50 años del metro

EDICIÓN CONMEMORATIVA · SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA, A. C. WWW.SMIG.ORG.MX

AMPLIACION DE LA RED DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO "METRO"

PLAN MAESTRO

LAMINA N° 7

LINEA	TIPO DE LINEA (LONGITUD EN KM.)			TOTAL
	SUBTERRANEA	SUPERFICIAL	ELEVADA	
	DISTRITO FEDERAL			
2		6.6		6.6
14	10.0			10.0
17			11.3	11.3
18	14.3			14.3
SUMA	24.3	6.6	11.3	42.2

ABRIL-1979

RED DE 387.41 KMS.

SIMBOLOGIA

- LINEA SUBTERRANEA
- LINEA SUPERFICIAL
- LINEA ELEVADA
- ESTACION DE PASO
- ESTACION DE CORRESPONDENCIA
- ESTACION TERMINAL

Red del metro 2019

Mesa Directiva 2019-2020
Presidente
Moisés Juárez Camarena
Vicepresidenta
María Guadalupe Olín Montiel
Secretario
Ricardo Enrique Ortiz Hermosillo
Tesorero
Héctor Valverde Reyes
Vocales
Héctor Augusto de la Fuente Utrilla
Renata Alejandra González Rodríguez
Sergio Martínez Galván
Félix Sosa Contreras
Gerson Vázquez Salas
Gerente
Brenda Aguilar Silis
Delegaciones regionales
Michoacán
Occidente
Puebla
Querétaro
Tabasco
Veracruz
Representaciones
Chiapas
Ciudad Juárez
Irapuato
Mérida
Monterrey
Tijuana

geotecnia
Edición conmemorativa
50 años del metro
Dirección general
Moisés Juárez Camarena
Dirección ejecutiva
Natalia Parra Piedrahita
Consejo Editorial
J. Eleazar Arreygue Rocha
Gabriel Yves Armand Auvinet Guichard
José Trinidad Briseño Rodríguez
Jorge Efraín Castilla Camacho
José Francisco González Valencia
Moisés Juárez Camarena
Germán López Rincón
Raúl López Roldán
Aquiles Jorge Morales González
Héctor Moreno Alfaro
Gabriel Moreno Pecero
Rodrigo Murillo Fernández
María Guadalupe Olín Montiel
Ricardo Enrique Ortiz Hermosillo
Alexandra Ossa López
Walter I. Paniagua Zavala
Natalia del Pilar Parra Piedrahita
Margarita Puebla Cadena
Luis Bernardo Rodríguez González
Margarita Rodríguez Trinidad
Juan Jacobo Schmitter
Guillermo Springall Cáram
Carlos Roberto Torres
Ángel Trejo Moedano
Héctor Valverde Reyes
Sergio Aurelio Zamora Castro
Comercialización
Brenda Aguilar Silis

Realización
HELIOS comunicación
+52 (55) 29 76 12 22
heliosmx.org

Índice

Presentación
Moisés Juárez Camarena 3

La decisión de construir el metro de la Ciudad de México
Bernardo Quintana Isaac 5

Primeras investigaciones para la selección de su procedimiento constructivo
Juan J. Schmitter M. 11

Criterios de diseño y sistema constructivo del metro
Ricardo Lasso Herrera 15

Maduración de un proyecto
Luis Vieitez Utesa 31

El privilegio de haber participado
Luis Bernardo Rodríguez González 37

El Túnel Tacubaya
Andrés A. Moreno y Fernández 43

Apuntes de un jefe de frente
Alfonso Chávez 47

Experiencias de un joven ingeniero
Carlos Martínez Molina 51

La Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica dedica esta edición conmemorativa a los cientos de jóvenes ingenieros que asumieron con total y absoluta responsabilidad y entrega, cada uno en su trinchera, estudios, diseño, proyecto y construcción de esta magna obra, así como a los miles de trabajadores que hicieron realidad las grandes ideas.

En especial, un sincero reconocimiento a quienes concibieron y llevaron la dirección del proyecto metro de la Ciudad de México: a Bernardo Quintana Arrioja, Ángel Borja Navarrete y Enrique Tamez González.

50 años del metro de la Ciudad de México

El pasado 4 de septiembre de 2019 se cumplieron 50 años de la inauguración de la línea 1 del metro de la Ciudad de México, que fue puesta en marcha en 1969. Con este motivo, la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica decidió recordar ese importante acontecimiento con la publicación de una edición conmemorativa de nuestra revista *Geotecnia*, que mostrará en forma simple y anecdótica algunos eventos que fueron vividos por algunos de los ingenieros que participaron en la obra durante esa época.

Desde años anteriores a su construcción, varios ingenieros visionarios manifestaron su inquietud de construir una obra de esta envergadura en la Ciudad de México, pero no fue hasta el año 1967 que el ingeniero Bernardo Quinta Arrioja, con el entonces regente de la ciudad, Alfonso Corona del Rosal, cristalizó este gran proyecto que resolvería la movilidad de la ciudad, que ya representaba problemas serios en ese tiempo.

Quintana encargó toda la parte técnica de las primeras tres líneas del metro a Enrique Tamez González, quien movilizó a un equipo de ingenieros constructores y proyectistas cuyo común denominador fue la geotecnia.

Con esta gran visión, Enrique Tamez se dio a la ardua tarea de revisar, analizar y proponer todas las soluciones geotécnicas que representaron los diseños de los tramos y estaciones en los suelos blandos de la ciudad para permitir no sólo la construcción de las líneas, de sus depósitos y talleres en condiciones de estabilidad y seguridad, sino también su adecuado comportamiento a corto y largo plazo ante la acción de los sismos y del hundimiento regional, con el fin de lograr una obra duradera y de calidad para el servicio a los ciudadanos.

Las aportaciones que se lograron en la ingeniería geotécnica mexicana derivadas del proyecto del metro, como lo fueron la exploración, las pruebas de laboratorio, los estudios y análisis de la estabilidad y de los procedimientos constructivos, entre otros, fueron la piedra angular de una geotecnia mexicana que sirvió de base para la elaboración de otros proyectos de estructuras subterráneas que años más adelante se construyeron en la Ciudad de México y en nuestro país.

Desde sus inicios, la participación del Instituto de Ingeniería de la UNAM fue necesaria para estudiar y revisar los primeros análisis geotécnicos establecidos por el ingeniero Tamez. De esta forma, el 17 de mayo de 1996 fue publicada la Memoria de la Reunión Conmemorativa "40 años de Investigación y Práctica en Geotecnia", en la que participaron el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el Grupo ICA y la empresa Solum, y que contiene varios artículos del metro de la Ciudad de México.

Esta magna obra construida en los suelos blandos de la Ciudad de México, sujetos, como ya se dijo, a la acción sísmica y al hundimiento regional, es insignia de la ingeniería geotécnica mexicana, y fue el origen de muchas excavaciones que hoy en día parecieran audaces, pero que están soportadas por las experiencias obtenidas en las primeras líneas del metro.

