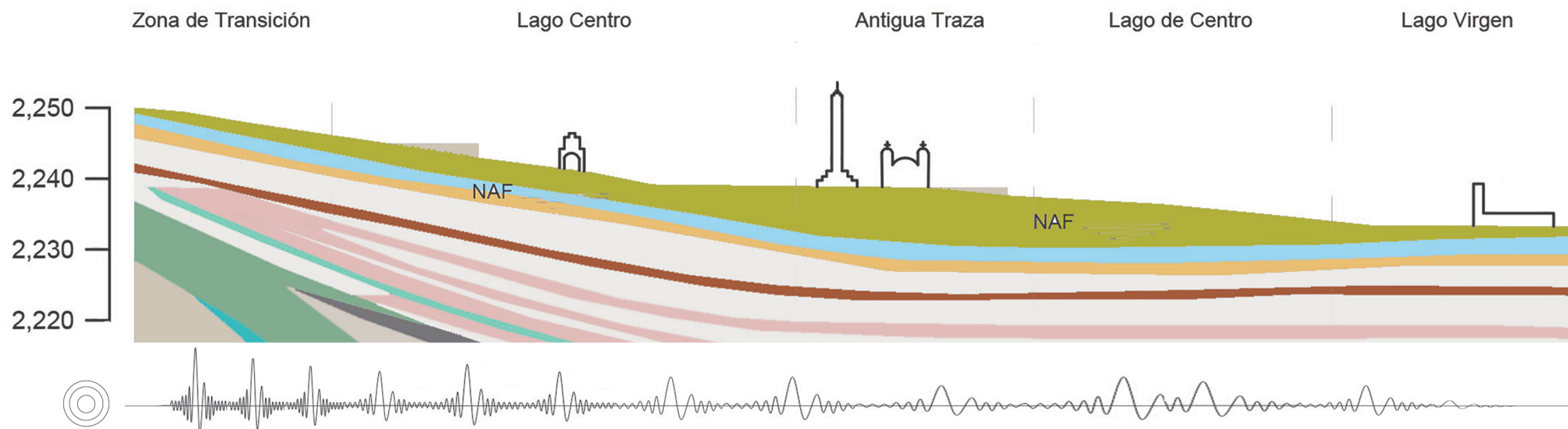


FIG. 18 Diferencias en las frecuencias y aceleraciones de las ondas sísmicas en las distintas zonas. La trayectoria de las ondas sísmicas es más complicada de lo que muestra, debido a que la Tierra está formada por diferentes capas con propiedades como densidad, espesor y constitución distintas para **cada una de ellas**.

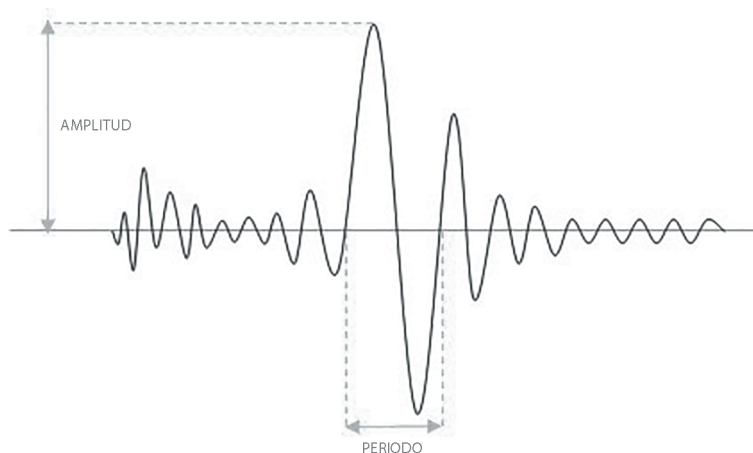


FIG. 19 Amplitud y periodo de onda. La amplitud (A) de la onda es el pico máximo medido desde la línea central. El período (P) se refiere al tiempo que transcurre para completar un ciclo de vibración.

Los factores que interactúan en un sismo son: el tipo de suelo, las características del movimiento, la cimentación y el comportamiento de la superestructura, de ello dependen los diferentes modos de vibración del edificio. A la modificación de las propiedades del suelo provocada por la presencia de la estructura y viceversa se le conoce como interacción suelo-estructura.

Las características del suelo de las cuales depende la interacción son: sus propiedades dinámicas y estáticas (desplazamiento, cohesión, compresibilidad), la profundidad y su estratigrafía.

Las características de interés del movimiento son la duración, la amplitud y la **frecuencia**, refiriéndose la amplitud a los máximos valores que se alcanzan durante el sismo, ya sea de desplazamiento, velocidad o aceleración del suelo y la frecuencia al número de ciclos de **oscilación** del movimiento por unidad de tiempo. Dichas características dependen de la distancia al **epicentro** (punto en la superficie de la Tierra sobre el origen del movimiento sísmico), la profundidad del punto de origen sismo (**foco o hipocentro**), y magnitud (energía liberada).¹¹

Las ondas que crean el movimiento emanan por el suelo, sus características e interacciones generan movimientos irregulares durante todo este trayecto. El movimiento del suelo daña las construcciones debido a las fuerzas de inercia generadas interiormente en el edificio.

11 Becerra, B., (2014), "Condiciones resistentes de los edificios ante los sismos", México, Lomo Sapiens.

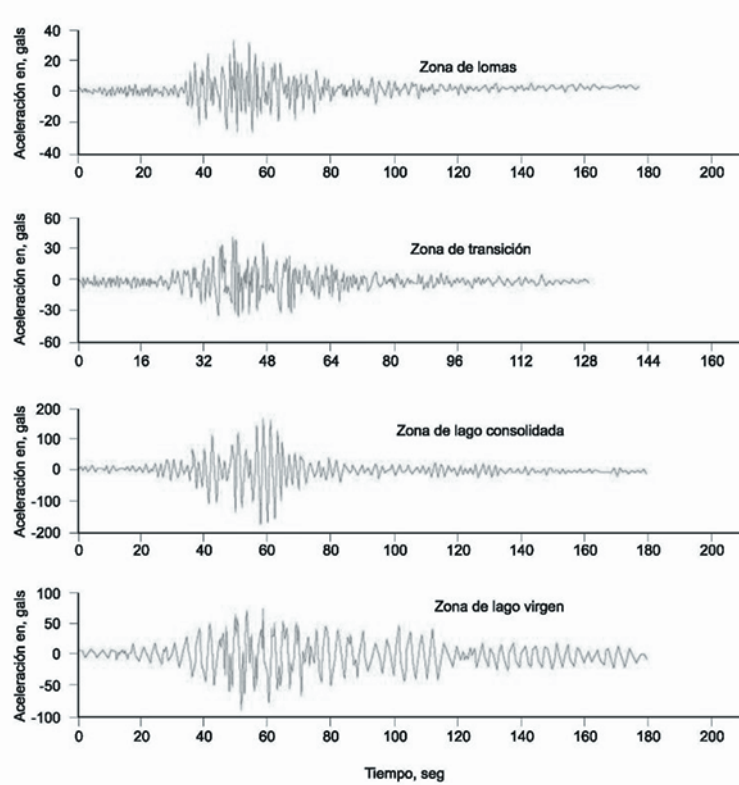


FIG. 20 Registros de aceleración en diferentes zonas obtenidos el 19 de septiembre de 1985. Ing. José Antonio Segovia Pacheco.

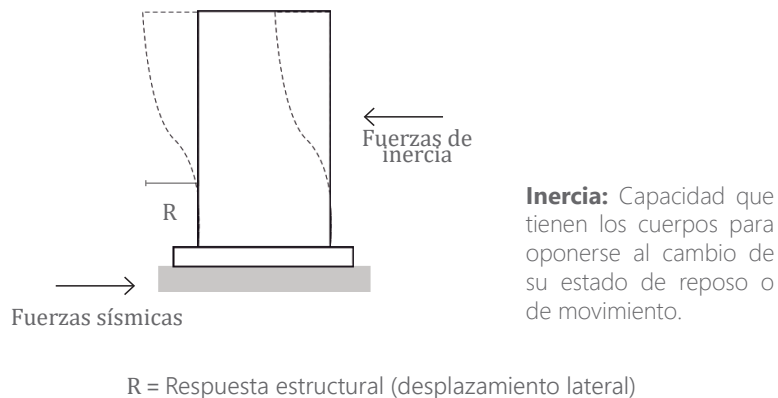


FIG. 21 Fuerzas laterales y movimiento de oscilación de un edificio.

El movimiento en un depósito de roca densa, será significativamente diferente al que puede ocurrir en un suelo blando donde las aceleraciones máximas del terreno son menores y con un periodo de onda mayor, esto implica que el suelo arcilloso del Valle de México amplifica el movimiento. En el caso del sismo del 85 se registraron amplificaciones hasta 4 veces más que las que se registraron en zona firme.¹²

Cuando se somete una construcción a movimiento horizontal del terreno, se generan fuerzas laterales (fuerzas de inercia o fuerzas sísmicas). Las fuerzas a que es sometida la estructura dependen de su masa y de su altura.

La **cimentación** es el elemento intermediario entre la superestructura y el suelo, y tiene que ser considerado como un elemento fundamental en un análisis sísmico puesto que definirá tanto el comportamiento del suelo debajo y colindante de la construcción, así como de la propia estructura. Las características que inciden principalmente como veremos en los siguientes capítulos son: el tipo, el tamaño, la rigidez y la profundidad de desplante.

La configuración (masa, tamaño, forma y rigidez) de una **estructura** también determinan su comportamiento y su resistencia. En el contacto del movimiento con el edificio, las afectaciones estarán relacionadas por la frecuencia o número de ciclos de oscilación del movimiento por unidad de tiempo y la duración.

Las Normas Técnicas Complementarias para Sismo establecen tres zonas al igual que las Normas de Cimentaciones (Lomas, Transición y Lago) pero toman en cuenta el modo de vibración (periodo) del terreno que, como vimos anteriormente, está ligado a las propiedades del suelo y su estatigrafía. De la misma manera que en la zonificación geológica se han determinado otras variaciones del suelo que dan pie a subzonas y con las modificaciones en las propiedades debido, especialmente al asentamiento, los periodos dominantes del suelo cambian con el paso del tiempo.

Los objetivos generales de reglamentos de diseño sismorresistente son:

- Que la estructura no tenga ningún tipo de daño (ya sea estructural o no estructural) durante sismos de baja intensidad
- Que la estructura no tenga daños estructurales durante sismos moderados, aunque se pueden experimentar daños en elementos no estructurales
- Que la estructura no sufra un derrumbe aún en sismos de gran intensidad.

En una estructura que no tiene dispositivos de disipación de energía, se pueden aceptar daños leves estructurales durante sismos intensos por efectos de buscar optimizar el costo de la estructura.

Espectros de respuesta

Los movimientos de terreno durante un temblor se miden por medio de un acelerógrafo, el cual mide la historia de aceleraciones del terreno. El espectro de respuesta permite evaluar la magnitud del desplazamiento máximo (R) de una estructura con un cierto periodo, en comparación con el desplazamiento máximo de alguna otra estructura sometida al mismo movimiento de terreno.

Por ejemplo, si se tiene una estructura con un periodo de vibración de 1.0 segundos y otra con un periodo de 1.5 segundos, podemos observar que si ambas estructuras se sometieran al mismo movimiento de terreno, la estructura con periodo de 1 segundo estaría sometida a un desplazamiento mayor que el de la otra estructura, a pesar de que ambas tengan el mismo movimiento en su base.¹³

Es importante aclarar que la aceleración espectral representa la aceleración en la estructura, la cual puede ser mayor o menor a la máxima aceleración del terreno.

Aisladores y disipadores

Para poder tener estructuras con un comportamiento predecible es necesario revisar el posible comportamiento estructural no solo para sismos de gran intensidad, sino también para sismos de baja y moderada intensidad con la finalidad de tratar de lograr que la estructura tenga un comportamiento adecuado durante diferentes intensidades sísmicas.

Los dispositivos **disipadores** de energía son elementos estructurales que están específicamente diseñados para poder incrementar la capacidad de disipación de la propia estructura mediante el **amortiguamiento** (disminución de la amplitud de vibración hasta regresar a su estado de reposo). Existen varios tipos de disipadores de energía: de amortiguamiento viscoso y viscoelástico; dispositivos de amortiguamiento por fricción y cedencia; y los amortiguadores de masa sintonizada.

El efecto de amortiguamiento se traduce en que la estructura disipa energía en sus ciclos oscilatorios. En el caso de edificaciones de varios pisos, la distribución de los dispositivos de disipación de energía a lo largo de la altura de la estructura es una consideración de importancia. Numerosos autores recomiendan la distribución en altura de una manera similar a la distribución de rigideces de los pisos (sin cambios abruptos de rigidez).

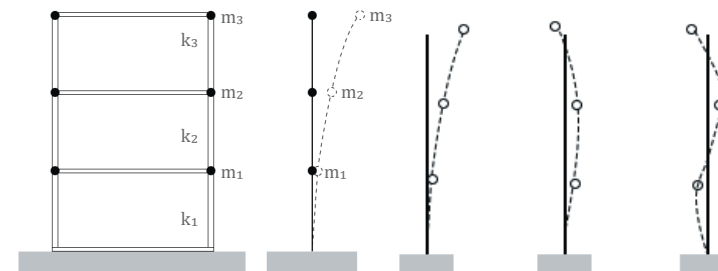
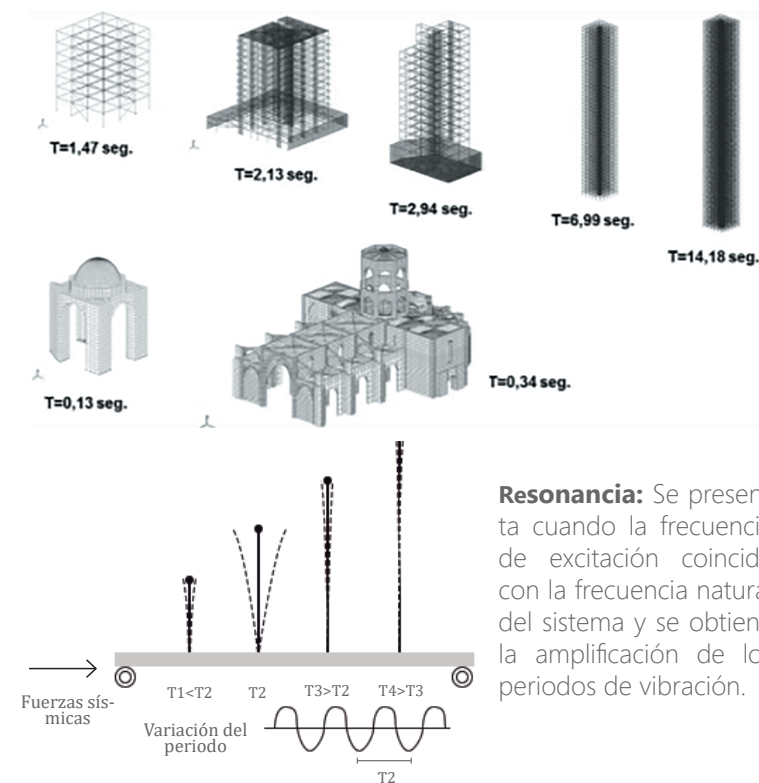


FIG. 22 Sistema idealizado de 3 grados de libertad y su modo de vibración. La respuesta de la estructura (R) frente a las fuerzas sísmicas va a ser en función de la relación que hay entre la masa (m) y la rigidez (k).



Resonancia: Se presenta cuando la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural del sistema y se obtiene la amplificación de los periodos de vibración.

FIG. 23 Demostración de resonancia en mesa vibratoria. Se colocan modelos con diferentes periodos de oscilación, la respuesta se amplifica moviendo la mesa con un periodo igual al de ese modelo. Al cambiar el periodo de oscilación de la mesa, se excitará algún otro modelo.

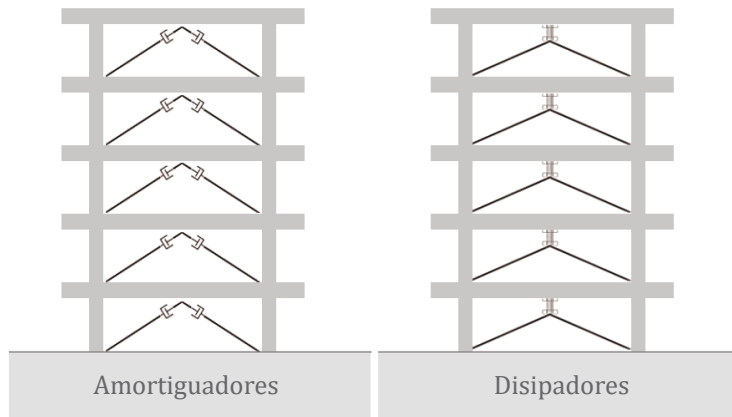


FIG. 24 Sistema de disipadores basados en fluidos viscoelásticos.

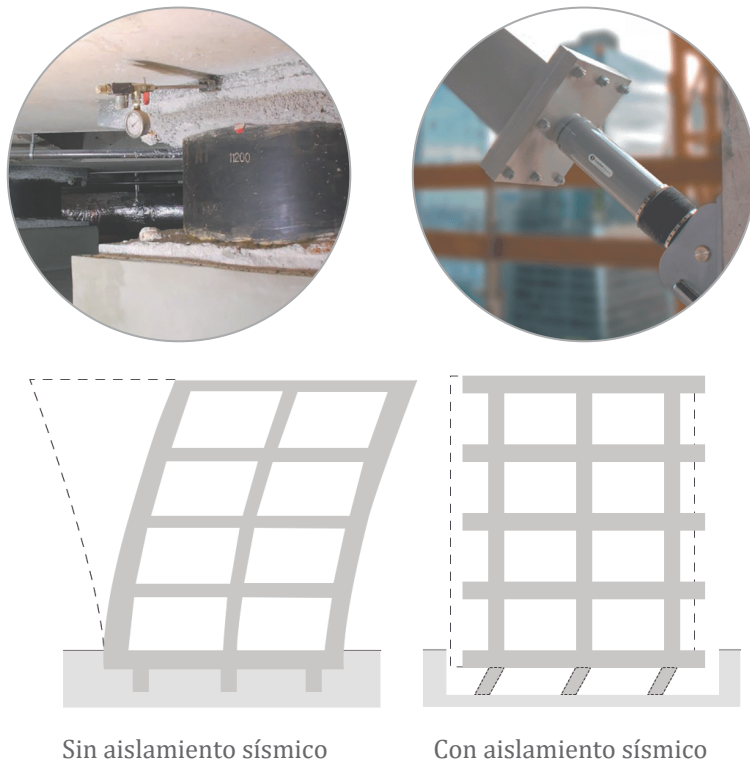


FIG. 25 Aislador sísmico elastomérico y disipador de fluidos viscosos

Los **aisladores** sísmicos, por su parte, son elementos elásticos que usualmente se instalan entre la cimentación y la superestructura con el fin de impedir que los movimientos sísmicos del terreno se transfieran a la edificación.

Por ser muy flexibles, contribuyen a incrementar el periodo fundamental de vibración del sistema estructural. En el espectro de frecuencias del sismo, a estos altos períodos de vibración, corresponden valores bajos de aceleraciones, por lo que las fuerzas inducidas por el sismo sobre la estructura disminuyen significativamente.

Por otro lado, las deformaciones se incrementan de manera importante, pero estas deformaciones se concentran en los aisladores sísmicos, lo que hace que la superestructura sufra sólo pequeñas deformaciones. Los aisladores también producen un efecto de amortiguamiento importante que contribuye a disipar la energía introducida por el sismo.¹⁴

Su objetivo es reducir la acción del sismo sobre la superestructura a través de alargar el periodo fundamental de vibración del sistema estructural.

Puede decirse que hay dos factores que influyen significativamente en la respuesta de un edificio aislado:

1. Cambio del periodo fundamental de vibrar de la edificación
2. Cantidad de energía que el sistema de aislamiento absorbe y disipa

Hay mucha diversidad en los diseños de aisladores sísmicos. Estos, sin embargo, pueden agruparse en dos tipos. El primer tipo de dispositivos de aisladores son los **elastoméricos**, los cuales consisten en elementos que permiten grandes deformaciones laterales. Son cilindros cortos con capas de materiales flexibles como pueden ser gomas de alta resistencia, alternadas con láminas o capas de acero.

El segundo tipo de aisladores sísmicos son los de **deslizamiento**, los cuales se basan en apoyos con planchas metálicas que permiten desplazamientos relativos entre las dos planchas. Una plancha va sujeta a la fundación y la otra a la estructura. Estos sistemas deben producir poca fricción a fin de sólo transmitir parte de la fuerza de corte, pero por otro lado, la fricción debe ser suficiente como para que fuertes vientos o pequeños temblores no generen desplazamientos.

Es necesario verificar, para estructuras muy rígidas, la posibilidad de generar, en lugar de la reducción deseada de las sollicitaciones sísmicas, un incremento de cargas por la presencia de los aisladores. En efecto, si la estructura es de periodo muy corto, la presencia del aislador puede generar incremento de cargas.

14 Genatios. C., (2016). "Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras". Caracas, Banco de Desarrollo de América Latina

CIMENTACIONES

La cimentación se define como aquella parte de la edificación que está en contacto directo con el terreno, que se encarga de recibir y transmitir la carga de la estructura al suelo.

En el Valle de México, el diseño de cimentaciones presenta dificultades muy superiores a las que se encuentran en otras grandes ciudades del mundo debido, a como lo vimos anteriormente, a las características del suelo (blando y compresible), el hundimiento regional y su alta sismicidad.

Toda cimentación debe cumplir los siguientes propósitos:

- Transmitir las cargas al subsuelo
- Ser estable
- Evitar el deslizamiento o volteo de la estructura
- Aislar la estructura del contacto directo con el suelo
- No rebasar la capacidad de carga del suelo
- Limitar los asentamientos admisibles para la estructura de acuerdo con la norma y su función

En el diseño de toda cimentación se considerarán los siguientes estados límite:

a) De falla:

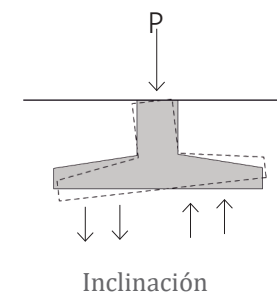
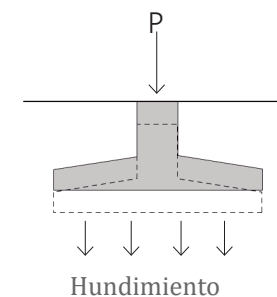
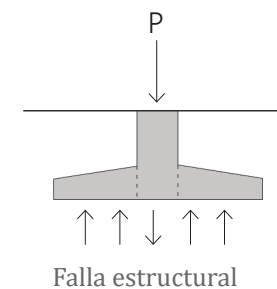
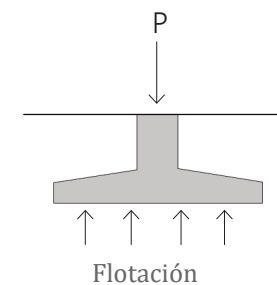
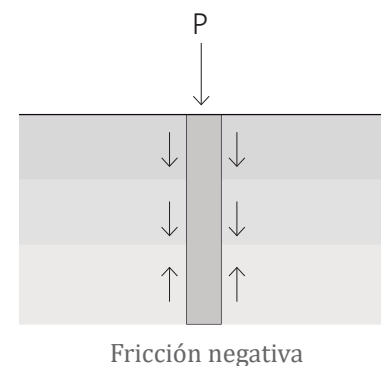
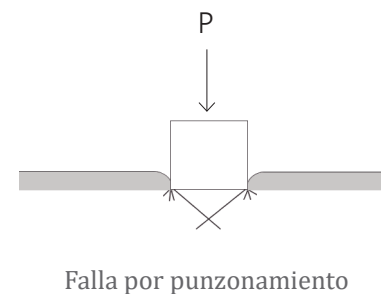
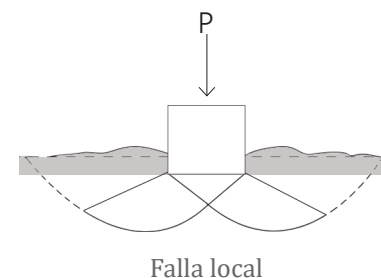
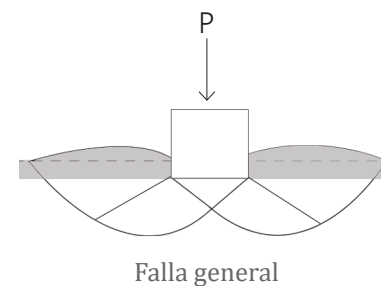
- Flotación;
- Falla local y general del suelo bajo la cimentación; y
- Falla estructural de pilotes, pilas u otros elementos de la cimentación.

b) De servicio:

- Movimiento vertical medio, asentamiento o emersión de la cimentación, con respecto al nivel del terreno circundante;
- Inclinación media de la construcción, y
- Deformación diferencial de la propia estructura y otras que pudieran resultar afectadas.

c) Fricción negativa¹⁵

La **capacidad de carga** de los suelos para una cimentación se entiende como la resistencia media del suelo a lo largo de la superficie potencial de falla, es decir, la mayor presión unitaria que el suelo puede resistir sin llegar al estado plástico.



15 Gaceta Oficial del Distrito Federal (2017). "Normas Técnicas Complementarias para Diseño Y Construcción De Cimentaciones". México

EVOLUCIÓN DE CIMENTACIONES EN EL VALLE DE MÉXICO

La historia de México revela que se tropezó serias dificultades para cimentar edificios pesados desde la época prehispánica. Cuando los mexicas fundaron su ciudad, el área de la futura capital era poco prometedora para edificar una ciudad como la que llegó a existir, debido a la baja resistencia de los suelos en el fondo del lago.

Se tuvo que recurrir a diferentes métodos de cimentación como el uso de enramadas entre capas del relleno, asentar las obras importantes en conjuntos de estacas de madera de 4 o 5 m de longitud, entre otras técnicas, con objeto de evitar su penetración y la falla local del terreno.

La construcción de templos mexicas fue posible gracias a su proceso gradual de construcción, en el que la arcilla se consolida bajo el peso del relleno inicial de la plataforma y de cada una de las etapas de carga que se realizan sobre las estructuras existentes; consecuentemente la resistencia al corte de la arcilla aumenta hasta ser capaz de sostener el peso final de las edificaciones.

Las exploraciones de las 6 etapas de construcción del Templo Mayor (más de 50 ton/m²) han permitido observar las estacas de cimentación de unos 3 m de longitud, que se usaron para eliminar la deformidad del fango del lago y transmitían las cargas de la estructura a la capa dura (Ovando, 1998).

Para la cimentación en el resto de espacios, se desarrollaron las famosas chinampas que 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 cultivo y diversos productos agrícolas.¹⁶

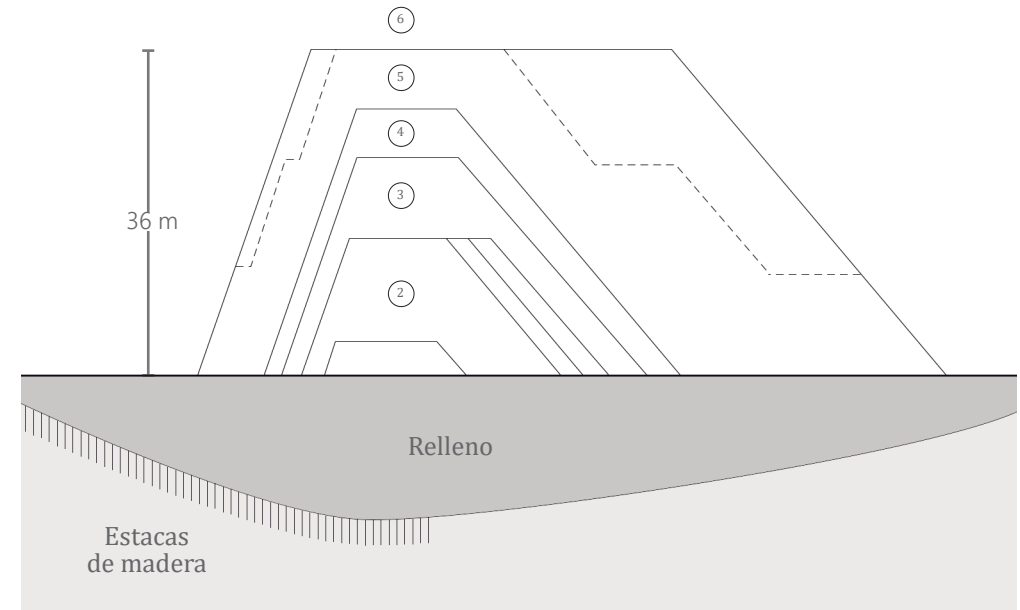


FIG. 25 Etapas constructivas y cimentación del Templo Mayor. Luis Miguel Zúñiga.

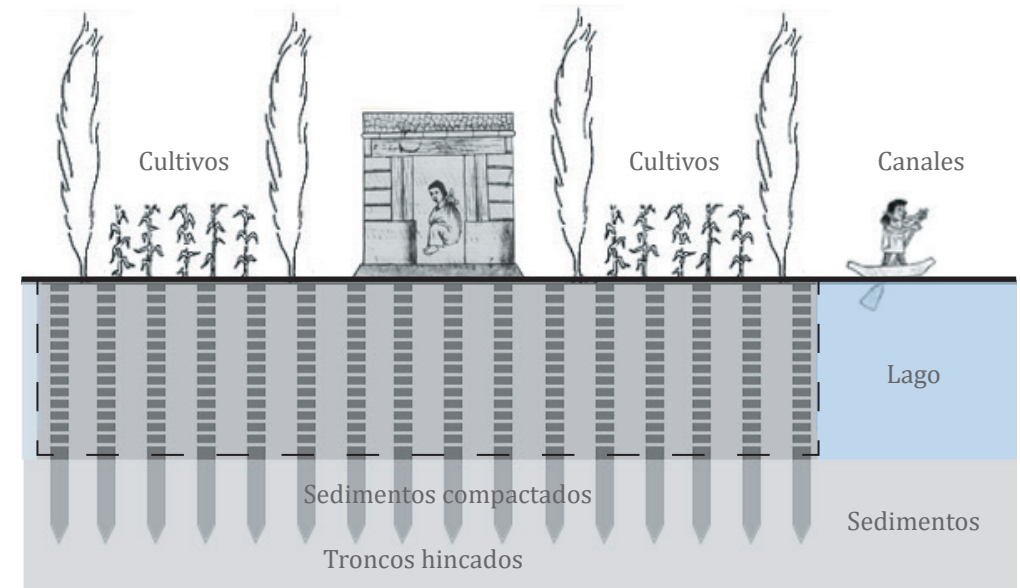


FIG. 26 . Cimentación de chinampas en el lago de Texcoco y Xochimilco. Martínez Oviedo.

