

# Evolución de los sistemas estructurales y constructivos para edificaciones de altura en la Ciudad de México

Fecha de recepción: 31 de julio de 2018.

Fecha de aceptación: 25 de septiembre de 2018.

En este ensayo se analiza la evolución de los sistemas constructivos para edificios altos a lo largo del siglo xx. Se muestra cómo el avance en la tecnología de los sistemas constructivos y los estudios realizados por investigadores mexicanos sobre mecánica de suelos y sismos han permitido la edificación de construcciones cada vez más altas en la Ciudad de México.

*Palabras clave:* edificios altos, sistemas constructivos, sistemas estructurales, materiales, siglo xx, Ciudad de México.

The essay analyzes the evolution of materials and structural systems for tall buildings throughout the twentieth century. It shows how advances in the technology of construction systems and studies carried out by Mexican researchers on soil mechanics and seismic design have permitted the creation of increasingly taller buildings in Mexico City.

*Keywords:* high rise buildings, construction systems, seismic design, structural system, materials, 20th century, Mexico City.

Los sistemas estructurales y constructivos están intrínsecamente relacionados con los materiales que los componen, y en la manera en que éstos se combinan o ensamblan, proporcionando así resistencia y durabilidad a los objetos arquitectónicos.

Como resultado de la evolución o surgimiento de nuevos materiales, los sistemas estructurales-constructivos se perfeccionan o generan nuevos sistemas que permiten llevar a una nueva frontera constructiva, dando lugar a edificaciones más sofisticadas y complejas en tanto a su forma y función. La revisión historiográfica de este avance tecnológico y de materiales resulta interesante al permitirnos observar cómo la evolución del uso de materiales y sistemas constructivos innovadores en la Ciudad de México ha permitido la creación de edificios con nuevas características, como una mayor altura, en una urbe que a lo largo de los siglos ha representado un reto constructivo para ingenieros y arquitectos.

Para mostrar tal evolución, se seleccionaron seis ejemplos, mediante los cuales se ejemplifica tanto la evolución de la tecnología de materiales y constructiva, así como las modificaciones en

\* Facultad de Arquitectura, UNAM.

\*\* Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM.

Se agradece al proyecto PAPIIT IN404318, DGPA, UNAM, por su apoyo para la generación del presente artículo.

el reglamento de construcción en relación con el rubro del cálculo estructural, elementos que en conjunto modifican la concepción de las obras arquitectónicas diseñadas y construidas para la Ciudad de México, al deber tomar en consideración factores como el subsuelo y los movimientos sísmicos que afectan a la capital del país. A su vez, esto modifica el concepto de “edificio alto”, ya que todas estas variaciones permiten construir edificios con un mayor número de niveles, convirtiéndose en un concepto mutable que se transformó a finales del siglo XIX y a lo largo del XX.

### Antecedentes

Entre los siglos XVI y XVIII, para la construcción de las primeras edificaciones en el centro de la Ciudad de México se empleaban materiales como tepetate, tezontle, ladrillo cocido, argamasa de cal y arena, los cuales sirvieron para conformar un sistema estructural a base de muros de carga. Los techos eran contruidos con ladrillo delgado cocido, sostenido mediante traveses o vigas de madera cubiertas con un tablado y un terrado, en tanto que para la cimentación se hincaban pilotes de madera —para mejorar las condiciones del terreno—, y sobre ésta se construía un pedraplén a base de cal, arena, roca basáltica y tezontle, con lo que se buscaba mejorar la resistencia del suelo. Sobre este pedraplén se desplantaban contratraveses de mampostería que recibían los muros de carga antes mencionados.<sup>1</sup> Este tipo de estructura permitió construir edificios de entre tres y cuatro niveles, como el ex convento de Betlemitas (1820) o el palacio de los condes del Valle de Orizaba (1737).

En 1888 se introdujo en la ciudad un nuevo sistema estructural y constructivo, formado por traveses y columnas de fierro o acero,<sup>2</sup> el cual permitió construir edificios más ligeros, lo que representaba me-

<sup>1</sup> Enrique León, *La ingeniería en México*, México, SEP, 1974, p. 30.

<sup>2</sup> Creando lo que ahora conocemos como sistema estructural a base de marcos metálicos.

nores cargas en la cimentación y admitía un mayor número de entrepisos. Otra de las ventajas de este sistema constructivo era el menor tiempo que requería la construcción. En el ámbito nacional, uno de los primeros edificios contruido con este sistema constructivo fue El Palacio de Hierro (1888-1891), de Ignacio y Eusebio de la Hidalga, en el cual no sólo se modificaron los sistemas constructivos convencionales de la superestructura, sino también la cimentación, al consolidar el terreno a través de la colocación de piedras y cedacería de ladrillo, colocando sobre esta capa elementos de fierro remachados para desplantar sobre los mismos las columnas metálicas,<sup>3</sup> logrando así un edificio de cinco pisos de altura. A principios de 1900 llegó al país otro material importante para las construcciones en la ciudad: el concreto reforzado, que permitió la creación de nuevas soluciones para el diseño y la construcción de edificios.

### Concreto reforzado y acero estructural en la Ciudad de México

#### *Concreto reforzado*

A finales del siglo XIX, México comenzó a importar de Inglaterra, Bélgica y Estados Unidos un novedoso material, el concreto, que en Francia había tomado carta de naturalización, y donde François Hennebique había desarrollado un sistema constructivo con el mismo, en el cual lo empleaba en conjunto con un esqueleto metálico en el interior de las secciones, sistema que sería el precursor del concreto reforzado.

El sistema Hennebique se introdujo en México en 1902, bajo la representación del contraalmirante Ortiz Monasterio, en sociedad con el ingeniero Miguel Rebolledo. La primera obra realizada con este nuevo sistema constructivo fue la cimentación del edifi-

<sup>3</sup> Las columnas y vigas de acero y fierro eran de origen belga.

cio de la Ministerio de Relaciones Exteriores (1907),<sup>4</sup> obra de Nicolás Mariscal.<sup>5</sup> Debido a la gran preocupación existente desde épocas prehispánicas de la respuesta del terreno en el centro de la ciudad, ante la imposición de cargas como resultado de la construcción de edificaciones,<sup>6</sup> a partir del siglo xx los ingenieros adoptaron el concreto reforzado como solución constructiva para el diseño de la cimentación de los nuevos edificios de la capital del país. Éstos comenzaron a ganar altura —mayores a cinco niveles— y requerían de una solución de cimentación distinta a las utilizadas hasta ese momento: pilotes de madera, retículas de viguetas de metal encofradas con concreto (emparrillados) o consolidación del terreno.<sup>7</sup>

Estos nuevos sistemas de cimentación hecho con concreto reforzado fueron pilotes mixtos o de concreto, losas y cajones de cimentación (cimentación flotada).

Aproximadamente en 1920 el material comenzó a utilizarse como parte del sistema constructivo de la superestructura para edificios bajos, lo cual cambiaría en 1930, al construirse en México una de las primeras edificaciones con marcos rígidos de concreto reforzado: el edificio Corcuera, obra de los hermanos Martínez Negrete, que contaba con 24 niveles

y 90 m de altura, considerado en la época como el más alto de la ciudad y en el cual se presume que se utilizaron los estándares de capacidad utilizados en Estados Unidos durante el periodo comprendido entre 1920 y 1940.

Tales estándares consistían en la utilización de concretos con un esfuerzo resistente a compresión entre 180 y 210 kg/cm<sup>2</sup> y acero de refuerzo con  $F_y - 3500 \text{ kg/cm}^2$ .<sup>8</sup> Asimismo se había reconocido la importancia de la relación de la resistencia del material con la cantidad de agua que se agregaba a la mezcla, por lo que en este periodo ya existían tablas dosificadoras para generar concretos con distintas resistencias, utilizadas por los ingenieros de la época para la construcción de nuevas edificaciones en el país.

#### *Acero estructural*

Hasta 1900 México contaba con ferrerías, es decir, empresas de transformación del hierro al hierro forjado, las cuales fueron las primeras en fabricar soleras, varillas corrugadas y hierro estirado, elementos metálicos empleados por las empresas ferroviarias.<sup>9</sup>

La primera edificación de hierro y acero construida en la Ciudad de México fue El Palacio de Hierro (1891), con cinco niveles de altura, diseñado por

<sup>4</sup> Para 1900 había en México dos fábricas de cemento con hornos verticales: la de Santiago Tlatelolco y la de Dublán, en Hidalgo. Debido al bajo consumo y el alto costo de producción, ambas fábricas cerraron. En los siguientes años se abrieron fábricas de cemento con hornos rotatorios como la de Hidalgo en Nuevo León (1903), Cruz Azul en Jasso, Hidalgo (1907), y la Tolteca (1909). Israel Katzman, *La arquitectura contemporánea mexicana: precedentes y desarrollo*, México, INAH, 1964, p. 58.

<sup>5</sup> Nicolás Mariscal, "Cimentación del edificio de Relaciones Exteriores", *El Arte y la Ciencia*, vol. vi, núm. 7, 1904, p. 105.