A lo largo de estos 50 años, una gran cantidad de artículos técnicos han sido escritos por ingenieros que participaron en el diseño geotécnico de las diferentes líneas de la red y divulgados en las revistas técnicas especializadas, editadas por varias sociedades técnicas, entre ellas la Sociedad Mexicana Ingeniería Geotécnica (anteriormente llamada Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos), la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural y la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

Actualmente es un privilegio para la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica presentar en su revista *Geotecnia* esta edición conmemorativa de los 50 años de haberse inaugurado la línea 1 del metro de la Ciudad de México como un reconocimiento a la ingeniería geotécnica mexicana y a los ingenieros que participaron en estos trabajos.

Moisés Juárez Camarena
Presidente de la Mesa Directiva 2019-2020

ETERNA-MATIC
EELE

La decisión de construir el metro de la Ciudad de México

Bernardo Quintana Isaac

El 4 de septiembre de 2019 se cumplieron 50 años del inicio de operaciones del metro de la Ciudad de México. Muchas vicisitudes han transcurrido desde su inauguración; sin embargo, previamente a su diseño y construcción ocurrieron otras tantas situaciones y controversias en las que debieron superarse obstáculos y escepticismos, tuvieron que conciliarse intereses divergentes y hubo que alinear decisiones de políticas públicas con directrices esencialmente técnicas.

Se afirma que los primeros indicios de su concepción surgieron en la década de 1950, pero está escrito que a finales de 1959 el ingeniero Bernardo Quintana Arrioja –entonces presidente de ICA–, platicando con el vicepresidente de la empresa, arquitecto Ángel Borja Navarrete, le decía una vez más que los tranvías y camiones de la ciudad eran una verdadera calamidad, que se necesitaba insistir ante las autoridades en la construcción de un nuevo sistema de transporte público…

Desde esa época, la industria de la construcción ya padecía lapsos de casi total inactividad, que siempre coincidían con el proceso sexenal de retiro del presidente saliente y la llegada del nuevo presidente, cada uno con sus respectivos equipos de trabajo. La empresa ICA aprovechaba la baja de actividades para explorar algunas propuestas de proyectos que luego bien podrían interesar al nuevo gobierno.

Así fue ideado y concebido el proyecto del metro. A instancias del Ing. Bernardo Quintana Arrioja, ICA, durante al menos dos cambios de gobierno, avanzaba en esquemas y prediseños, al tiempo de insistir ante las autoridades respectivas en la necesidad de construir un nuevo sistema de transporte colectivo, proyecto que era sistemáticamente ignorado por el Lic. Ernesto P. Uruchurtu, el "regente de hierro", quien nunca simpatizó con el concepto.

En 1964, después de que se inauguraron los trabajos que ICA realizó en el "Puerto Piloto de Alvarado", en Veracruz, el Ing. Quintana Arrioja –animado porque constató que los trabajos del metro de Tokio habían superado sus problemas de subsuelo– decidió encomendar al equipo técnico recién desocupado llevar los estudios ya avanzados al nivel de propuesta, para el diseño y construcción de un transporte subterráneo para la Ciudad de México.

Imagen página anterior
Proceso constructivo de la estación Juárez, calle Balderas.

Presentada por el profesor Tamez, una técnica tan sofisticada para la época como la del muro Milán parecía ser de una gran sencillez, y sus principios, de una lógica implacable.

Se hicieron pruebas en un sitio en la colonia Agrícola Oriental. Fue una sorpresa que presidiéndolo asistiera Bernardo Quintana acompañado por otros gerentes de las empresas que integraban el Grupo ICA. Tamez se encargó de explicar el experimento y sus resultados. Cuando terminó, la reflexión de los decisores motivó un silencio que quizá pareció a los presentes más prolongado de lo que en realidad fue, dada la trascendencia del momento. La exposición de Tamez en aquella ocasión ha sido calificada como magistral.

Por fin Bernardo Quintana rompió el silencio: "Este es el procedimiento. Enrique, vente conmigo para que diseñes la construcción del metro con este sistema…"

Enrique Tamez,
Ingeniero a profundidad

Medalla emitida por la SMMS en reconocimiento a Enrique Tamez González.

En septiembre de 1966, el presidente Gustavo Díaz Ordaz designó un nuevo regente para la Ciudad de México: el general y licenciado Alfonso Corona del Rosal. Desde luego, el Ing. Bernardo Quintana Arrioja decidió presentar al nuevo responsable del gobierno del entonces Distrito Federal, tan pronto como fue posible, la propuesta de su empresa para contribuir a solucionar el problema del transporte público, que todos sabían ya agobiaba a la capital.

El Ing. Quintana se dio cuenta de que para sumar voluntades y decisiones políticas propicias tendrían que ofrecer capacidades de organización técnica y de construcción conjuntas, con los respaldos económicos y financieros necesarios. En razón de eso revisó anticipadamente con su equipo de trabajo el material de la presentación y estableció la estrategia a seguir: avanzar poco a poco, convenciendo en cada paso.

Persuadir al regente no fue tan fácil como ahora podría parecer. En un testimonial que escribió el Lic. Corona del Rosal –para un libro en memoria del Ing. Bernardo Quintana Arrioja, ya fallecido–, decía que al llegar a la Jefatura del Departamento del Distrito Federal el transporte de la ciudad ya estaba saturado. Recibió una visita del Ing. Quintana Arrioja, quien le habló en términos generales de un transporte colectivo subterráneo y sin más lo invitó a comer ese mismo día a su casa.

Comieron, y luego de platicar de temas diversos, lo invitó a pasar a un salón donde había una pequeña exhibición con todo el material. Junto con los hermanos Ángel y Gilberto Borja Navarrete le explicaron el proyecto del metro, mientras le mostraban un audiovisual que ya tenían preparado. A pesar de que todo le pareció lógico y factible, reconoció que él no tenía los conocimientos para entender ni juzgar la información que le presentaron.

En una segunda visita les manifestó sus dudas respecto del subsuelo y los temblores, y obtuvo respuestas en principio tranquilizadoras, pero no del todo. De regreso a sus oficinas, mientras circulaban por el paso a desnivel de Fray Servando Teresa de Mier bajo Tlalpan, en Tlaxcoaque, el Ing. Quintana le dijo: "Mire, señor regente: el túnel que acabamos de pasar es igual al que vamos a hacer para el metro". Casi convencido, el regente argumentó todavía: "¿Y el financiamiento?", a lo que Bernardo Quintana –quien parecía tener respuesta para todo– le contestó que ya había hablado con representantes de la banca francesa y que había disposición para otorgar un crédito al gobierno.

El proyecto no era sencillo; previamente ICA había desarrollado muchos trabajos de investigación, estudios y diseños en gabinete, en campo y en el laboratorio. En un terreno de la colonia Agrícola Oriental realizó –con intervención directa de Enrique Tamez, ingeniero de ICA– la excavación y construcción de un túnel de prueba con piso y muros a seis metros de profundidad. Apenas en sus cuarenta, Enrique Tamez asumió la responsabilidad de defender la certeza de que el metro podía construirse en el suelo de la Ciudad de México, particularmente en su modalidad subterránea. Sus argumentos, después de discusiones no siempre tersas, fueron siempre bien fundamentados.