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

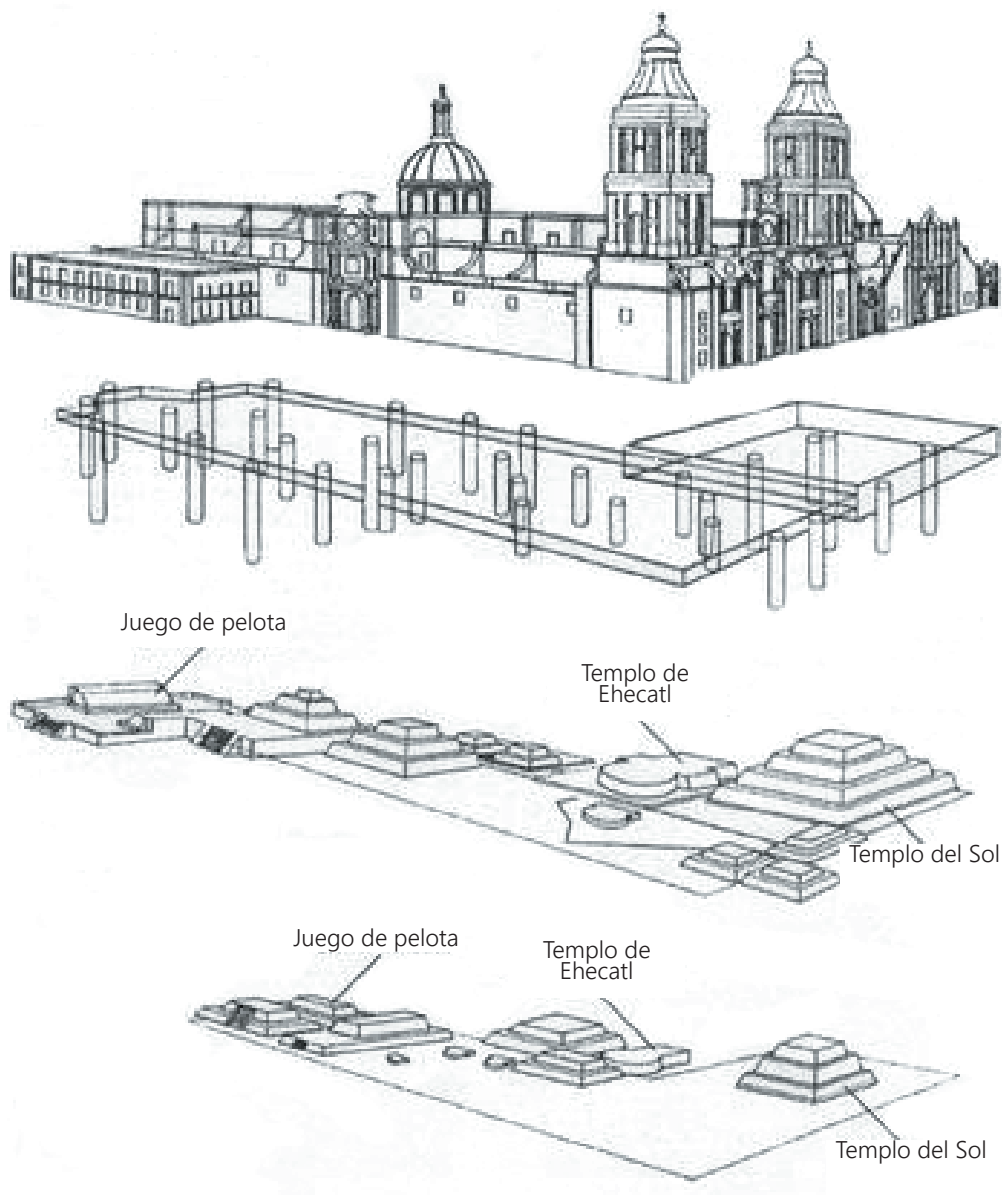


FIG. 27 Fundación de la Catedral Metropolitana sobre restos prehispánicos. Programa de Arqueología Urbana (arriba).

FIG. 28 Cimentación del Edificio de la Lotería Nacional. Santoyo Villa. (derecha)

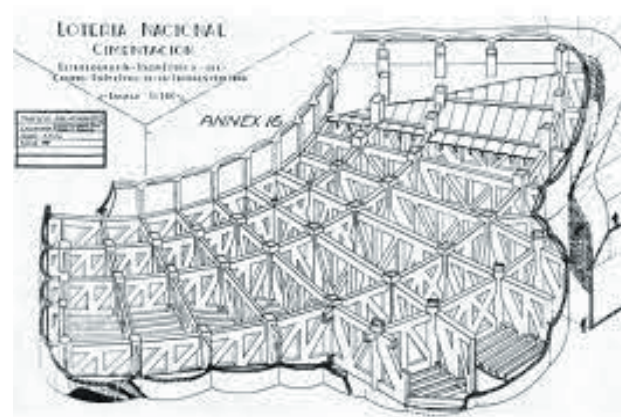
La ciudad colonial se fundó sobre los restos de la ciudad mexicana, las construcciones más importantes se construyeron sobre los terrenos previamente ocupados por los templos prehispánicos, que fueron demolidos y en varios casos aprovechados como cimientos. En este periodo las inundaciones causaron severos daños.

Algunas cimentaciones utilizadas en esta época se constituían de una retícula de trabes de mampostería aligeradas con arcos, sobre estacas de madera. 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 impulsaron soluciones de cimentación mediante losas que ampliaban el área de contacto y por ende, su capacidad de carga aumenta al mismo tiempo que se reducen los esfuerzos a valores tolerables.

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 pueden mencionar: el Teatro Nacional, conocido ahora como Palacio de Bellas Artes, el Monumento a la Independencia y el Monumento a la Revolución.

Hacia principios del siglo XX, la ciudad de México creció de manera apresurada, y los proyectos crecían tanto en altura como en desarrollo tecnológico, se incrementó el interés por los estratos profundos para poder apoyar las edificaciones, buscando minimizar las afectaciones ante los sismos, sobre todo después de los aprendizajes que dejó el sismo de 1985.



CLASIFICACIÓN DE CIMENTACIONES

En función de la profundidad de los estratos a los que se transmite la mayor parte de las cargas, las cimentaciones pueden dividirse en:

- Superficiales: Aquellas que para su construcción se requiera una excavación menor a 2.5 m de profundidad, se apoyan en las capas superficiales del terreno debido a que se cuenta con la suficiente capacidad de carga.
- Profundas: Aquellas que para su construcción se requiera una excavación mayor a 2.5 m de profundidad, transmiten las cargas a capas profundas del subsuelo que dispongan de la capacidad de carga requerida. [4]

Cimentaciones Superficiales

- 1. Zapatas de piedra:** Se construyen seleccionando las piedras con caras planas, colocándolas de tal manera que la transmisión se haga de forma normal en sus caras, evitando planos inclinados entre las piedras que puedan provocar posibles deslizamientos. Debe acomodarse de tal manera que se utilice la menor cantidad de mortero posible, ya que es la zona de menor resistencia en este tipo de cimiento; la inclinación de las caras no debe ser menor de 60° con relación a la horizontal, y su anchura no deberá pasar de 1.50 m.
- 2. Zapatas aisladas:** Es un elemento aislado de base generalmente cuadrada o rectangular que se utiliza para transmitir cargas puntuales, son comúnmente utilizadas por ser económicas, sin embargo, no es recomendable su uso en terrenos con baja fatiga al trabajo debido a los hundimientos diferenciales que puede causar a la estructura.
- 3. Zapatas corridas:** Funcionan como zapatas aisladas con ligaduras llamadas contratraveses, las cuales soportan los esfuerzos de flexión producidos por la reacción del terreno, siendo anulados por las cargas transmitidas a través de las columnas. Su uso es conveniente cuando las zapatas aisladas sobre suelo compresible ocupan arriba del 30% del área de la planta del edificio o cuando los asentamientos diferenciales permisibles no son satisfechos.
- 4. Losas de cimentación:** En el caso de tener zapatas continuas muy anchas debido a la descarga y la baja capacidad de carga del suelo, resulta conveniente usar losas con o sin contratraveses. En este caso la distribución de las cargas se realiza sobre toda la área de construcción. Su cálculo es igual al de cualquier otra losa de concreto, se calcula a base de la reacción del terreno como carga por lo que su armado irá en la parte superior para momentos flexionantes positivos y en la parte inferior para negativos.

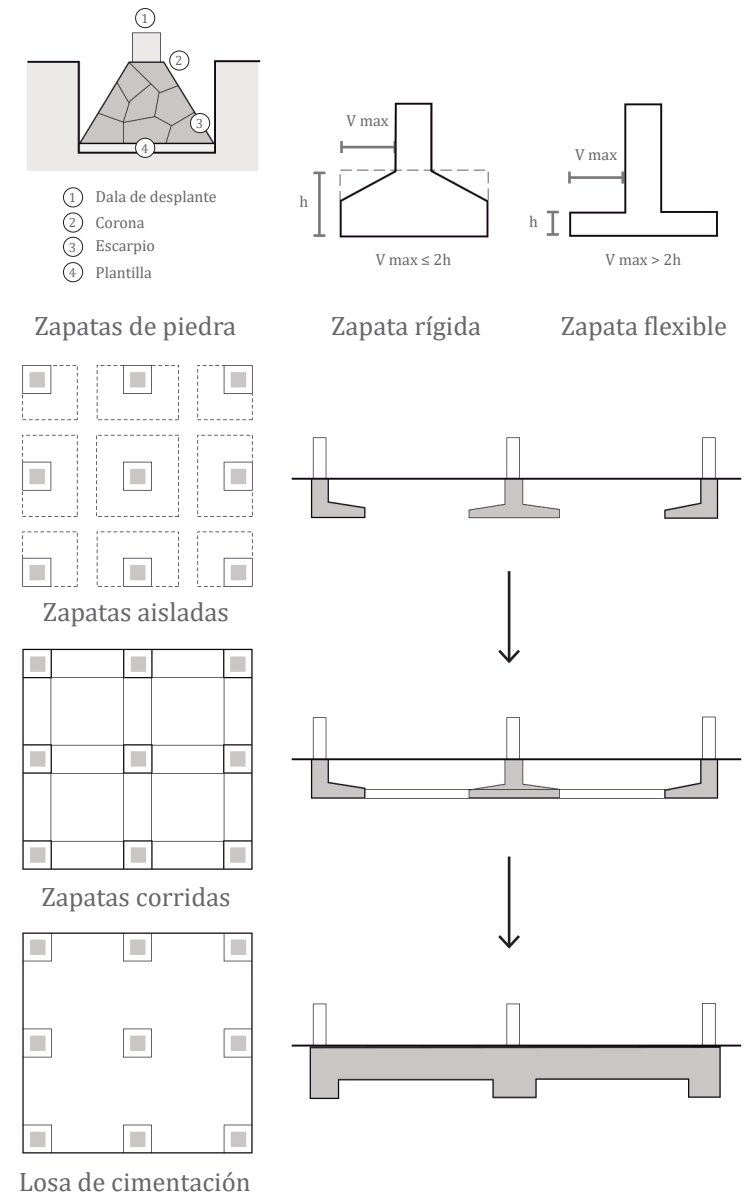


FIG. 29 Transición de cimentaciones superficiales. Conforme las cargas van aumentando, el área de desplante de la cimentación también lo hará.

Cimentaciones Profundas

5. **Por sustitución o compensadas:** Consiste en realizar una excavación precalculada, con objeto de sustentar el edificio en una capa que se encuentra fatigada por el peso de las capas superiores, sustituyendo dicho peso por el del propio edificio. Se debe conocer perfectamente los estratos a excavar para considerar el peso volumétrico de cada una de sus capas para que el cálculo pueda ser lo más exacto posible.

Es importante manejar cálculos precisos para evitar abultamientos, hundimientos o emersión de la estructura, por lo que cuando exista la incertidumbre de un cambio de uso o de materiales que modifiquen significativamente las cargas, deberá considerarse este tipo de cimentación como poco confiable. Se recomienda su uso en suelos altamente compresibles y con poder de expansión y baja capacidad de carga.

Este tipo de cimentación requiere una excavación por etapas, manteniendo el terreno lo más controlado e inalterado posible, con objeto de no permitir **bufamientos** ni pérdida de humedad.

6. **Por pilotes o pilas:** Son cimentaciones cuyo objeto es transmitir la carga de un edificio a través de elementos verticales a capas más profundas que cumplan con la capacidad de carga requerida, y sea apoyando la punta en dichos estratos o trabajando por fricción con el suelo que los rodea. En su diseño y construcción intervienen fundamentalmente tres variables, la forma en la que transmite las cargas al subsuelo, el material con el que están fabricados y su proceso constructivo dependiendo de la tipología de edificación y el tipo de suelo en donde se desplantes como veremos más adelante.

Comúnmente, en la ciudad de México se emplean pilotes de concreto prefabricados e hincados con o sin perforación previa y pilotes o pilas colados en perforación previa. Por reglamento, la medida mínima de pilotes es de 60 cm de diámetro hasta 20 m de profundidad, y de las pilas de 80 cm hasta 30 m de profundidad.¹⁷

17 Normas Técnicas Complementarias para Diseño Y Construcción De Cimentaciones Gaceta Oficial del Distrito Federal (2017).

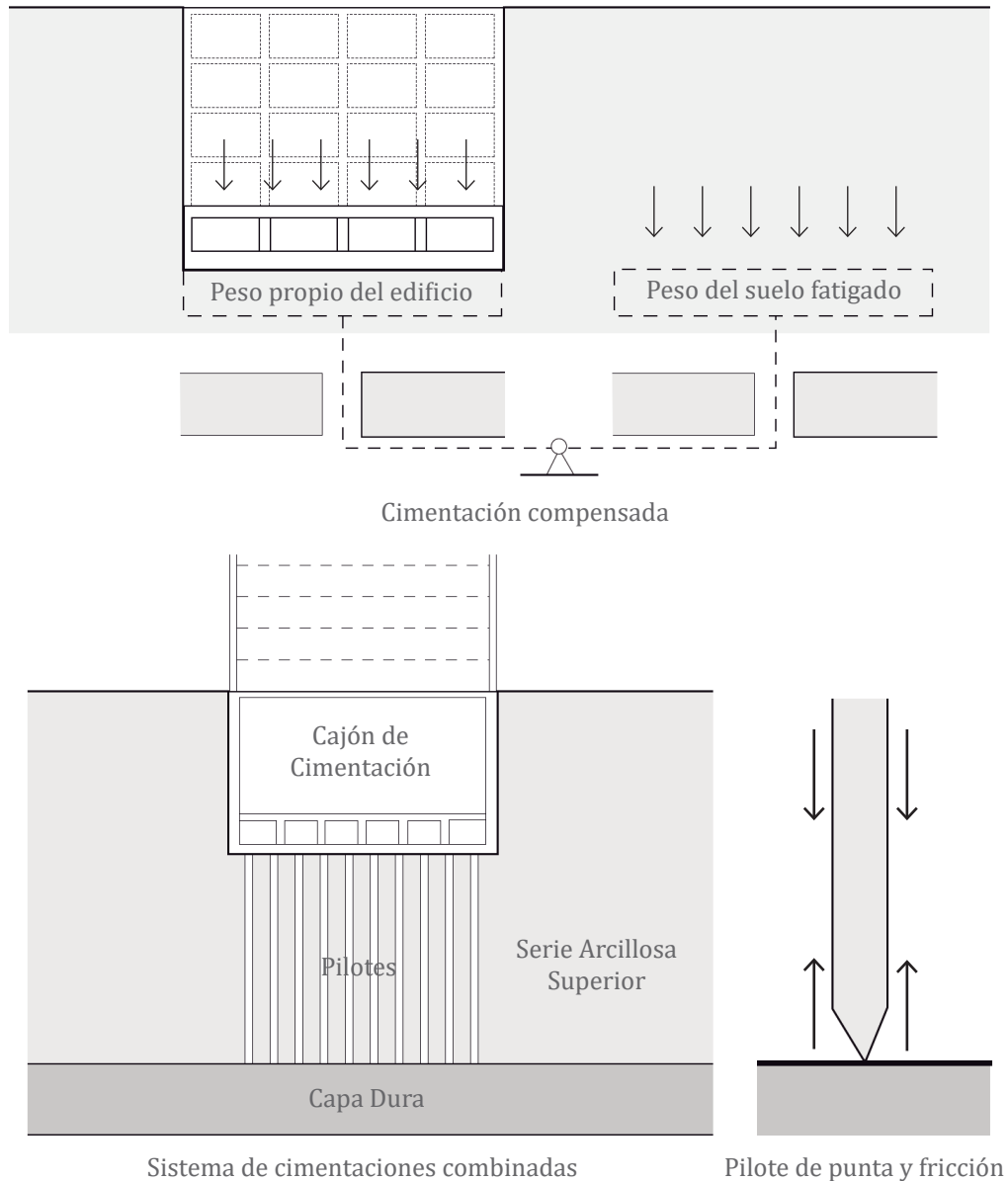


FIG. 30 Cimentación del Edificio de la Lotería Nacional. Santoyo Villa. (derecha)

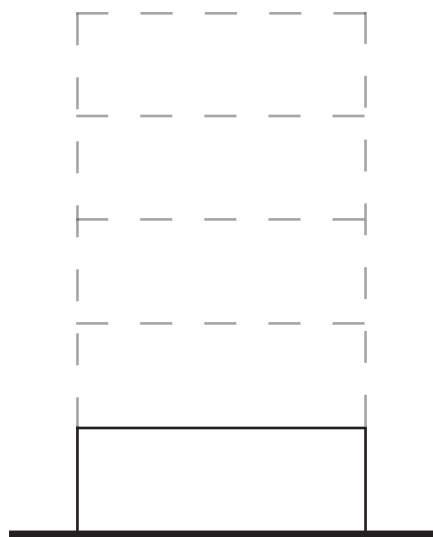
MARCO METODOLÓGICO

TIPOLOGÍA DE CIMENTACIONES

Para limitar el alcance de los casos en cada una de las zonas en las que se divide el Valle de México, se adoptaron cuatro distintas tipologías de edificaciones con características específicas.¹⁸

EDIFICACIÓN 1

1-5 niveles



Edificaciones con una altura menor a 15 m con un área total construida de poca extensión y/o menor a 3,000 m²

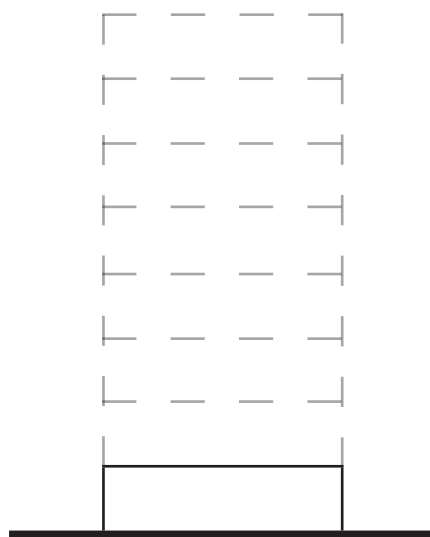
Construcciones ligeras o medianas

de poca extensión y con excavaciones menores a 2.5m

$$w \leq 4 \text{ T/m}^2$$

EDIFICACIÓN 2

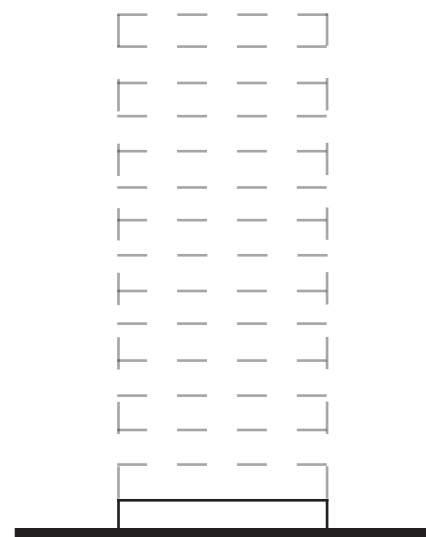
5-10 niveles



Edificaciones con una altura de entre 15-30 m o con un área total construida entre 3,000 y 6,000 m²

EDIFICACIÓN 3

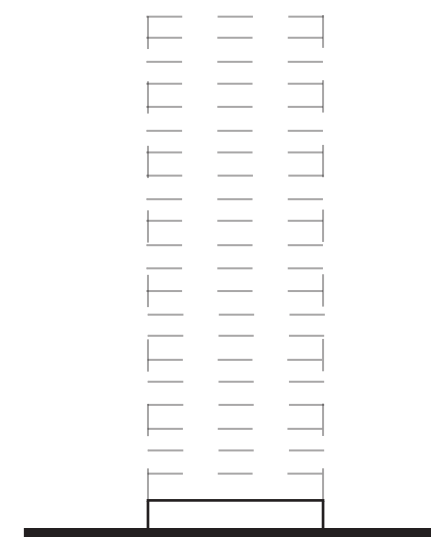
10-25 niveles



Edificaciones con altura de entre 30-75 m o con área total construida de entre 6,000 y 15,000 m²

EDIFICACIÓN 3

10-25 niveles



Construcciones con más de 75 m de altura o con más de 15,000 m² de área total construida

Construcciones pesadas, extensas

o con excavaciones profundas mayores a 2.5 m

$$w > 4 \text{ T/m}^2$$

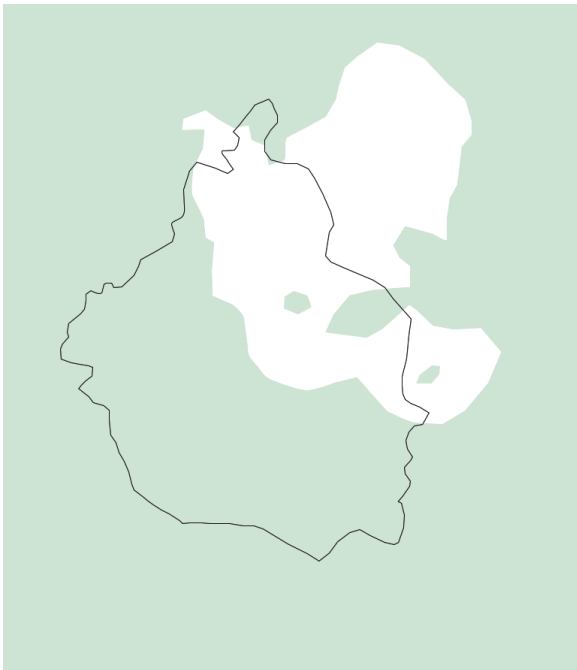
MATRICES

ZONA I LOMERÍO

Formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados.

RESISTENCIA DEL TERRENO

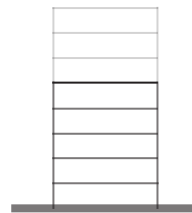
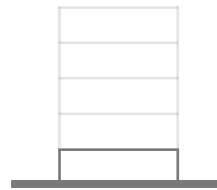
$$R_t = \geq 14 \text{ T/m}^2$$



TIPOLOGÍA DE EDIFICACIONES

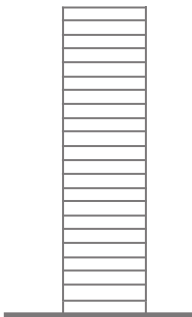
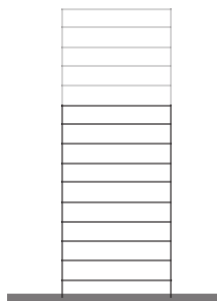
Construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones menores a 2.5m

$$w \leq 4 \text{ T/m}^2$$

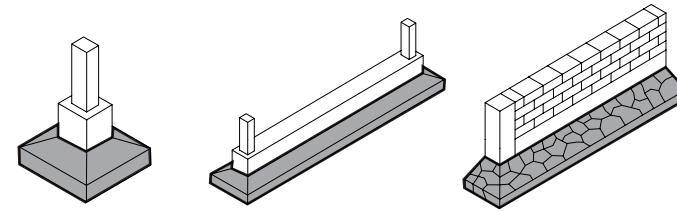


Construcciones pesadas, extensas o con excavaciones profundas mayores a 2.5 m

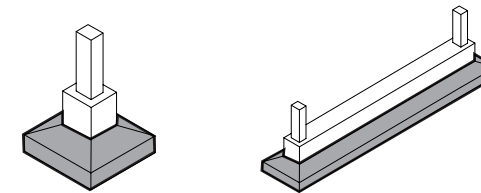
$$w > 4 \text{ T/m}^2$$



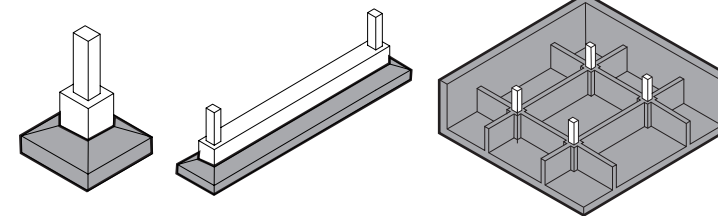
CIMENTACIÓN (propuesta)



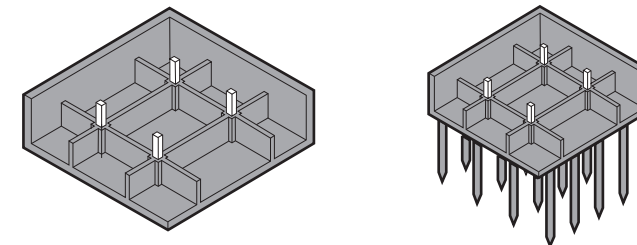
Cimentación superficial: Zapatas aisladas (piedra o concreto armado) y zapatas corridas



Cimentación superficial: Zapatas aisladas, zapatas corridas



Cimentación mixta: Zapatas aisladas reforzadas, corridas y losas de cimentación (estacionamientos)



Cimentación profunda: Cajón de cimentación y sistemas combinados (los/pilas/pilotes)

CASO 1

CASO 2

CASO 3

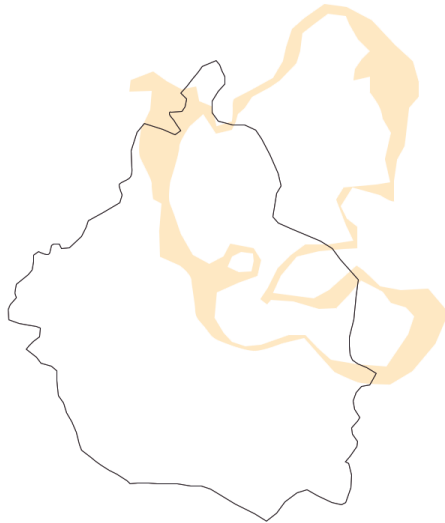
CASO 4

ZONA II TRANSICIÓN

Formadas por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

RESISTENCIA DEL TERRENO

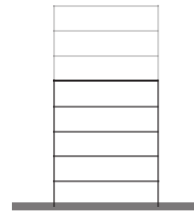
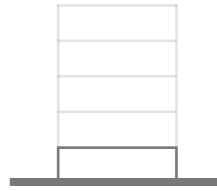
$$8 \text{ T/m}^2 \leq R_t \leq 14 \text{ T/m}^2$$



TIPOLOGÍA DE EDIFICACIONES

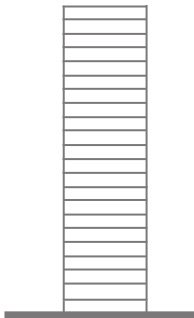
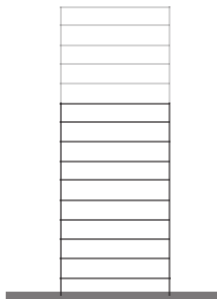
Construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones menores a 2.5m

$$w \leq 4 \text{ T/m}^2$$

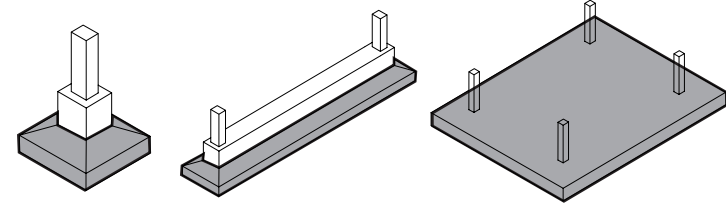


Construcciones pesadas, extensas o con excavaciones profundas mayores a 2.5 m

$$w > 4 \text{ T/m}^2$$

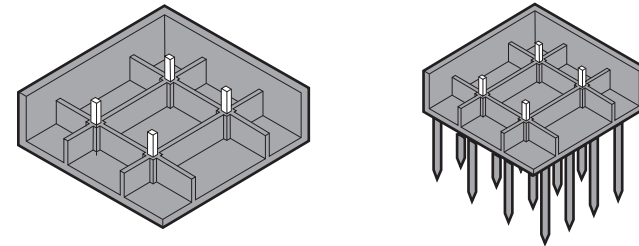


CIMENTACIÓN (propuesta)



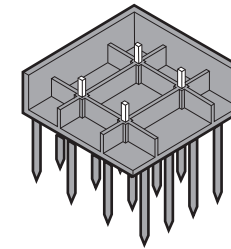
Cimentación superficial: Zapatas aisladas, zapatas corridas y losa cimentación

CASO 5



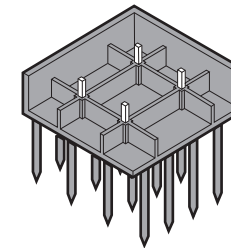
Cimentación profunda: Cajón de cimentación y sistemas combinados (losa/pilas/pilotes)

CASO 6



Cimentación profunda: Sistemas combinados (losa/pilas/pilotes)

CASO 7



Cimentación profunda: Sistemas combinados (losa/pilas/pilotes)

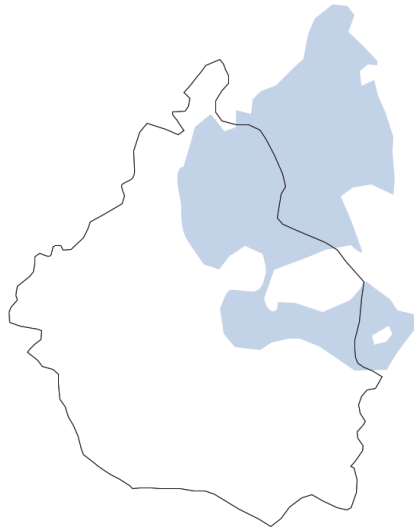
CASO 8

ZONA III LACUSTRE

Integrada por depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

RESISTENCIA DEL TERRENO

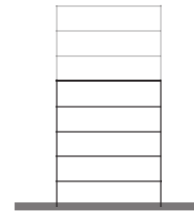
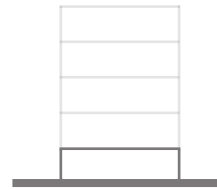
$$R_t \leq 8 \text{ T/m}^2$$



TIPOLOGÍA DE EDIFICACIONES

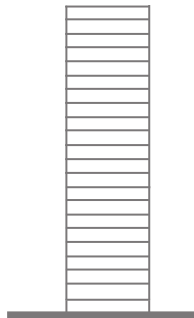
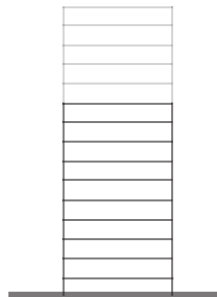
Construcciones ligeras o medianas de poca extensión y con excavaciones menores a 2.5m

$$w \leq 4 \text{ T/m}^2$$

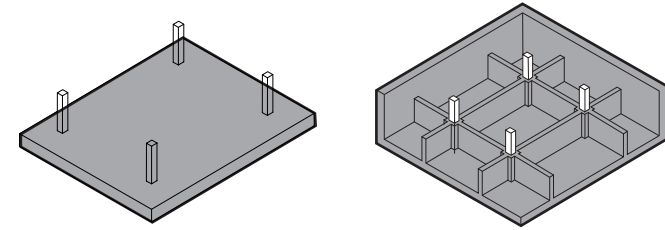


Construcciones pesadas, extensas o con excavaciones profundas mayores a 2.5 m

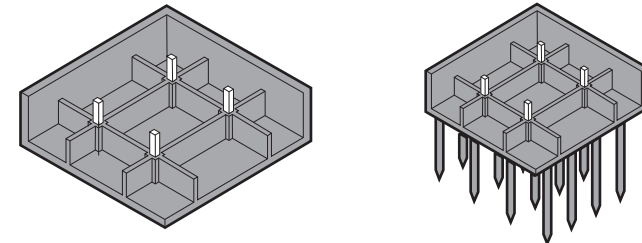
$$w > 4 \text{ T/m}^2$$



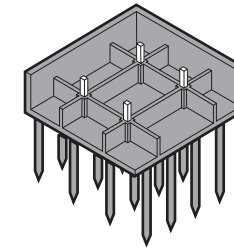
CIMENTACIÓN (propuesta)



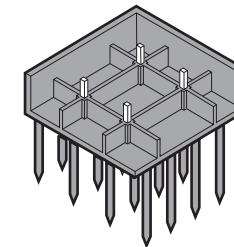
Cimentación mixta: Losa de cimentación y cajón de cimentación



Cimentación profunda: Cajón de cimentación y sistemas combinados (losa/pilas/pilotes)



Cimentación profunda: Sistemas combinados (losa/pilas/pilotes)



Cimentación profunda: Sistemas combinados (losa/pilas/pilotes)

CASO 9

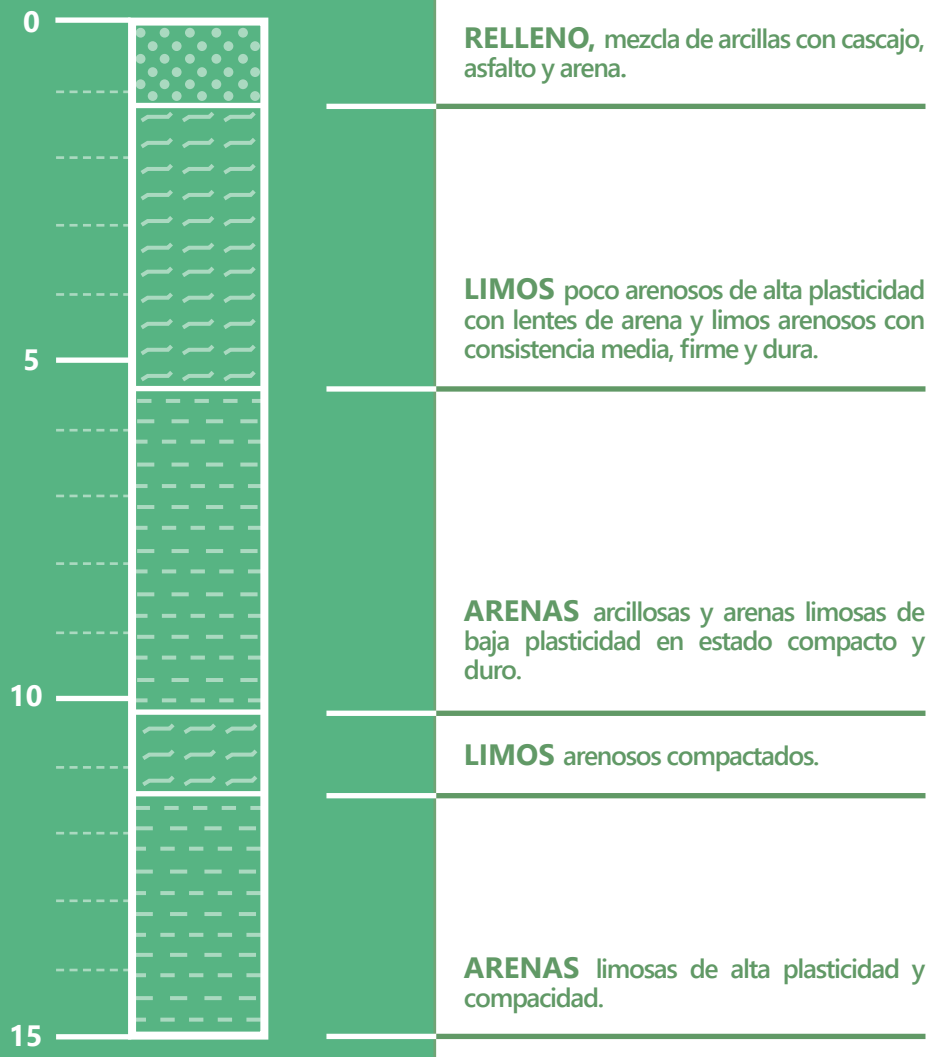
CASO 10

CASO 11

CASO 12

ZONA I

LOMERÍO



Según indica el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, la Zona I comprende la región perimetral del Valle, se caracteriza por presentar tobas (suelos areno-alimosos) compactas de cementación variable y derrames de basalto del pedregal.