<sup>6</sup> Suelos blandos compresibles formados por arcillas con baja capacidad de carga y alto nivel de deformación. "Notas Técnicas Complementarias en Gobierno del D. F.", *Reglamento de Construcción para el D. F.*, México, Gaceta Oficial del Departamento del D. F., 2004, p. 762.

<sup>7</sup> La consolidación del terreno consistía en colocar capas de piedra o pedacera de ladrillo mezclada con mortero (cal, arena y tezontle) apisonadas. Adrián Téllez, *Apuntes acerca de los cimientos de los edificios de la Ciudad de México*, México, Imprenta del Gobierno Federal en el ex Arzobispado, 1899, p. 90.

<sup>8</sup> Entre 1900 y 1920 se generaron en Estados Unidos los primeros lineamientos de estandarización de producción de cemento hidráulico, así como pruebas para la determinación de su  $f_c$ , siendo éste aproximadamente de 150 kg/cm<sup>2</sup>, en tanto que el acero de refuerzo presentaba un esfuerzo de fluencia de 2200 kg/cm<sup>2</sup>. Jack Mohele, *Historic Overview*, Berkeley, University of California, 2010, p. 3.

<sup>9</sup> A partir de 1800, en Estados Unidos y Europa, el hierro podía encontrarse en tres formas: i) hierro colado, el cual es frágil debido a su alto contenido de impurezas, aunque presenta una gran capacidad resistente a la compresión; ii) hierro forjado, el cual es una forma más refinada del hierro, maleable pero con baja capacidad a tensión, y iii) el acero, con mayor fuerza y versatilidad que el hierro.

los arquitectos Ignacio y Eusebio de la Hidalga, pero diseñada estructuralmente por ingenieros franceses con acero importado de Bélgica. Posterior a ésta siguió la construcción del Pabellón de México para la Feria de Nueva Orleans en 1884 —también conocido como el Pabellón Morisco de Santa María la Ribera—, erigido con estructura importada de Estados Unidos y diseñado por el arquitecto J. Ibarrola.

En 1898 se construyó la edificación conocida como Casa Boker, obra de los arquitectos De Lemos y Cordes, con la participación del ingeniero mexicano Gonzalo Garita, quien verificó la implementación del sistema estructural metálico creado por el grupo estadounidense Milliken Brothers, de Nueva York. Esta compañía jugaría un papel importante en el desarrollo de algunos de los edificios más emblemáticos de la arquitectura mexicana.

Milliken Brothers era un grupo de ingenieros, arquitectos y constructores estadounidenses que construyeron edificaciones metálicas parcialmente preconcebidas (prototipos) en distintos países del mundo; gracias a su catálogo de soluciones constructivas y de secciones estructurales, los clientes en otras geografías podían generar sus propios proyectos, asesorados y supervisados directamente por esta empresa, con las siguientes ventajas: *a)* velocidad en la construcción (en Estados Unidos podían tener tiempos de construcción de entre cinco y seis semanas;<sup>10</sup> *b)* manufactura precisa mediante la generación de moldes de las secciones en madera para evitar errores en la fabricación; *c)* eficiencia de envío y ensamblaje en el sitio, ya que las piezas se numeraban con gran precisión para evitar errores y se enviaban de manera diligente. Este grupo conta-

<sup>10</sup> Los ingenieros de Milliken Brothers preferían emplear acero estructural para los proyectos realizados fuera de Estados Unidos, ya que el hierro estructural presentaba una mayor complejidad en su producción, además de ser un material más frágil que el acero que podía romperse durante el traslado, generando gastos adicionales. Milliken Brothers, *Catalogue Steel, Iron and Other Products for Buildings*, Nueva York, Milliken Bros., 1905.

ba con soluciones tipificadas tanto de cimentación como de entrepiso y sistemas de marcos con secciones de acero remachadas, formando las columnas.

En cuanto a la Casa Boker, ésta fue construida en menos de dos años. El edificio cuenta con tres niveles, por lo que se decidió emplear en su cimentación un sistema<sup>11</sup> que consistía en la creación de una retícula de traveses metálicas encofradas dentro de cajones de concreto sobre los cuales se apoyarían las columnas del edificio. Dichas columnas, denominadas *Z columns*, estaban formadas por cuatro perfiles tipo “Z” de acero, unidos mediante una placa central y remaches. El *Fy* del acero utilizado para la construcción del edificio fue de 2100 kg/cm<sup>2</sup> (figura 1).

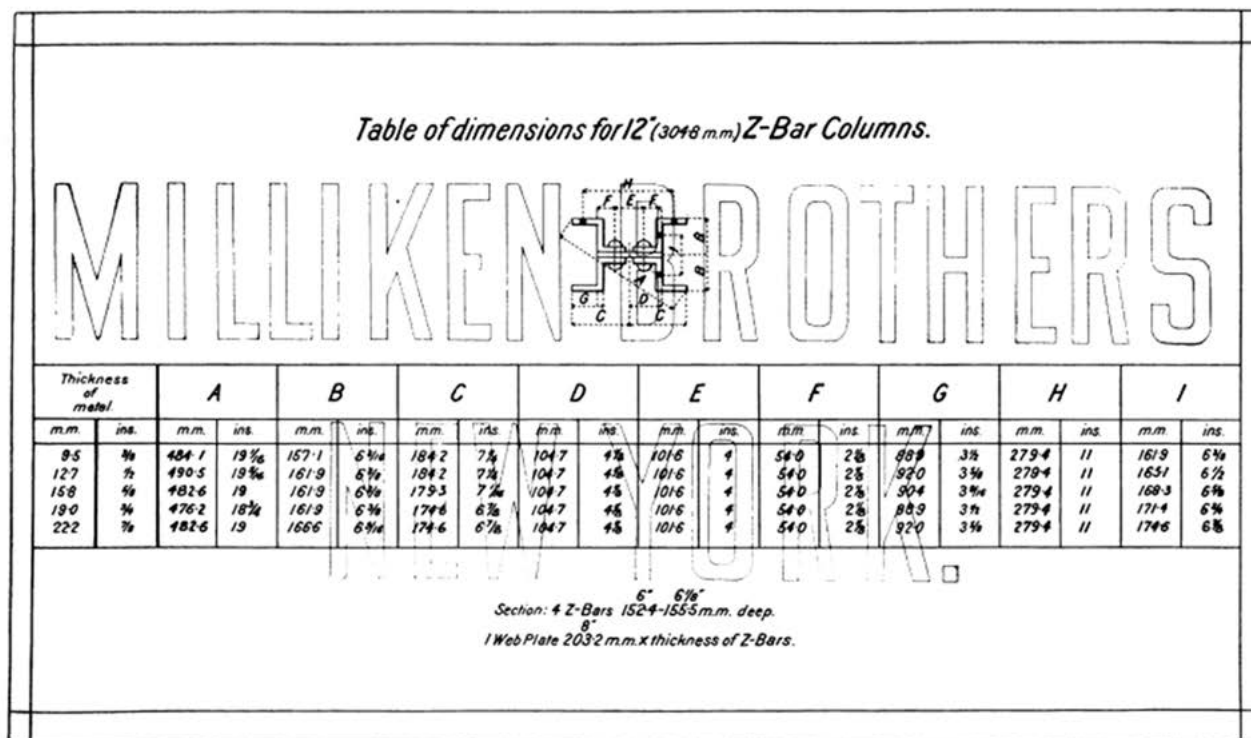
Los entrepisos fueron resueltos con un sistema de traveses secundarios metálicos tipo “I” estándar, apoyadas sobre las traveses principales; para unir a estas traveses se colocaba lámina o un entramado de varilla —solución usada en el edificio—, sobre la cual se colaba concreto para que las traveses secundarias quedaran ahogadas en el mismo, colocando en la parte superior listones de madera con tezontle alrededor sobre las cuales se apoyaba el piso de madera (figura 2).<sup>12</sup>

Este grupo construyó también el Palacio de Correos (1902) y el Palacio de Bellas Artes (1904), obras del arquitecto Adamo Boari, con la participación del ingeniero Gonzalo Garita; los materiales fueron importados de Estados Unidos y Europa, ya que durante ese periodo no existían fundidoras en México.

La primera siderúrgica en el país fue Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey, constituida en 1900 con procesos y tecnología estadounidenses. Poco después de su fundación, desarrolló y publicó el *Manual para constructores*, donde se presentaban los perfiles metálicos que producían y sus propiedades geométricas. Este documento sirvió como

<sup>11</sup> Este sistema era una solución ya comprobada para suelos con alto contenido de humedad y de baja capacidad de carga (Q).

<sup>12</sup> Este sistema de entrepiso fue propuesto y patentado por Milliken Brothers.



Digitized by Google

Original from  
NEW YORK PUBLIC LIBRARY

Figura 1. Tabla de dimensiones para las Z columns. Fuente: Milliken Brothers, *Catalogue Steel, Iron and Other Products for Buildings*, Nueva York, Milliken Bros., 1905, p. 39.

una guía de diseño para los arquitectos e ingenieros mexicanos. El tipo de acero estructural producido por Fundidora Monterrey era similar al que se producía en Estados Unidos, con un esfuerzo de fluencia de 2100 kg/cm<sup>2</sup>, proponiendo un diseño elástico en el cual se consideraba un valor de carga viva para determinar su resistencia.<sup>13</sup>

Adicional a los materiales de construcción y sistemas constructivos, otro factor que influyó en el diseño de los objetos arquitectónicos fueron los reglamentos de construcción, que entrarían en vigor a partir de 1920 e influirían en el diseño estructural de las construcciones de la época.