Por otra parte, también se anticipaba que la ejecución del proyecto implicaba construir obras civiles complicadas, expropiar propiedades inmuebles, usar equipos especializados y capacitar personal para la construcción de las obras y para la operación del nuevo sistema de transporte colectivo. Afortunadamente, ICA contaba con la masa crítica de un grupo de empresas

vigorosas y muy activas en el desarrollo de México, que hicieron posible afrontar con responsabilidad y seguridad el compromiso de llevar a cabo el proyecto.

Antes de aceptar la propuesta, el regente Corona del Rosal todavía pidió reunir "a ingenieros expertos en mecánica de suelos y estructuras, para que escuchen todo esto y opinen". Entonces se organizaron varias reuniones con la asistencia de personajes de la ingeniería como Raúl Marsal, Marcos Mazari, Emilio Rosenblueth y, desde luego, Enrique Tamez, donde se dio a conocer y se discutió el proyecto. La reunión final se desarrolló en el auditorio de la Compañía Mexicana Aerofoto, empresa que ICA había adquirido recientemente.

En esta reunión, aun cuando aparentemente –en lo teórico– estaban resueltas todas las dudas, persistían en algunos personajes ciertas suspicacias, ante lo cual el Ing. Quintana Arrioja hizo la invitación para ir a ver el túnel experimental, excavado y construido en la colonia Agrícola Oriental. En esa construcción se materializaba todo lo que habían estado planteando en las reuniones de trabajo, y de esta manera, una semana después de la visita –y prácticamente a un año de haber llegado a la Regencia– el jefe del Departamento del Distrito Federal autorizó a su dependencia la firma del contrato respectivo. Los trabajos iniciaron en junio del 1967.

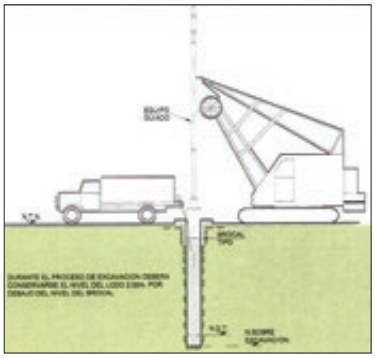
Para finalizar el testimonial mencionado, el Lic. Corona del Rosal comenta que oportunamente recibió de parte del Ing. Quintana Arrioja el compromiso escrito que de que el costo y el plazo de ejecución de la obra no rebasarían los términos pactados. Al finalizar el plazo, los trabajos del metro concluyeron. Sus tres primeras líneas se integraron por 40 kilómetros y 36 estaciones, construidos todos en 40 meses –conforme a lo programado– sin exceder el costo convenido. Había nacido el Sistema de Transporte Colectivo Metro (STCM), que inició con la operación de 577 carros en las tres primeras líneas. A la distancia, Corona del Rosal se percató de que había sido una decisión histórica.

Detrás de estos hechos de indudable valor histórico subyacen circunstancias previas que debieron concurrir para que los sucesos se desenvolvieran de la forma en que lo hicieron.

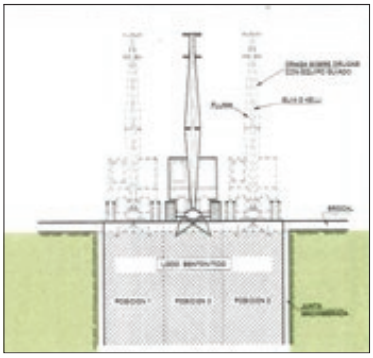
El transporte colectivo disponible antes de la operación del metro prestaba un servicio deficiente sobre rutas de trazo arbitrario, en horarios no coordinados, con vehículos incómodos y deteriorados; todo ello, en conjunto, clamaba por un nuevo tipo de servicio. Por lo tanto, había la convicción generalizada en el gobierno local y en la sociedad de que había que tomar medidas radicales que contribuyeran a mitigar el problema.

Por otra parte, a principios de los sesenta se utilizaba con éxito el transporte subterráneo en las grandes ciudades del mundo, no sólo en países más desarrollados, sino en otros con economías de la escala de México, como España o Argentina. De esta manera, su pertinencia era clara y el único problema que parecía insalvable era la composición física y el comportamiento mecánico del subsuelo, que con un 80% de contenido de agua y una alta compresibilidad en algunas zonas exigía recomendaciones específicas para garantizar el buen comportamiento de las estructuras del proyecto a largo plazo.

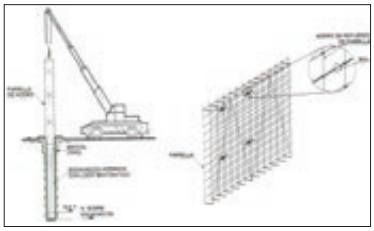
Además, su trazo presentaba otros problemas, como la existencia de numerosos vestigios arqueológicos, cuyo tratamiento había que definir y conciliar con las autoridades encargadas de su preservación y mantenimiento.



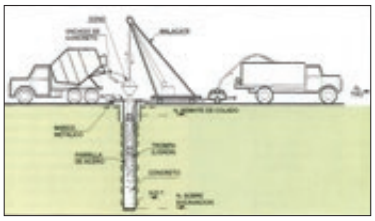
Excavación para el muro colado de sitio.



Vista frontal del proceso de excavación del muro.



Introducción de la parrilla de acero en la cepa.



Colado del tablero (tablestaca).

Imagen superior:
Cruce de las avenidas Chapultepec e Insurgentes, 1966.

Imágenes inferiores y página siguiente:
Proceso constructivo de la estación Insurgentes, línea 2.

Adicionalmente había que considerar el carácter sísmico de la región, así como los reducidos espacios viales heredados de la traza colonial. Desde luego, también concurría el propósito de conservar el patrimonio histórico y reducir en lo posible la afectación de bienes inmuebles.

No obstante las dificultades mencionadas, se formalizó la contratación para diseñar y ejecutar el proyecto de la obra civil con empresas del Grupo ICA, que fue el promotor; también se seleccionó y se propuso la tecnología francesa de rueda neumática, utilizada en ese entonces en el metro de Montreal, por considerarse la mejor opción para el equipo rodante y las instalaciones electromecánicas. El proyecto electromecánico se contrató con la compañía Société Française d'Études et de Realisations des Transports Urbains (Sofretu), con objeto de que transmitiera a los técnicos mexicanos su tecnología y experiencia en la materia.

Sobre este último punto, debe resaltarse que una vez captadas las tecnologías francesas durante la ejecución de la primera etapa, los ingenieros mexicanos las asimilaron totalmente, y desde entonces continuaron no sólo siendo autosuficientes, sino capaces de exportarlas exitosamente a otros países.

Con tal conjunción de capacidades y el esfuerzo de más de 700 profesionistas y miles de trabajadores, se realizó la construcción del proyecto contratado, primera etapa de una de las obras civiles más grandes e importantes en la historia de la Ciudad de México por su dimensión y su costo, pero sobre todo por el beneficio para sus habitantes. Prueba de ello ha sido que durante los terremotos que asolaron a la Ciudad de México el 19 de septiembre de 1985 y nuevamente el mismo día en 2017 –irónicamente

después del correspondiente simulacro de conmemoración–, las construcciones e instalaciones del metro no sufrieron daños de importancia, a pesar de que ambos fenómenos telúricos han sido catalogados como los de mayor magnitud de la época moderna en la región.