PROPIEDADES GENERALES

ORIGEN	VOLCÁNICO
COHESIÓN	ALTA / MEDIA
COMPACIDAD	DENSA
PLASTICIDAD	BAJA
COMPRESIBILIDAD	BAJA
NIVEL FREÁTICO	GRAN PROFUNDIDAD
CAPACIDAD DE CARGA	ALTA

ANOMALÍAS GEOTÉCNICAS

- Presencia de oquedades en rocas de cavernas y túneles excavados.
- Localización de rellenos sueltos o de desechos.
- Laderas o cortes artificiales inestables.

FIG. 31 Corte estratigráfico. Sondeo realizado en la colonia San José Insurgentes de la alcaldía Benito Juárez, típico de la Zona de Lomerío.



FIG. 32 Zonificación geotécnica propuesta para Zona Norte y Oriente. "El subsuelo de la Ciudad de México" 2017.

- Subzona Ia
- Subzona Ib

En su libro "El subsuelo de la Ciudad de México" Marsal (1959) nos propone una subdivisión de esta zona en dos:

Subzona Ia, Lomeríos: Formada por rocas o suelos firmes depositados fuera del ambiente lacustre que corresponden a las serranías de la zona.

Subzona Ib, Aluvial: Integrada por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla altamente resistentes que se encuentran en las planicies elevadas de la zona, donde regularmente no llegaba el nivel de los antiguos lagos.

En esta zona se presentan generalmente condiciones favorables para cimentar estructuras, sin embargo, debido a la exploración de minas de arena y grava, muchos predios están cruzados por galerías a diferentes profundidades. Muchas de ellas, a causa de derrumbes, se encuentran rellenas con material fragmentado suelto que puede engañar las pruebas de percusión debido a que esta herramienta comprime localmente la arena.

Por las razones antes apuntadas, pueden ocurrir colapsos por falla del techo de las galerías; es frecuente que en la temporada de lluvias se formen pequeños cráteres en la superficie a consecuencia de dichas fallas. Por otra parte, es frecuente la ocurrencia de microsismos en el Valle que tienen su origen en los movimientos de ladera provocados por excavaciones subterráneas.

Otro problema que puede ser característico de esta zona es la existencia de depósitos eólicos de arena fina y uniforme, hacia el norte de la ciudad, particularmente en las laderas de la Sierra de Guadalupe, estas formaciones son susceptibles de provocar asentamientos diferenciales erráticos e importantes en las estructuras.

Dada la constitución del suelo, la capacidad de carga, es muy variable, pero, en general, elevada. Sin embargo, el factor decisivo para un correcto diseño de cimentación es la heterogeneidad de las formaciones.

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:

- **Tobas estables:** Compuestas por mezclas de arena y grava en proporciones variables, cementados por una matriz de suelos finos, aún bajo acciones erosivas del agua, mantienen una 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.
- **Tobas inestables:** Compuestos en mayor proporción por arcilla de plasticidad media a alta con cementación pobre. Se localizan principalmente al sur-poniente (Contadero y algunas barrancas de la zona de las Águilas).
- **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.
- **Rellenos:** Originados debido 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.
- **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.
- **Roca basáltica:** Abundan en gran parte de la zona sur como derrames de lava con distintos grados de fracturamiento y oquedad.



TOBA ESTABLE



TOBA INESTABLE



SUELOS PUMÍTICOS



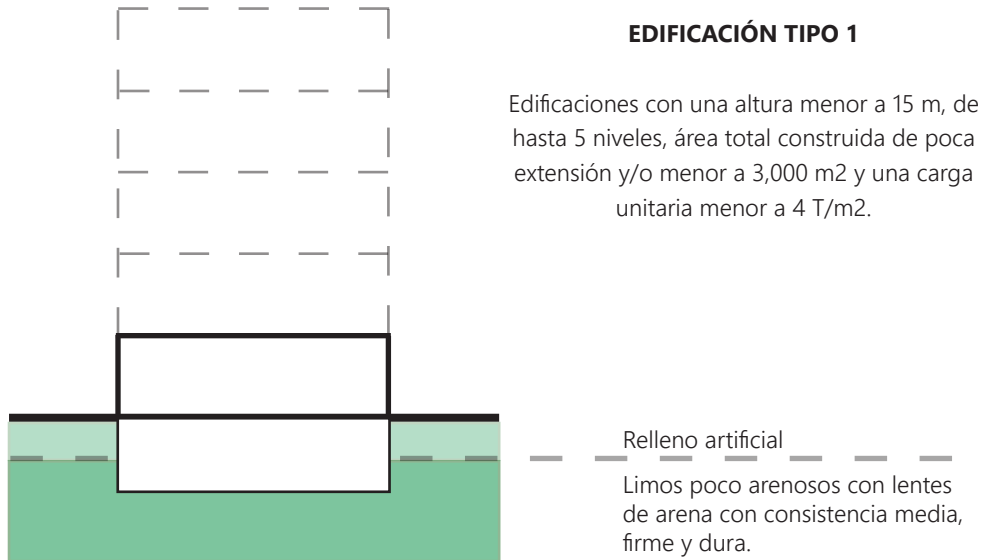
RELLENOS



ROCA BASÁLTICA

CASO 1

ZONA I



Un terreno en Zona I generalmente presenta una buena capacidad de carga, tomando en cuenta un suelo con formaciones rocosas homogéneas, la cimentación más indicada será constituida por una simple ampliación de la base del elemento transmisor de cargas, como es el caso de las zapatas.

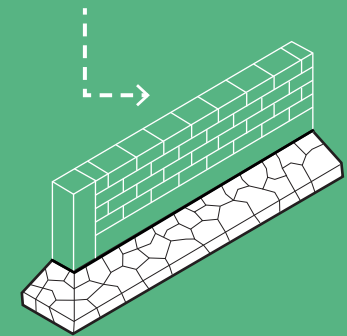
La profundidad mínima para cimentaciones superficiales deberá ser de 0.80 m, sin embargo, es importante realizar excavaciones a mayor profundidad que el desplante de la cimentación para destacar la existencia de minas subterráneas y rellenos sin compactación.

PROPUESTAS DE CIMENTACIÓN

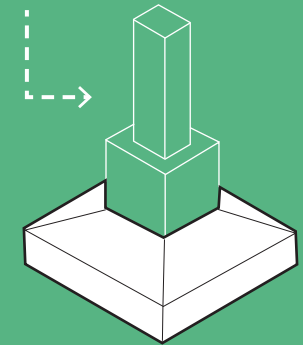
Zapata de piedra

Para construcciones ligeras, como viviendas de 1 a 2 niveles en suelos con alta resistencia, es muy común el uso de la piedra, debido a su bajo costo y su buen comportamiento gracias a su peso volumétrico y baja fatiga de trabajo.

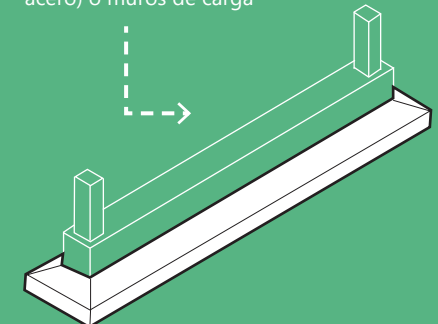
Sistema estructural a base de muros de carga



Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero)



Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero) o muros de carga

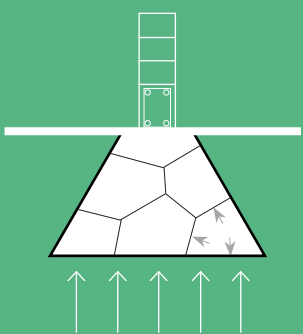


Zapata aislada de concreto armado

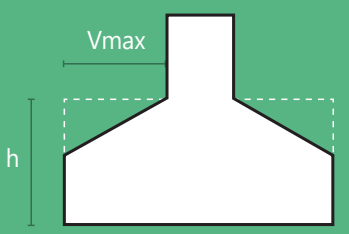
Es la opción más económica y eficiente, transmite las cargas puntuales (columnas), por medio de una ampliación del área de contacto en la base.

Zapata corrida

Por otra parte, la cimentación de un sistema de cargas distribuidas (muros de carga), se efectúa generalmente por medio de zapatas corridas, si las cargas que transmite el muro van aumentando, el ancho de la zapata irá incrementando.

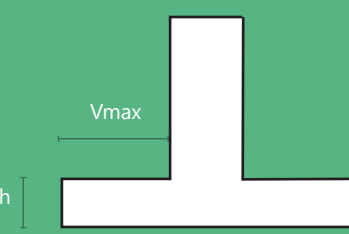


La zapatas de mampostería se construyen seleccionando las piedras con caras planas y se colocan de tal manera que la transmisión se haga de forma normal en sus caras, evitando planos inclinados entre las piedras que puedan provocar posibles deslizamientos,



Zapata rígida ($V_{max} < 2h$)

Se debe utilizar la menor cantidad de mortero posible en las juntas, ya que es la zona de menor resistencia en este tipo de cimiento; la inclinación de las caras no debe ser menor de 60° con relación a la horizontal, y su anchura no deberá pasar de 1.50 m.

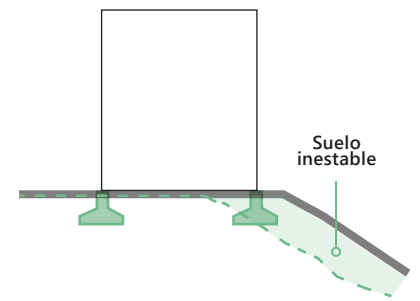


Zapata flexible ($V_{max} > 2h$)

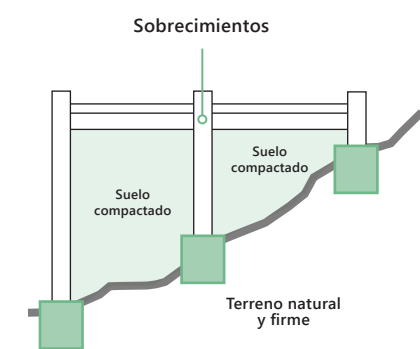
Las zapatas de piedra se toman como zapatas rígidas, y en el caso de superar la anchura de 1.50 m, es mejor proponer una zapata de concreto armado.

Con las zapatas aisladas flexibles, se debe tener una especial atención al rectificar el esfuerzo de penetración que ejerce tanto la columna dentro del cimiento como éste dentro del terreno.

Existen **laderas inestables** en distintas zonas del valle de México y en particular en Milpa alta, Xalostoc y en el cerro del Chiquihuite que presentan desprendimientos de roca producidos comúnmente en taludes con alta verticalidad y en macizos rocosos fracturados.

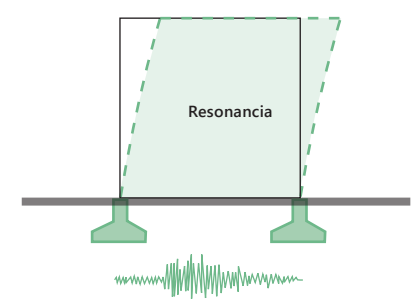


Es necesario realizar una exploración adecuada en el caso de construcciones cercanas a barrancas ya que en algunas zonas se presentan laderas cubiertas con escombros o rellenos inestables en presencia de agua o bajo carga. En caso de encontrarlos, deberán ser removidos en su totalidad o compactados antes de iniciar la construcción de la cimentación



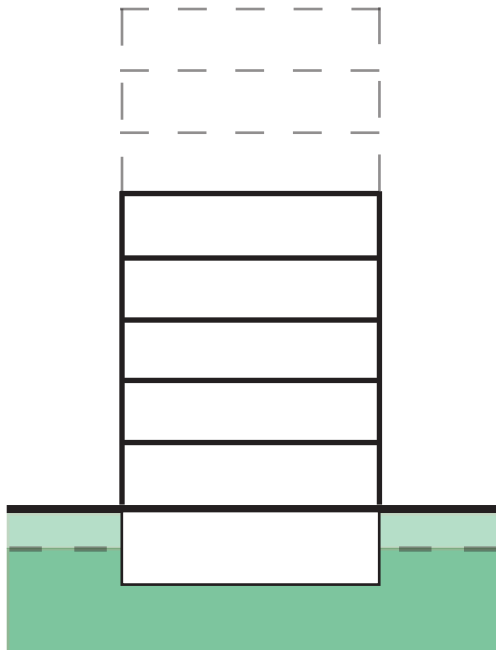
La segunda opción es la más económica, pero para llevarla a cabo hay que hacer antes un muro de contención, para luego recién proceder con el relleno y la nivelación.

Debido a la alta **frecuencia** en las ondas sísmicas que se generan en este tipo de terreno, las construcciones rígidas y de poca altura (periodo corto) suelen entrar en resonancia y presentar afectaciones en su estructura.



CASO 2

ZONA I



EDIFICACIÓN TIPO 2

Edificaciones con una altura de entre 15 y 30 m, de 5 a 10 niveles, con un área total construida de entre 3,000 y 6,000 m² y una carga unitaria menor a 4 T/m²

Relleno artificial

Limos poco arenosos con lentes de arena con consistencia media, firme y dura.

Para el caso de construcciones de menor peso se puede proponer una cimentación a base de zapatas aisladas flexibles. En el caso de construcciones de mayor peso, si se tiene un terreno sin anomalías geotécnicas, se pueden proponer zapatas aisladas rígidas debido a su buen comportamiento en el terreno, su facilidad de construcción y bajo costo.

Por las características del suelo en esta zona, el nivel freático se encuentra a gran profundidad, salvo casos especiales, los problemas de estabilidad en excavaciones para cimentar son mínimos o nulos.

PROPUESTAS DE CIMENTACIÓN

Zapata aislada de concreto armado

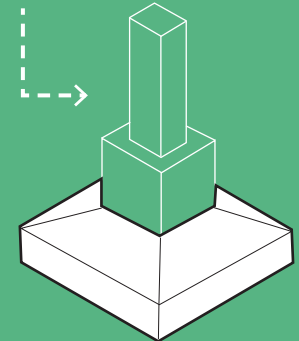
Es la opción más económica y eficiente, pueden notarse algunos asentamientos diferenciales mínimos, sin embargo, si se realizan correctamente los estudios y exploraciones, no suponen un riesgo para la estructura.

Cuando las zapatas sufran una elevada **excentricidad** (soportes medianeros y de esquina) es necesaria la disposición de vigas centradoras o de atado entre las zapatas en el perímetro de la cimentación con la finalidad de disminuir la incidencia de los asientos diferenciales.

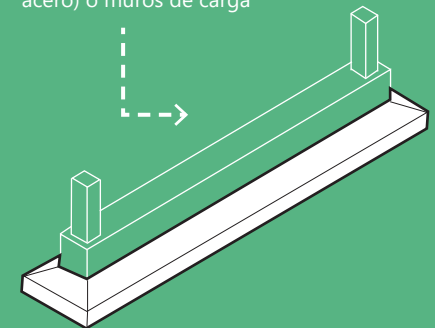
Zapata corrida

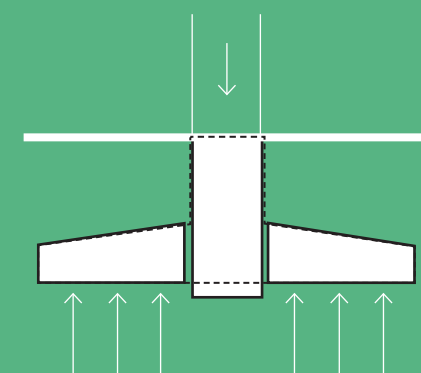
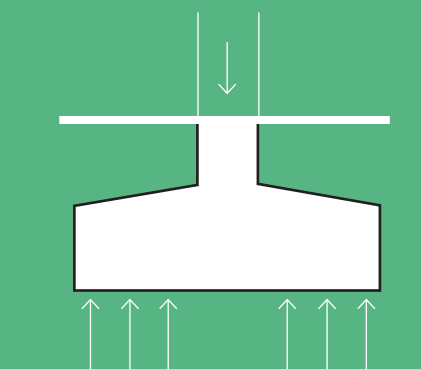
Conforme aumentan las cargas, la ampliación del área de contacto llega a ser muy próxima entre las zapatas aisladas, por lo que es mejor considerar el uso de zapatas corridas de concreto armado.

Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero)

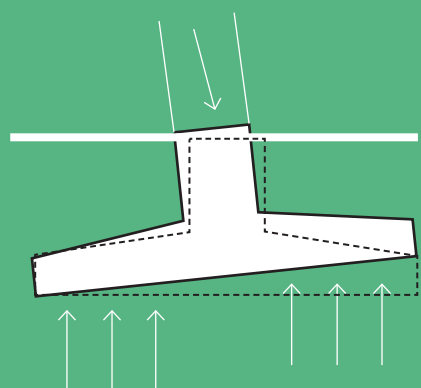


Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero) o muros de carga





CORTANTE



VOLTEO

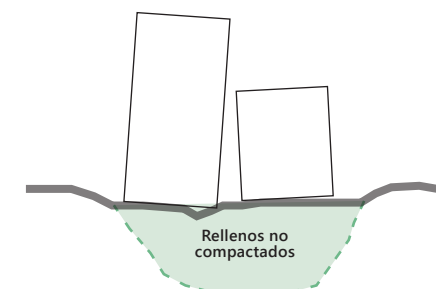
Generalmente, debido a la rigidez de la cimentación, la capacidad de carga del terreno y que no es un suelo compresible los asentamientos no suelen ser un problema para este caso.

Sin embargo, por las características del suelo y de la propia estructura, es importante tomar en cuenta dos tipos de falla probables de zapatas:

La primera la **falla por cortante o penetración** del elemento vertical cuando las cargas puntuales superan la capacidad de carga de la base de la cimentación.

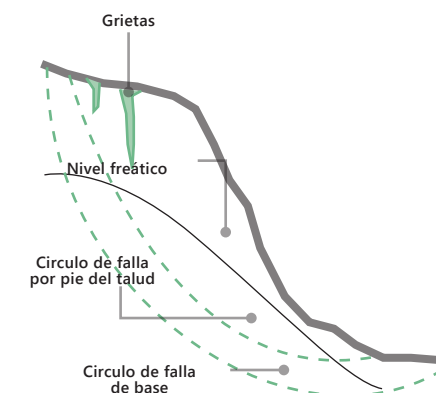
Por otra parte, la segunda **falla por volteo** de las zapatas, ocurre debido a la localización poco profunda de las mismas que sumado a las altas cargas, pueden ser expulsadas durante un sismo

Para aprovechar las áreas de topografía irregular de la zona de lomas, se ha llegado a rellenar barrancas enteras con material no compactado, por lo que es importante determinar el uso pasado del terreno.



Rellenos no compactados

En ese tipo de suelos no cohesivos teóricamente puede construirse una excavación vertical, sin embargo puede haber desprendimientos, que generalmente, antes de la falla, puede ser identificados por la presencia de **grietas de tensión**.



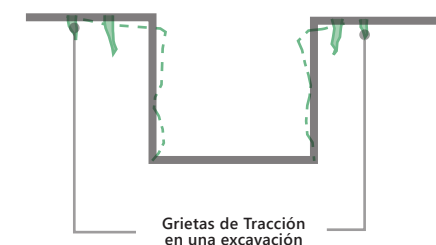
Circulo de falla por pie del talud

Circulo de falla de base

Las edificaciones de mediana y gran altura desplantados sobre materiales sueltos suelen presentar grandes asentamientos, especialmente en época de lluvias, y sufrir daños importantes.

Actualmente, se recurre con frecuencia a operaciones cuyo objetivo sea aumentar la capacidad portante del terreno o su rigidez, como son:

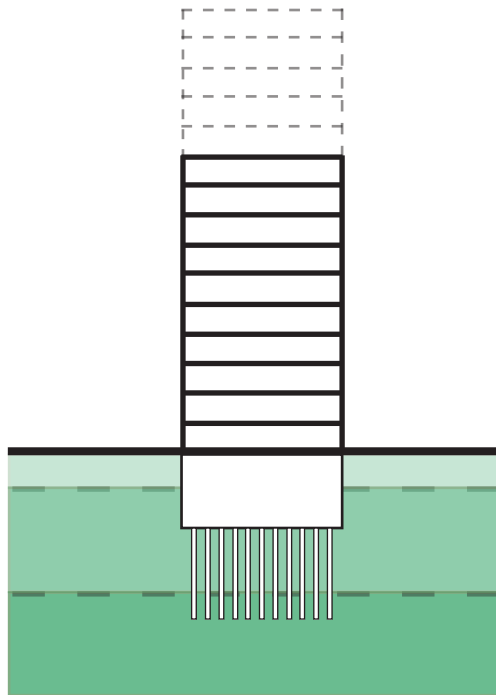
- La compactación
- El drenaje
- La protección de la superficie contra la erosión,
- La adición de fluidos para cementar.
- Relleno de fisuras y de huecos



Grietas de Tracción en una excavación

CASO 3

ZONA I



EDIFICACIÓN TIPO 3

Edificaciones con una altura de entre 30 y 70 m, de 10 a 23 niveles, con un área total construida de entre 6,000 y 15,000 m² y una carga unitaria mayor a 4 T/m²

Relleno artificial

Limos poco arenosos con lentes de arena con consistencia media, firme y dura.

Arenas arcillosas y limosas de baja plasticidad en estado compacto y duro

La profundidad de la exploraciones con respecto al nivel de desplante deberá abarcar todos los estratos sueltos o compresibles que puedan afectar el comportamiento de la cimentación del edificio.

Si la resistencia del terreno y el área del terreno lo permite, se pueden realizar excavaciones a cielo abierto, entre taludes laterales con muy poca inclinación aprovechando la alta resistencia a los esfuerzos cortantes.

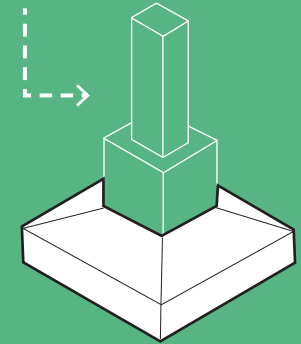
Para estabilizar los taludes se ocupan diferentes métodos como son el concreto lanzado o para detener bloques rocosos inestables se han usado los tensores anclados.

PROPUESTAS DE CIMENTACIÓN

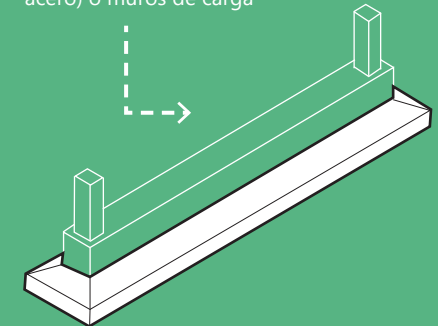
Zapata aislada de concreto armado

Para el caso de construcciones de menor peso, hasta 15 niveles aproximadamente, se puede proponer una cimentación a base de zapatas aisladas debido a su buen comportamiento en el terreno, su facilidad de construcción y bajo costo.

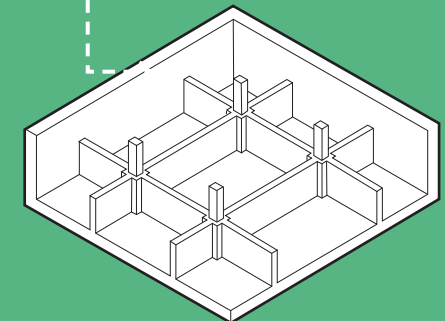
Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero)



Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero) o muros de carga



Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero)



Zapata corrida

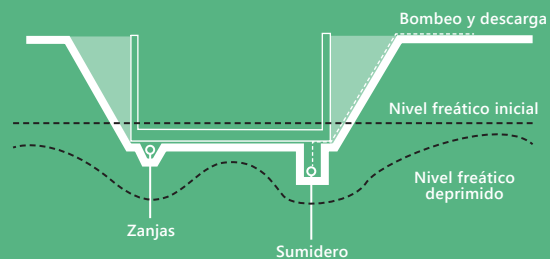
Conforme aumentan las cargas, la ampliación del área de contacto llega a ser muy próxima entre las zapatas aisladas, por lo que es mejor considerar el uso de zapatas corridas de concreto armado.

Cajón de cimentación

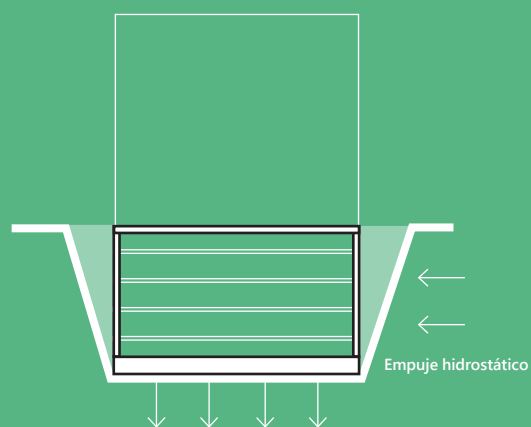
Generalmente son edificios que cuentan con estacionamiento subterráneo, por lo que se suele incluir en el diseño niveles de sótanos formando un cajón compensado o parcialmente compensado.

CASO 4

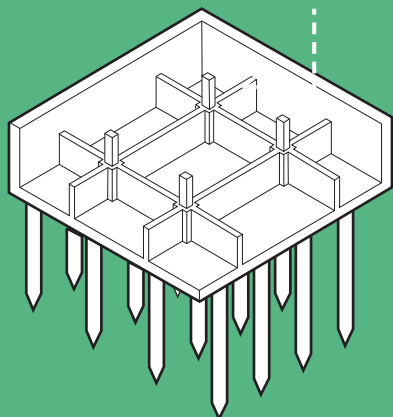
ZONA I



EXCAVACIÓN Y DRENAJE



Sistema estructural a base de marcos (concreto o acero)



Alcanzada la profundidad de excavación se cuela la losa de fondo de concreto reforzado, dejando las preparaciones en el armado para ligar los muros de contención.

En este caso, la losa base distribuye uniformemente las tensiones en toda la superficie y los asentamientos que se esperan son reducidos.

En algunos casos el respaldo se debe rellenar con material areno limoso compactado por capa. Entre el momento de la terminación del muro y la colocación del relleno, se debe cuidar que el drenaje esté garantizado sobre todo si se construye durante la época de lluvias y poner especial atención en el diseño por falla de **empuje hidrostático**.

Sistemas combinados

Para edificaciones de gran altura, se utilizan losas de cimentación de gran espesor que permiten una distribución uniforme de las cargas y se agregan pilotes, generalmente de fricción, que le dan estabilidad a la cimentación ante acciones sísmicas.

EDIFICACIÓN TIPO 4

Edificaciones con una altura mayor a 70 m, de 23 niveles o más, con un área total construida mayor a 15,000 m² y una carga unitaria mayor a 4 T/m².

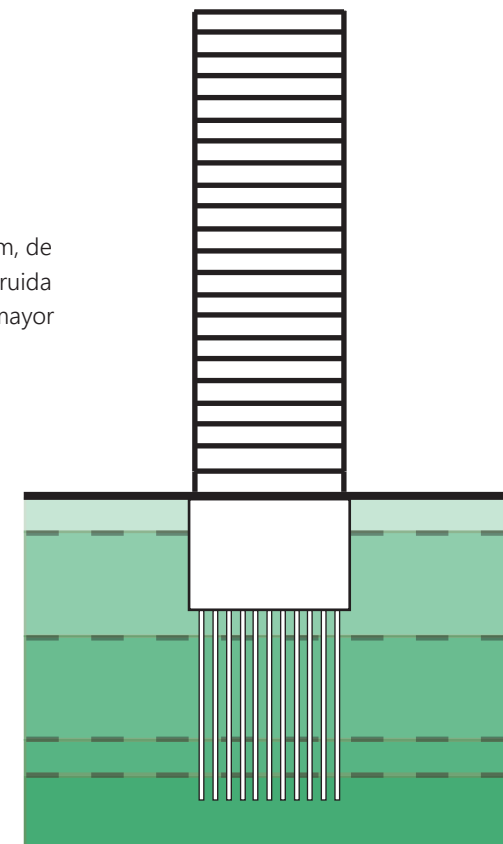
Relleno artificial

Limos poco arenosos con lentes de arena con consistencia media, firme y dura

Arenas arcillosas y limosas de baja plasticidad en estado compacto y duro

Limos arenosos compactados

Arenas limosas de alta plasticidad y compactidad



En cimentaciones de gran profundidad es importante realizar las excavaciones de manera progresiva, tomando en cuenta la seguridad de las cimentaciones colindantes, tener un control de los posibles asentamientos y un buen sistema de drenaje que permita abatir el nivel de aguas freáticas.