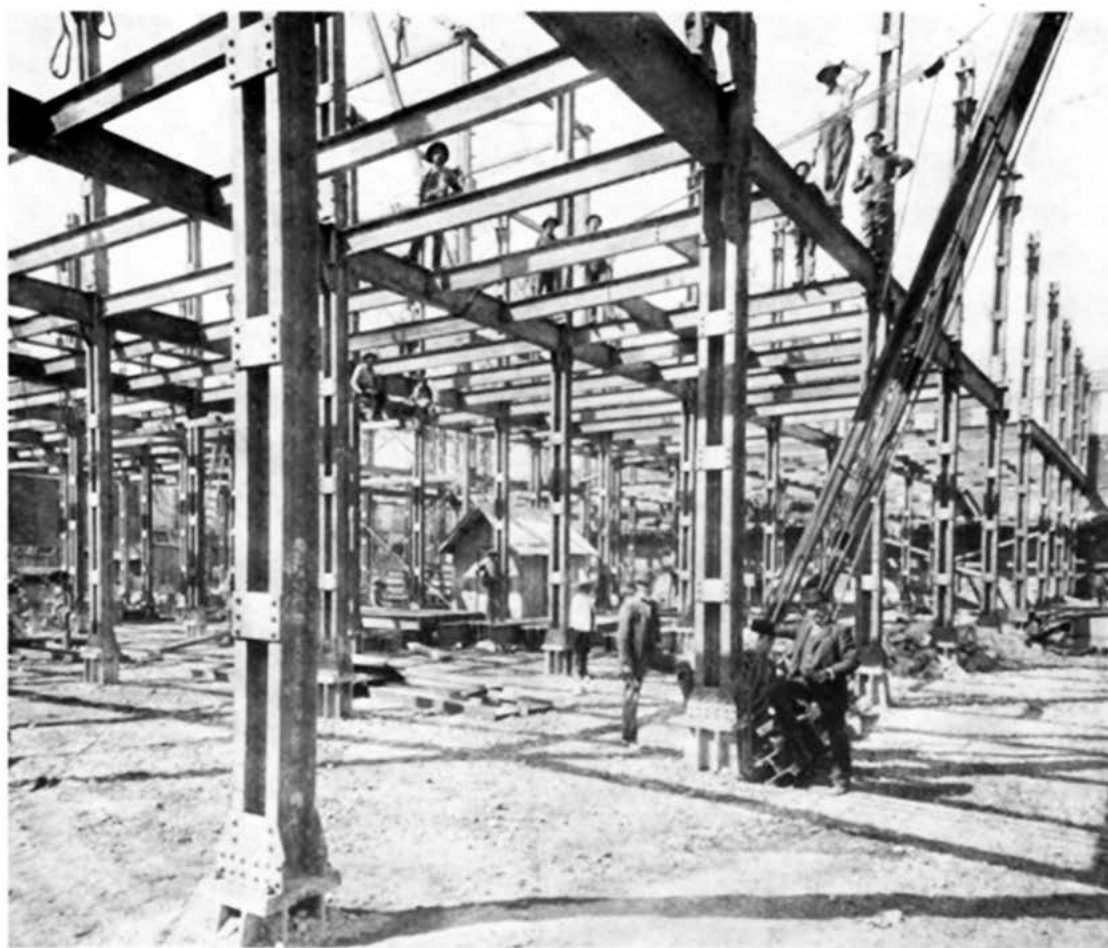
<sup>13</sup> Alrededor de 1920, con Adolfo Prieto como presidente del consejo, se imprimió el primer *Manual para constructores* de la Compañía Fundidora y Acero de Monterrey, el cual influiría en el diseño de edificios con estructura metálica en México por más de 50 años.

### Construcción en la ciudad a partir de 1920

La Dirección de Obras Públicas del Ayuntamiento de la Ciudad de México creó el primer reglamento de construcción en 1920 (RCDF-20).<sup>14</sup> Este reglamento autorizaba la inspección, aprobación de licencias de construcción y señalamiento de cuotas, así como multas por infracciones cometidas contra éste. Asimismo, para otorgar la licencia de construcción se debían presentar planos del terreno, pisos, azoteas, albañales, instalación sanitaria, fachadas, espesores de muros, pisos y techos, así como las dimensiones de columnas, vigas y cimientos, cálculo de estabilidad

<sup>14</sup> Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, *Reglamento de Construcción de la Ciudad de México*, México, Diario Oficial del GCEUM, 1920.

R. BOKER & CO. BUILDING, MEXICO CITY, MEXICO.



STEEL WORK FURNISHED AND ERECTED BY MILLIKEN BROTHERS.

Digitized by Google

135

Original from  
NEW YORK PUBLIC LIBRARY

184 |

Figura 2. La Casa Boker en construcción. Fuente: Milliken Brothers, *op. cit.*, p. 135.

de la estructura y de los cimientos. La responsabilidad del proyecto era del propietario y un perito contratado por éste, mientras que los constructores eran responsables ante la ciudad de accidentes o incumplimiento al reglamento. La altura máxima de construcción para edificios que no fueran públicos debía ser de hasta 22 m, considerando que la calle no fuera menor a los 12 m de ancho.

Se enfatizaba en el diseño de la cimentación de los edificios por la complejidad que presenta el sue-

lo de la ciudad y la falta de estudios científicos sobre el comportamiento del mismo hasta esa fecha. Este diseño sólo se basaba en la experiencia, lo cual hasta ese momento había dado resultados casuísticos, pues algunas veces la solución era acertada y otras no. Como resultado de esta condición, el RCDF-20 hace hincapié en tomar en consideración los hundimientos diferenciales de los edificios y establece como solución para la cimentación de casas y edificios muros de carga asentados sobre una capa de "buen"

---

concreto,<sup>15</sup> con un espesor no menor de 10 cm. Para el diseño de la cimentación se da una capacidad del terreno igual a 5 t/m<sup>2</sup>, valor ligeramente mayor al utilizado hoy en día para esta zona de la Ciudad de México, que es de 4 t/m<sup>2</sup>.

Durante la vigencia de este reglamento se construyeron dos edificios emblemáticos de la Ciudad de México: el de La Nacional (1932) y el de la Lotería Nacional (1946), inmuebles que, mediante su análisis, permiten observar cómo la evolución de los materiales, sistemas constructivos y reglamentación dieron pie al inicio en la carrera por alcanzar una mayor altura a los edificios construidos en la capital mexicana, y donde comenzó la primera modificación en el concepto de edificios altos, al lograr la construcción de edificios con 20 niveles de altura.

#### *Edificio de La Nacional*

En 1929, la compañía de seguros La Nacional encargó la construcción de su edificio a la firma Monasterio y Calderón, constituida por el arquitecto Ortiz Monasterio, el ingeniero Bernardo Calderón y el arquitecto Luis Ávila, quienes comenzaron en 1930 a erigir el primer edificio catalogado como el más alto en la Ciudad de México, cuya construcción finalizó en 1932. El edificio se ubica en la avenida Juárez, con un estilo *art déco*; su altura total es de 55 m y 13 niveles, rebasando la permitida por el RCDF-1920, que era de 22 m.

El reto principal para la construcción de este edificio fue su cimentación, ya que se encuentra en una zona de suelo blando, de la cual hasta ese momento se habían realizado pocos estudios en cuanto a su comportamiento. Otro factor que incidió en el diseño estructural del inmueble fue el uso de marcos

rígidos de estructura metálica fabricados en una siderúrgica mexicana, diseñados con los parámetros de diseño elástico utilizados en Estados Unidos, ya que en México no se contaba con una reglamentación para diseñar estructuralmente con ese material.

La cimentación del edificio, de acuerdo con las palabras del arquitecto Ortiz Monasterio, resultó un desafío:

Se nos presentó ante todo el problema de proyectar una cimentación para un edificio que pesaba 10000 toneladas sobre una superficie de 735 m<sup>2</sup>, o sea 14.5 t/m<sup>2</sup> [...] Para resolver el problema, procedimos ante todo a hacer sondeos del terreno, ensayando la resistencia relativa a la penetración en las diversas profundidades encontrando a los 36 m bajo el nivel de banqueta una capa suficientemente gruesa en la que la resistencia aumentaba considerablemente. La existencia de este estrato nos trajo la idea de usar pilotes de madera profundos con tramo superior de concreto armado haciéndolos trabajar como postes y despreciando o mejor dicho sin confiar su resistencia únicamente al frotamiento del pilote.<sup>16</sup>

Con base en las consideraciones mencionadas por el arquitecto Ortiz Monasterio, y considerando los estudios realizados por el doctor Karl Von Terzaghi,<sup>17</sup> se decidió realizar la cimentación del edificio empleando 373 pilotes de punta contruidos con madera y capuchón de concreto reforzado, unidos en la parte superior mediante contratraveses que dan soporte a la losa de cimentación, la cual forma parte del cajón de cimentación con que cuenta la edificación. Se consideró el peso del terreno excavado para tratar de compensar la descarga final al terreno por parte del edificio, además de aprove-

<sup>15</sup> El "buen" concreto estaba compuesto de grava limpia, pedacera de ladrillo, cascajo o material pesado unido por mezcla de cal o cemento.