El servicio que desde sus inicios presta el metro de la Ciudad de México es colectivo y su historia afirma que colectiva fue y seguirá siendo su realización. También se presta para ver –virtualmente– al metro como el principio de una ciudad subterránea bajo otra ciudad. Lo que es real e innegable es que el metro es el transporte colectivo por excelencia, que en comparación con cualquier otro transporte de combustión, desplaza tres veces más pasajeros y consume la mitad de la energía.

El Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México se integra actualmente por una red de 226.5 kilómetros de líneas en operación; 195 estaciones; dos puestos centrales de control; ocho talleres de mantenimiento y 384 convoyes con 3,333 vagones. La inversión total, a costos de reposición de finales de 2018, asciende a 400,000 millones de pesos. Hoy día traslada –en algo más de 10 días– el mismo número de pasajeros que desplaza en un año el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México; tal es la magnitud de la movilidad que brinda el metro a sus usuarios, 50 años después de su puesta en marcha.

El metro de la Ciudad de México ha alcanzado una etapa en la que debe reponer sus activos. Por tanto, es oportuno plantear un nuevo Plan Maestro del Metro como una herramienta fundamental para orientar a la urbe –de forma gradual– hacia un desarrollo menos disperso y más policéntrico, que tome en cuenta las demandas y cambios en la movilidad de la población derivados de nuevos polos de atracción, como el nuevo sistema de aeropuertos para la CDMX y su obligada red de accesos desde diversos puntos de la ZMVM.

Igualmente deberá tomarse en cuenta el Tren Express y las vías rápidas desde el Aeropuerto Internacional de México hacia los otros aeropuertos del sistema, el impacto del tren México-Toluca –que deberá concluirse en un horizonte no mayor a tres años– y la consecuente modernización del Cetram Observatorio, la Central de Autobuses de Oriente y el complejo Observatorio.

Estos sistemas de transporte masivo apoyarán la economía e impactarán favorablemente el medio ambiente y el desarrollo inmobiliario, en beneficio de la calidad de vida del usuario, mejorando tiempos de desplazamiento, costos, comodidad, seguridad y confiabilidad. Bien vale la pena comprometernos todos para lograrlo.

Las soluciones urbanístico-arquitectónicas

El día que obtuvieron el contrato para el metro, Quintana y Borja tuvieron un acuerdo: si querían cumplir en tiempo y costo con el encargo, debían evitar los imponderables que ofrecían las estaciones (40 en total) en caso de encargarlas a distintos despachos de arquitectos, tanto por la unidad estilística requerida por el sistema, como por la dificultad de controlar a diversas y connotadas personalidades artísticas. Este problema lo habían conocido recientemente en el metro de Montreal, que no se había terminado oportunamente porque los arquitectos de las distintas estaciones no acompasaron su proceso creativo con los calendarios de la obra. Borja "se echó ese trompo a la uña" y le aseguró a Quintana que con su equipo semilla, de jóvenes arquitectos, se podrían tener los mejores resultados sin los riesgos del protagonismo "de autor". Las estaciones son en su mayoría subterráneas y sólo las de Insurgentes y Candelaria se manifiestan a la vista sobre y bajo el nivel de la calle; estos dos casos se encomendaron por excepción al arquitecto Salvador Ortega Flores y a Félix Candela, respectivamente. Las estaciones sobre la Calzada de Tlalpan quedan a nivel de calle, pues en este tramo se aprovechó el derecho de vía de los tranvías a Xochimilco, condición que las hacía diferentes del resto y requerían una expresión unitaria; se encomendaron a Enrique del Moral, el Gringo. A Luis Barragán le fue solicitada una asesoría sobre materiales y colores.

Estos fueron los únicos encargos hechos a arquitectos por fuera del equipo, pero siempre bajo la dirección del arquitecto Borja.

Ángel Borja Navarrete.
Vida y obra

ADC
AD
TRANSI-COCUS

Primeras investigaciones para la selección de su procedimiento constructivo

Juan J. Schmitter M.

Con justa razón puede decirse que en el año 1967, al iniciarse la construcción del anhelado metro de la Ciudad de México, se configuró un notable parteaguas entre los procedimientos de construcción subterránea que antes de ese año se consideraban imposibles y los que posteriormente, con las nuevas tecnologías puestas en operación, se transformaron en posibles.

Cabe mencionar que este notorio avance no se habría dado sin el relevante papel que desempeñó en el contexto de este portentoso cambio el entonces novedoso "muro Milán", desarrollado en la Italia de los cincuenta.

Como bien se sabe ahora, el muro Milán se forma *in situ*, cuando fragua el concreto fresco colado en una zanja excavada en el subsuelo, cuyas paredes han sido estabilizadas mediante lodo bentonítico y en la cual previamente se ha colocado una parrilla de acero de refuerzo.

De acuerdo con los antecedentes históricos que relatan Santoyo y Segovia en el capítulo 3 del *Manual de construcción geotécnica* (2002), la utilización de lodo bentonítico para estabilizar pozos de agua y petroleros ya era ampliamente conocida en 1910, mientras que no fue hasta el año 1938 cuando el ingeniero italiano Carlo Veder utilizó el concepto para estabilizar zanjas excavadas en el subsuelo. Posteriormente, entre 1950 y 1951, los ingenieros italianos Veder y Marconi, trabajando independientemente, desarrollaron el muro Milán, que fue utilizado con gran éxito en la construcción de las primeras líneas de metro de esa ciudad, que le dio su nombre, excavadas en suelos aluviales limoarenosos. En 1962 está técnica llegó a Estados Unidos; se utilizó para construir la cimentación de un edificio en la ciudad de Nueva York y posteriormente, en 1967, para la construcción del metro de San Francisco y para el World Trade Center de Nueva York.

Imagen página anterior
Proceso constructivo del metro avenida Balderas.

PRIMERAS INVESTIGACIONES

Después de un largo periodo de análisis y búsqueda de soluciones al problema del tránsito urbano de la Ciudad de México, a finales de la década de 1960 el gobierno en funciones tomó la decisión de poner en marcha el proyecto y la construcción de un transporte masivo metropolitano (metro), considerando prioritariamente la alternativa subterránea, por estimarla la menos invasiva de las opciones.

Por ese entonces ya se contaba con experiencias en la novedosa (para México) tecnología tunelera en suelos blandos mediante el uso de escudos, principalmente de frente abierto, y se oía mencionar en la bibliografía técnica el notable éxito alcanzado por los muros Milán para facilitar la construcción de estructuras subterráneas (metro y sótanos de edificios), principalmente en Europa.

Aunque en México la utilización del lodo bentonítico para estabilizar perforaciones en suelos arcillosos blandos ya era ampliamente conocida, no se sabía qué pasaría si se utilizaba para estabilizar zanjas de sección transversal de gran longitud con respecto a su ancho.

Para superar esta duda, con la iniciativa de Enrique Tamez González, directivo de la empresa Solum del Grupo ICA, apoyado por sus cercanos colaboradores, se tomó la decisión de hacer una primera investigación de campo en el subsuelo arcilloso del patio de maquinaria, asociado a sus oficinas de la colonia Agrícola Oriental, en la Ciudad de México, utilizándose una almeja convencional y lodo bentonítico para estabilizarla, de características similares al utilizado en la perforación de pilas de cimentación y sondeos exploratorios, excavación que resultó estable.