ZONA III

TRANSICIÓN

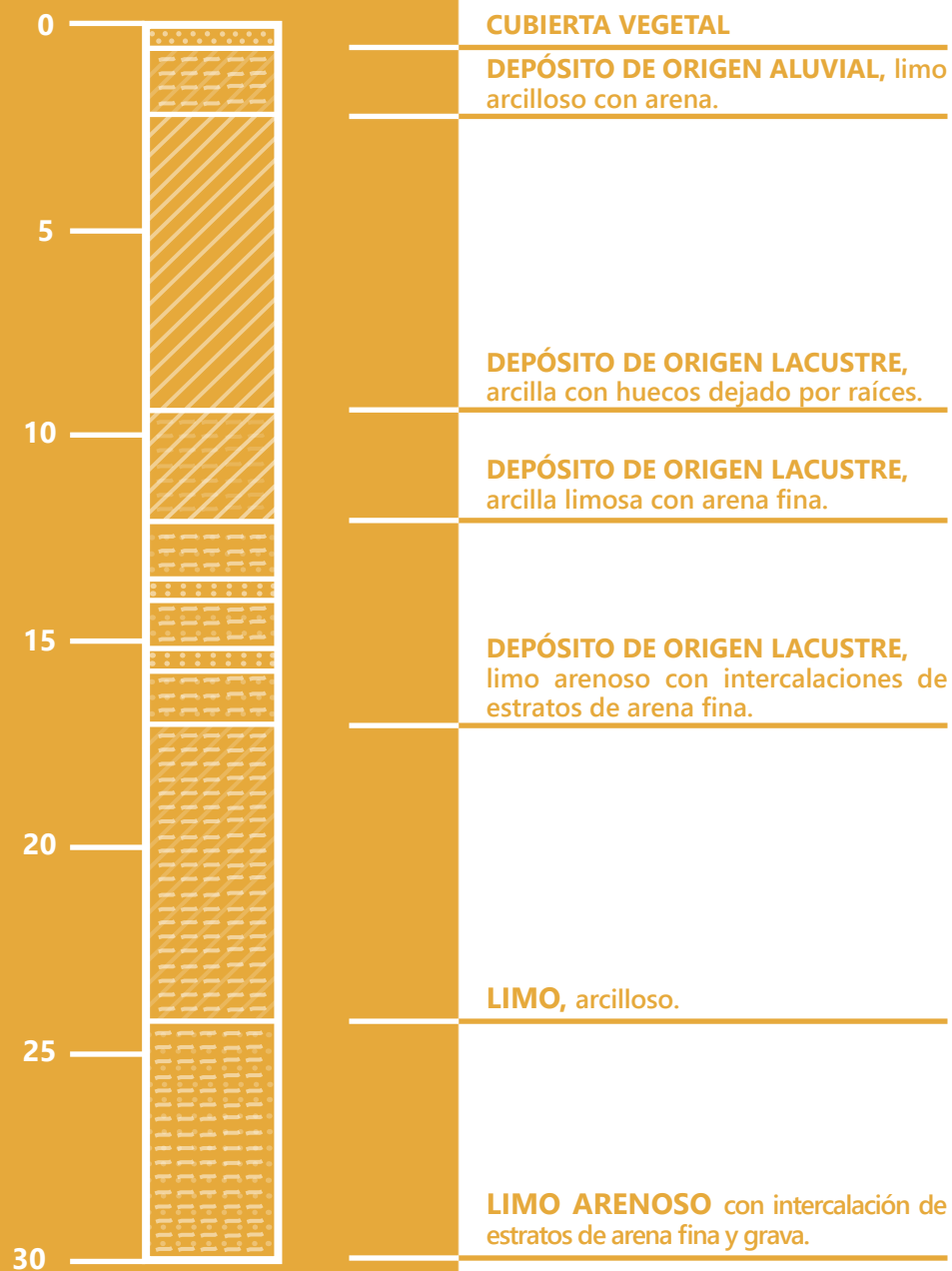


FIG. 33 Corte estratigráfico. Sondeo realizado en la colonia Sta. Úrsula Coapa de la alcaldía Coyoacán, ubicado dentro la Zona de Transición.

Según indica el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, la Zona II comprende un área perimetral de la zona de lagos, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

PROPIEDADES GENERALES

ORIGEN	DESPLAZAMIENTO Y DEPÓSITOS ALUVIALES/LACUSTRES
COHESIÓN	MEDIA
COMPACIDAD	MEDIA/SUELTA
PLASTICIDAD	MEDIA
COMPRESIBILIDAD	MEDIA
NIVEL FREÁTICO	PROFUNDIDAD MEDIA
CAPACIDAD DE CARGA	VARIABLE

ANOMALÍAS GEOTÉCNICAS

- Agrietamiento o fractura del suelo debido a la transición abrupta entre suelos firmes y suelos blandos.
- Heterogeneidad del suelo
- Asentamientos diferenciales

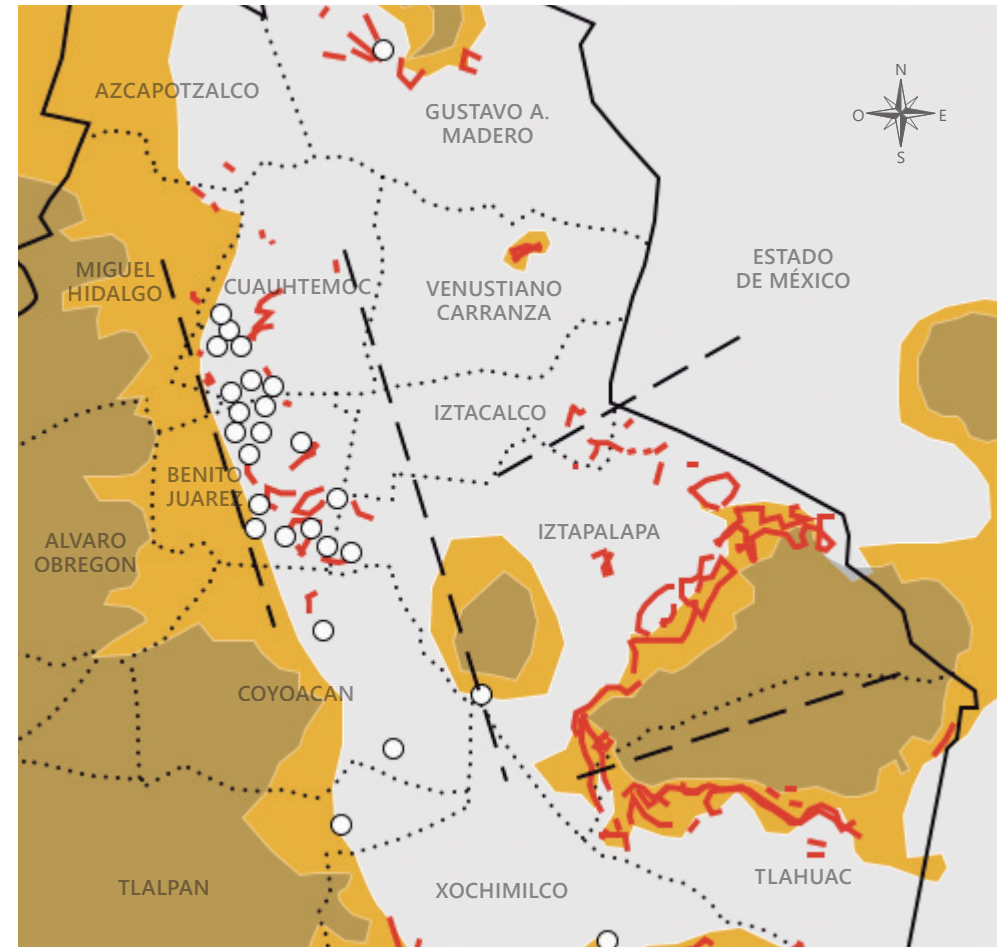
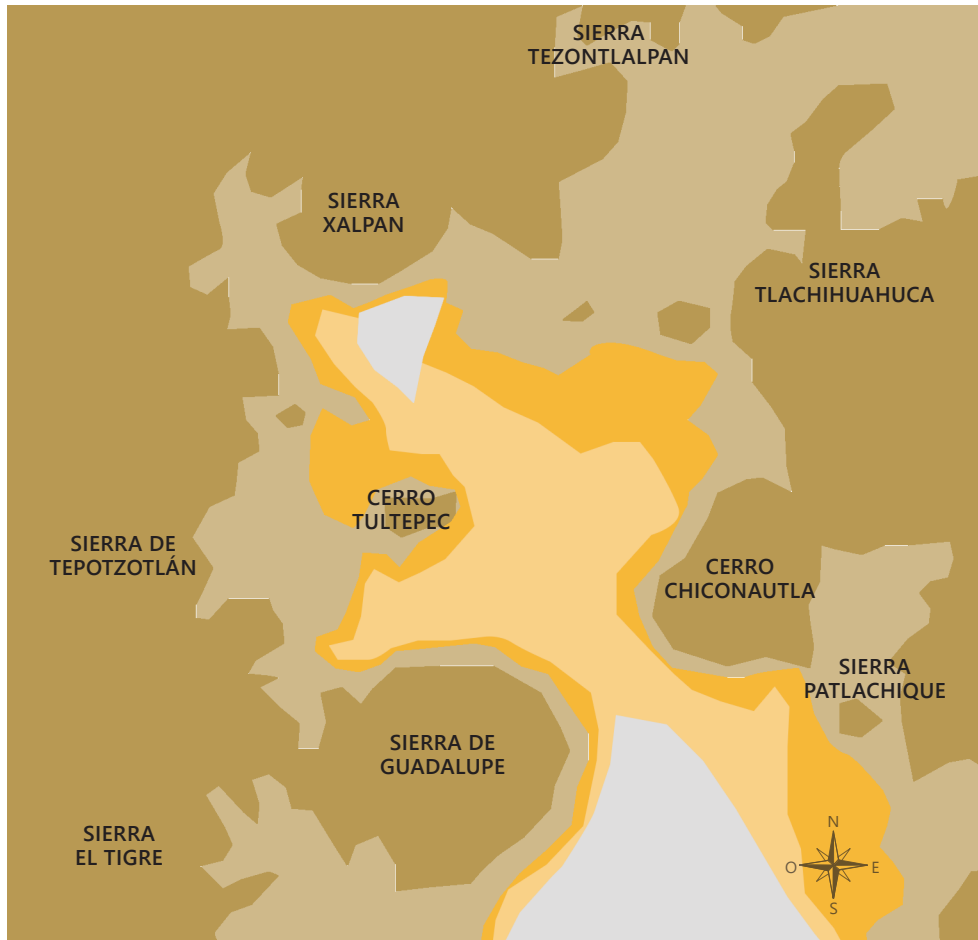


FIG. 32 Zonificación geotécnica propuesta para Zona Norte y Centro. “El subsuelo de la Ciudad de México” 2017.

Transición alta
 Transición baja

Zona I Zona III Derrumbes
 Zona II Fracturas Fallas geológicas mayores

En esta zona ocurren los cambios más notables en la estratigrafía. Es común encontrar superficialmente depósitos de arcilla o limo orgánico cubriendo estratos de arcilla muy comprensible, intercalados con cuerpos arenosos, los cuales pueden descansar sobre gruesos mantos de arena y grava.

Para efectos de este estudio se puede dividir dicha zona en dos:

- **Transición alta:** Es la subzona más próxima a las lomas. Bajo estos materiales se encuentran estratos de arcilla lacustre con espesores menores de 2.5 m que sobre yacen a los depósitos propios de las lomas.
- **Transición baja:** Es la subzona más próxima a la zona de lago, al igual que en la anterior, se encuentra la serie arcillosa superior con intercalaciones de estratos limo-arenosos de origen aluvial en espesores mayores que 2.5 m y menores que 20 m.

Estratigráficamente los espesores y propiedades de los materiales pueden tener variaciones importantes en cortas distancias, dependiendo de la ubicación del sitio respecto a las corrientes de antiguos ríos y barrancas. Por lo tanto, esta zona requiere una mayor atención para el diseño y construcción de cimentaciones.

En ésta zona, no son tan comunes los casos de fallas en las cimentaciones por insuficiencia de la resistencia al corte del suelo, sin embargo, son muy frecuentes los daños en construcciones (grietas, desplomes) provocados por asentamientos diferenciales. Los problemas de asentamientos diferenciales pueden ser muy críticos, especialmente en construcciones extensas sometidas a cargas muy diferentes, lo cual ocurre muy frecuentemente en esta zona por corresponder al sector industrial de la ciudad (Azcapotzalco y Vallejo).

Hacia los 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, 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

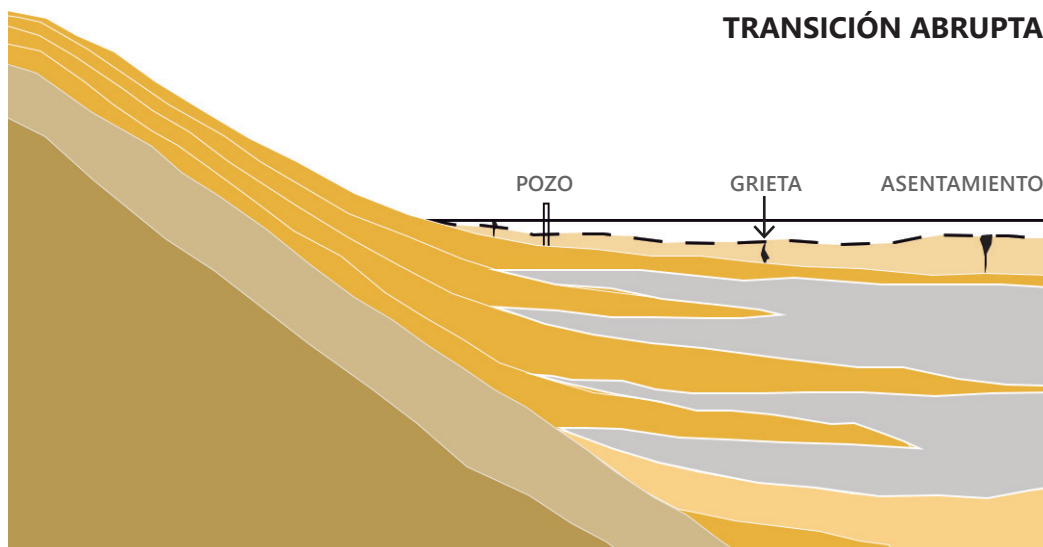
fenómeno de hundimiento regional provocando, en primer instancia la aparición de un desnivel que hace notorio los límites entre ambos tipos de suelos para posteriormente generar grietas y fallas por tensión. Estas grietas se caracterizan por presentar escalones hacia la zona de mayor asentamiento y, por lo general, son paralelas a las curvas de nivel de las zonas que se ubican al pie de las laderas de las sierras o cerros.

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.

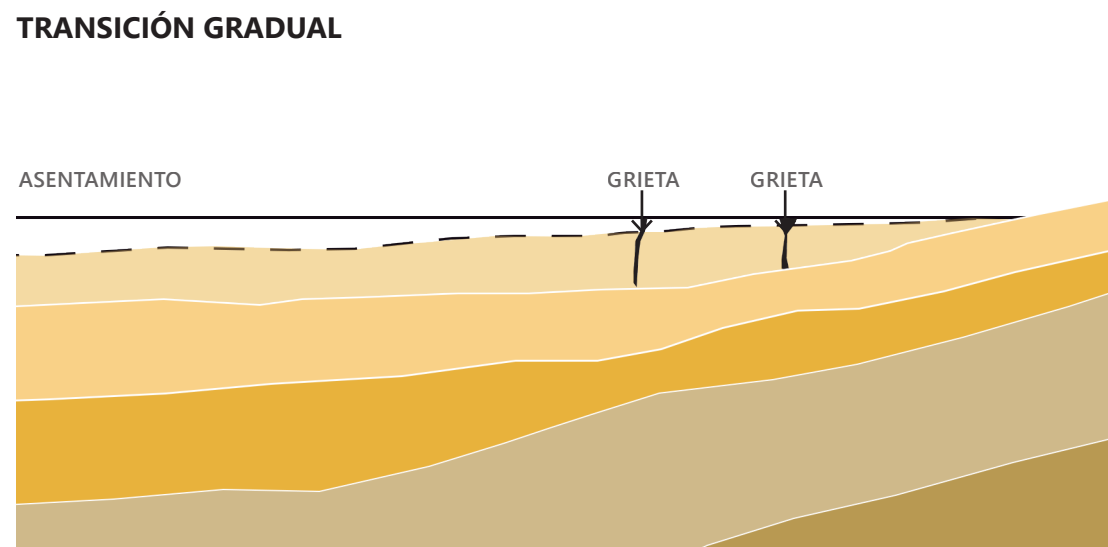
El tramo Guelatao-Los Reyes de la Línea "A" del Metro se localiza en la parte sur-oriental de la cuenca de México. Una parte de la vía del Metro se encuentra dentro de la delegación Iztapalapa y otra parte en el Municipio de los Reyes La Paz, en el Estado de México. Las deformaciones del terreno tan variantes de un punto a otro de la línea han ocasionado diferentes tipos de daños en las estructuras del Metro, sobre todo en la presencia de deformaciones súbitas que se desarrollan en tramos cortos.

Dado las condiciones tan diversas del suelo, la exploración preliminar a base de un número elevado de sondeos de penetración es muy importante para tener un conocimiento lo suficientemente próximo de la disposición estratigráfica, incluso, salvo casos muy específicos, estos ensayos arrojan información más acertada que la obtenida a partir de pozos de muestreo continuo e inalterado de costos elevados.

TRANSICIÓN ABRUPTA

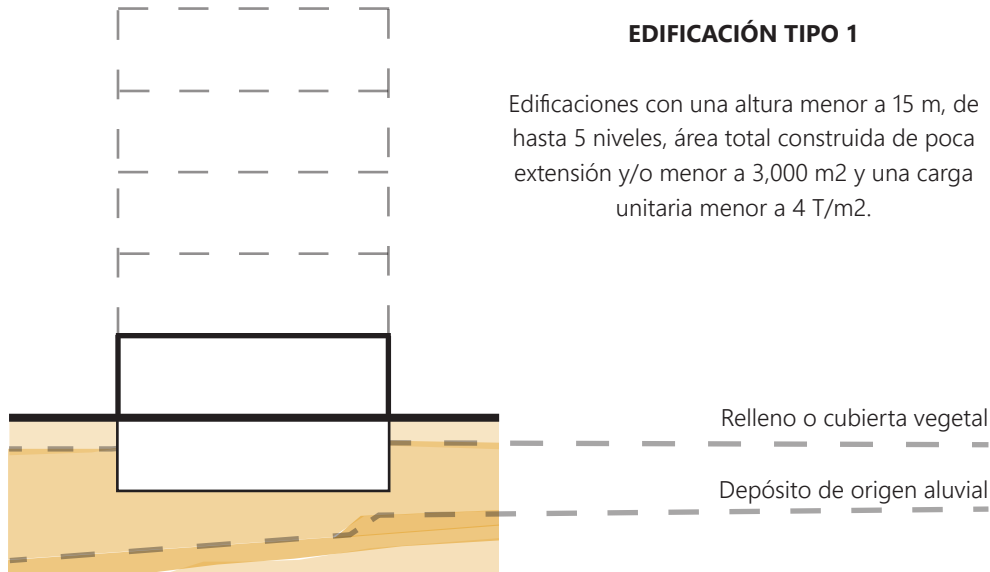


TRANSICIÓN GRADUAL



CASO 5

ZONA II



EDIFICACIÓN TIPO 1

Edificaciones con una altura menor a 15 m, de hasta 5 niveles, área total construida de poca extensión y/o menor a 3,000 m² y una carga unitaria menor a 4 T/m².

En el caso de un terreno en Zona II la capacidad de carga puede variar debido a la heterogeneidad de los estratos.

En este caso, no se toman en cuenta los asentamientos que pueden resultar al consolidarse los mantos arcillosos por el alto costo de las pruebas, por lo que es frecuente la aparición de grietas en muros debido a los movimientos diferenciales, sobre todo en construcciones con una amplia área de desplante.

PROPUESTAS DE CIMENTACIÓN

Zapata aislada de concreto armado

El uso de zapatas aisladas en estructuras de ligeras de uno o mas niveles, como viviendas, es la solución más económica y usual.

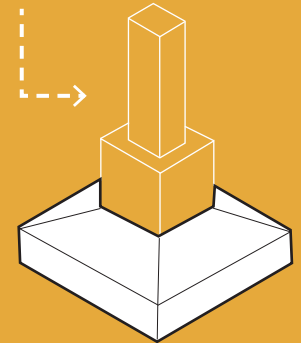
Zapata corrida

Es constituida generalmente, por un conjunto de zapatas corridas dispuestas en forma de retícula ortogonal, para evitar o disminuir la aparición de grietas en los muros.

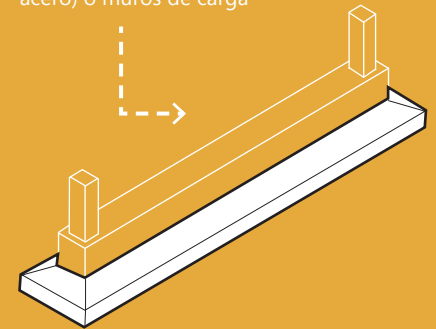
Losa de cimentación

Conforme el área de desplante de las zapatas corridas va aumentando debido a las cargas, se propone el uso de una losa de cimentación,

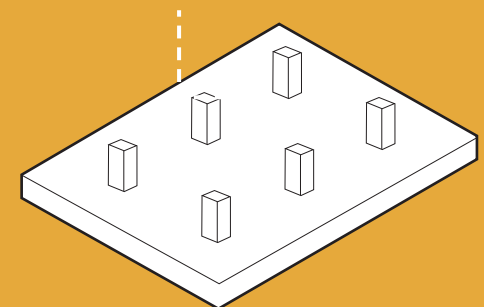
Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero)

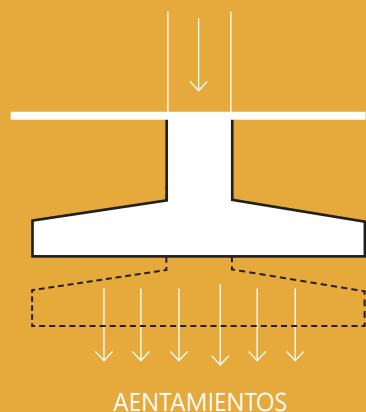


Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero) o muros de carga

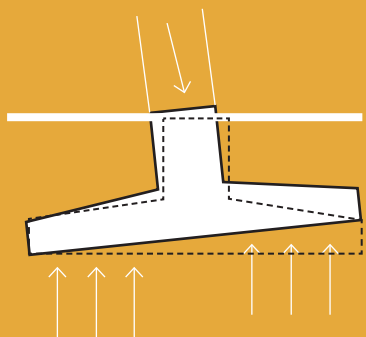


Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero) o muros de carga

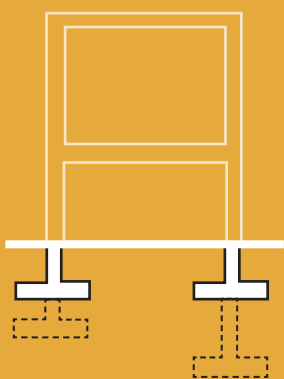




ASENTAMIENTOS



VOLTEO



ASENTAMIENTO DIFERENCIAL

Generalmente, debido a la heterogeneidad de los estratos y sus propiedades, los asentamientos suelen ser un problema muy importante para estos casos.

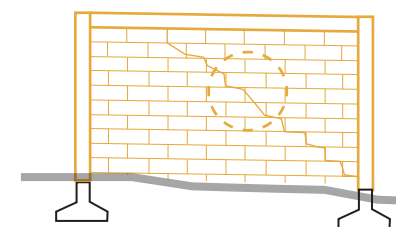
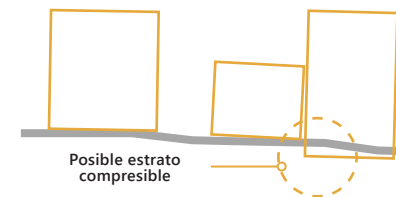
Por lo que es necesario tomar en cuenta dos problemáticas probables de zapatas:

La primera por **volteo** de los elementos por la falta de profundidad del desplante durante un movimiento sísmico, que puede provocar una inclinación crítica de la estructura.

La segunda por **asentamientos diferenciales**, ya que en algunas partes de la construcción se pueden presentar mayores asentamientos o a diferentes velocidades que en otros puntos, principalmente por las diferentes capacidades de consolidación de los estratos.

Es importante investigar el tipo, comportamiento y condición de las **cimentaciones cercanas y colindantes** en cuanto a hundimientos, agrietamientos del suelo y desplomes.

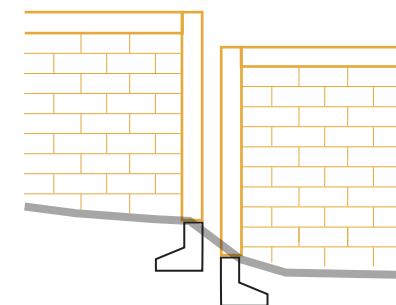
La dirección de los desplomes en las estructuras nos presenta la presencia de estratos altamente compresibles de espesores desconocidos, que nos permiten identificar las posibles áreas más críticas dentro del terreno.



En edificaciones estructuradas por muros de carga de mampostería, es común que los muros presenten **esfuerzos de tensión**, provocando que una parte del muro se hunda junto con el suelo, y la otra parte se mantenga en estado de inercia. Esta condición llega a ser crítica en este tipo de estructuras.

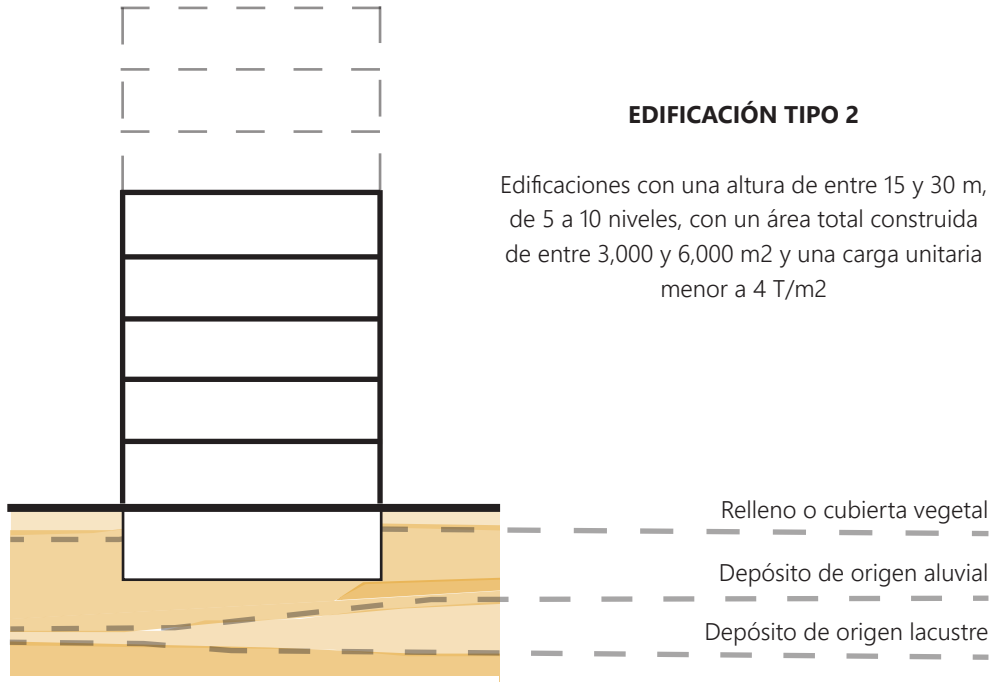
Para minimizar las problemáticas en terrenos de transición gradual, es conveniente realizar una compactación del terreno natural, así como de capas de relleno sobre las cuales desplantar la cimentación para mejorar su capacidad de carga.

En el caso de terrenos cercanos a fallas o de transición abrupta, es necesario la colocación de juntas en muros y bardas, o bien el empleo de adoquín en pisos y patios, para reducir los daños a las estructuras provocados por las grietas.



CASO 6

ZONA II



El hundimiento general del valle tiene sus consecuencias más graves, cuando la transición entre materiales firmes de la zona I y blandos de la Zona III se presenta en forma abrupta. El suelo tiende entonces a fracturarse por asentamiento diferencial, dicho fenómeno es evolutivo y las reparaciones en las construcciones afectadas suelen ser poco efectivas.

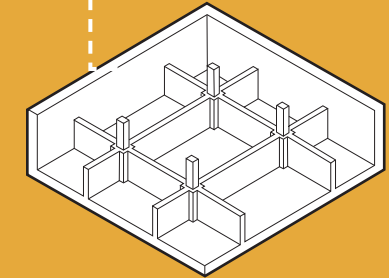
No es factible realizar excavaciones por taludes verticales o escalonados, por lo que es necesario el uso de sistemas de contención adomados y rígidos, como es el muro milán. Estos elementos no pueden ser considerados realmente como una forma de cimentación puesto que su misión es la contención de tierras, sin embargo, forman parte crucial para su buen comportamiento.

PROPUESTAS DE CIMENTACIÓN

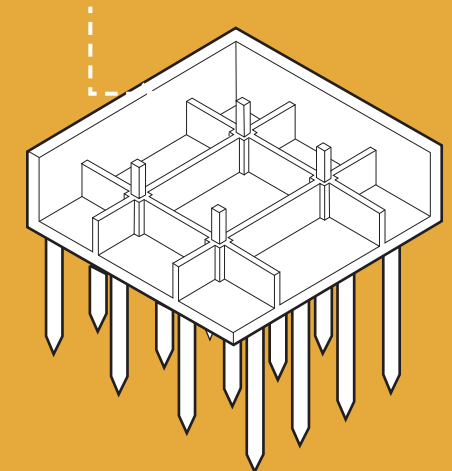
Cajón de cimentación

Es común su empleo en edificaciones donde es necesario el uso de sótanos o semisótanos donde pueden llegar a ser compensados o parcialmente compensados.

Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero) o muros de carga

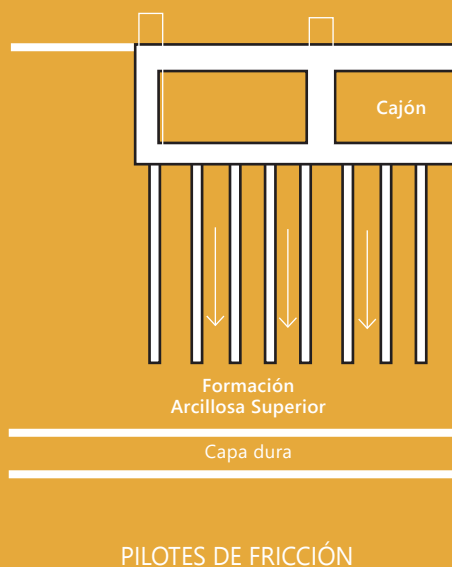
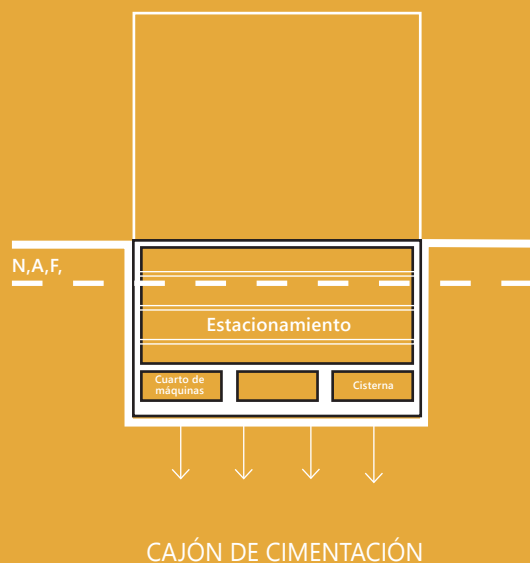


Sistema estructural a base de marcos (concreto o acero)



Sistemas combinados

Para edificaciones de gran altura, se utilizan losas de cimentación de gran espesor que permiten una distribución uniforme de las cargas y se agregan pilotes, generalmente de fricción, que le dan estabilidad a la cimentación ante acciones sísmicas.



El uso de **cajones de cimentación** funcionan como una estructura empotrada por lo que su comportamiento dinámico y estático dependen del comportamiento del suelo. La porción de las celdas del cajón de cimentación que esté por debajo del nivel freático y que no constituya un espacio funcionalmente útil, deberá considerarse como lleno de agua, a menos que dicho espacio se rellene con material ligero no saturable que garantice la permanencia del efecto de flotación.

Con el objeto de esperar un buen comportamiento de la cimentación, es importante aminorar las excentricidades en el área de la losa, sobre todo en el uso de cisternas o cuarto de máquinas.

Una **cimentación combinada** a base de cajón de cimentación con pilotes de fricción es muy útil en esta zona, debido a que se busca evitar **emersiones** de las estructuras que puedan provocar asentamientos diferenciales en estructuras vecinas y reducir la capacidad de carga de la propia cimentación.

Además de que también es aplicable donde los estratos duros se encuentran a una profundidad que no es factible de alcanzar económicamente.