<sup>16</sup> Manuel Ortiz, "Cimentación de pilotes en la Ciudad de México", *Arquitectura y Decoración*, núm. 19, 1937, pp. 27-30.

<sup>17</sup> Karl Von Terzaghi (1883-1963), ingeniero civil, geólogo y geotécnico austriaco, padre de la mecánica de suelos.

char la presión hidrostática que presentaba el suelo en ese tiempo sobre la losa fondo del cajón, ayudando a evitar hundimientos. De los pilotes hincados, 91% quedaron apoyados a una profundidad de entre 35 y 37 m. Los pilotes de madera estaban formados por tramos de entre 6 y 8 m de longitud, con un diámetro de 30 cm. Esta solución de cimentación fue el primer caso utilizado a base de un cajón de cimentación y pilotes, apoyados en estrato resistentes del suelo.<sup>18</sup>

La superestructura del edificio presenta una forma rectangular de 29.15 × 23.95 m, con reducciones en sus dimensiones en los pisos superiores. En cada nivel se presentan aproximadamente 42 columnas en la intersección de los ejes, generando claros promedio de 5.5 × 5.4 m, siendo el atrio central el de mayores claros con 7.5 × 5.6 m libres. La altura promedio del entrepiso es de 3.20 m, excepto el sótano y la planta baja, los cuales presentan una altura de 3.50 m. Estas columnas forman parte de un sistema estructural a base de marcos de acero suministrado por Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey; siguiendo su manual de diseño ( $f_y = 1265 \text{ kg/cm}^2$ ), se puede presumir que las columnas están formadas por perfiles tipo canal de 25 y 30 cm de peralte, colocados espalda con espalda y separados entre ellos, uniéndose con placas metálicas remachadas colocadas en forma de celosía —recomendado por el manual de la siderúrgica.

Las columnas fueron recubiertas en su totalidad con concreto, como material antiñifugo, por lo que al final quedaron con una dimensión de 44 × 44 cm. Las trabes metálicas son perfiles laminados tipo “IE” con peraltes entre 25 y 40 cm; para mantener los peraltes pequeños en las trabes, se colocaron en los extremos de las columnas diagonales hacia las tra-

bes, de forma que las ayudaran a reducir el momento flexionante y, por ende, su peralte. Las vigas, al igual que las columnas, fueron recubiertas con concreto, generando secciones finales de 25 × 35 cm. El sistema de piso se encuentra resuelto mediante losas macizas de concreto apoyadas sobre las trabes metálicas, con un espesor de 20 cm.

Ante la falta de un método estándar de diseño por sismo de los edificios dentro del Reglamento de Construcción del D.F. de 1920, el diseño se realizó considerando sólo el momento de volteo que producían las fuerzas debido a sismo o viento y el deslizamiento en la base. Los sismos eran considerados con una escala de intensidad Sieberg y no de magnitud de energía, como la actual Richter; la aceleración máxima considerada en esos tiempos se presume que fue calculada con base en un coeficiente sísmico de .03 g (figura 3).<sup>19</sup>

Este edificio marcó un partaguas constructivo en México, ya que, a pesar de no existir una normatividad que indicara a los diseñadores cómo analizar, diseñar y construir con las nuevas soluciones constructivo-estructurales, los ingenieros y arquitectos mexicanos recurrieron a los conocimientos teóricos<sup>20</sup> existentes sobre el comportamiento de estos nuevos materiales y del terreno para “tropicalizar” la solución, creando un edificio que ha mostrado un buen funcionamiento a lo largo de su vida, al resistir cuatro grandes sismos (1957, 1979, 1985 y 2017).

Su solución de cimentación resultó exitosa, a pesar de los desplomes que ha presentado a lo largo del tiempo. La solución estructural es ingeniosa (marcos metálicos), generando claros y alturas de entrepiso moderadas, mientras que al recubrir

<sup>18</sup> El uso del cajón de cimentación y pilotes se conoce como cimentación mixta. El  $f_c$  del concreto empleado fue aproximadamente de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , utilizado comúnmente en la época, proporcionado por la compañía Cementos Tólteca.

<sup>19</sup> Manuel González, *Estudios comparativo entre dos clases de estructura concreto armado y fierro estructural*, México, FL-UNAM, 1935, p. 102.

<sup>20</sup> Se estudió principalmente el estado del arte de países como Estados Unidos en relación con el diseño sísmico.



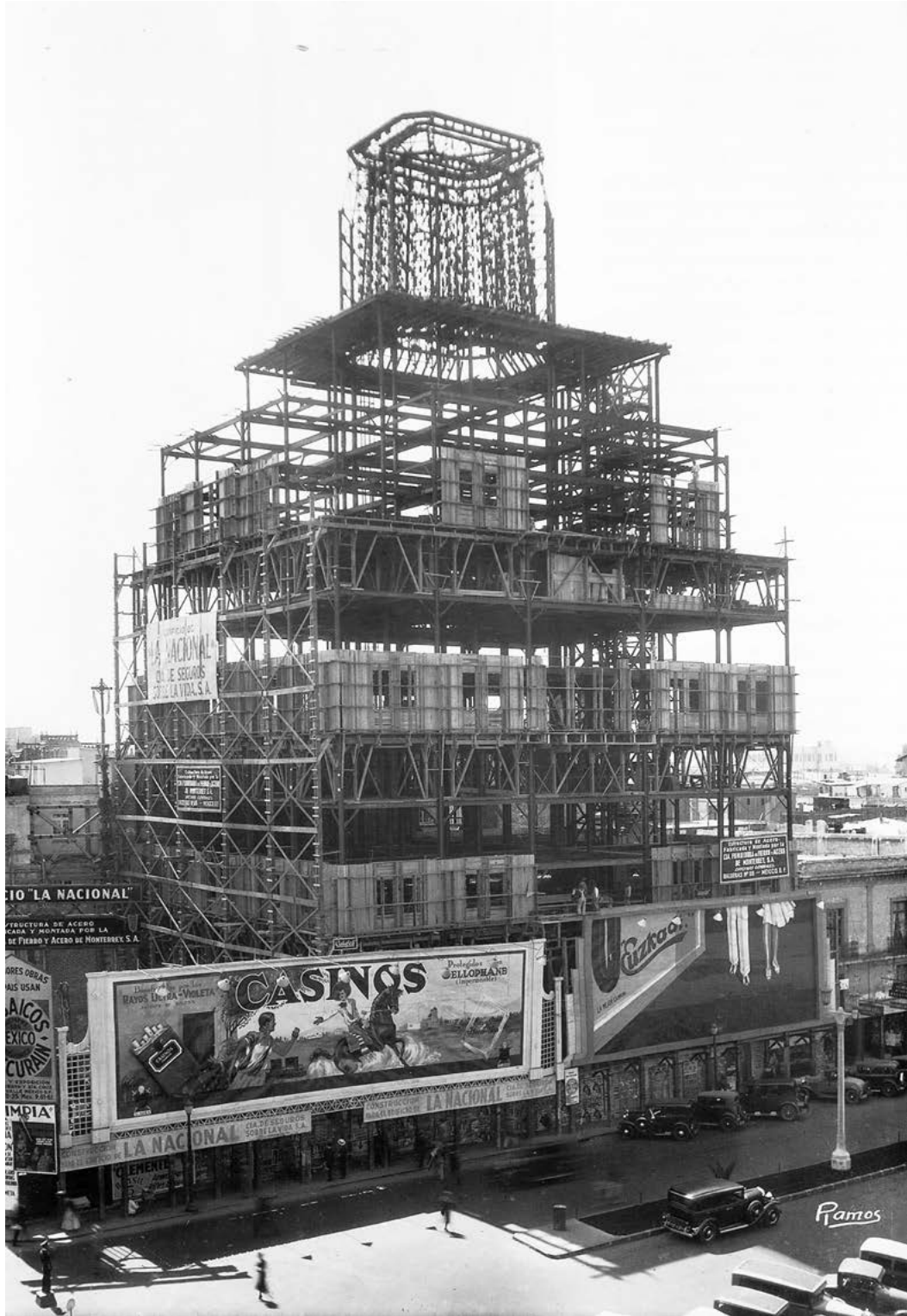


Figura 3. Edificio de La Nacional en construcción. Fuente: Manuel Ramos, *Fervores y epifanías en el México Moderno*, México, Planeta, 2006, p. 65. Agradecemos a la Fundación Ramos.

los elementos estructurales da pie a una adecuada solución estética. Posterior a la edificación analizada, los nuevos proyectos realizados en la Ciudad de México adoptaron estos nuevos sistemas constructivos y estructurales, comenzando con una etapa de modernidad y fomentando la ambición de estudiar con mayor profundidad los aspectos técnicos y constructivos, los cuales se aplicarían en el diseño y construcción de un edificio emblemático como el de la Lotería Nacional.