Faltaba entonces confirmar la posibilidad de colar concreto bajo lodo bentonítico, lo cual implicaba utilizar un tubo tremie, siguiendo las reglas de operación establecidas por Gerwick (1964); esto se llevó a cabo en otro terreno de la misma colonia Agrícola Oriental, donde se realizó con razonable éxito el colado de dos muros Milán paralelos, con varios paneles de longitud, y se procedió después a la excavación entre ambos, encontrándose que el concreto de los muros fraguó como se esperaba, pero las juntas entre tableros dejaron mucho que desear.

Comida de trabajadores del metro.

Bernardo Quintana durante visita a las instalaciones del metro.

Proceso constructivo de la estación Salto del Agua, línea 1.

Instalaciones de las estaciones Pino Suárez y San Lázaro.

Era obvio que había muchos detalles que resolver para llegar a dominar la novedosa técnica de construcción, especialmente en lo relativo a las juntas de construcción entre tableros.

SELECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

En 1967, meses antes de iniciar formalmente la construcción del metro de la Ciudad de México, se llevó a cabo una reunión técnica de alto nivel para seleccionar el procedimiento que se utilizaría para las primeras líneas, tomando en cuenta que serían predominantemente subterráneas.

Los varios especialistas que participaron en dicha reunión debieron escoger entre el uso de escudos tuneleros, cuya experiencia en obras de drenaje empezaba a ser palpable, y la utilización de la recién llegada tecnología del muro Milán, que todavía no era aplicada en México en un proyecto real.

Los expertos discutieron ampliamente los pros y los contras de ambas opciones, y su decisión final se inclinó hacia el uso el muro Milán, porque de esta manera se podrían atacar simultáneamente un gran número de frentes, lo cual era favorable para el ambicioso programa de obra. Adicionalmente debió reconocerse que la tecnología tunelera no estaba tan avanzada para excavar túneles relativamente someros como los que se pretendía construir para las primeras líneas del metro.

Cabe mencionar que, gracias al continuo desarrollo que ha tenido a través del tiempo el proceso constructivo denominado muro Milán, en la actualidad se sigue aplicando con frecuencia, tanto para nuevas líneas del metro como para la construcción de los sótanos cada vez más profundos que requieren los recientes edificios que se construyen en la ciudad capital.

Por su parte, los escudos de frente abierto, con excavación manual o mecanizada, han sido utilizados con gran éxito en la construcción de nuevas líneas de metro en suelos competentes; más recientemente, en suelos arcillosos blandos y compresibles se ha utilizado con gran éxito un escudo presurizable o EPB (de presión balanceada térrea).

CERVEZA

METRO
CINCUENTA
AÑOS

Criterios de diseño y sistema constructivo del metro*

Ricardo Lasso Herrera

Es conocido tanto dentro como fuera del país que los estudios previos que se realizaron para hacer factible la construcción del metro –que antes se juzgaba casi imposible por las características del subsuelo de la Ciudad de México–, se debe a la iniciativa del Ing. Bernardo Quintana, presidente del Grupo ICA y a sus técnicos, quienes colaboraron estrechamente con las autoridades del Departamento Central en busca de soluciones racionales al grave problema del transporte colectivo de la gran metrópoli.

Aceptada la factibilidad del proyecto, se creó por decreto presidencial la empresa descentralizada Sistema de Transporte Colectivo (STC), para responsabilizarla de la construcción y operación del metro. Dicha empresa contrató para estos fines los servicios de las firmas que se anotan al final de este artículo.

La siguiente descripción está basada en innumerables publicaciones, entre las que destacan especialmente la exposición presentada al VII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones por el personal técnico del ISTME (Ingeniería de Sistemas de Transporte Metropolitano), del cual el Arq. Ángel Borja es director general y el Ing. Enrique Tamez, director técnico; otra de las publicaciones de referencia es la revista *Ingeniería*, de la UNAM, editada en octubre de 1969.

Estas informaciones fueron complementadas con observaciones directas y diálogos con algunos jefes de obra. Con todo ello se elaboró el siguiente artículo, que gentilmente revisó y corrigió el Ing. Luis Vieitez, jefe del Departamento de Ingeniería Civil del ISTME.

El éxito constructivo de una obra de la importancia del metro depende fundamentalmente de la aplicación de los principios de la mecánica de suelos. Son problemas por ella resueltos la elección del tipo de estructuras, su grado de flexibilidad para adaptarse a los movimientos diferenciales del subsuelo, la determinación de su peso más apropiado, los estudios y consideraciones para determinar el empuje de tierras, la estabilidad de los taludes y del fondo de las excavaciones, el efecto de los sismos y los procedimientos constructivos. En este orden se tratarán brevemente dichos puntos y al final de éstos se presentará, también brevemente, una exposición sobre la planeación y funcionamiento del sistema de transporte colectivo.

Imágenes página anterior
Av. Chapultepec y Dr. Río de la Loza, construcción de la estación Cuauhtémoc.

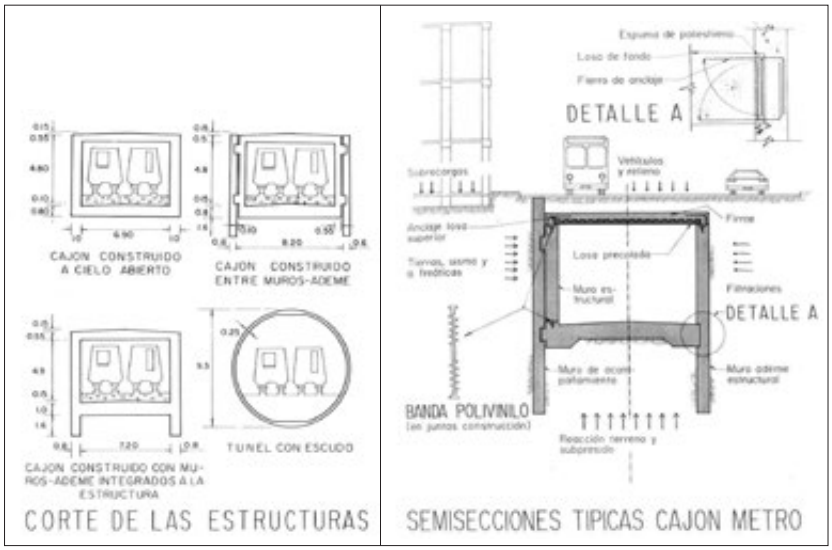
Estela conmemorativa del inicio de las obras del metro.

Cartel conmemorativo de los 50 años del metro.

* Este texto fue tomado del libro de Ricardo Lasso Herrera *Actualidades de construcción*, México, 1971.

Figura 1.

Figura 2.