Estas cimentaciones requieren una separación suficiente entre la punta de los pilotes y el estrato duro, así como una longitud calculada que sea suficiente para generar una resistencia por fricción en las paredes de sus elementos y la cantidad adecuada de elementos.

Es importante realizar un buen estudio de mecánica de suelos que nos permita predecir los asentamientos en diferentes puntos del proyecto.

Cuando el suelo es sujeto a un esfuerzo debido a una cimentación cargada hay tres tipos de asentamientos :

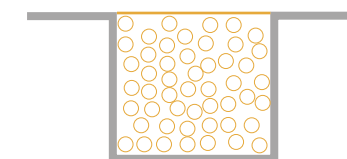
Asentamiento elástico; Inmediato (horas o días) y se produce en cualquier tipo de suelo.

Asentamiento por consolidación primaria: Se presenta con el paso de los años, en suelos de media y baja permeabilidad, generalmente en suelos finos. Se produce por una expulsión gradual de agua.

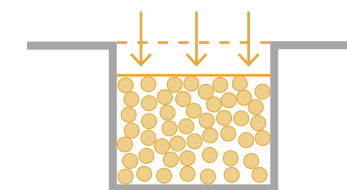
Asentamiento por consolidación secundaria: Se presenta con el paso de los siglos, en suelos de media y baja permeabilidad, generalmente en suelos finos.

Existe una clara correlación entre los daños ocurridos (los edificios colapsados o fuertemente dañados) y las zonas donde se produjeron las mayores **aceleraciones espectrales** del sismo del 19 de septiembre de 2017.

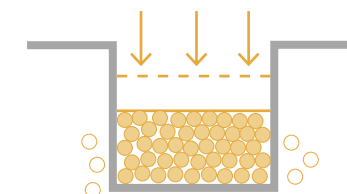
El sismo de magnitud 7.1 dañó, en su mayor parte, estructuras de entre 4 y 7 pisos, a lo largo de una franja dentro de la zona de transición. La interacción y **amplificación** abrupta de las ondas sísmicas con esta región provocaron los daños.



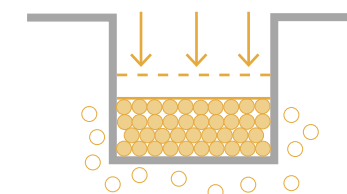
ESTADO ESTÁTICO



ASENTAMIENTO ELÁSTICO



CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

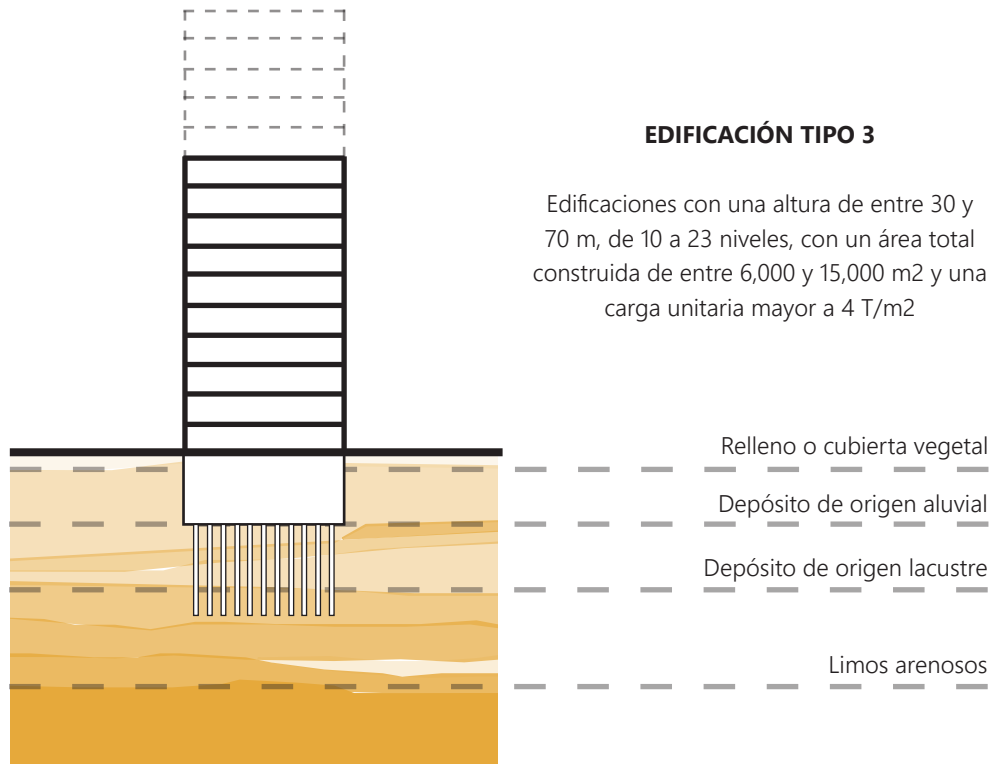


CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA

CONSOLIDACIÓN TOTAL

CASO 7

ZONA II



PROPUESTA DE CIMENTACIÓN

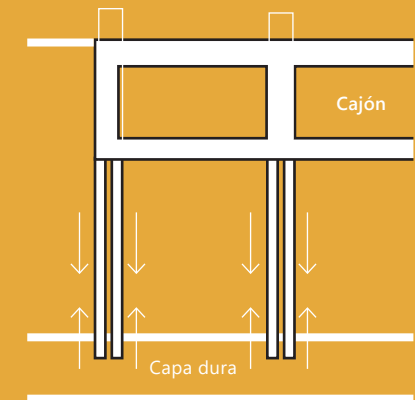
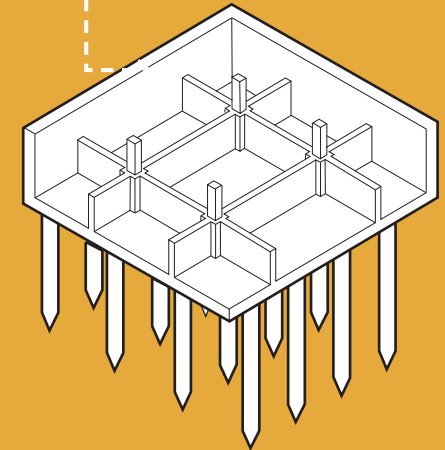
Sistemas combinados

Para edificaciones de gran altura, se utilizan cajones de cimentación con losas de base de gran espesor que permiten una distribución uniforme de las cargas y se agregan pilotes, generalmente de fricción, que le dan estabilidad a la cimentación ante acciones sísmicas.

En esta zona, cuando las puntas de las pilas o pilotes son desplantadas en un estrato duro, no es recomendable despreciar la resistencia por fricción ni tampoco la resistencia por punta, sin embargo es importante resaltar, que la resistencia por fricción es el primer mecanismo de transferencia de carga en trabajar.

Por las altas cargas de estas edificaciones es común trabajar con zonas pilotadas, que son en las que los pilotes no sirven de apoyo directo a los soportes sino que están colocados para reducir los asentos o asegurar la estructura.

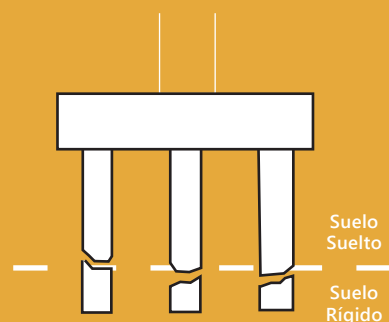
Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero)



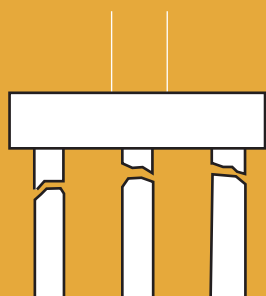
PILOTES DE PUNTA

CASO 8

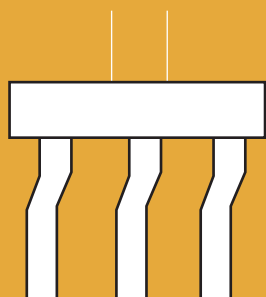
ZONA II



FALLA DEL PILOTE POR CONTRASTE DE RIGIDEZ



FALLA DEL PILOTE POR CORTE BASAL



DEFORMACIONES LATERALES EXCESIVAS

La falla de los pilotes a flexión o cortante por el **contraste de la rigidez** que pueden causar las diferentes propiedades de los estratos.

Otra falla a tomar en cuenta es el **cor-tante basal**, una consecuencia de la presencia de detalles de conexión deficientes entre los pilotes y cabezales.

Las **deformaciones laterales** excesivas pueden afectar considerablemente la capacidad de carga de los pilotes, incluso causar una falla por cortante, sobre todo ante acciones sísmicas, por lo que es importante tener un control durante cada proceso constructivo.

En condiciones sísmicas, se debe considerar el incremento de esfuerzos generado por el momento de **volteo**.

Algunos pilotes son sometidos a fuerzas de tensión y si la resistencia por fricción y el peso de la edificación no son suficientes, puede darse una extracción de las pilas desde el suelo.

Teniendo en cuenta que el hincado de pilotes produce desplazamientos laterales en el terreno, el proyecto de hincado debe contemplar una ejecución desde el interior de la obra hacia el exterior.

EDIFICACIÓN TIPO 4

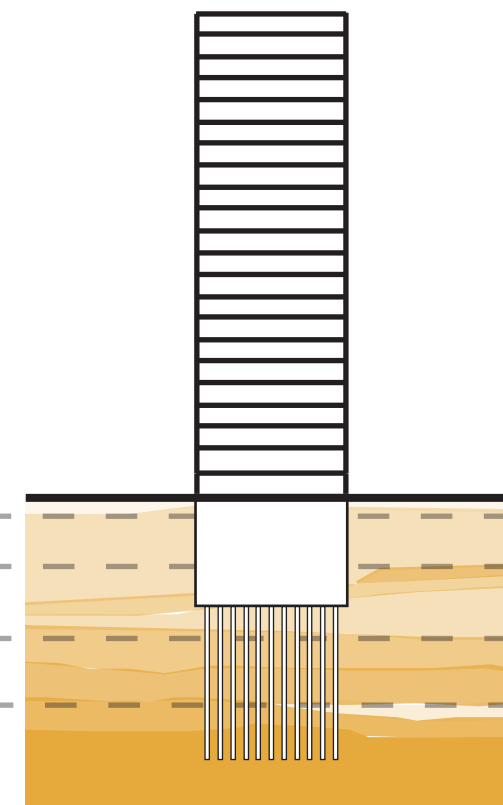
Edificaciones con una altura mayor a 70 m, de 23 niveles o más, con un área total construida mayor a 15,000 m² y una carga unitaria mayor a 4 T/m².

Relleno o cubierta vegetal

Depósito de origen aluvial

Depósito de origen lacustre

Limos arenosos



Es necesario realizar sondeos en número suficiente para definir variaciones dentro del terreno, nivel de aguas freáticas y determinación de las condiciones de presión del agua en el subsuelo, incluyendo detección de mantos acuíferos colgados.

ZONA III

LAGO

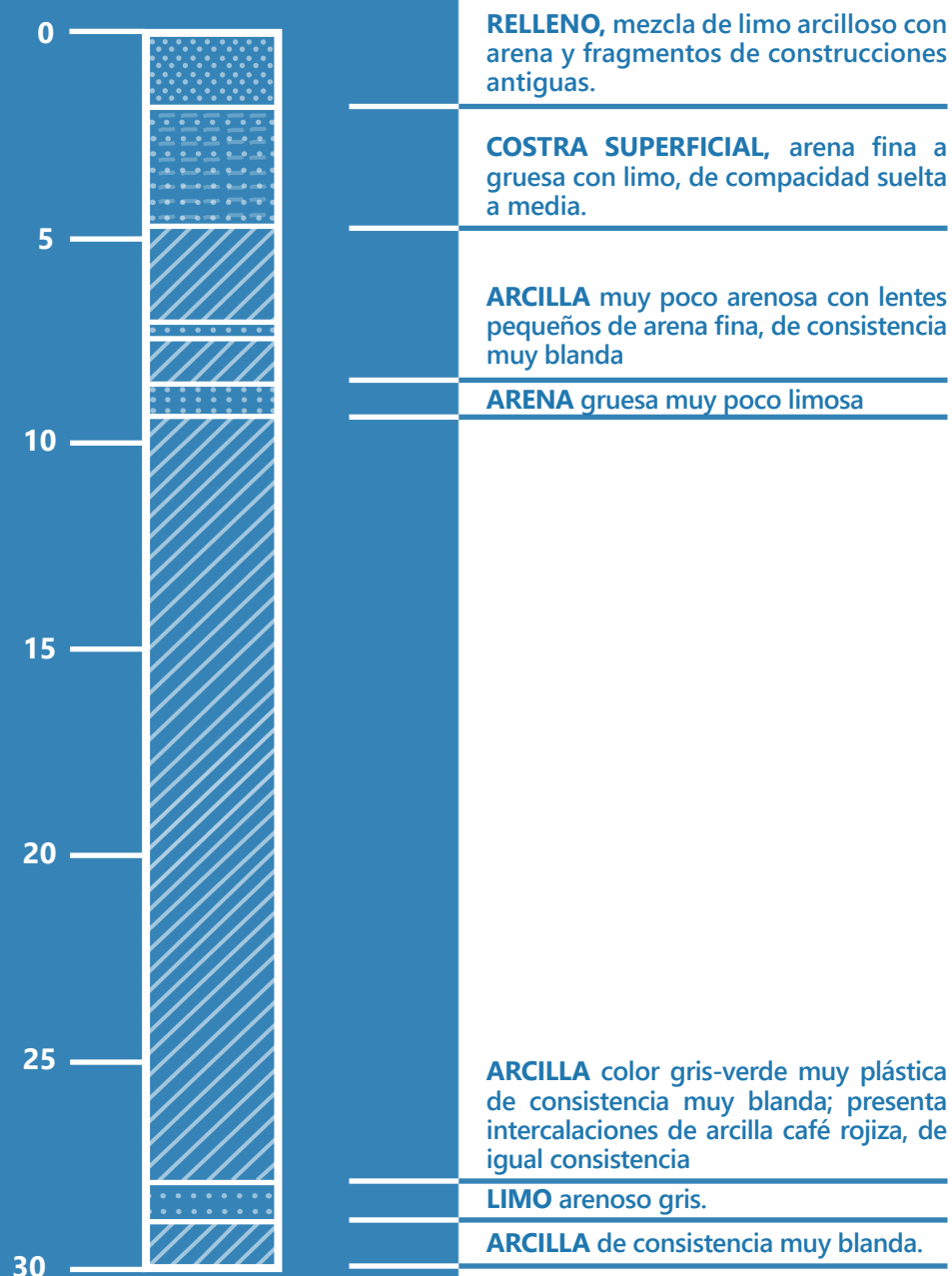


FIG. 33 Corte estratigráfico. Sondeo típico de la Zona de Lago.

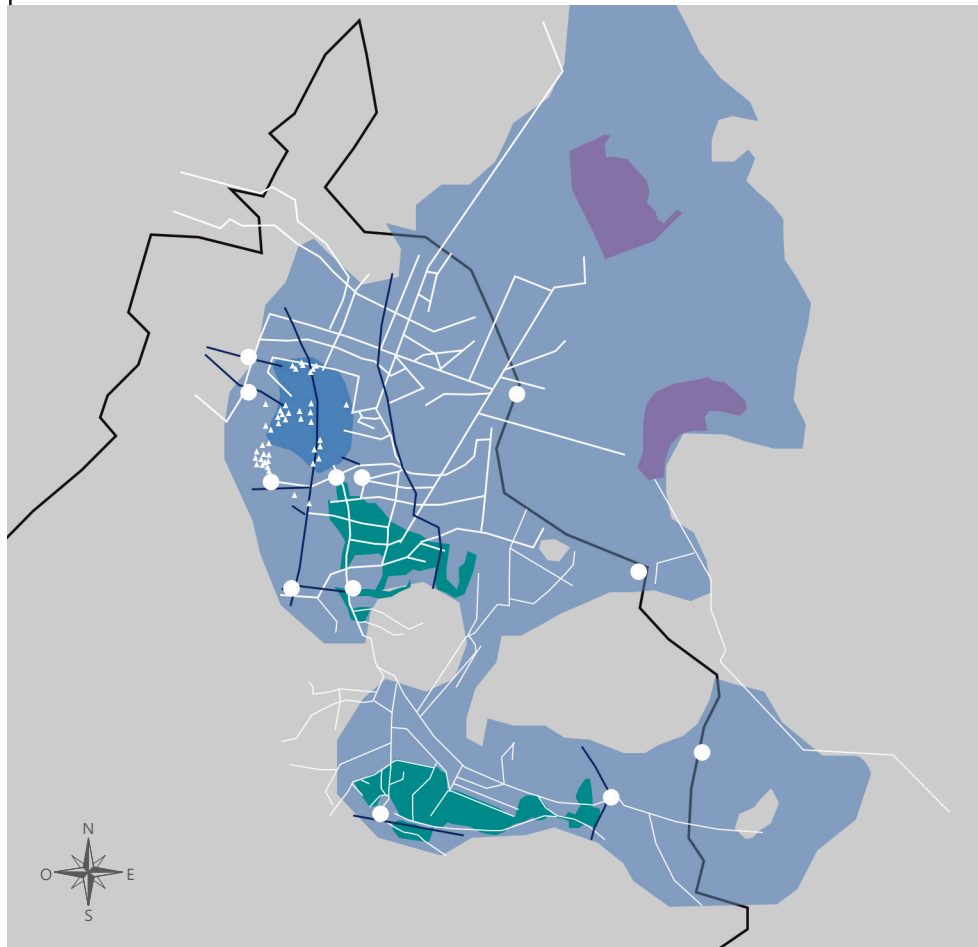
Según indica el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, la Zona III comprende la zona de lagos, en la que se encuentran depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Dichos depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelo aluviales y materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

PROPIEDADES GENERALES

ORIGEN	RESIDUAL (VOLCÁNICO/LACUSTRE)
COHESIÓN	BAJA
COMPACIDAD	SUELTA
PLASTICIDAD	ALTA
COMPRESIBILIDAD	ALTA
NIVEL FREÁTICO	PROFUNDIDAD BAJA
CAPACIDAD DE CARGA	BAJA

ANOMALÍAS GEOTÉCNICAS

- Propiedades atípicas a otras arcillas debido a su origen volcánico y lacustre
- Asentamientos regionales
- Abultamiento del suelo
- Suelo con altos niveles de sal en la Zona Oriente
- Amplificación de ondas sísmicas
- Alto contenido de agua en arcillas (hasta 500%)



En el libro "El subsuelo de la Ciudad de México" Marsal (2017) se presenta el mapa propuesto de zonificación geotécnica para el centro histórico de la Ciudad de México. Esta propuesta considera una subzona dentro de la Zona de Lago:

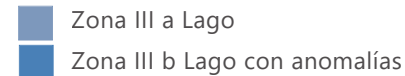


FIG. 33 Zonificación geotécnica propuesta para Zona de Lago. "El subsuelo de la Ciudad de México" 2017.

- **Zona IIIa Lacustre:** Corresponde al que aparece en el Reglamento de Construcciones y a las Normas Complementarias
- **Zona IIIb Lacustre con anomalías geotécnicas:** Correspondiente a los sitios en donde la historia de cargas aplicadas en la superficie ha sido muy variable por lo cual se presentan capas de arcilla fuertemente consolidadas por efecto de rellenos y grandes sobrecargas de construcciones aztecas y coloniales.

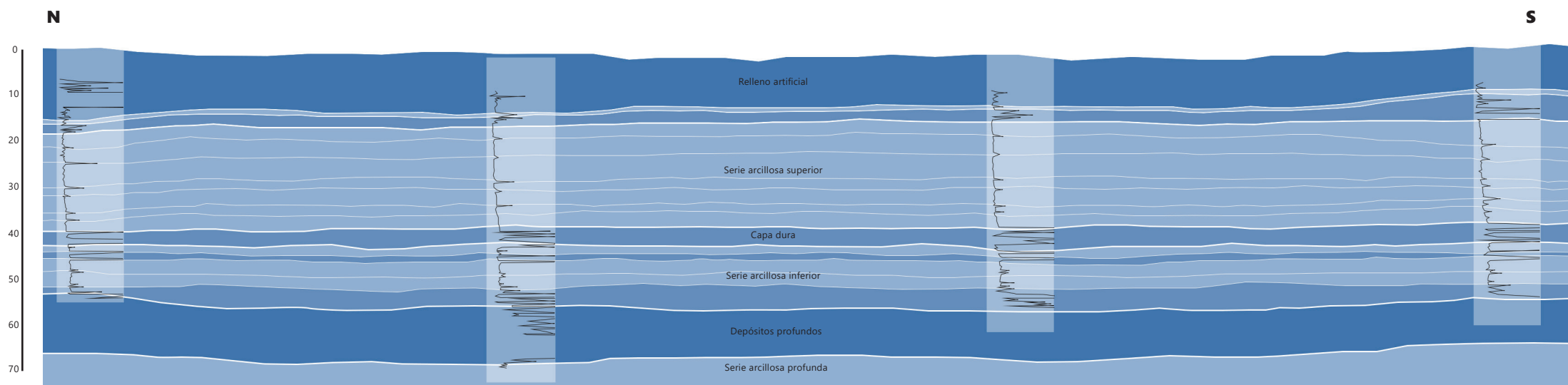
En el Centro Histórico de la Ciudad de México se destaca la presencia de rellenos arqueológicos de gran espesor asociados al islote de Tenochtitlan, que han originado diversos problemas de comportamiento y daños estructurales, en edificios antiguos y monumentos históricos, en esta zona.

El máximo valor de espesor de rellenos es de 10 m aproximadamente, en la esquina que forman las calles de Donceles y República de Argentina, a corta distancia del Templo Mayor, es importante resaltar la heterogeneidad de los materiales de relleno utilizados en la construcción de la México-Tenochtitlan.

El mayor problema de esta zona, es el hundimiento que se genera por la consolidación del suelo con el paso del tiempo. Dicha consolidación genera hundimientos importantes que pueden afectar la funcionalidad de los proyectos, sin embargo, también forman parte de un historial de esfuerzos en las propiedades mecánicas del suelo, en donde se puede notar un aumento en la resistencia y diferencias en la respuesta sísmica del terreno con el paso del tiempo, por lo que es importante actualizar la normativa periódicamente.

El hundimiento regional afecta cimentaciones y estructuras construidas en las arcillas del Valle de México. La zona lacustre cercana a la zona de lomas presenta menor hundimiento, lo cual indica que en efecto la magnitud de hundimiento está directamente relacionada con el espesor de la profundidad de las capas de arcilla.

FIG. 34 Corte estratigráfico en el Centro de la Ciudad de México . (Santoyo 1990).



ANOMALÍAS PREHISPÁNICAS

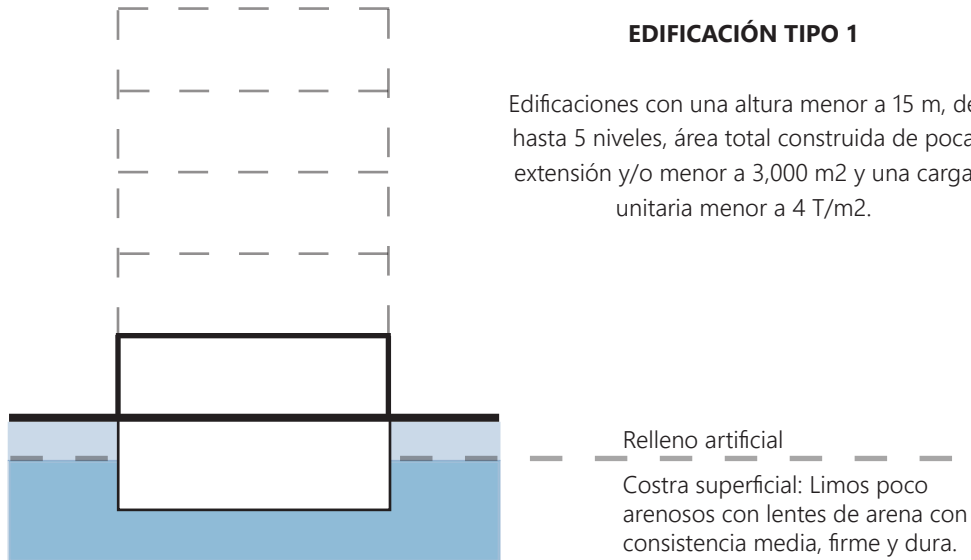
- **Tlateles:** Proviene del vocablo náhuatl "tlaltelli", el cual significa terraplén, montículo o tierra elevada. Es una estructura artificial formada principalmente de suelo y materiales variados donde se localizaban asentamientos humanos.
- **Calzadas y diques:** Su función principal consistía en la protección y manejo de las aguas de los lagos, además de la comunicación de los asentamientos inmersos dentro de la zona. Prácticamente todas las calzadas prehispánicas son hoy avenidas de la Ciudad de México
- **Chinampas:** Son segmentos de tierra artificiales cuya función consistía en extender las áreas de cultivo.
- **Canales:** Servían para conducir el agua de los ríos el agua proveniente de las regiones montañosas, sin embargo, con la explotación demográfica, se inició el entubamiento de ríos y cauces.

ANOMALÍAS GEOLÓGICAS

- **Eventos volcánicos relativamente recientes:** En el sur de la cuenca se han encontrado zonas donde las arcillas lacustres típicas están intercaladas con potentes estratos de tobas depositadas recientemente. Estos estratos rígidos se fracturan fácilmente bajo el efecto del hundimiento regional y dan lugar a grietas con escalón de hasta 75cm. (Colonia del mar, Tlahuac).
- **Agrietamiento por fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamiento:** Los encharcamientos de agua en áreas considerables producen presiones internas en las puntas de las grietas por secado existentes, lo que facilita su propagación

CASO 9

ZONA III



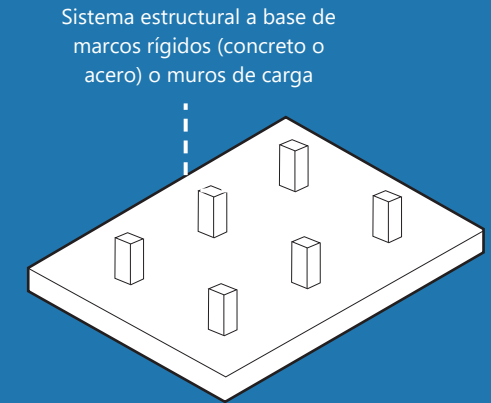
Las deformaciones inmediatas del suelo en esta zona, bajo carga o durante excavaciones dificultan la construcción de edificaciones de gran extensión en planta y obligan frecuentemente a proceder por etapas.

A mediano y largo plazo, la consolidación de las arcillas por expulsión de agua bajo el peso de las construcciones genera grandes asentamientos adicionales. Las edificaciones de los conjuntos habitacionales son generalmente relativamente ligeras; sin embargo, es necesario tomar en cuenta que el peso combinado de varias construcciones contiguas puede generar un bulbo de presiones de gran profundidad, susceptible de causar fuertes asentamientos no uniformes en la zona construida.

PROPUESTAS DE CIMENTACIÓN

Losa de cimentación

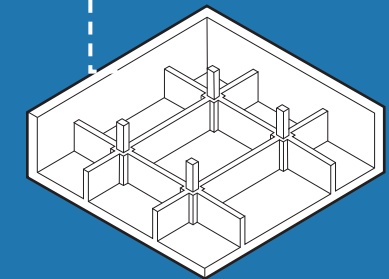
Es muy común el uso de esta cimentación en construcciones de viviendas unifamiliares por su buen comportamiento ante hundimientos diferenciales y la buena distribución de cargas.

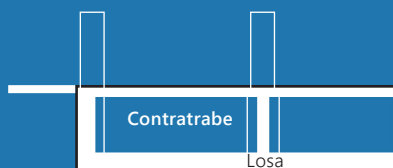


Cajón de cimentación

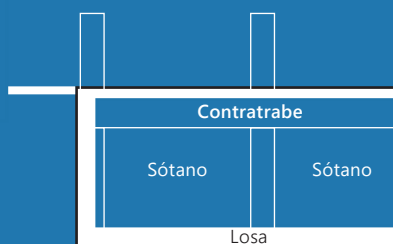
Es común su empleo en edificaciones habitacionales de 4 o 5 niveles para obtener mayor estabilidad y capacidad de carga por medio de una ampliación del área de desplante e incremento en su profundidad.

Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero) o muros de carga

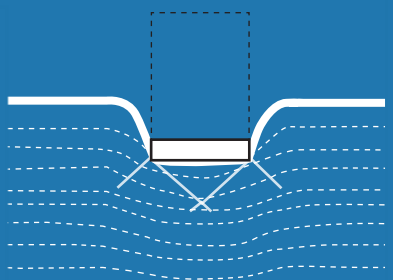




LOSA DE
CIMENTACIÓN



CIMENTACIÓN
COMPENSADA



FALLA POR PUNZONAMIENTO

Las losas de cimentación se utilizan generalmente en este caso, porque resultan más económicas que zapatas de grandes dimensiones y reducen la presión de contacto con el terreno.

La losa puede ser maciza, aligerada o disponer de refuerzos especiales para mejorar la resistencia a punzonamiento bajo los soportes individualmente. Usualmente se refuerza con contratrajes para darle mayor rigidez y evitar fallas por excentricidad.

Este tipo de cimentación tiende a ser en gran medida sobredimensionada por tres razones principales:

1. Costo adicional de los métodos de análisis que son, sin embargo, no exactos.
2. El costo adicional de un sobredimensionado razonable de este elemento de la estructura será generalmente bastante pequeño con relación al costo total del proyecto.
3. El margen de seguridad adicional proporcionado por el modesto costo adicional.

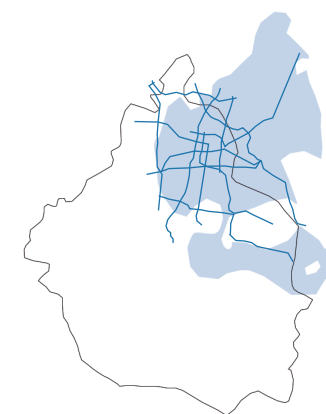
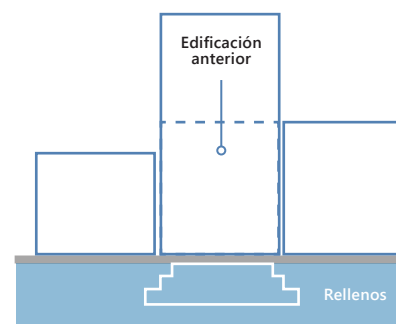
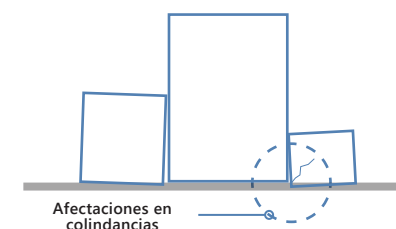
Se deben evitar durante y después de la construcción las filtraciones en los cajones de cimentación, calculando y tomando en cuenta la reacción de empuje ascendente, para evitar el hundimiento o el volteo.

Es importante investigar el tipo, comportamiento y condición de las **cimentaciones cercanas y colindantes** en cuanto a hundimientos, agrietamientos del suelo y desplomes.

La cimentación por losa en terrenos compresibles, al crear un hundimiento generalizado de los estratos inferiores, requiere un estudio adicional de los asentamientos inducidos en las edificaciones colindantes.