#### *Edificio de La Lotería Nacional o El Moro*

La construcción de esta edificación se inició en 1933 y se concluyó en 1946. Presenta 20 niveles más tres sótanos y una altura de 107 m, doblando en altura al edificio de La Nacional. El sobrenombre de El Moro le fue dado por los propios empleados de la Lotería, ya que, de acuerdo con ellos, presentaba similitudes con las construcciones moriscas. La normatividad vigente establecía 35 m como la altura máxima de un edificio en la Ciudad de México, por lo que fue necesario que el presidente de la República, el general Lázaro Cárdenas, expidiera un decreto donde se autorizaba una altura mayor con la condición de que se realizara un estudio de comportamiento sísmico y geotécnico del inmueble.

Por su emplazamiento se construyó en un suelo de tipo arcilloso con nivel freático alto, lo cual generó un abudamiento en el terreno al realizar la excavación de la cimentación. Como resultado de estas condicionantes, el ingeniero José A. Cuevas, diseñador estructural de la obra, generó un nuevo sistema de cimentación, al cual llamó "sistema de flotación elástica". Este diseño representó una nueva aportación en el mundo de la construcción y la ingeniería, al ser precursor de los sistemas conocidos hoy en día como "cajón de cimentación".

Con base en la creación de este cajón de cimentación, se generaron tres sótanos abajo del nivel de

calle, de modo que el peso del volumen que forma el cajón lastrara al edificio para no sufrir volteo ante las fuerzas sísmicas. Como no había nada escrito respecto a esta nueva tecnología, tenía que recurrirse a pruebas de carga durante la construcción para determinar si cumplía con la seguridad estructural requerida; para asegurar la estabilidad se decidió colocar 180 pilas adicionales de concreto debajo del cajón de cimentación, hasta llegar a una profundidad de 55 m para anclarse en terreno firme.

La superestructura se realizó con marcos de acero, introduciendo vigas de alma abierta para claros grandes o armaduras metálicas.<sup>21</sup> Estos marcos metálicos están formados por trabes tipo "IE", las cuales cubren claros de entre 5 y 6 m, ya que para claros mayores a 8 m se utilizaron por primera vez en México armaduras en la franja central del edificio en sus cuatro primeros niveles, en tanto que las columnas se construyeron con perfiles metálicos de tipo canal espalda con espalda, unidos mediante solares metálicas remachadas, variando su tamaño de acuerdo con el incremento en la altura.

La estructura fue recubierta con concreto reforzado. El sistema de piso está solucionado mediante una losa de concreto reforzado, apoyado sobre armaduras y trabes. La altura de entrepiso en los primeros tres niveles es de 9 m, mientras que en los niveles superiores es de 3.5 m. El diseño sísmico para este edificio fue similar al utilizado en La Nacional, obteniendo la fuerza sísmica y verificando que la edificación no sufriera volteo (figura 4).

Este edificio fue uno de los primeros en manejar en zonas públicas claros mayores a 8 m y alturas de entrepiso mayores a 3 m, todo ello gracias al uso de la estructura metálica y la introducción de armaduras, generando menor peso para la cimenta-

<sup>21</sup> Su origen se debe a los puentes para ferrocarriles, y era aplicado en cubiertas industriales tanto en Europa como en Estados Unidos alrededor de 1840.



Figura 4. Edificio de El Moro en construcción. Fuente: M. Ramos, *op. cit.*, p. 75. Agradecemos a la Fundación Ramos.

ción. Los materiales, diseño y procedimiento constructivo fueron producto del ingenio y la tecnología mexicanos. Entre 1920 y 1942 se dejaron de emplear varillas lisas como refuerzo del concreto reforzado, y se utilizaron varillas corrugadas. Comenzó a tenerse un mejor control de la resistencia del concreto en obras importantes y apareció el uso del mortero neumático para reparar los edificios afectados por un sismo.

### Construcción en la ciudad a partir de 1942

El sismo de 1941 generó la modificación del RCDF-20. Bajo la supervisión de la Dirección de Obras Públicas se creó el reglamento de construcción de 1942 (RCDF-42),<sup>22</sup> con disposiciones de índole técnico; las más relevantes fueron el establecimiento de alturas máximas para los edificios —14 m, 18 m y 35 m para calles de 9 m, 12 m y mayores a 12 m de ancho—, así como especificaciones para valores de cargas muerta y vivas. Estas últimas podían ser reducidas para el diseño de columnas, muros y cimientos, desde 10% para edificios de dos niveles hasta 50% para edificios de siete niveles o más.<sup>23</sup>

Se consideraron los efectos sísmicos, generando una clasificación de las construcciones por tipo de importancia y asignando un valor de coeficiente sísmico. Las capacidades de carga del terreno eran de 5 t/m<sup>2</sup> para terrenos preconsolidados o 3 t/m<sup>2</sup> si no había edificaciones previas en el predio. Las cimentaciones permitidas eran de concreto reforzado o fierro fundido/acero estructural ahogadas en con-

creto; los pilotes de madera, de concreto reforzado o compuestos. Se regularon los materiales, estableciendo la dosificación mínima para el concreto. Bajo estas nuevas especificaciones técnicas se construiría uno de los edificios más emblemáticos de la Ciudad de México: la Torre Latinoamericana.

### *Torre Latinoamericana*

Este edificio se construyó entre 1948 y 1956 y se convirtió en un ícono del paisaje de la ciudad y de la arquitectura mexicanas, al ser el primer edificio elevado, construido en una zona altamente sísmica y en suelo blando. Cuenta con una altura total de 140 m y 43 pisos,<sup>24</sup> rebasando la altura máxima permitida por el RCDF-42, que era de 35 m. La cimentación se encuentra resuelta mediante un cajón de cimentación de 13 m de profundidad y 361 pilotes de punta apoyados en la primera capa de arena compacta a 33 m de profundidad. Los pilotes cuentan con un diámetro de fuste de 30 cm y un diámetro en la punta de 43 cm, fabricados en concreto reforzado con un esfuerzo resistente a compresión aproximado de 750 kg/cm<sup>2</sup>; éstos no se encuentran anclados directamente sobre la losa fondo del cajón de cimentación, sino que pasan libremente, permitiendo ajustar la altura de la edificación independiente al terreno, resultando así precursores de los pilotes de control.<sup>25</sup>

Debido a que la descarga de la edificación era mayor a lo que soportaban los pilotes, se realizó un cajón de cimentación en concreto reforzado formado por dos sótanos, apoyándose la losa fondo de 60 cm de espesor en depósitos de arcilla en el nivel -13.50, obteniendo una cimentación semicompensada.

<sup>22</sup> Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, "Reglamento de Construcción y Servicios Públicos en el D.F., México", *Diario Oficial del GCEUM*, 1942.

<sup>23</sup> Esta reducción ocasionó que los edificios altos se diseñaran con cargas menores a las que realmente se sometían en condición de sismo generado, y que muchos edificios calculados bajo esta normatividad se colapsaran durante los sismos de 1957 y 1985. Ejemplo de lo anterior es el Centro Urbano Benito Juárez (1950-1952) del arquitecto Mario Pani.

<sup>24</sup> Ernesto Zeevaert, *La Torre Latinoamericana*, México, DEPEI-UNAM, 1986, p. 5.

<sup>25</sup> Los pilotes de control permiten el paso del pilote a través de la losa fondo del cajón de cimentación, permitiendo que la edificación se hunda junto con el terreno en forma controlada.

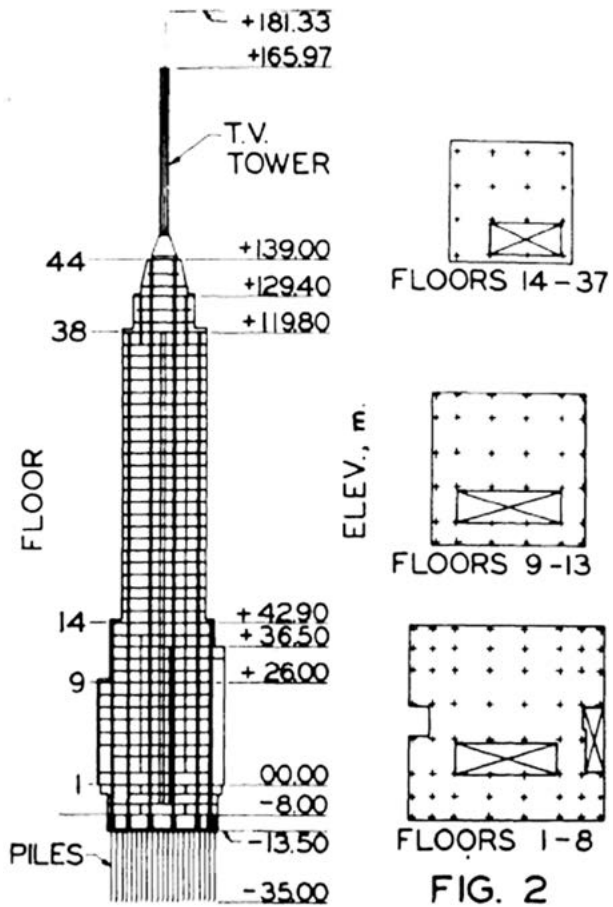
Como el nivel freático era alto (-1 m respecto al nivel de banqueta en la época de su construcción), se estableció que la reacción del terreno sobre la losa de cimentación era realmente la presión hidrostática del nivel de aguas freáticas, lo cual dio pie a considerar que la cimentación flotaba.