1. TIPO DE ESTRUCTURAS

Después de varios estudios (figura 1) se prefirió al tipo convencional de túnel una sección de tipo cajón, alojada en una excavación a cielo abierto con taludes y, cuando las limitaciones de espacio lo exigían, construyendo primero las paredes del cajón, según se describe más adelante, para luego excavar entre ellas, apuntándolas conforme iba progresando la excavación. Esta última solución presenta dos variantes: consiste la primera en construir otro cajón de menores dimensiones entre las paredes, a las cuales se liga mediante llaves horizontales de cortante, a fin de formar un solo conjunto. En la segunda se integran las paredes previamente construidas, a la estructura, ligándolas mediante losas tanto en el fondo como en la parte superior, estas últimas resueltas a base de elementos prefabricados, sobre los cuales se cuela una losa de liga; los muros laterales se prolongan debajo de la losa para controlar la estabilidad del fondo de la excavación.

La primera de las variantes, esto es, la de emplear las paredes como muros de acompañamiento –semisección izquierda de la figura 2– se aplicó inicialmente cuando el concreto colado dentro del lodo bentonítico (a que se hará referencia más adelante) presentaba deficiencias tales como oquedades, fisuras, etc.

Se aplicó en los tramos donde había mayor espesor de arcillas expansivas y se requería por tanto mayor peso de las estructuras, fungiendo los muros como ademe en la etapa de construcción, y como lastre después en el conjunto estructural.

En el segundo caso (ver semisección derecha de figura 2), la losa inferior se conecta a los muros –en este caso, estructurales–, mediante anclajes colocados previamente en el armado, al nivel de dicha losa, el cual durante el colado se protege con espuma de poliestireno (ver detalle en figura 2).

La profundidad máxima de las excavaciones para cajones es de 8 m, salvo en el cruce con otras líneas.

Finalmente, en un tramo al suroeste de la línea número 1, tanto por exigencias de tazo como por alojarse la estructura en material compacto, se resolvió la sección tal como se muestra en la figura 1: con un túnel de 9 m de diámetro, atacado con escudo.

Estampilla conmemorativa de la construcción del metro de la Ciudad de México.

2. FLEXIBILIDAD DE LA ESTRUCTURA

El hundimiento del suelo de la Ciudad de México (debido a causas ampliamente conocidas), de 45 cm anuales como promedio en el lapso de 1935 a 1955, se ha reducido a 8 cm anuales, por la disminución del bombeo.

Los distintos espesores de las capas de arcilla del subsuelo, su diferente compresibilidad, el desigual abatimiento de los mantos acuíferos en las diversas zonas, etc., han ocasionado que el hundimiento de la ciudad no sea uniforme. En la figura 3 se muestran las tres zonas representativas del subsuelo de la Ciudad de México: 1) zona con depósitos lacustres de arcilla blanda, hasta de 60 m de espesor y contenidos de agua de 500%, lo que le confiere características indeseables, como son baja resistencia al corte y

Figura 3.

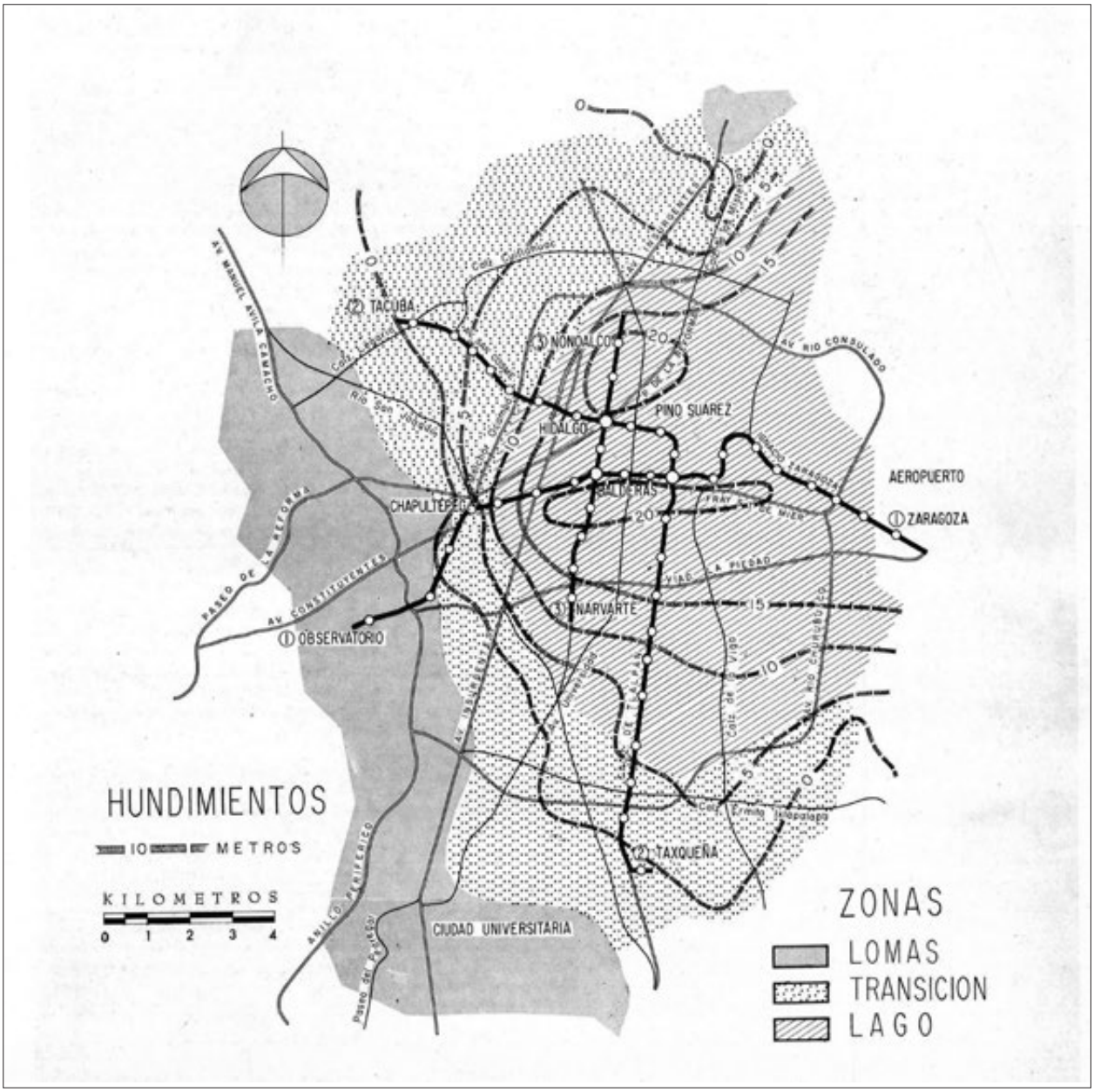


Figura 4. Perforadora Calweld extrayendo material en una zanja donde será construido uno de los muros estructurales o en su defecto uno de los de acompañamiento.