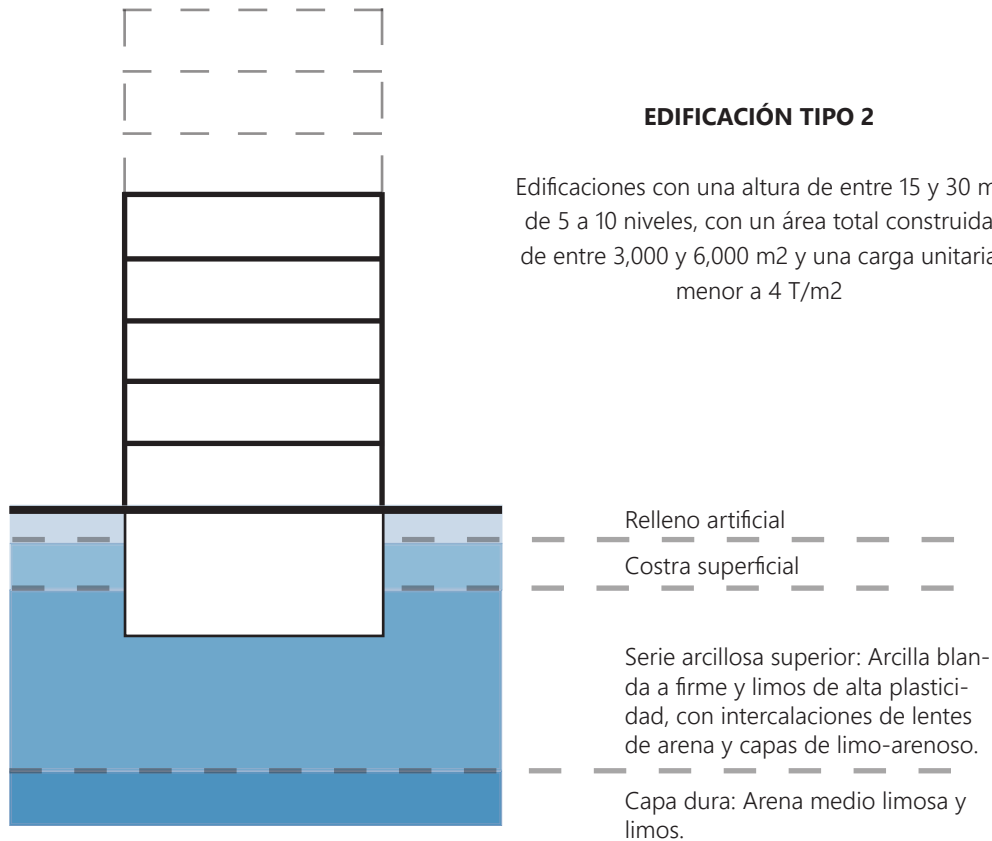
De igual manera, es importante investigar la **historia de carga del predio** y la existencia de cimentaciones antiguas, restos arqueológicos, rellenos superficiales antiguos o recientes, o cualquier otro factor que pueda originar asentamientos diferenciales de importancia, de modo que todo ello pueda tomarse en cuenta en el diseño. Las deformaciones actuales que presentan las banquetas, bardas y calles son una excelente evidencia de los asentamientos de la zona y consecuentemente un comportamiento similar que podría presentarse en la estructura.

Asimismo, se investigarán la localización y las características de las **obras subterráneas** cercanas, existentes o proyectadas, pertenecientes a la red de transporte colectivo, de drenaje y de otros servicios públicos, con objeto de verificar que la construcción no cause daños a tales instalaciones ni sea afectada por ellas.



CASO 10

ZONA III



En esa zona el uso de la compensación del suelo como método de cimentación se ve limitado por las dificultades que se presentan al realizar excavaciones a grandes profundidades,, incluyendo los problemas de estabilización de taludes, de control de agua y de expansión del suelo por descarga.

PROPUESTAS DE CIMENTACIÓN

Cajón de cimentación

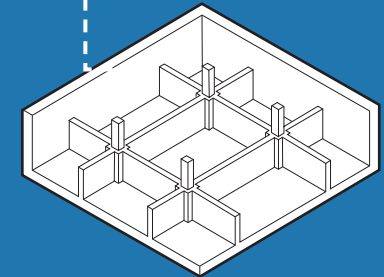
El uso de cajones de cimentación en este caso, tiene el inconveniente de requerir que la capa de suelo donde se sustenta la losa, debe permanecer lo más inalterada posible, lo cual obliga a realizar la excavación por etapas, evitando bufamientos o pérdida de humedad .

Sistemas combinados

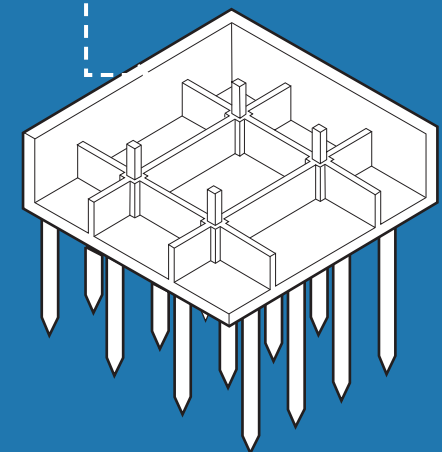
Se usan pilas o pilotes como complemento de cimentaciones parcialmente compensada para reducir asentamientos, transfiriendo parte de la carga a los estratos más profundos.

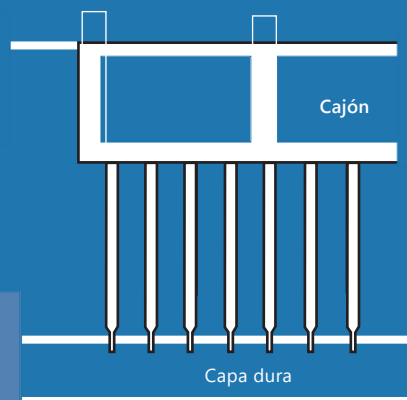
En esta zona, cuando las puntas de las pilas o pilotes son desplantadas en un estrato duro, no es recomendable despreñar la resistencia por fricción ni tampoco la resistencia por punta, sin embargo es importante resaltar, que la resistencia por fricción es el primer mecanismo de transferencia de carga en trabajar.

Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero) o muros de carga

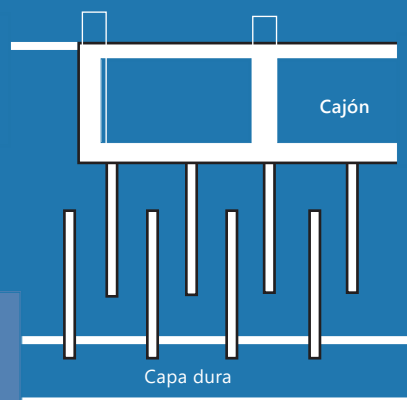


Sistema estructural a base de marcos rígidos (concreto o acero)





PILOTES DE PUNTA PENETRANTE



PILOTES ENTRELAZADOS

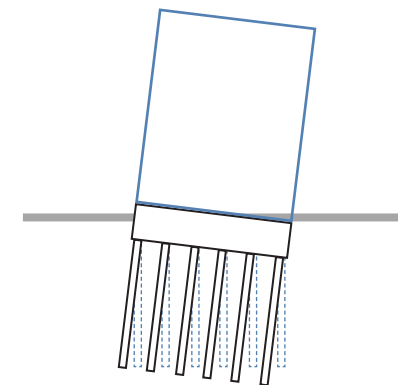
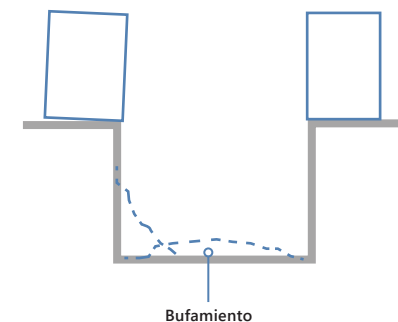
Cuando no resulta técnica o económicamente viable alcanzar un estrato con resistencia adecuada se diseñan los pilotes para su trabajo por fricción, en cuyo caso se denominan flotantes, y transmiten la carga al terreno por rozamiento.

Para evitar la emersión de las estructuras en pilotes de punta, existen alternativas en cuanto al uso de pilotes para contrarrestar algunas deficiencias de su comportamiento debido a los efectos del hundimiento regional.

El uso de pilotes de punta penetrante aumenta la capacidad de carga de los pilotes de fricción con una contribución de la punta pero acotando esta última para evitar la emersión. La punta presenta una disminución del diámetro del resto del pilote con el objetivo de favorecer la penetración en el estrato de apoyo bajo el efecto combinado de la carga y de la fricción negativa.

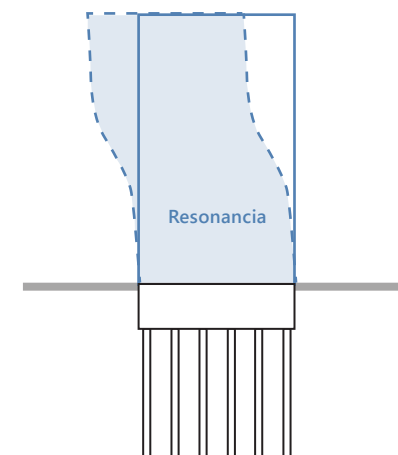
Las cimentaciones a base de pilotes entrelazados constan de pilotes de fricción convencionales ligados a la losa de cimentación y de otro conjunto apoyado en la capa dura. Esta disposición disminuye la magnitud de los esfuerzos inducidos en el suelo por el peso de la estructura. Además de generar un colchón de suelo que absorben los asentamientos de la formación arcillosa superior, evitando la emersión aparente

Todo proceso de excavación está asociado a un cambio del estado de esfuerzo del suelo. Este cambio está inevitablemente acompañado por **deformaciones**, que toman la forma de hundimiento del área que rodea la excavación, de movimiento hacia adentro del suelo situado en los bordes y de bufamiento de suelo localizado abajo del fondo.



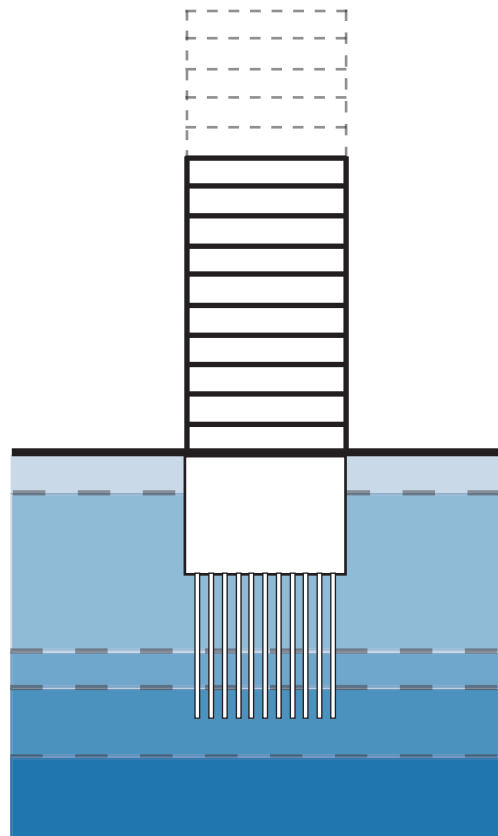
Se debe tener especial cuidado en este caso, ya que las edificaciones con sistemas mixtos de una losa o cajón de cimentación y pilotes de fricción fueron las más afectadas durante los pasados temblores; éstas eran típicamente de moderada altura (6 a 15 pisos) con periodos naturales de vibración relativamente largos.

Debido precisamente a la similitud en los modos de vibrar de edificios con este tipo de cimentación y de los depósitos de suelo en que se apoyan estas estructuras, resultan particularmente susceptibles a los efectos de sismos. Además de la **amplificación** de las ondas, la duración del movimiento del suelo es también mucho mayor dentro de los sedimentos blandos.



CASO 11

ZONA III



EDIFICACIÓN TIPO 3

Edificaciones con una altura de entre 30 y 70 m, de 10 a 23 niveles, con un área total construida de entre 6,000 y 15,000 m² y una carga unitaria mayor a 4 T/m²

Costra superficial

Serie arcillosa superior: Arcilla blanda a firme y limos de alta plasticidad, con intercalaciones de lentes de arena y capas de limo-arenoso.

Capa dura

Serie arcillosa inferior: Arcilla preconsolidada

Depósitos profundos: Arena limosa con intercalaciones de arcilla, limos y arenas

Durante un sismo es factible que se presenten hundimientos del inmueble por las oscilaciones a que el subsuelo y la estructura se someten; por otra parte, en edificios muy esbeltos, las oscilaciones dan origen a que el momento de volteo se incremente, al grado de que provoque su vulcamiento.

PROPUESTA DE CIMENTACIÓN

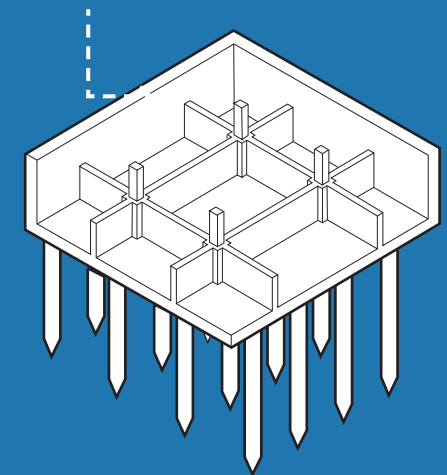
Sistemas combinados

Para edificaciones de gran altura, se utilizan cajones de cimentación con losas de base de gran espesor que permiten una distribución uniforme de las cargas y se agregan pilotes, generalmente de fricción, que le dan estabilidad a la cimentación ante acciones sísmicas.

Generalmente, los edificios muy altos se encuentran rodeados por estructuras de baja altura, sometidas a cargas mucho más pequeñas. Por ello es necesario controlar los asentamientos diferenciales entre las construcciones altas y las bajas.

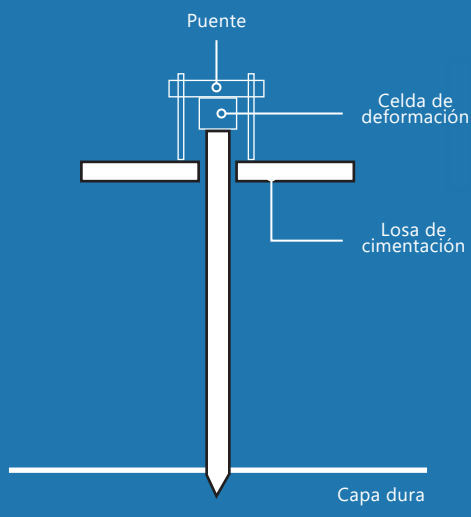
En el caso contrario de encontrarse rodeados por estructuras de gran altura es importante que se considere un espacio para evitar que las estructuras choquen y recordar que las ondas con mayor periodo de oscilación, son las que amenazan a las estructuras más altas.

Sistema estructural a base de marcos (concreto o acero)

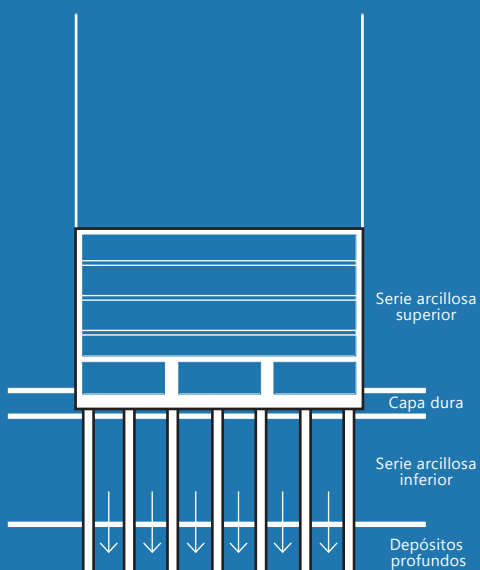


CASO 12

ZONA III



PILOTES DE CONTROL



Los grupos de pilotes se encuentran unidos por elementos lo suficientemente rígidos como para que los pilotes trabajen conjuntamente.

En el diseño preliminar es en ocasiones conveniente simplificar el sistema de cimentación propuesto como una pila equivalente, para luego analizar la estabilidad general y el asentamiento de esta pila. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que el mecanismo de falla desarrollado para una pila individual y para un grupo de pilas no es el mismo, este comportamiento está en función de la separación entre pilas.

La separación entre pilotes se determinará en función de la naturaleza del terreno, de los esfuerzos que deba resistir y de la capacidad de flexión de los pilotes.

El asentamiento tolerable para estructuras altas puede sobrepasar los valores de diseño convencionales de 50-65 mm. Un aspecto más crítico es el desplome general, así como el asentamiento diferencial entre las estructuras altas y bajas.

EDIFICACIÓN TIPO 4

Edificaciones con una altura mayor a 70 m, de 23 niveles o más, con un área total construida mayor a 15,000 m² y una carga unitaria mayor a 4 T/m².

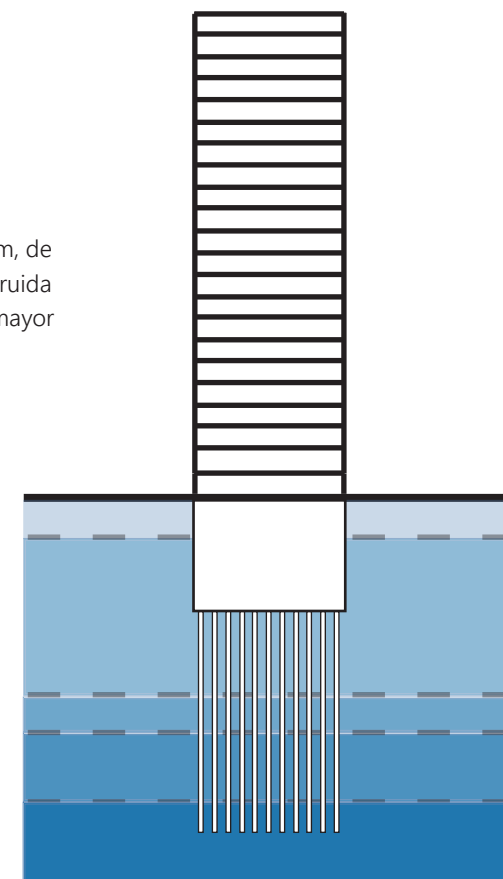
Costra superficial

Serie arcillosa superior: Arcilla blanda a firme y limos de alta plasticidad, con intercalaciones de lentes de arena y capas de limo-arenoso.

Capa dura

Serie arcillosa inferior: Arcilla preconsolidada

Depósitos profundos: Arena limosa con intercalaciones de arcilla, limos y arenas



Es importante mencionar que cualquier estructura pesada, levantada sobre la superficie de un manto de arcilla saturada, tenderá a hundirse, por lo que es importante, desde el comienzo de las excavaciones disponer de varias referencias topográficas, así como bancos de nivel profundos y superficiales, puntos para desplomes de edificios colindantes para observar la evolución de la presión del agua y hundimientos en diferentes etapas de construcción.

APLICACIÓN EN PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS ACTUALES

TORRE ARCOS BOSQUES II

TORRE MITIKAH

TORRE BBVA BANCOMER

TORRE REFORMA

TORRE ARCOS BOSQUES II

Arquitectos:

Teodoro González de León; J. Francisco Serrano.

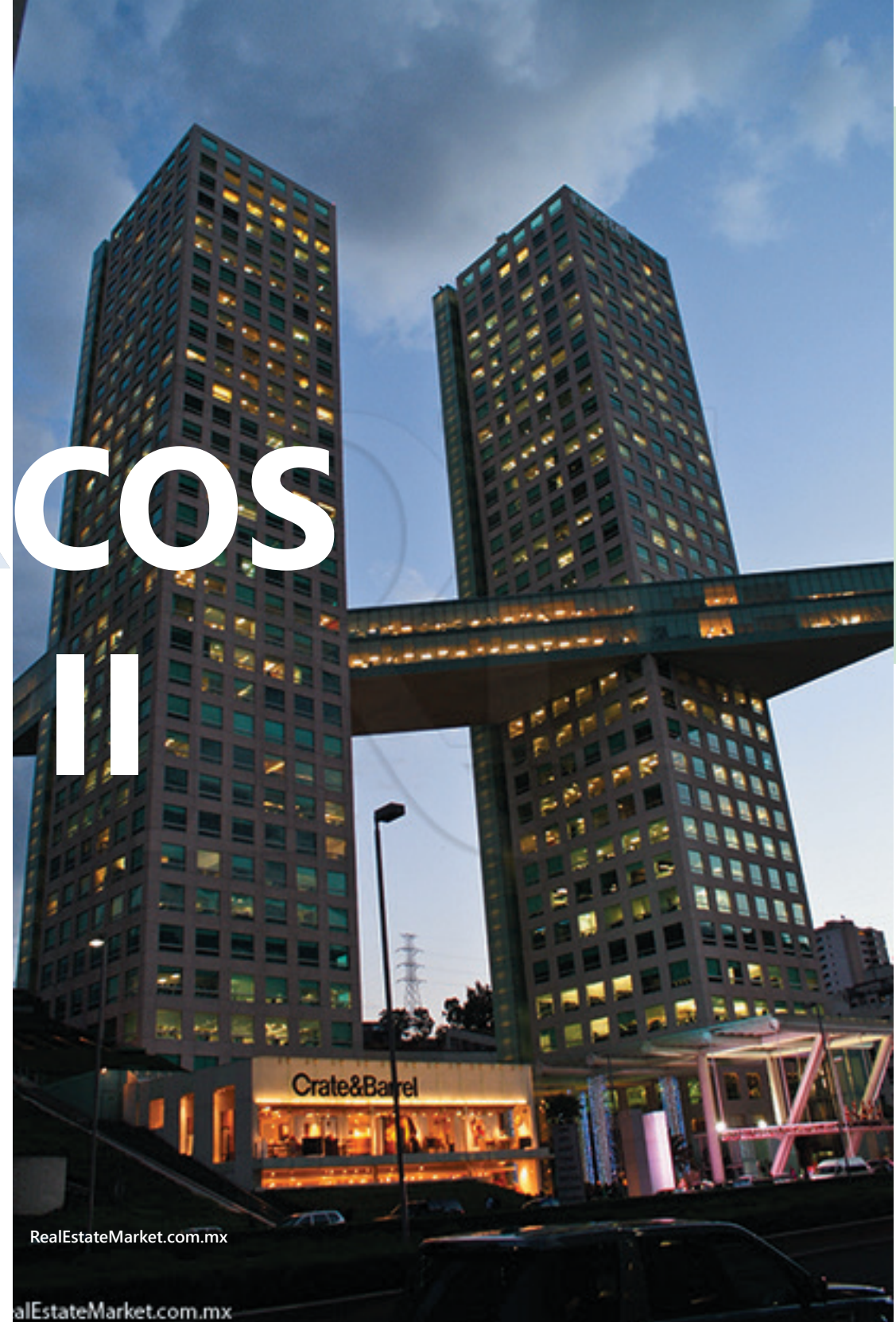
Nombre de la obra:

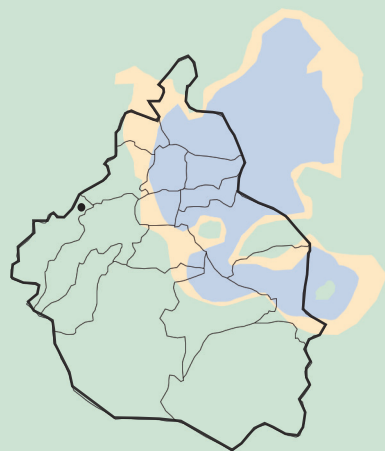
Arcos Bosques Corporativo.

Ubicación:

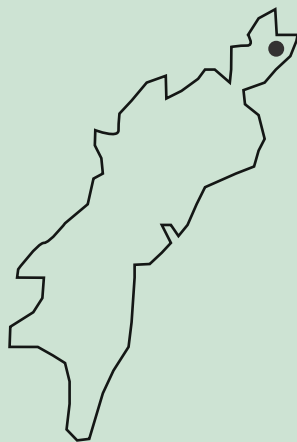
Paseo de los Tamarindos #400B, Colonia Bosques de las Lomas, en Delegación Cuajimalpa, CDMX

Fecha de construcción: 2006-2008.

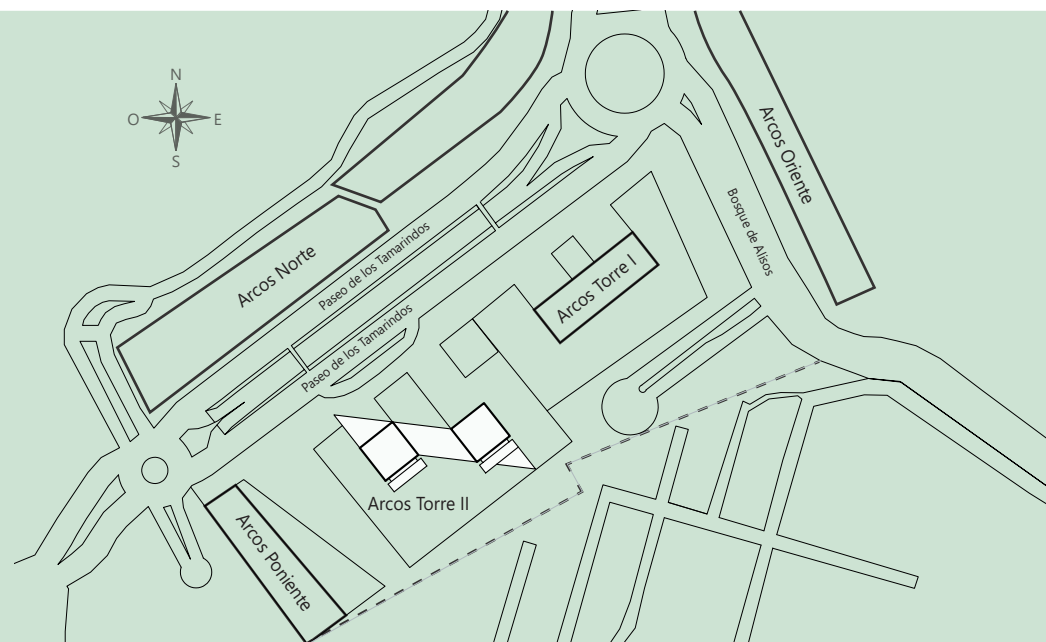




ZONA I

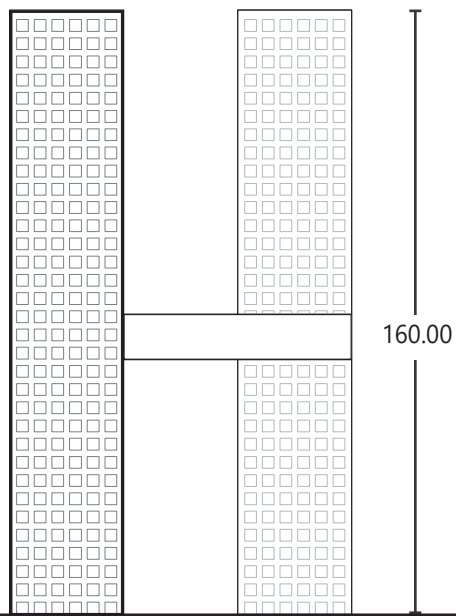


CUAJIMALPA



ARCOS BOSQUES CORPORATIVO

— 29.00 — 29.00 — 29.00 —



Arcos Bosques Corporativo es un desarrollo inmobiliario desarrollado en ocho etapas de construcción que comprenden en su totalidad la realización de 621,560m² de construcción. A menos de dos décadas de su inicio, el conjunto fue concluido al erigir la Torre II, la última gran pieza del plan maestro.

Explicado por los propios arquitectos proyectistas, "la idea central de este conjunto fue crear un recinto urbano, un espacio visualmente aislado de su entorno integrado por dos volúmenes altos –dos torres de 160m de altura, desplantadas sobre un plano inclinado cubierto de vegetación–, y tres volúmenes bajos de seis niveles, colocados en tres lados (oriente, norte y poniente) del perímetro del terreno, concebidos como muros urbanos que definen, contienen al conjunto y a la vez bloquean las vistas de los alrededores".

La Torre Arcos Bosques II es un rascacielos y edificio inteligente conformado por dos torres separadas entre sí 29 m con una sección de planta cuadrada de 29 m de lado. El complejo incluye un hotel de cinco estrellas, oficinas, un centro comercial y cada planta de piso cuenta con una superficie promedio de 1,600 a 1,655 m², libre de columnas y con una altura libre de cada piso de 3,82 m. Actualmente es una de las torres más altas de la zona Bosques de las Lomas.

El esquema de funcionamiento es estrictamente práctico: sólo dos columnas al centro, mientras que, los núcleos de servicios y circulación vertical se encuentra en la parte posterior forrada de cristal translúcido. Un par de escaleras eléctricas y doce elevadores comunican a los cinco niveles de estacionamiento, al cual se accede por el estacionamiento bajo el Paseo de los Tamarindos.

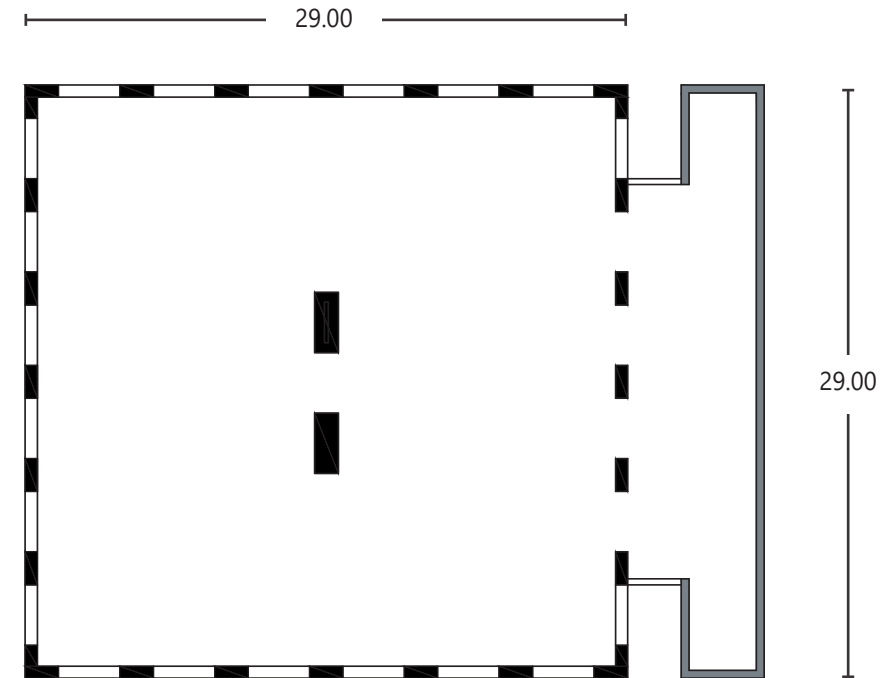
Cada piso fue colado in situ con concreto premezclado para permitir la realización de una especie de muro portante (fachadas), permitiendo que con los dos cuerpos aislados se obtuviera una estructura de bajo costo y se percibiera como un muro perforado con traveses de 1.525 cm de peralte y columnas con la misma sección separadas a 3.05 mm formando un sistema de muros de rigidez con ventanas cuadradas que se repiten en todos los frentes.

El objetivo era mantener el carácter de la fachada, para que ésta a su vez funcione como una especie de tubo estructural perfectamente diseñado para soportar las consideraciones más exigentes de criterios sísmicos y viento.

El puente que vincula ambos cuerpos en los niveles 17,18 y 19 llevó más tiempo en resolver a nivel estructural que la misma torre, se resolvió adecuadamente a base de tres armaduras ancladas a los tres pisos y sus respectivos elementos estructurales, vinculando estos elementos por medio de una trabe de alma abierta con un peralte total de 13.72 m, apoyada en las secciones centrales y volada en los extremos logrando un claro de más de 30 m en cantiléver.

El sitio donde se desplanta el desarrollo, forma parte de un conjunto de terrenos que originalmente fueron minas de explotación a cielo abierto, las cuales posteriormente fueron utilizados como tiradero de basura de la ciudad, sin embargo, gracias a las excavaciones y nivelaciones del terreno, se encontró un suelo de baja compresibilidad y una alta capacidad de carga de 130 ton/m². Por ello la cimentación que integran la torre se resolvió a base de zapatas corridas de concreto para las columnas perimetrales y los muros de concreto de los elevadores, y zapatas aisladas para las columnas interiores. Todas ellas, apoyadas a 4.0 m de profundidad con respecto al nivel del último sótano y se encuentran unidas por contratraveses de liga.