Con base en la solución del tipo de cimentación, se determinó el número de niveles con los que contaría la torre: 43 pisos. Para ejecutar la cimentación se siguió un procedimiento constructivo meticuloso y paulatino, pues debía controlar que no se hundieran las construcciones circundantes ni la calle. Para esto se instaló un sistema hidráulico que mantuviera el nivel freático bajo dentro de la construcción e inyectara el agua fuera de la excavación, de forma que en los terrenos adyacentes se mantuviera el nivel freático de -1 m (figura 5).

La superestructura está formada por marcos metálicos<sup>26</sup> y conexiones remachadas. Se consideró un comportamiento estructural mixto, en el que las trabes metálicas tipo "IE" trabajaran junto con la losa de concreto mediante el uso de pernos de cortante, dando como resultado una resistencia mayor del elemento estructural. Las columnas están formadas por perfiles tipo "H" reforzados con placas metálicas en los patines. La planta del edificio se diseñó para que fuera lo más regular y simétrica posible, evitando así problemas de torsión ante un sismo. Está conformada por claros de 6 × 6 m, dejando en todos los extremos trabes en volado (entre 2 y 4.5 m) para soportar la losa, liberando de columnas todos los extremos. Los núcleos de elevadores y escaleras fueron colocados al centro del edificio para evitar torsión ante un sismo. La altura promedio de los entrepisos es de 3.20 m.

La estructura metálica se fabricó en Estados Unidos, en la fábrica Bethlehem Steel Corp., la cual mencionó que las columnas de esta torre presentaban

<sup>26</sup> Dicha estructura tiene un  $F_y = 2300 \text{ kg/cm}^2$ .



**2. Elevation and Cross-Sections of Latino Americana Tower**

Figura 5. Esquema de la Torre Latinoamericana. Fuente: Leonardo Zeevaert, *Aseismic Design of Latino Americana Tower in Mexico City*, California, VI World Conference Earthquake Engineering, 1954, p. 20.

dimensiones similares a la de las columnas empleadas para el Empire State, en la ciudad de Nueva York, el cual duplicaba la altura de la torre. Los ingenieros mexicanos demostraron que el diseño era correcto debido a las fuerzas sísmicas que podría sufrir la torre y la necesidad de limitar sus deformaciones. En cuanto al diseño por sismo, se revisó de acuerdo con el RCDF-42. Los edificios diseñados hasta esa fecha con esta reglamentación aparentemente satisfacían las condiciones ante los sismos que se habían presentado en la capital; sin embargo, el doctor Leonardo Zeevaert, al estudiar

las intensidades de los sismos sufridos en la ciudad, determinó que podían presentarse sismos con intensidades mayores y que este edificio debía ser capaz de soportarlas.

La torre se diseñó sísmicamente empleando un nuevo método estudiado en Estados Unidos, el cual consideraba al edificio como un elemento dinámico. Para realizar este análisis, el doctor Zeevaert consultó al doctor Nathan Newmark, dando como resultado que el inmueble se diseñara para soportar un sismo nunca antes registrado, de grado ocho. Los requisitos que debía cumplir para lograr un comportamiento sísmico adecuado serían los siguientes: la estructura debía ser flexible para permitir las deformaciones impuestas por un sismo sin que sufriera daños la estructura, además de que todos los muros divisorios de los ejes principales debían removerse y no podían ligarse a la estructura principal. Los muros perimetrales debían diseñarse con materiales que permitieran deformaciones considerables sin dañarse.

La Torre Latinoamericana forma un parteaguas en el diseño sísmico en México y en el uso de la tecnología, materiales y sistemas constructivos del momento para lograr una edificación segura y funcional. Esta edificación fue pionera en aplicar un método de diseño sísmico dinámico en el país, verificando su comportamiento de manera analítica. Al conocer el comportamiento sísmico de los edificios, se seleccionó el acero como material para la estructura, debido a su alta ductilidad. Se instalaron instrumentos para registrar el desplazamiento de entrepisos consecutivos bajo sismo, lo cual, aunado a la investigación realizada para su construcción, se aprovechó para realizar modificaciones a los reglamentos de construcción posteriores.

Algunos de los avances técnicos en los sistemas de cimentación se realizaron entre 1942 y 1957, cuando el ingeniero González Flores patentó los pilotes de control; además, en la Ciudad de México se

estableció la primera planta de concreto premezclado. Aunado a lo anterior, el ingeniero Raúl Marsal, primero en los laboratorios de Ingenieros Civiles Asociados (ICA) y luego en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (1956), realizó estudios de las arcillas del valle de México.

Otro evento que modificaría la forma de diseño y construcción en la Ciudad de México fue el sismo del 28 de julio de 1957, con una magnitud de 7.7 Mw, lo cual generó la promulgación de normas de emergencia, vigentes hasta la promulgación de un nuevo reglamento de construcción, en 1966. El aspecto importante que cubrían estas normas emergentes era el efecto sísmico sobre las edificaciones, estableciendo que las construcciones menores a los 45 m de altura podrían seguir ocupando el método de diseño sísmico establecido en el RCDF-42, mientras que para edificios de mayor altura se requeriría un estudio especial para garantizar su correcto funcionamiento (método dinámico). Los valores de coeficientes sísmicos se incrementaron y por primera vez se zonificó la Ciudad de México de acuerdo con el tipo de suelo, surgiendo tres tipos de zonificación: lacustre, de transición y lomerío.<sup>27</sup>

En 1964, con la pretensión de subsanar las deficiencias del reglamento anterior, se generó el RCDF-64. Nuevamente en éste se cubrieron los temas de cargas vivas para determinados tipos de suelo, las capacidades de carga del terreno y la variación de coeficientes sísmicos conforme al tipo de suelo. Para los edificios altos era de rigor hacer un análisis sísmico dinámico modal espectral para su diseño, y se solicitaba su diseño por viento.

<sup>27</sup> Se iniciaron las investigaciones acerca del comportamiento sísmico de los edificios. Investigadores como el doctor E. Rosenblueth aportaron al reglamento de construcción los primeros espectros sísmicos para el cálculo de edificios. Emilio Rosenblueth, *Proyecto de reglamento de las construcciones en el distrito federal: folleto complementario diseño sísmico de edificios*, México, II-UNAM, 1962, pp. 1-120.

## Construcción en la ciudad a partir de 1976

Al reconocer que el tipo de suelo y los efectos sísmicos son los principales agentes que afectan a las construcciones de la Ciudad de México, se realizaron más estudios acerca de los mismos, y los resultados obtenidos modificaron la normatividad. Este hecho convirtió al país en un punto de referencia a escala mundial en el área de geotecnia y comportamiento sísmico, surgiendo así el Reglamento de Construcción del Distrito Federal de 1976 (RCDF-76).<sup>28</sup> En éste se creó la figura de los directores responsables de obra, quienes deben verificar la seguridad y el servicio de la edificación. Los aspectos técnicos constructivos de los materiales quedaron separados del cuerpo principal normativo, generando las Normas Técnicas Complementarias de Diseño. Los valores de coeficientes sísmicos aumentaron según el tipo de terreno.

Para las cimentaciones, el Distrito Federal se dividió en cuatro zonas: suelos compresibles con espesor menor a 3 m, suelos compresibles entre 3 y 20 m de profundidad, suelos compresibles con espesor de 20 m, y zonas que requieren forzosamente un estudio de mecánica de suelos. La capacidad del terreno máxima era de entre 2 y 8t/m<sup>2</sup>. Para el diseño de los materiales se emplearían los métodos de diseño por resistencia última. Estas nuevas consideraciones, surgidas del estudio del comportamiento geotécnico y estructural, permitirían la construcción de edificaciones con un mayor número de niveles en la Ciudad de México, pese a la complejidad de su subsuelo en la zona lacustre, una de las cuales fue la Torre de Pemex.

### *Torre Ejecutiva Pemex*

De 1976 a 1982 se construyó el edificio inteligente denominado Torre Ejecutiva Pemex, diseñado por el

arquitecto Moctezuma Díaz Infante y calculado por el ingeniero Óscar de Buen, con 49 niveles y 235 m de altura, de modo que al finalizar su construcción se convirtió en el edificio más alto de la Ciudad de México. Su planta es rectangular, de 63.44 × 44.32 m, con un sótano a 4.8 m por debajo del nivel de acceso y un helipuerto.