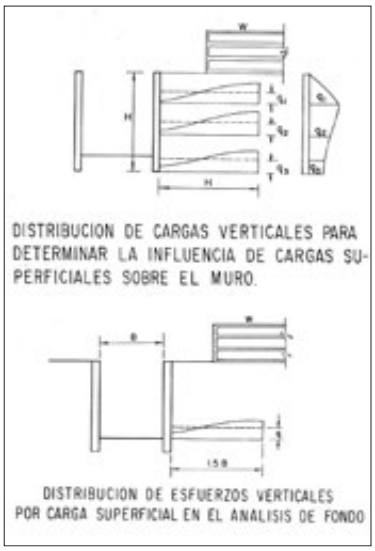
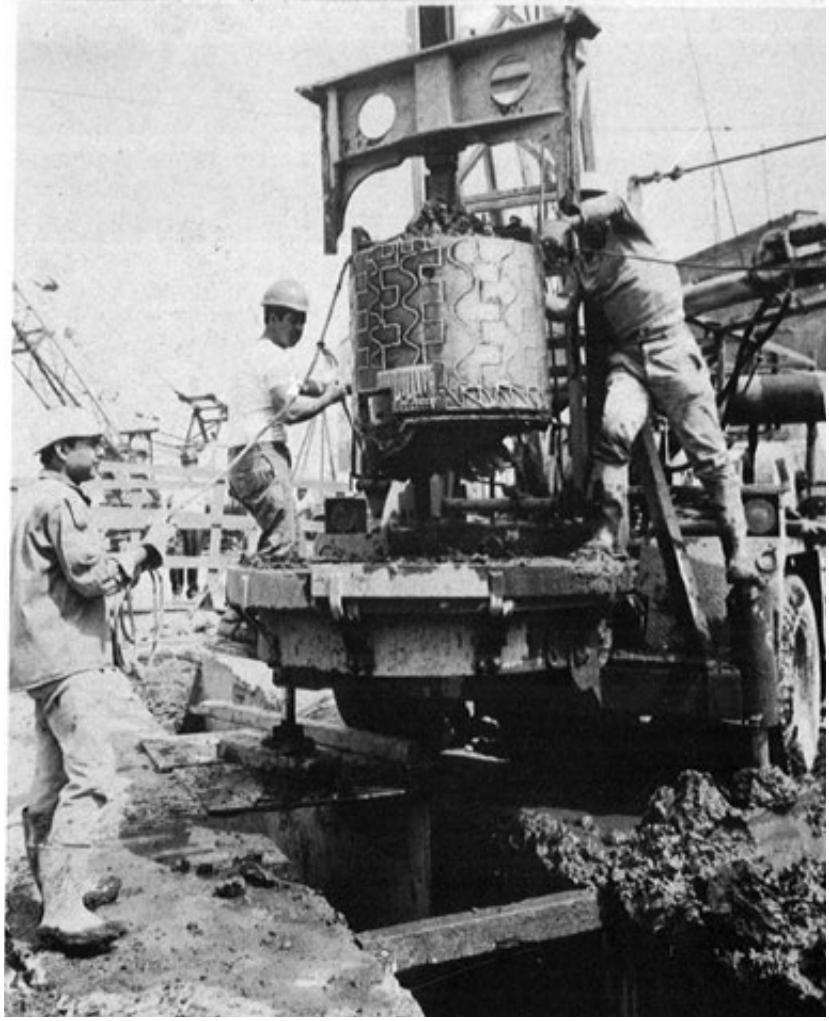


Figura 5.



alta compresibilidad; 2) zona de lomas, constituida por tobas volcánicas o corrientes basálticas, de gran dureza y alta resistencia al corte; y 3) la zona de transición, formada por depósitos fluviolacustres de 10 a 15 m de espesor y contenidos de agua de un 200%, en consecuencia de mejores características que la zona 1.

Debido a las deformaciones y al hundimiento general del suelo de la ciudad, se pensó en una estructura flexible, sin riesgos de fisuración ni de filtraciones, con juntas de construcción estancas de cloruro de polivinilo y neopreno, a cada 25 m; y en los cambios estratigráficos y de sección.

Pero por las dificultades constructivas y los fuertes gastos de mantenimiento que dicha estructura exigía, se optó por un cajón continuo, con juntas sólo en los cambios bruscos de la sección estructural, decisión basada en el estudio de las curvas de hundimientos futuros totales (figura 3), que se estima ya han acaecido en un 50% hasta la fecha, por lo que los cambios de pendiente que puedan presentarse no excederán del 1%, cifra despreciable si se tiene en cuenta la capacidad de tracción del tren, la cual le permite operar en pendientes hasta del 7%. Mayores cambios pueden ocurrir en distancias cortas, a consecuencia de variaciones del nivel freático, de recuperación de expansiones

durante la construcción, etc., y, previéndolos, bajo la vía se encuentra una capa de balasto de 35 cm de espesor, y el espacio vertical sobre el techo de los carros tiene 25 cm más de los estrictamente requeridos por las dimensiones del equipo rodante.

Por otra parte, como se concluye de observaciones en dos tramos experimentales de cajón continuo de 600 m de longitud, la lentitud de las deformaciones del terreno permite a la estructura ajustarse a ellas, por adaptación plástica del concreto, redistribuyéndolas por su misma flexibilidad. Esto a su vez restringe los movimientos diferenciales.

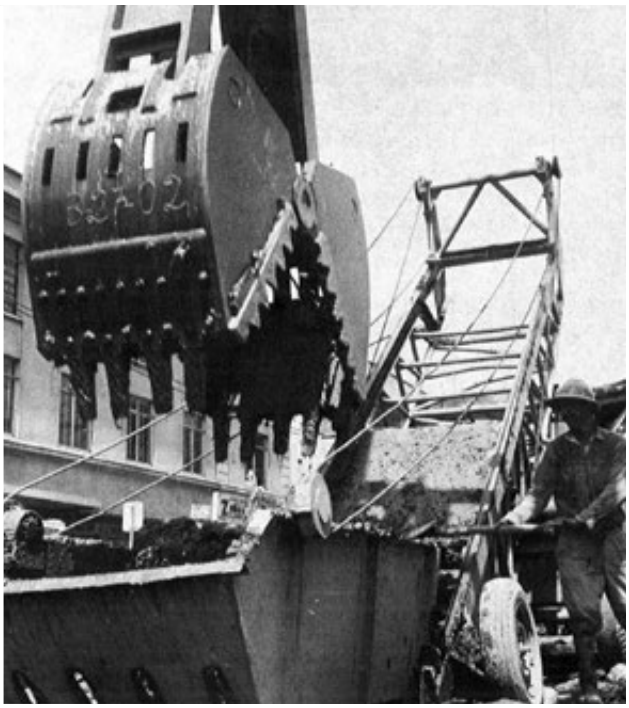
3. PESO DE LA ESTRUCTURA

La alta compresibilidad de las arcillas del subsuelo de México exige, para evitar asentamientos excesivos, que el peso de la estructura no sea mayor que el del material excavado. En cambio una estructura sobrecompensada (de menor peso que la excavación) tiende a emerger, como resultado de la expansión lenta del terreno.

Este es el caso del metro. Para evitar expansiones a largo plazo mayores de 15 cm, las estructuras tienen secciones mayores que las estructuralmente necesarias. Las sobrecompensaciones compatibles con dicha limitación de expansiones y con la economía de la obra variaron según las condiciones locales entre 1.5 y 2.5 toneladas por metro cuadrado.