En este proyecto, los sótanos que funcionan como estacionamiento, abarcan gran parte del conjunto, por lo que el área de contacto entre la estructura y el terreno es muy amplia. Esto tiene dos ventajas, aprovecha la excavación y mantiene las edificaciones seguras del riesgo de volteo ante acciones sísmicas



PLANTA TIPO

Caso 4 ZONA I Edificación tipo 4

Niveles: 30

Altura: 160 m

Resistencia del terreno: 130 T/m²

Historia de cargas: Nula (Suelo normalmente consolidado)

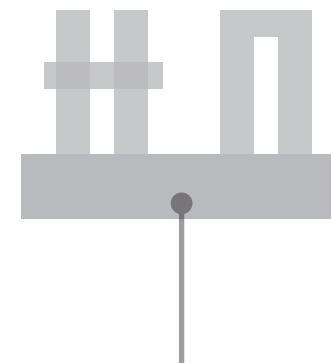
Cimentación: Compensada Mixta (Zapatas aisladas y corridas)



Muros rígidos portantes



Puente que conecta ambas torres



El conjunto funciona como una zapa gigante en donde se desplantan los edificios simulando 4 grandes "columnas"

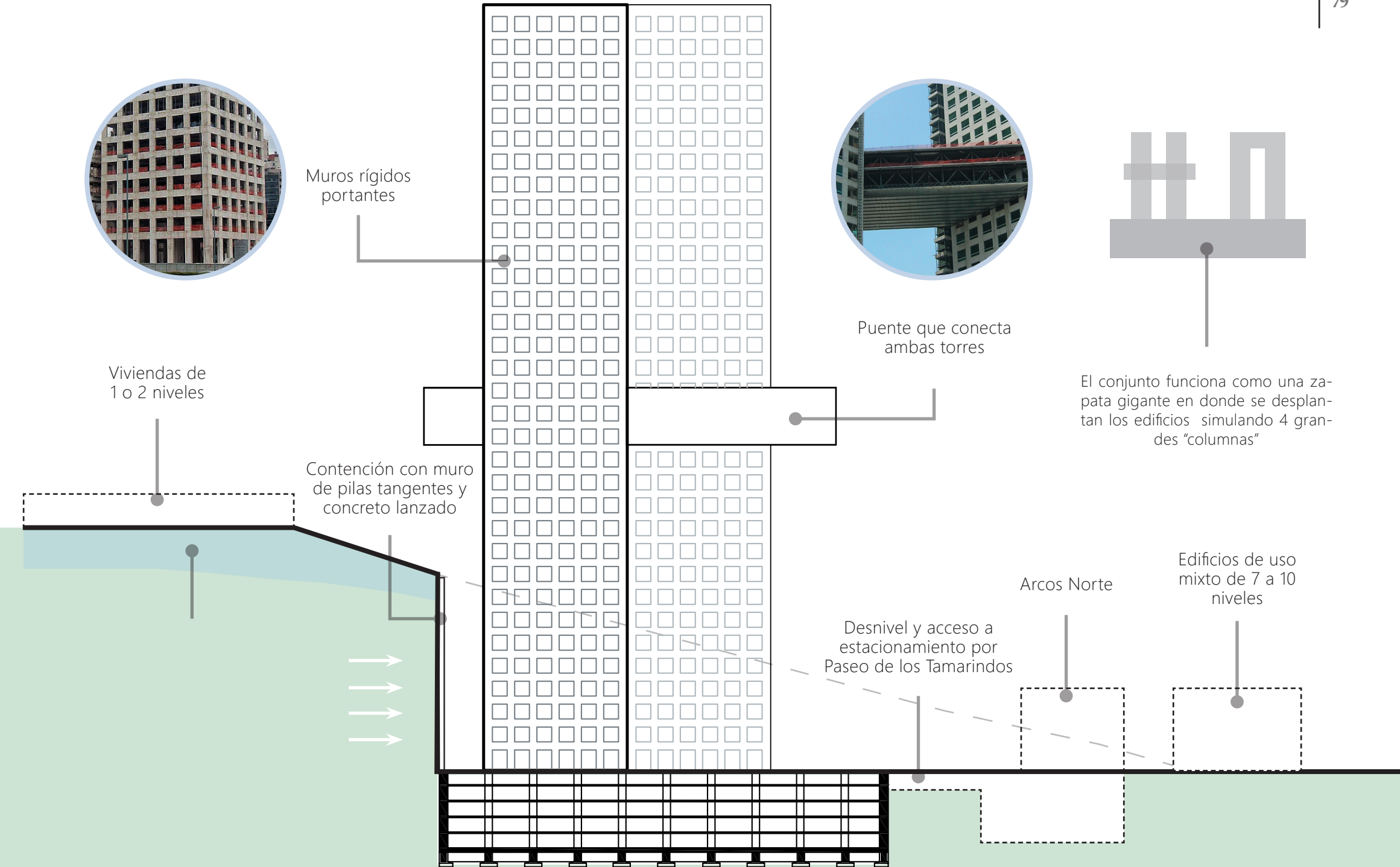
Viviendas de 1 o 2 niveles

Contención con muro de pilas tangentes y concreto lanzado

Arcos Norte

Edificios de uso mixto de 7 a 10 niveles

Desnivel y acceso a estacionamiento por Paseo de los Tamarindos



TORRE MITIKAH

Arquitectos:

Pelli Clarke Pelli Architects

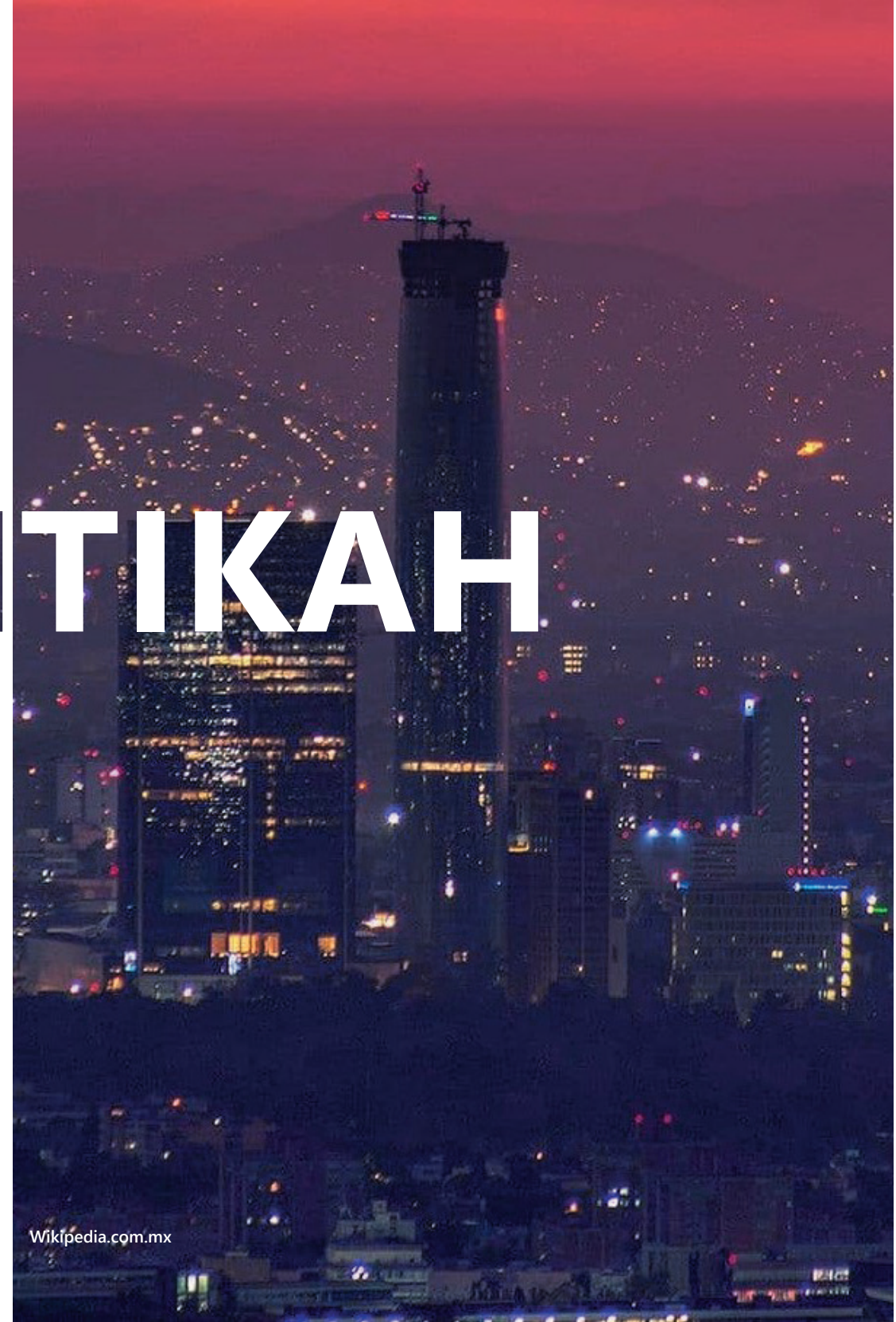
Nombre de la obra:

Desarrollo Integral Mitikha: Ciudad Viva

Ubicación:

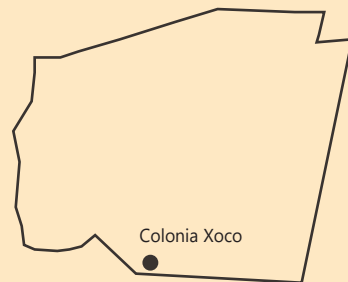
Río Churubusco 601, Colonia Xoco, Benito Juárez, CDMX

Fecha de construcción: En construcción

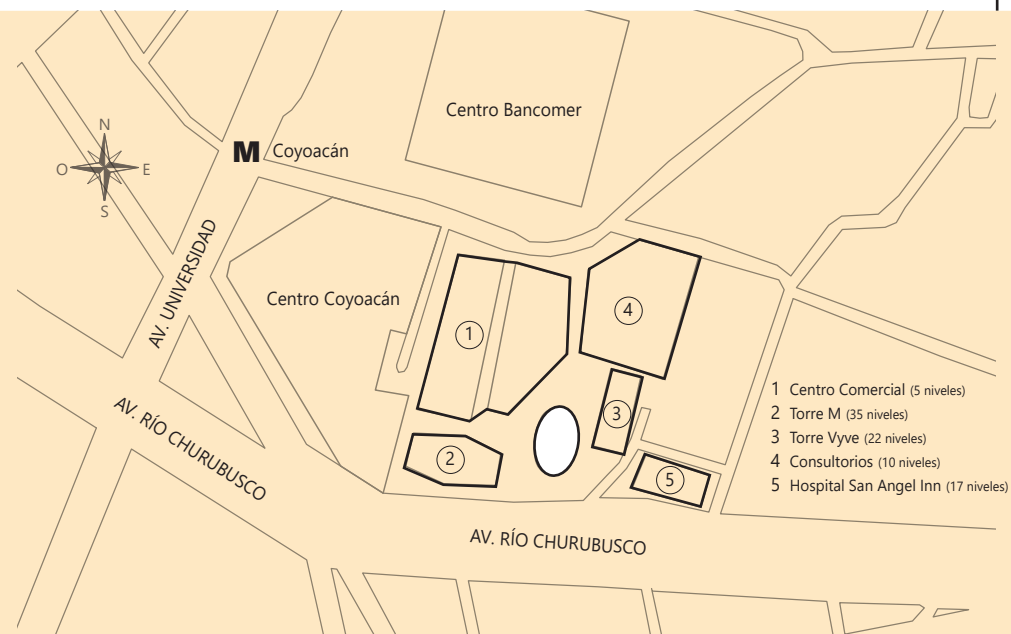




ZONA II

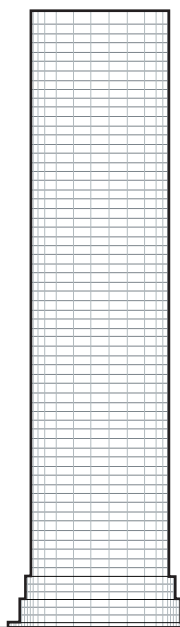


BENITO JUÁREZ



DESARROLLO INTEGRAL MITIKAH

60.00



276.00

MÍTIKAH es un desarrollo de usos mixtos que integra vivienda, comercio, servicios y áreas verdes en un solo espacio al sur de CDMX. Se ubica en un terreno irregular con una superficie aproximada de 130,000 m² que se secciona en dos fases para su construcción y se compone de 7 edificios. Busca ser un ícono para la ciudad que busca aprovechar y mejorar la infraestructura existente dentro de la zona.

MÍTIKAH Torre Residencial es un rascacielos de 276 m de altura, con 65 pisos que consta de una superficie de desplante de 4,799 m² y 3,269 m² para la construcción, en un terreno donde anteriormente estuvo el Auto cinema del Valle. Su construcción se inició en el año 2008, pero se suspendió debido a problemas de uso de suelo y cambios de propietarios, por lo que se previó concluir a mediados del 2021.

La propuesta arquitectónica conjuga matices elegantes y sofisticados con elementos funcionales, seguros y de alta calidad. Torre Mítikah fue diseñada por el arquitecto César Pelli, autor de numerosos rascacielos alrededor del mundo, entre los cuales se encuentran: The Canary Wharf Tower de Londres, NTT Headquarters en Tokyo, el World Financial Center en Nueva York y las mundialmente reconocidas Torres Petronas en Kuala Lumpur.

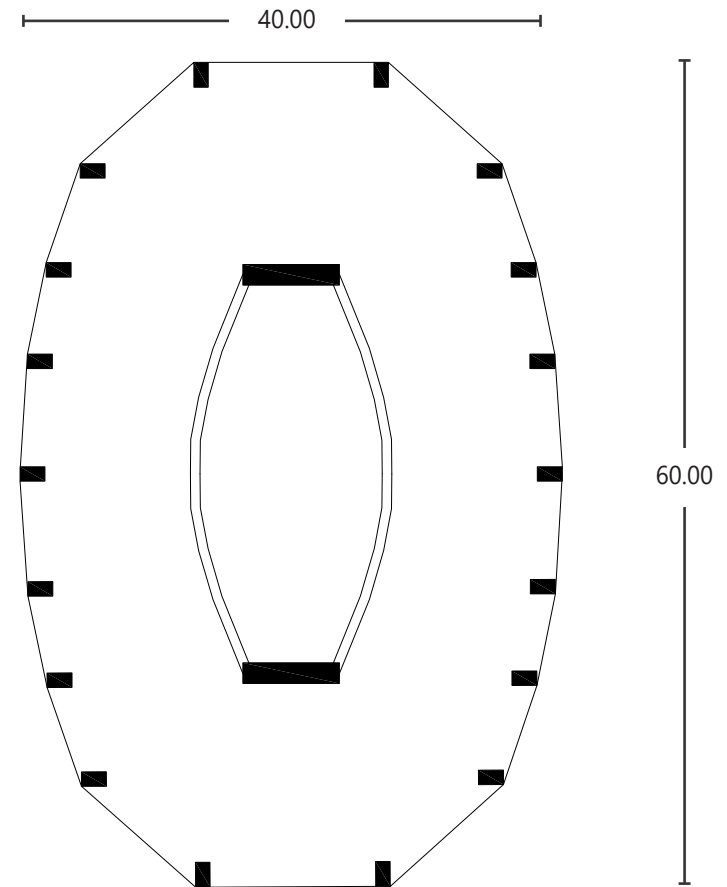
El proyecto se sitúa en la zona de transición alta, más próxima a las lomas con una transición gradual, por lo que presenta irregularidades estatigráficas producto de las cercanía a las antiguas barrancas y el río Churubusco que colinda al sur con el predio. Bajo estos materiales se encuentran estratos arcillosos desplantados en los depósitos propios de las lomas y la capa dura se encuentra a 20 m de profundidad

El desarrollo se dividió en dos fases para su construcción, la fase I está constituida por un conjunto de 6 sótanos para estacionamiento y un semisótano comercial; para la fase II se realizó del mismo modo por etapas, la primera se realizó con el método de Top-Down para disminuir el tiempo de construcción y permitir aprovechar la excavación a cielo abierto de la zona colindante, para poder realizar excavaciones laterales y no solo la excavación de forma ascendente que comúnmente se realiza con este método.

La cimentación está constituida por un cajón compensado y pilas de cimentación, por lo que durante su construcción se consideran muros milán con anclas de tensión para la estabilidad de la excavación: losas pre-tensadas en la zona de top-down y una losa de fondo de concreto reforzado desplantada a 23 m medidos desde el nivel de la calle.

El cortante en la base es resistido por las seis losas del estacionamiento, el cual proporciona empotramiento a la estructura, el cajón fue construido a base de muros pila que tiene gran capacidad al cortante por la fricción del terreno. Finalmente las pilas ayudan a soportar las fuerzas laterales y de volteo.

El sistema estructural consiste en muros de cortante acoplados a columnas perimetrales de acero cubiertas con concreto; y armaduras de acero que son considerados como elementos estabilizadores por sus propiedades elásticas. En algunos niveles intermedios cuenta con estabilizadores en forma de cinturones con armaduras de acero.



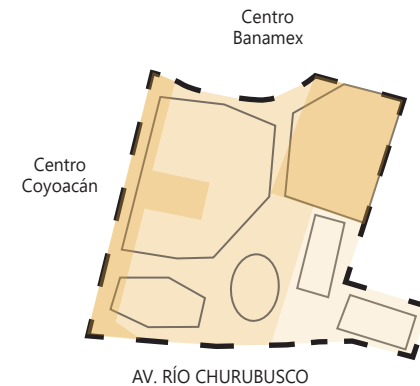
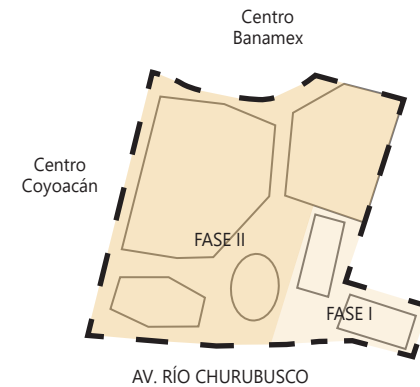
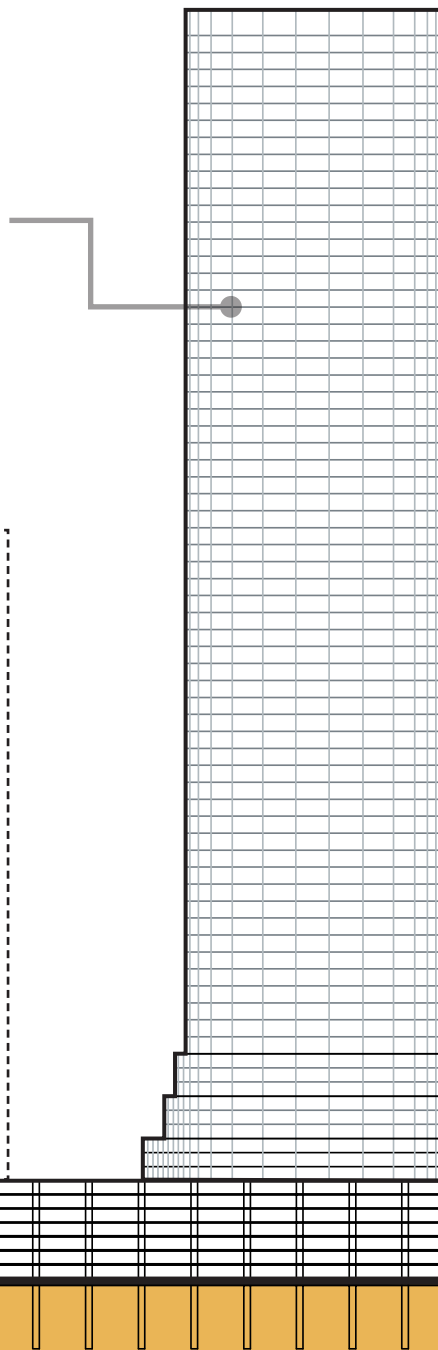
Caso 8 ZONA II Edificación tipo 4

Niveles: 65

Altura: 276 m

Historia de cargas: Suelo normalmente consolidado (Uso de estacionamiento)

Cimentación: Compensada Mixta (Cajón de cimentación y pilas)



Av. Río Churubusco

Centro Coyoacán

Torre M

23.20

Relleno de arena arcillosas con gravas
Arcilla arenosa a poco arenosa
Arena arcillosa con gravas de consistencia muy dura
Capa Dura

TORRE BBVA BANCOMER

Arquitectos:

LEGORRETA, Rogers Stirk

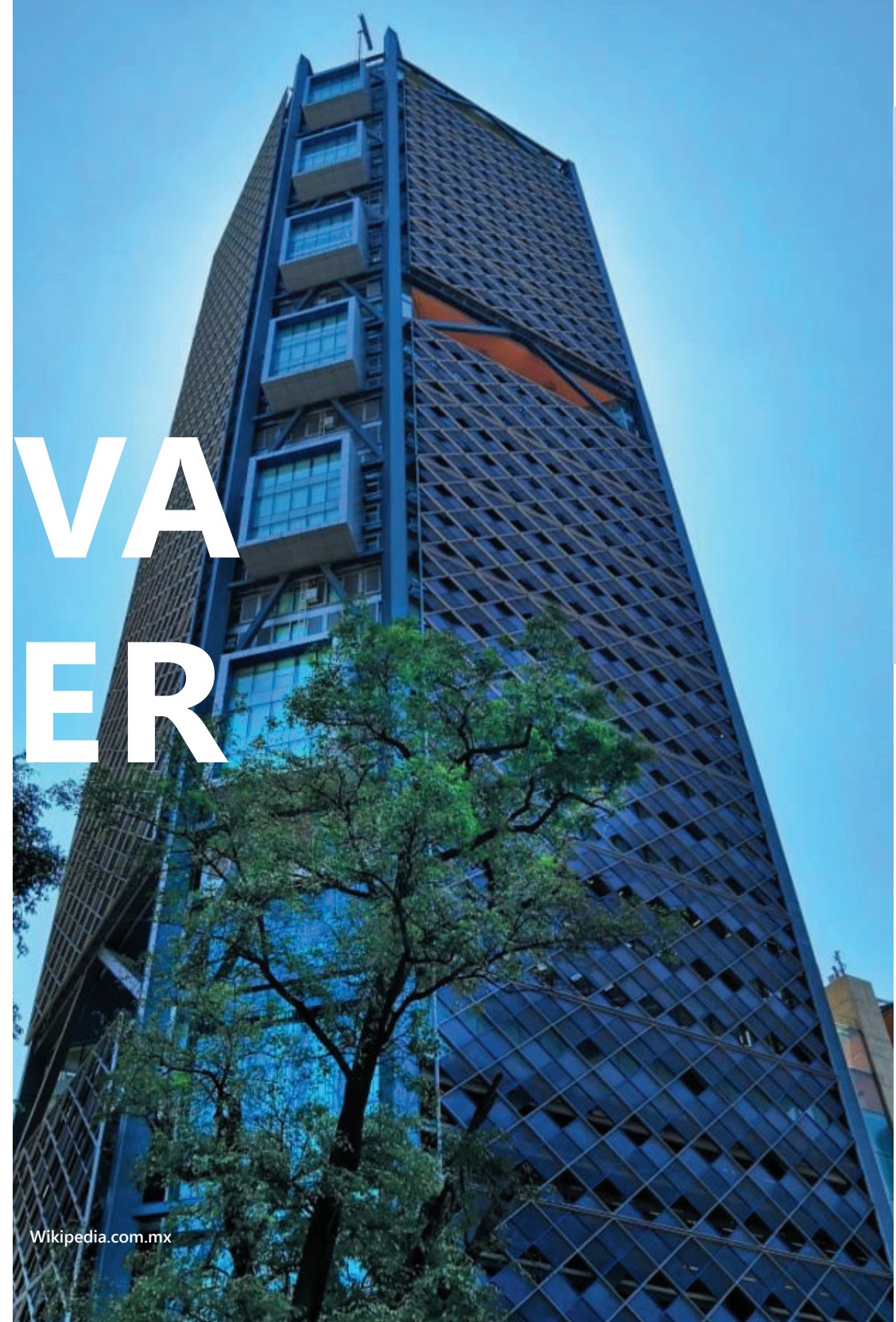
Nombre de la obra:

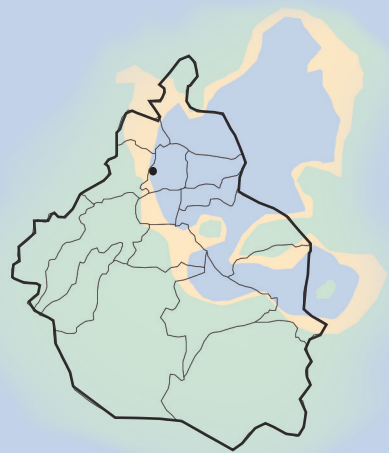
Torre BBVA Bancomer

Ubicación:

A. Paseo de la Reforma 510, Juárez, CDMX

Fecha de construcción: 2016

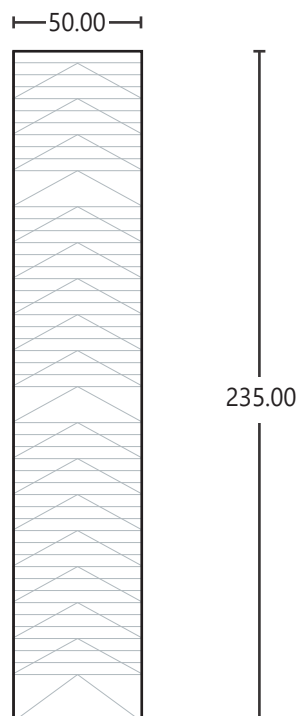
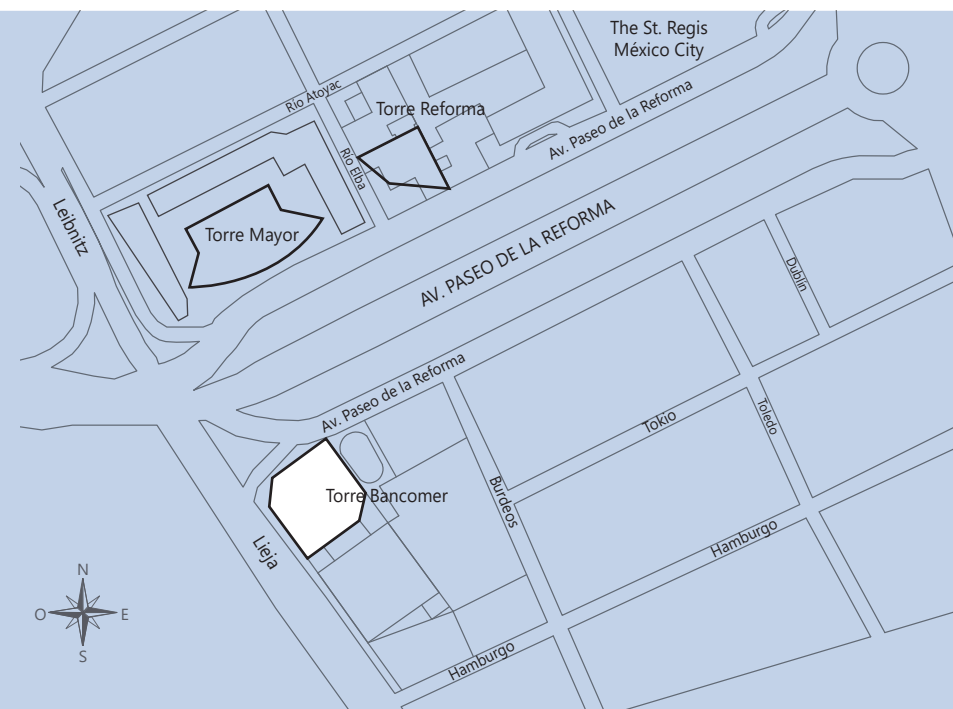




ZONA III



CUAUHTÉMOC



La Torre BBVA Bancomer se diseñó con base en ciertos principios y cualidades que responden a su contexto urbano y a su relación con el medio natural que lo rodea, así como con el usuario y su necesidad de espacios estéticos, flexibles y que no descuiden el aspecto funcional.

El complejo cuenta con un auditorio para 250 personas, comedor de atención simultánea para 1,000 comensales, 7 pisos de estacionamiento en sótano y 9 pisos superiores para 2,792 autos, 234 lugares para bicicletas, un helipuerto y varios jardines interiores que funcionan como aislantes térmicos en su fachada que aprovecha al máximo la luz natural.

La torre se localiza frente a la Torre Mayor, en el predio que ocupó desde 1971 el edificio Reforma 506 más conocido como la Torre Mario Moreno I que medía 95 metros, también el predio del Edificio Jena, que medía 68 metros, además de otro edificio ubicado en Reforma 508 de una altura aproximada de 45 metros con 10 pisos.

Su altura es de 235 metros hasta el helipuerto, cuenta con 60 pisos de 4.30 metros de altura cada uno en los pisos de oficinas y 3.70 m en los niveles de estacionamiento. Con 188.000 metros cuadrados de superficie construida y 78.800 para oficinas.

Se encuentra situada sobre una zona lacustre, ahora llena de sedimentos consolidados, de manera que para encontrar la primera capa del terreno resistente hay que excavar a gran profundidad, lo cual se dificulta debido al nivel de aguas freáticas, encontrado aproximadamente a 2 m de profundidad.

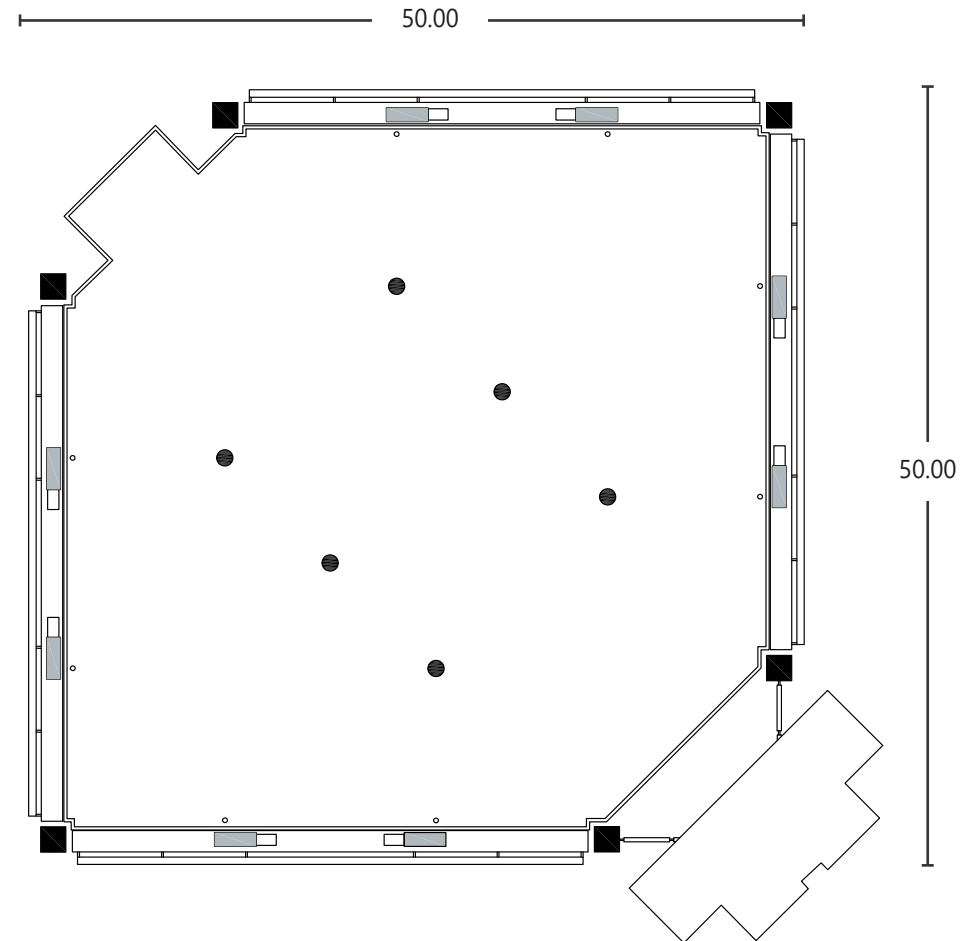
La cimentación se solucionó con un cajón, el cual contribuye a resistir los empujes del suelo y las aguas subterráneas, complementado con 156 pilas coladas "in situ" de 1.40 m de espesor, desplantadas a 52 m de profundidad en los depósitos profundos. El cajón de cimentación es contenido con muros milán de 1.5 metros de espesor y una losa de concreto armado de 2.50 m de espesor.

La disposición del edificio gira en torno a un núcleo central ligero con un sistema estructural sujeto a un mega marco metálico para ofrecer flexibilidad en el espacio de oficina. La estructura y el núcleo de servicios compuesto por seis mega-columnas longitudinales, corren diagonalmente en la planta.