El terreno donde se construyó es una zona considerada de transición, con depósitos resistentes de suelo ubicados a 32 m de profundidad. Esta condición obligó a resolver la cimentación con un cajón de cimentación, además de colocar 164 pilas de concreto reforzado coladas in situ con un fuste de 1 m de diámetro y ampliación en la base de 1.5 m. Estas pilas presentan una corona a 8.5 m por debajo del nivel de calle y son recibidas por contratrabes, formando cajones que se utilizan como cisterna contra incendio. El concreto reforzado para esta estructura presenta un  $f_c$  mayor a 600 kg/cm<sup>2</sup>.

La estructuración está hecha a base de marcos de acero atornillados; las separaciones entre ejes son de 7.93 m y 10.90 m. Para rigidizar el edificio se definieron en el perímetro macromarcos con diagonales a 45° que terminan cada 16 niveles, y se formaron dos diafragmas horizontales con armaduras en el perímetro entero, entre los niveles 20-21 y 37-38, generando un sistema rígido para evitar las deformaciones excesivas por sismo en ambas direcciones. En los niveles intermedios se cuenta con trabes y columnas metálicas tipo "IR" conectadas a momento. El sistema de piso es losacero, con una capa de compresión a base de concreto ligero, empleando conectores de cortante para generar un comportamiento compuesto con las trabes de este sistema. El acero empleado presenta un esfuerzo resistente aproximado de 3500 kg/cm<sup>2</sup> (figura 6).

Su planta es simétrica con el núcleo de elevadores y servicio al centro de la edificación, evitando torsiones por sismo. El uso de estructura metálica, así como de concreto ligero, permite que las descargas

<sup>28</sup> Departamento del Distrito Federal, "Nuevo Reglamento de Construcciones para el D.F., México", *Diario Oficial del D.F.*, 1966.

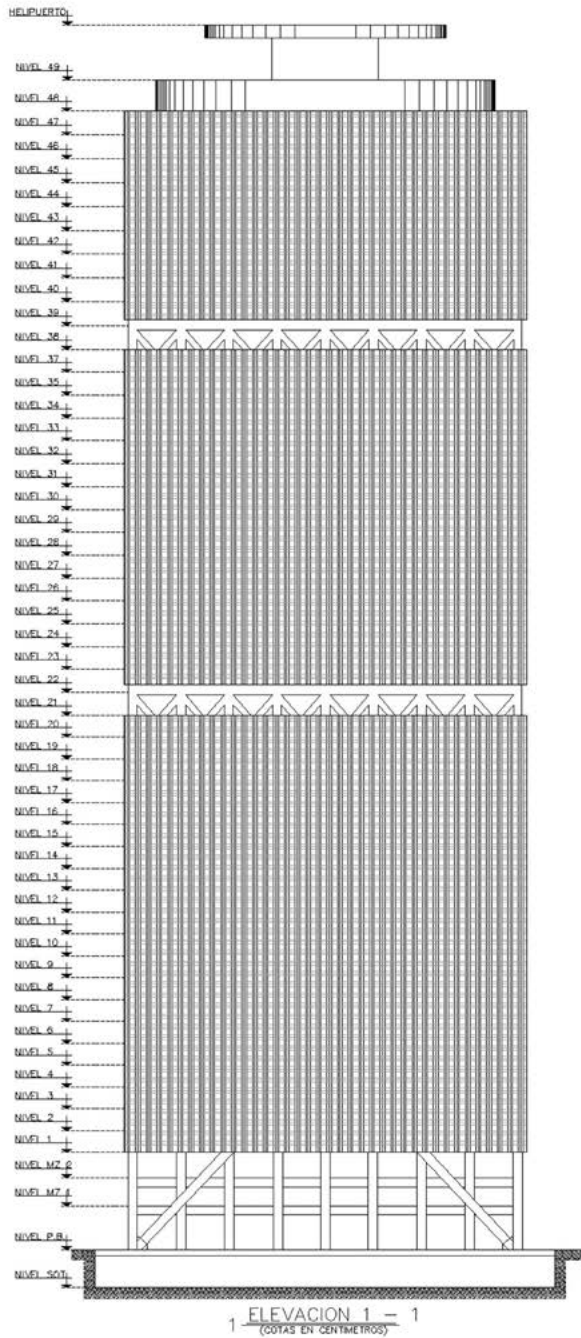


Figura 6. Esquema de la Torre de Pemex. Dibujo de Perla Santa Ana.

al terreno sean menores y, por ende, se requiera un menor volumen de cimentación. La estructura metálica permite una mayor ductilidad, al generar entrepisos rígidos mediante la colocación de armaduras perimetrales con peralte de uno o dos entrepi-

sos conectados a la estructura principal. Para limitar aún más sus posibles deformaciones laterales, se colocaron contraventeos verticales en todas las caras del edificio, con 90 amortiguadores para disminuir deformaciones, ya que fue diseñado para sismos con mayor intensidad a los registrados en la actualidad (8.5 Mw).

Las nuevas tecnologías sísmicas, como son los disipadores de energía por medio de contraventeos, amortiguadores sísmicos,<sup>29</sup> sistemas de macromarcos, etc., permitirían construir edificios de mayor altura en zonas donde antes no era imaginable construir sin que presentaran problemas de hundimientos en el terreno y colapsos ante sismos. Los materiales ofrecen capacidades resistentes mayores a las empleadas en el país. Su diseño consideró parámetros aún no contemplados en el RCDF-76, que serían considerados en el reglamento de construcción de 1987.

### Construcción en la ciudad a partir de 1985

El grado de afectaciones sufrido en la ciudad a causa del sismo del 19 de septiembre de 1985 (de intensidad 8 Mw) mostró efectos particulares del comportamiento de los edificios en determinadas zonas de la ciudad. Ese año se generaron normas técnicas de emergencia, y el nuevo reglamento de construcción se publicó en 1987 (RCDF-87).<sup>30</sup> Estas normas enfatizan en las aceleraciones sísmicas y los efectos de resonancia. Las condiciones de regularidad de la edificación se marcaron como condiciones deseables en los proyectos arquitectónicos. Se generaron tres zonas en la ciudad con distintas capacidades de terreno: zI Q – 8 t/m<sup>2</sup>, zII Q – 5 t/m<sup>2</sup> y zIII Q – 1.5 a 4 t/m<sup>2</sup>. Se modificaron los factores de diseño de

<sup>29</sup> Aminoran la deformación de la edificación.

<sup>30</sup> Gobierno del D.F., "Reglamento de construcciones para el D.F., México", *Gaceta Oficial del Departamento del D.F.*, 1987.



los materiales, generando un amplio rango de seguridad, enfatizando en los sistemas estructurales dúctiles. Tales consideraciones fueron utilizadas en el diseño y construcción de edificios más altos, como en el caso de la Torre Mayor.

### Torre Mayor

En 1999 comenzó su construcción, con 225 m de altura y 57 pisos. Ubicada sobre el Paseo de la Reforma, tiene una huella de 80 × 80 m en planta en los niveles inferiores, disminuyendo sus dimensiones en los niveles superiores (48 × 36 m).

Consta de cuatro niveles de estacionamiento subterráneo, lo cual le da un total de 230.4 m de altura. El proyecto arquitectónico fue desarrollado por Zeidler Roberts, mientras que el proyecto estructural fue desarrollado por el maestro en ingeniería Enrique Martínez Romero.<sup>31</sup>

El inmueble se encuentra desplantado entre la zona de transición y lago de la Ciudad de México. Como resultado de la profundidad de la excavación requerida para generar la cimentación del edificio, se realizaron terraplenes cerca de los linderos del terreno para controlar el empuje del suelo en las colindancias. La cimentación consta de un cajón de cimentación<sup>32</sup> formado por tabletas de concreto reforzado (de entre 60 y 80 cm de espesor), empleando para su construcción el método "muro Milán". Constructivamente, antes de colar la losa fondo del cajón de cimentación se colaron 251 pilas de 1.20 m de diámetro, las cuales llegan hasta el estrato resistente,<sup>33</sup> para finalmente colar la losa fondo con un peralte variable de entre 1 y 2.5 m en concreto reforzado.

<sup>31</sup> Ahmad Rahimian, *Standing Tall*, Chicago, Modern Steel Constructions, 2003, p. 42.

<sup>32</sup> Cuatro niveles subterráneos, a 15 m por debajo del nivel de banqueta.

<sup>33</sup> El estrato resistente se encontró entre 38 y 50 m de profundidad.

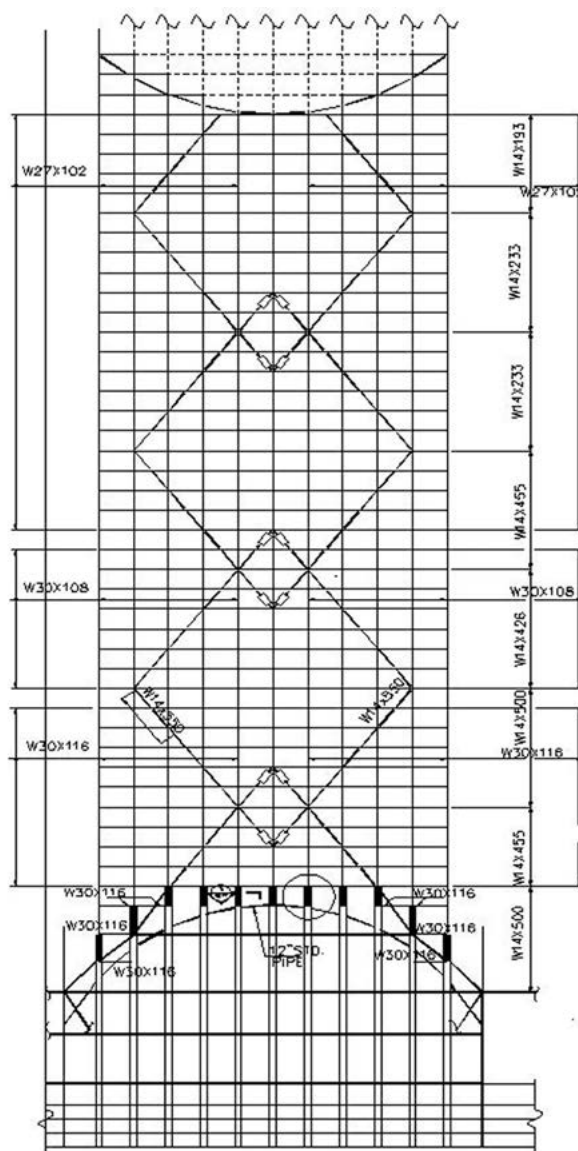


Figura 7. Elevación de la Torre Mayor. Dibujo de Perla Santa Ana.

La estructura principal fue realizada en acero, conformada por marcos con columnas y muros compuestos.<sup>34</sup> Los entrepisos están contruidos con un sistema tipo losacero de 7.6 cm de espesor, soportado

<sup>34</sup> Columnas metálicas que forman el refuerzo interior de muros de concreto reforzado o columnas metálicas cubiertas con acero de refuerzo y concreto, colocando pernos de cortante para lograr adherencia entre el concreto y el acero estructural. El uso del sistema mixto añade rigidez y resistencia.

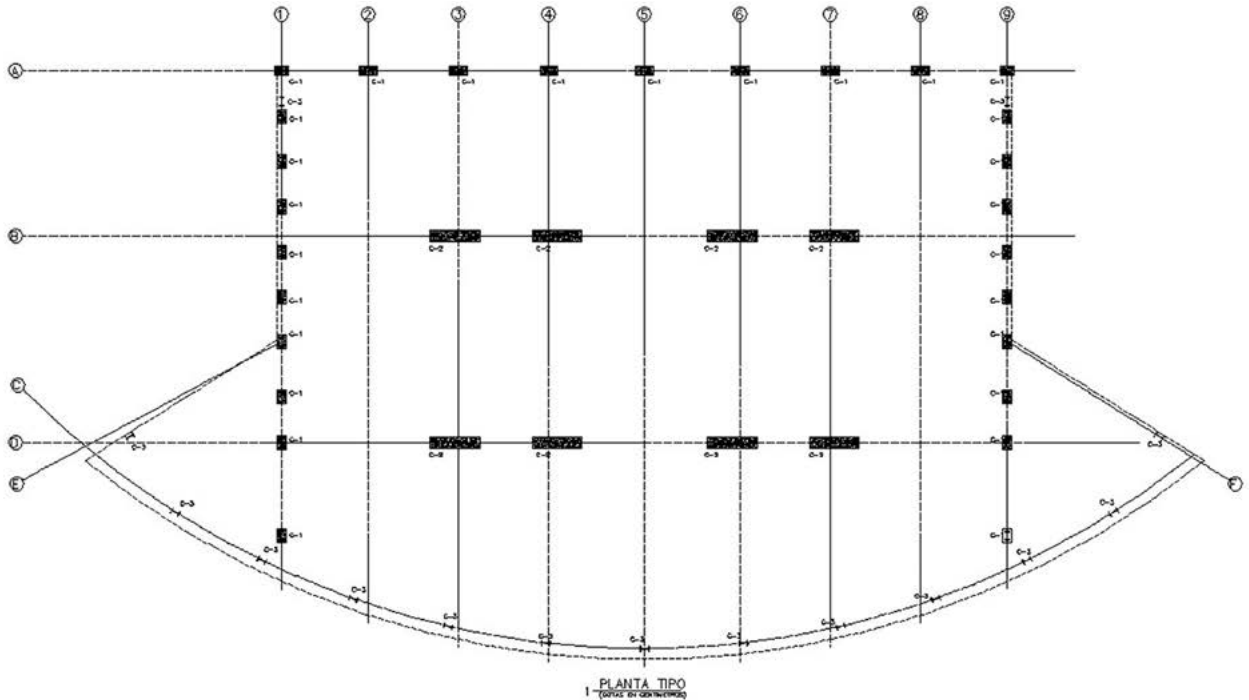


Figura 8. Planta tipo de la Torre Mayor. Dibujo de Perla Santa Ana.

por vigas metálicas, formando una sección compuesta con la losa, empleando conectores de cortante (figura 7).

A pesar de su geometría en planta semicircular, se trata de una planta simétrica donde el núcleo de servicios se localiza cercano al centro. En relación con el diseño por sismo, su sistema para soportar las fuerzas y deformaciones laterales se basa en colocar macromarcos contraventeados en el perímetro de la torre, acoplados con los marcos rígidos interiores, formando un sistema de tubo al exterior y al interior. Adicionalmente se colocaron 96 amortiguadores viscoelásticos en los contraventeos, aminorando los desplazamientos laterales. Para su análisis sísmico se obtuvo la aceleración de diseño específica para el predio, revisando la torre en primera instancia con los métodos de diseño establecidos por el RCDF-93<sup>35</sup> (análisis dinámico), para después realizar análisis

sísmicos más sofisticados, como el análisis tiempo-historia bajo distintos sismos de mayor intensidad a los presentados actualmente (8.2 Mw).

Este edificio, junto con la Torre de Pemex, marcaron un nuevo rumbo en construcción y diseño estructural, ya que para lograr la resistencia requerida no sólo se usaron materiales con mayor resistencia, sino que comenzaron a combinarse, formando secciones compuestas, obteniendo una mayor rigidez y resistencia. Las dimensiones de los elementos constructivos cambiaron, presentando dimensiones nunca antes vistas —losas de cimentación de hasta 2 m de espesor, muros de 80 cm de espesor, etc.—. Los métodos constructivos se perfeccionaron, desde el proceso de excavación y retención del terreno hasta el colado de elementos en las alturas (figura 8).

### Conclusiones

Los adelantos en cuestión de materiales, sistemas constructivos y la integración de estudios técnicos

<sup>35</sup> Gobierno del D.F., “Reglamento de Construcciones para el D.F., México”, *Gaceta Oficial del Departamento del D.F.*, 1993.

---

como la geotecnia o el diseño sísmico han permitido la creación de edificaciones en la Ciudad de México más complejas formalmente, con una mayor altura y mayores claros. Uno de los grandes retos para los arquitectos e ingenieros que construían —y construyen— en esta urbe desde el siglo XIX es el suelo y su comportamiento, el cual genera distintos efectos en las construcciones, desde asentamientos imperceptibles en los edificios hasta llevarlos a su colapso.

Este factor, aunado a los movimientos telúricos, condicionaron durante un amplio periodo el incremento en altura y el aspecto formal de los edificios construidos en la capital del país. El siglo XX fue muy importante en la construcción de México: se inició la modernidad con la importación de materiales y de estudios realizados en otras partes del mundo con respecto a los suelos y a los materiales. El acero estructural y el concreto reforzado son tan importantes en la construcción mexicana como lo fue la madera antes de ese siglo, permitiendo adaptar e innovar los sistemas constructivos a las necesidades y realidad de nuestro país.

A lo largo del siglo XX, la iniciativa y el estudio realizado por importantes investigadores internacionales y mexicanos, tanto en el aspecto geotécnico como en el diseño sísmico y estructural, entre

otros, produjo grandes adelantos en el comportamiento de los edificios bajo condicionantes como la construcción en suelos arcillosos o con alta sismicidad. Los sistemas de cimentación creados en México, como los pilotes de control o las cimentaciones mixtas, fueron aportaciones del país al mundo.

En cuanto al factor sísmico, los estudios desarrollados en el país, primordialmente en la Ciudad de México, sobre todo en universidades públicas como la UNAM y la UAM, han convertido a los ingenieros mexicanos en un punto de referencia dentro de la resolución del cálculo de edificios en zonas con este problema a nivel mundial.

Finalmente, los materiales originales, concreto reforzado y acero estructural, siguen su evolución a nivel internacional. Hoy en día existen concretos de alta resistencia con  $f_c$  de 1000 kg/cm<sup>2</sup>, con una mayor capacidad para deformarse y usarse como material para la construcción de edificios altos en zonas sísmicas —como la Torre Reforma—, apoyados con el uso del acero estructural, los cuales, trabajando juntos, generan una mancuerna perfecta constructivamente. Esto permitirá que los edificios del futuro continúen con la carrera iniciada en el siglo XIX con el surgimiento de los rascacielos: alcanzar el cielo.