Las seis mega-columnas que se pueden apreciar desde el exterior del edificio, están rellenas de concreto armado y reparten todo el peso de la torre permitiendo proyectar espacios internos abiertos (una de las características del edificio).

En la estructura externa, los macro-marcos con forma de "V" que forman una estructura de enjambre alrededor de la torre, tienen una altura de 3 pisos cada uno y proporcionan total resistencia lateral y ductilidad sismo resistente. La elasticidad de los marcos protege el resto de la estructura de los daños propios de un sismo, libera la acumulación de gravedad, las cargas de las columnas y evita la rigidez. En caso de que por algún motivo externo, una de las mega-columnas sufriera una falla, los mega-marcos conservarían el edificio en pie.

Además en su relación con el entorno, es destacable que los grandes espacios entre la torre BBVA Bancomer y las estructuras que la rodean, previenen que se golpee con otros edificios, ya que la torre puede oscilar hasta 1.5 metros en su parte superior durante un evento sísmico. Siendo que en caso de un sismo de gran magnitud, los enlaces de los mega marcos pueden deformarse para liberar energía y ofrecer menor resistencia al movimiento, dichos elementos pueden sustituirse rápidamente.



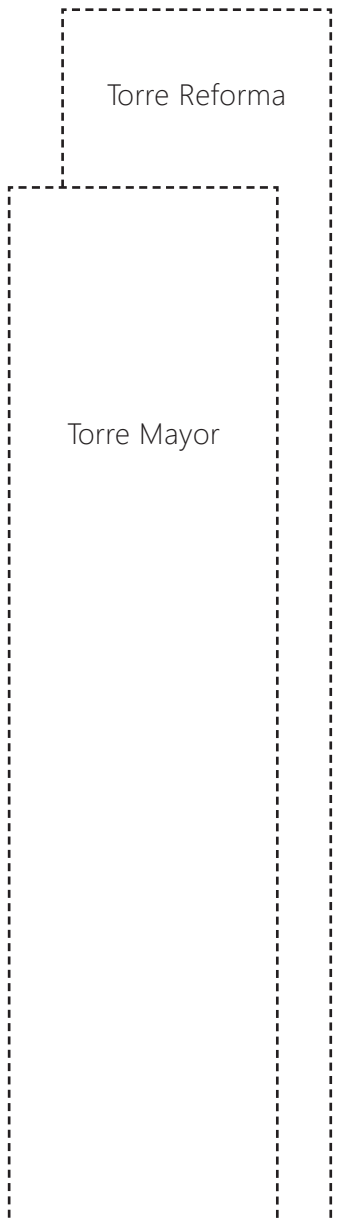
Caso 12 ZONA III Edificación tipo 4

Niveles: 60

Altura: 235 m

Historia de cargas: Suelo consolidado (Construcciones de 68 y 95 m)

Cimentación: Compensada Mixta (Cajón de cimentación y pilas)



Terrazas verdes de 3 niveles

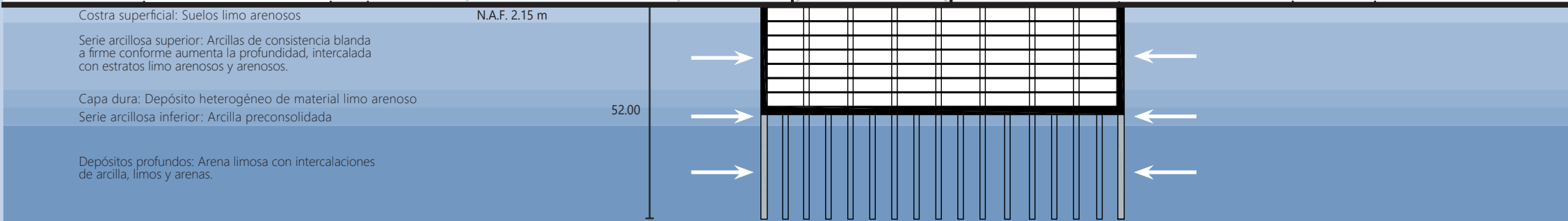


Mega marcos metálicos



Trama de celosías que protegen la fachada del calor del sol

Comedor y estacionamiento



Costra superficial: Suelos limo arenosos

N.A.F. 2.15 m

Serie arcillosa superior: Arcillas de consistencia blanda a firme conforme aumenta la profundidad, intercalada con estratos limo arenosos y arenosos.

Capa dura: Depósito heterogéneo de material limo arenoso
Serie arcillosa inferior: Arcilla preconsolidada

52.00

Depósitos profundos: Arena limosa con intercalaciones de arcilla, limos y arenas.

TORRE REFORMA

Arquitectos:

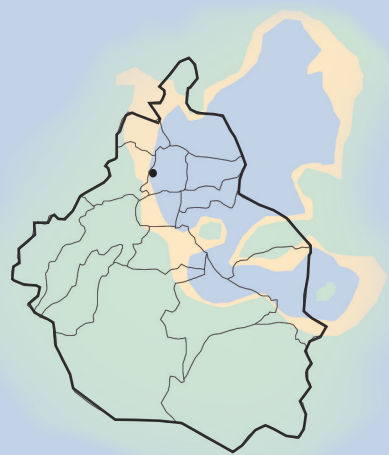
Benjamín Romano

Ubicación:

Reforma No. 483 Colonia Cuauhtémoc, CDMX

Fecha de construcción: 2016

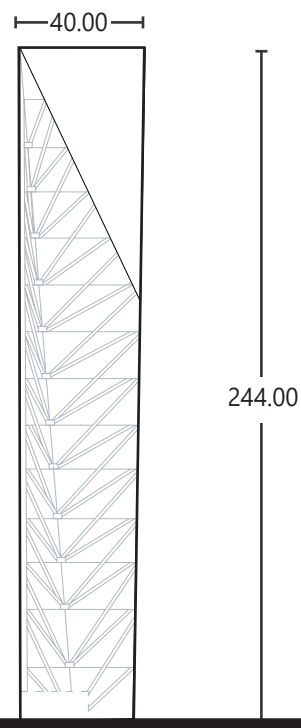
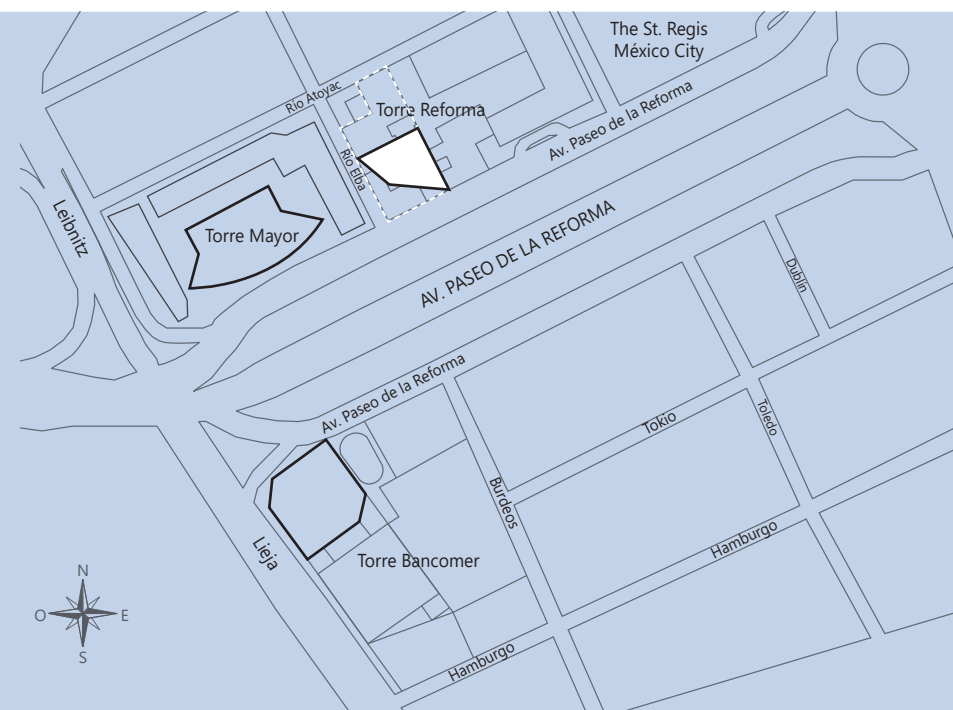




ZONA III



CUAUHTÉMOC



La Torre Reforma es un rascacielos que se ubica en un predio con un área total de 2780 m², cuenta con 57 niveles con un total de 244 metros de altura y 9 niveles de más de sótano, actualmente el más alto de la Ciudad de México, hasta que se concluya la Torre Mítikah ubicada al sur de la Ciudad de México. El edificio crece en sus pisos superiores, para evitar ocupar la totalidad del predio disponible, es decir, su planta es más estrecha que su cúspide.

Caracterizada por su imponente altura, estructura principal de muros de concreto, la resistencia a altos grados de actividad sísmica y ahorro de recursos, Torre Reforma se posiciona como el corporativo número uno en México y el mundo. El diseño de la torre guarda una debida proporción con su entorno e incluye en su construcción acero, concreto y vidrio, por su extraordinario trazo, cuenta con una excelente vista hacia el Bosque de Chapultepec.

El proyecto está erigido sobre una casona del siglo XX protegida por el Instituto Nacional de Bellas Artes (INBA), y que por medio de una 'charola' fue desplazada 18 m para construir la cimentación y después regresada a su lugar. El movimiento de la casona, catalogada como patrimonio cultural urbano de valor artístico y patrimonial, actualmente es considerado como una de las innovaciones tecnológicas más importantes en materia de ingeniería y conservación que han acontecido en México.

Es importante considerar que la cimentación no incluye pilotes como es común en los edificios de este tipo en la zona de Lago debido al tamaño del terreno.

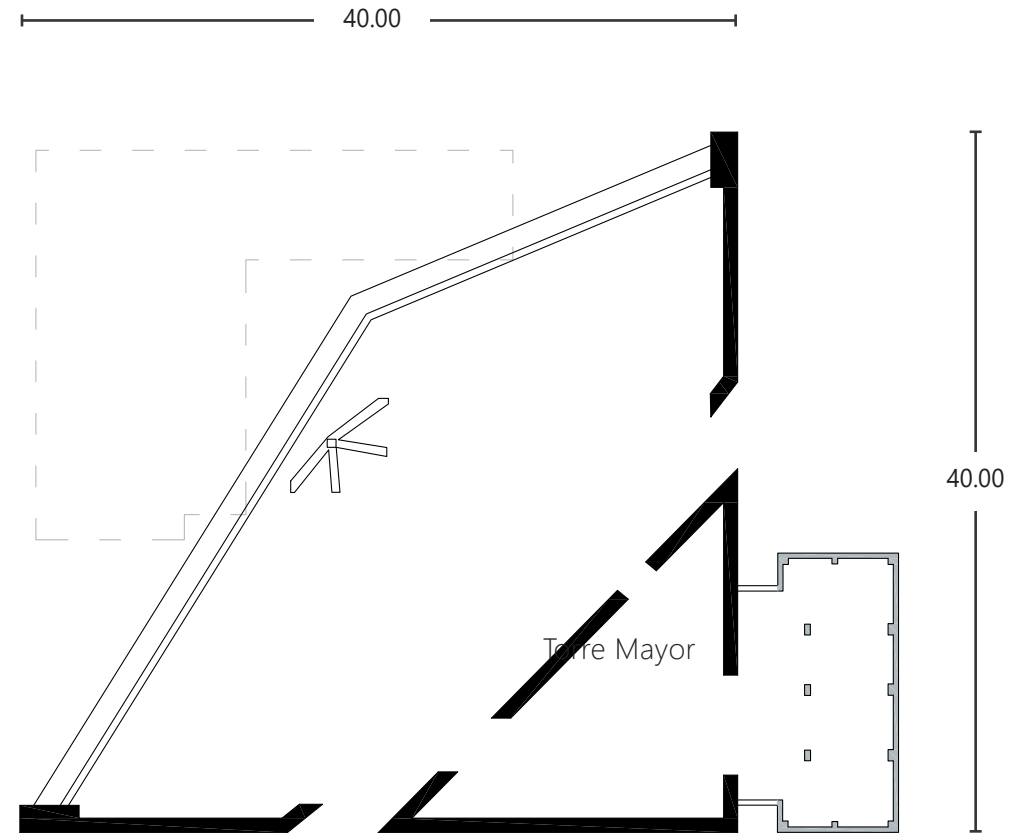
El sistema de cajón de cimentación del conjunto consiste en una serie de muros Milán perimetrales y perpendiculares interiores de diferentes espesores que se encuentran empotrados a diferentes profundidades, que varían entre 40-60m, y una losa de cimentación de 2.50 m de espesor que se encuentra a más de 30 metros de profundidad. A diferencia de los muros pantalla tradicionales, varios de los muros de este proyecto soportan, además de los empujes durante la excavación, el peso de la torre y los efectos del sismo en la misma.

Las losas que conforman los sótanos no tienen continuidad horizontal en toda el área, ya que forman desniveles con diferencia de alturas entre ellas de 1.50 y están conectadas a través de rampas de circulación. Cada losa funciona como diafragmas rígidos horizontales capaces de tomar los empujes laterales del suelo transmitidos por el muro Milán.

Para el un mayor rendimiento en el proceso constructivo Top-Down, se definieron dos zonas para realizar la excavación de forma sincronizada. La Zona 1 corresponde a la zona del edificio de aparcamiento anexo, mientras que la zona 2 corresponde a la zona propia de la Torre.

El edificio se distingue por la fuerza y solidez de dos muros de concreto de 120 cm de espesor que asemejan la forma de un libro abierto, que se encuentran empotrados a 60 metros de profundidad en el subsuelo y crecen para formar parte de la imponente estructura, por lo que son considerados de los más altos del mundo. Dichos muros fueron diseñados estratégicamente para evitar la colocación de columnas intermedias en sus espacios interiores y cuentan con unas perforaciones que reducen la rigidez de la estructura de concreto y libera la energía sísmica. Estas grietas también forman parte de la estética del inmueble y proporcionan luz natural a los jardines interiores.

Los muros de concreto se encuentran entretejidos con tensores metálicos que evitan que los muros se junten y soportan las losas de los entrepisos. En la parte posterior, donde se forma el ángulo de 90° entre los dos muros se encuentra el cubo de instalaciones, flujos y servicios.



Caso 12 ZONA III Edificación tipo 4

Niveles: 57

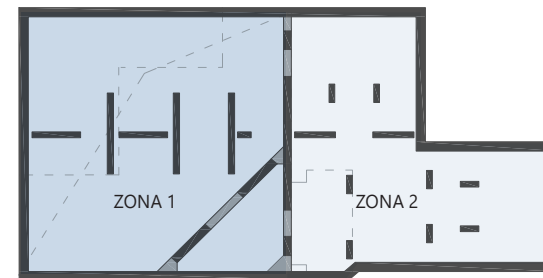
Altura: 244 m

Cimentación: Compensada Mixta (Cajón de cimentación y muros pila)

Muros de concreto expuesto con perforaciones en módulos que se repiten cada 4 niveles



Casona de construida en 1929 con fachada de cantera rosada. Para moverla, se instalaron rieles y gatos hidráulicos computarizados



DEFINICIÓN DE ZONAS PARA PROCESO TOP-DOWN

Tensores que evitan que los ursos se junten o se separen y al mismo tiempo, soportan las losas de entrepisos.



Torre Mayor

Río Elba

Casa Catalogada

Río de la Plata

N.A.F. 6.00 m

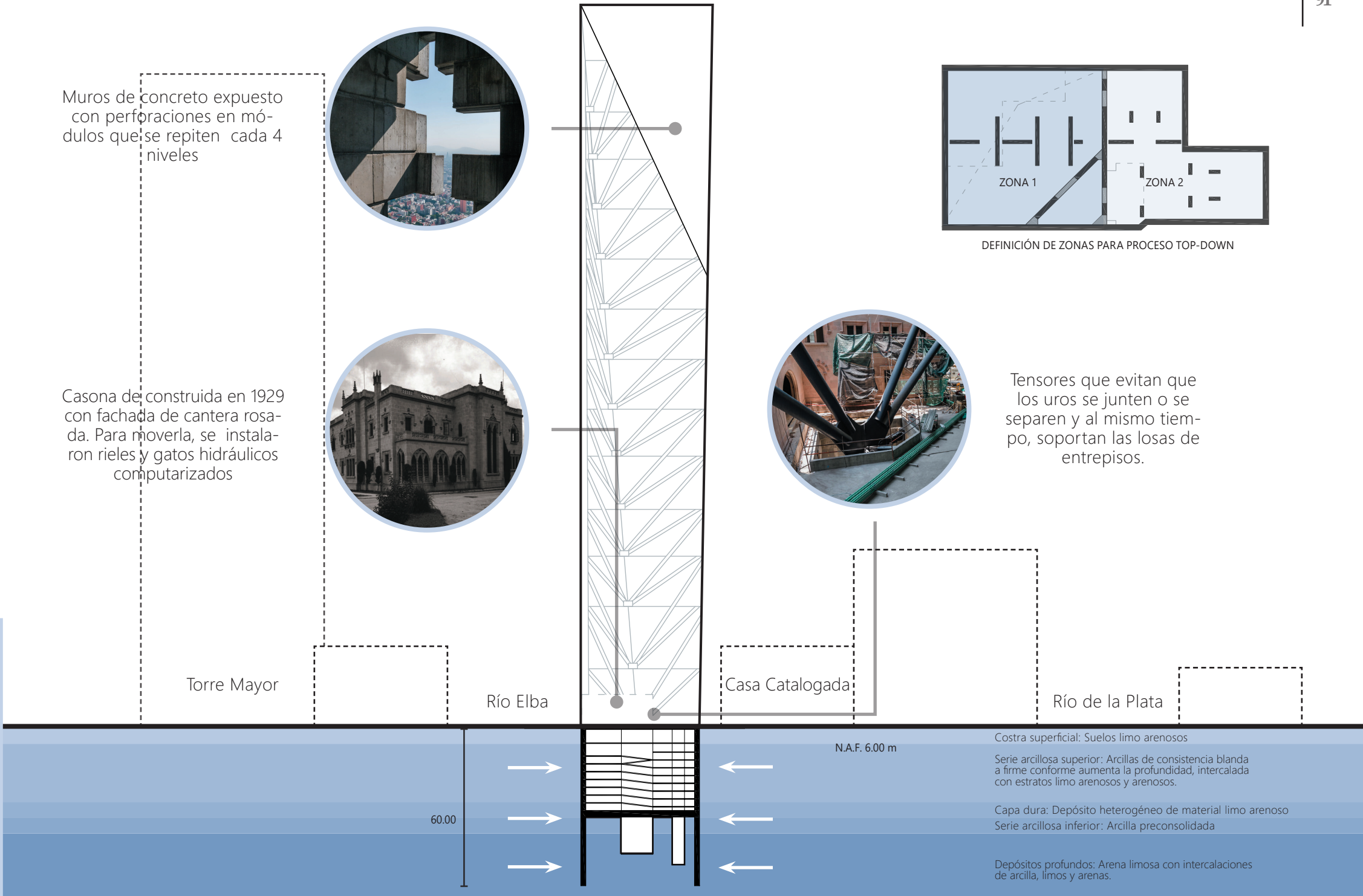
60.00

Costra superficial: Suelos limo arenosos

Serie arcillosa superior: Arcillas de consistencia blanda a firme conforme aumenta la profundidad, intercalada con estratos limo arenosos y arenosos.

Capa dura: Depósito heterogéneo de material limo arenoso
Serie arcillosa inferior: Arcilla preconsolidada

Depósitos profundos: Arena limosa con intercalaciones de arcilla, limos y arenas.



CONCLUSIONES

La lista de riegos geotécnicos existentes en el Valle de México es extensa. En la zona lacustre, la alta compresibilidad de las arcillas y su agrietamiento; en la zona de transición, la heterogeneidad del suelo y su fracturamiento en áreas de contacto abrupto; y en la zona de lomas, la existencia de rellenos sueltos, sanitarios y galerías de minas antiguas, así como laderas o cortes artificiales inestables. Cada una de las tres zonas geotécnicas dentro del área de estudio presenta dificultades particulares.

Por las razones ya mencionadas, teniendo una visión y conocimiento más profundo de la problemática en estudio, podemos afirmar lo siguiente:

- Es necesario darle la importancia a la investigación previa del contexto geológico de un proyecto, de la misma manera en la que se nos enseña a realizar análisis de usuarios, proyectos análogos, estudios antropométricos, etc.; ya que forma parte de nuestro contexto físico que afectará nuestro proyecto durante todo su proceso.
- Cualquier proyecto arquitectónico debe considerar un estudio de la geología local existente, hoy en día no representa gran dificultad su obtención gracias a las cartas geológicas elaboradas por el Servicio Geológico Mexicano, así como los prontuarios de información geográfica municipal publicados por el INEGI, en el caso del Valle de México.
- El diseño también requiere el conocimiento de la interacción y comportamiento entre suelo, cimentación y estructura que han de ser analizados como un conjunto, ya que deben ser compatibles durante toda la vida útil de una edificación. Esta previsualización nos evita caer en las limitaciones del propio subsuelo, que se reflejan en problemáticas constructivas, de costos, comportamiento y funcionalidad.

Se logró desarrollar el objetivo propuesto de la creación de una herramienta de apoyo para la comprensión y fundamentación de ejercicios académicos dentro del complicado suelo del Valle de México.

Para lograrlo fue necesario de una recopilación de varios temas de manera introductoria y su manifiesto en 12 casos, sin embargo, sigue siendo una caracterización bastante imprecisa para su uso en proyectos reales.

En los primeros casos de cada zona se hicieron notar que las limitaciones económicas constituyen frecuentemente un obstáculo importante a la apli-

cación de buenas soluciones, debido a la necesidad de abatir el costo de las construcciones de interés social.

El análisis en proyectos actuales fué posible gracias al conocimiento obtenido previamente y al contar con información más particular. Se logró comprender de mejor manera la aplicación de conceptos básicos sobre el comportamiento de estructuras y las diversas soluciones a proyectos muy similares. Son evidencia de que la buena conjunción entre ingeniería, arquitectura, tecnología y diseño hacen proyectos más interesantes y bien fundamentados.

Por último, los daños por mal comportamiento y fallas de cimentaciones se deben al descuido, la ignorancia, falta de control y comunicación entre las diferentes áreas. La responsabilidad recae en todos los involucrados en el proceso, desde la concepción arquitectónica, el diseño estructural, la construcción y el uso dado a la estructura.

Es nuestro trabajo como futuros arquitectos, trabajar y comprometernos en ampliar nuestras áreas de conocimiento durante todo nuestro ejercicio profesional, para dar soluciones más certeras, creativas y con mayor seguridad para nuestra sociedad.

GLOSARIO

acueducto. Sistema o conjunto de sistemas que permiten transportar agua en forma de flujo continuo desde un lugar en el que está accesible en la naturaleza hasta un punto de consumo distante, generalmente una ciudad o poblado.

amortiguamiento. Pérdida de energía que se produce en un sistema mecánico en movimiento o vibración como consecuencia de efectos disipativos debidos al movimiento relativo entre sus componentes o a la deformación de estos.

bufamiento. Capacidad de los suelos a aumentar su volumen por cambios en el contenido de agua.

cementación. Proceso por el cual se precipita material disuelto en los poros de los sedimentos uniéndolos entre sí.

cohesión. Cualidad por la cual las partículas del terreno se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, que dependen, entre otras cosas, del número de puntos de contacto que cada partícula tiene con sus vecinas.

compresión. Disminución del volumen de los poros en el suelo.

consolidación: Proceso que se produce en suelos y consiste en la reducción del volumen total del suelo por la colocación de una carga o el drenaje del terreno en un periodo de tiempo determinado.

corte estratigráfico. Representación gráfica de una sección del terreno donde se representan los diferentes tipos de rocas, su constitución y estructura interna y las relaciones geométricas entre ellas.

cuenca. Depresión en la superficie terrestre de forma y origen diversos.

cuenca endorreica. Cuenca que no tiene ninguna salida y por lo general da origen a un lago, si la impermeabilidad del suelo se lo permite.

emersión. Acción de levantarse, de surgir desde la superficie terrestre o del nivel del mar.

erosión. Acción de destruir o denudar a una roca o cuerpo estructural, por procesos fisicoquímicos y biológicos.

estratigrafía. Área de la geología que trata de la formación, composición, secuencias y correlación de las rocas de la corteza terrestre.

falla. Rasgo estructural manifestado por una fractura en un bloque, a lo largo de la cual se han desplazado los lados.

fricción. Fuerza que existe entre dos superficies ásperas en contacto, que se opone al deslizamiento. Se genera debido a las imperfecciones, que en mayor parte son microscópicas, entre las superficies en contacto.

nivel freático. Viene marcado por la profundidad que alcanza la capa superior del agua acumulada en el subsuelo

oquedad. Espacio hueco en el interior de un cuerpo sólido.

oscilación. Espacio recorrido por un cuerpo en movimiento, entre sus dos posiciones extremas.

plasticidad. Propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse

propiedades índice de los suelos. Conjunto de características de un suelo que permiten diferenciarlo de otros de su misma clase.

propiedades mecánicas de los suelos. Determinan su comportamiento bajo la acción de fuerzas externas continuas o discontinuas, estáticas, dinámicas o cíclicas que se ejercen sobre ellos.

sedimentos. Material sólido acumulado sobre la superficie terrestre derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera.

suelo. Parte más superficial de la corteza terrestre, constituida en su mayoría por residuos de roca provenientes de procesos erosivos y otras alteraciones físicas y químicas, así como de materia orgánica fruto de la actividad biológica que se desarrolla en la superficie.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS Y TESIS

Auvinet, G., Méndez E., Juárez, M., & Rodríguez J. **"Riesgos geotécnicos para la construcción de vivienda en el Valle de México"**. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C.

CENAPRED. (1999). **"Curso sobre diseño y construcción sismorresistente de Estructuras"**. Primera edición, México.

Domínguez R., (2016). **"Diseño geotécnico de la cimentación para un edificio de diez niveles desplantado en zona de transición."** Tesis de Ingeniería, IPN Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, México, D.F.

Gobierno del Distrito Federal, 2004, **"Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones en el Distrito Federal"** Gaceta Oficial, 6 de octubre, México, D. F.

Gobierno del Distrito Federal, 2004, **"Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo"**, Gaceta Oficial, 6 de octubre, México, D. F.

Gobierno del Distrito Federal, 2004, **"Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal"**, Gaceta Oficial del Distrito Federal, 29 de enero, México, D.F.

Jiménez, O., 2007, **"Caracterización geoestadística del subsuelo de la zona poniente del valle de México"**, Tesis de Maestría en Ciencias, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional.

Marsal, R.J. y Mazari, M., 1969, **"El subsuelo de la ciudad de México"**. Tomo I,II y III. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Martínez D., (2012). **"Evolución De Las Cimentaciones En La Zona De Lago De La Ciudad De México."**, Tesina para grado de Especialista en Geotecnia, Programa Único De Especializaciones De Ingeniería, Facultad De Ingeniería, UNAM.

Martínez S., (2012). **"Método de análisis simplificado para un nuevo tipo de cimentación en suelos blandos."** Tesis de Ingeniería Civil-Geotecnia, UNAM Instituto de Ingeniería, México, D.F.

Ramírez A., (2017). **"Procedimientos constructivos de la cimentación del proyecto Mítikah."** Tesina de la Facultad de Ingeniería, UNAM Programa Unico de Especializaciones de Ingeniería, México, D.F.

Santoyo Villa E. et al., 2005, **"Síntesis geotécnica de la cuenca del valle de México"**, Publicación 20 años TGC, México, D.F.

Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, 2013, **"Atlas de Riesgos Naturales de la Delegación Cuajimalpa de Morelos"** Entrega final, México, D. F.

SMMS, 1976, Memoria del Simposio **"Cimentaciones en zonas minadas de la ciudad de México"**, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México D.F.

SMMS, 1991, Memoria del Simposio **"Agrietamiento de suelos"**, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México D.F.

Suárez L., (2012). **"Diseño de la cimentación de Torre Reforma México, D.F."** Proyecto de fin de carrera. Departamento de Ingeniería de Materiales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.

Valencia D., 2007, **"Contribución a la zonificación geotécnica de la zona norte del valle de México"**, Tesis de Maestría en Ciencias, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional.

Zeevaert, L. (1980). **"Interacción Suelo-Estructura de Cimentación"** (Primera ed.). México, México: Limusa.

REVISTAS

Alberto P., Walter I. (2021). Síntesis de la XXII Conferencia Nabor Carrillo **"Compresibilidad de arcillas, incluyendo consolidación secundaria"**. Revista geotecnia. Órgano Oficial De La Sociedad Mexicana De Ingeniería Geotécnica, No. 259.

Domínguez, M., (2014) **"Períodos de vibración de las edificaciones"**. Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol. 8, núm. 2, Matanzas, Cuba.

González I., (2012). *"El soporte de un coloso"*. Construcción y tecnología en concreto. No.05

Gregorio B., (2009). *"La última pieza del conjunto"*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Harry G., (2015). Síntesis de la XXII Conferencia Nabor Carrillo *"Cimentaciones para edificios altos. Métodos de diseño y aplicaciones"*. Revista geotecnia.

Órgano Oficial De La Sociedad Mexicana De Ingeniería Geotécnica, No. 235.

Moreno G., (2016). *"Experiencias geotécnicas en el suelo del Lago de Texcoco"*. Revista geotecnia. Órgano Oficial De La Sociedad Mexicana De Ingeniería Geotécnica, No. 238.

PÁGINAS WEB Y MULTIMEDIA

Auvinet G., Méndez E., Juárez M. y Rodríguez J. *"Riesgos Geotécnicos Para La Construcción De Vivienda En El Valle De México"*. Recuperado de: <https://docplayer.es/20162293-Riesgos-geotecnicos-para-la-construccion-de-vivienda-en-el-valle-de-mexico-geotechnical-risks-affecting-housing-projects-in-mexico-valley-resumen.html>

Auvinet G., Méndez E., Juárez M., Hernández F. Y Martínez O. (2014) *"Avances sobre el agrietamiento del suelo asociado al hundimiento regional en el Valle de México"*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. Recuperado de: https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_SERVICIOS_TECNICOS/SANI/PAT/2017/

Auvinet, G. (2018). *"Avances En La Ingeniería De Cimentaciones 1957-2017"*. Recuperado de: <https://www.smig.org.mx/archivos/revista-trimestral-smig/revista-geotecnia-smig-numero-249.pdf>

Báez, C., & Bonilla, A. (2018). *"Ingeniería Mexicana en Acción"*. Recuperado de: <http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/materiales/24075-ingenieria-mexicana-en-accion>

Díaz J., *"Los Suelos Lacustres De La Ciudad De México"*. Recuperado de: <http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/Suelos-LacustresDeMexico.pdf>

Estructuristeando (2021). *Torre BBVA Bancomer (Marcos excéntricos)*. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=FaCEsDh4faE>

Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México. (2016). *"Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México Programa Estratégico / Institucional"* Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México. Recuperado de <http://aeropuerto.gacm.mx/2018/aeropuerto/doc/pdf/naicm-interiores-vf.pdf>

Iglesias, M., & Jesús de las Heras. (2018). *"¿Cómo se mantiene un edificio de 50 plantas durante un terremoto?"*. Recuperado de: <https://www.bbva.com/es/mantiene-pie-edificio-50-plantas-terremoto/>

Instituto de Ingeniería UNAM. *"Revisión y evaluación en geotecnia y estructuras para resolver la Problemática del transporte aéreo en el centro del país"* Avance de los estudios específicos. Recuperado de: <https://lopezobrador.org.mx/wp-content/uploads/2018/08/3-Geologia-general-de-la-zona.pdf>

mccopa. (2018). *"Cimentando sobre un lago mitológico"*. Recuperado de: <https://www.construccion-pa.com/reportajes/cimentando-lago-mitologico/> Mitikah página oficial. Recuperado de: <http://www.mitikah.com.mx/que-es-mitukah.html#contenido>

Moysen, G., & Garnica, M. (2018). *"El Nuevo Aeropuerto Internacional"*. Recuperado de: <https://interactivo.eluniversal.com.mx/2018/aeropuerto-nuevo-gigante/>

Rangel, J. L. *"Interacción suelo-estructura"* [Diapositivas]. Recuperado de http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/cu/cu_23/te_01/ar_05.pdf