En excavaciones que permanecen abiertas durante algún tiempo, la expansión, brusca al principio, continúa después a menor velocidad. Al cargar el terreno con el peso de la estructura se produce un asentamiento por recuperación de la expansión. Si la estructura es compensada (de igual peso al del volumen excavado) al cabo de dos o tres años la recuperación es total; en las sobrecompensadas puede ser parcial o nula, dependiendo del valor de la descarga.

Figuras 6 y 7. Cucharón de almeja dirigido descargando el producto de excavación de una de las zanjas que alojarán los muros laterales de la sección cajón. Este producto se vacía en una tolva que, accionada eléctricamente, sube unas guías y al final de éstas gira y carga los volteos.



Es posible en estructuras sobrecompensadas admitir valores de compensación mayores que los anteriores, siempre y cuando se pueda mantener previa a la construcción una descarga parcial que provoque una parte importante de las expansiones que se esperen después de construida la obra.

Esta posibilidad no pudo aprovecharse en el caso del metro por las limitaciones de tiempo y las dificultades para controlar la estabilidad de la excavación, ya que, debido a las expansiones, las arcillas pierden resistencia al corte.

4. EMPUJE DE TIERRAS

Para el análisis de los muros ademe se consideraron dos etapas: la de excavación del terreno entre muros y la posterior a la construcción.

En la primera etapa, el empuje del suelo y el hidrostático hacen que los muros tiendan a abatirse hacia la excavación, conforme se profundiza; para evitar desplomes se coloca un primer nivel de puntales antes de alcanzar la profundidad crítica de excavación. Se produce entonces en el terreno un estado de equilibrio plástico, y al seguir excavando y apuntalando otros niveles viene una redistribución del empuje, la cual depende del apuntalamiento y de la flexibilidad y continuidad del muro.

Figura 8. Introduciendo el refuerzo dentro de la excavación donde será construido, bajo el lodo bentonítico, el muro ademe integral Obsérvense las placas de espuma de poliestireno que evitarán demolicion es parciales en los muros, durante la extracción de las anclas de la losa de fondo.

Figura 9. Introduciendo el tubo tremie, dentro del cual el concreto vertido en su tolva escurrirá en la excavación sin mezclase con el lodo bentonítico (salvo las primeras revolturas, que por cierto son desplazadas al exterior por las siguientes; concreto que al final se retira).

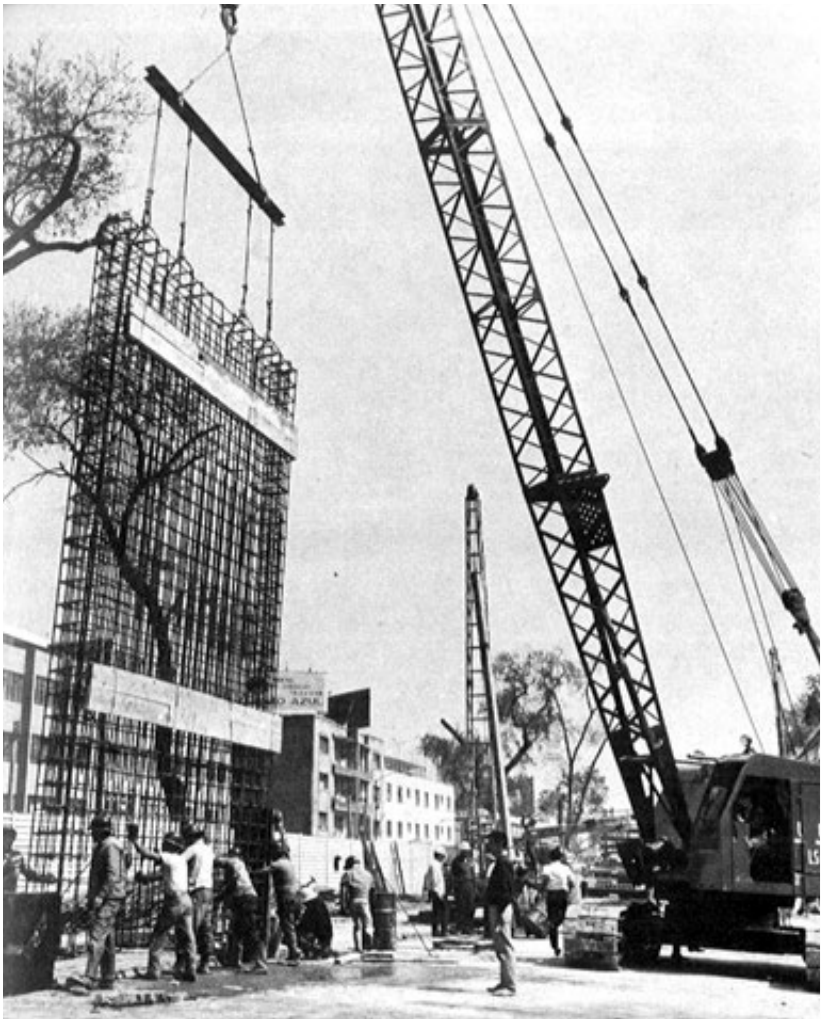


Figura 10. La revolvedora descargando directamente en la tolva del tubo tremie; éste es operado por la grúa para que el concreto –de alto revenimiento– escurra con facilidad.

Figura 11.

Figura 12.

Figura 13.

En la etapa final se supone que el empuje total es la suma del empuje hidrostático más el efectivo del suelo. Como las losas de pisos y de techo impiden todo desplazamiento lateral de los muros del cajón, para calcular el empuje del suelo se consideró el estado de reposo.

En sitios donde las construcciones próximas al metro sobrecargan el terreno, aumentando los empujes sobre los muros de la estructura, se determinó la influencia de la sobrecarga partiendo de una distribución elástica de ésta, obteniendo –para diferentes niveles– los diagramas de las presiones verticales producidas, y redistribuyendo uniformemente la parte de los diagramas comprendida entre el muro y una distancia igual a la profundidad de la excavación (figura 5).

5. ESTABILIDAD DE LOS TALUDES

La posibilidad de atacar a cielo abierto la excavación del extremo oriente de la línea número 1, por haber espacio disponible, hacía pensar en economías considerables, pero también en grandes problemas constructivos, ya que los resultados de experiencias previas habían sido desalentadores, por los fuertes deslizamientos que se presentaron.

Éstos ocurren generalmente por la base de los taludes y pueden ser de dos tipos: de desplazamiento o de traslación horizontal, generalmente provocados

por empujes hidrostáticos, y de giro o rotación según una superficie cilíndrica (figura 11).

En ambos casos, el movimiento se inicia con una expansión gradual del pie de talud o del fondo de la excavación, y se presentan luego grietas de tensión a lo largo de la parte alta de las excavaciones, proceso que se desarrolla en varias horas. Partiendo de su geometría, la resistencia al corte de fallas profundas se estimó de 1.0 a 1.2 t/m^2, mientras que con los análisis convencionales estos valores eran del orden de 2 a 3 t/m^2.

Como era fundamental la determinación más exacta posible de la resistencia al corte de las arcillas blandas, se sometieron varios especímenes de arcilla a diferentes tipos de prueba bajo distintas condiciones con la cámara triaxial, la veleta y el aparato de corte directo sueco modificado, y después de comparar los resultados se decidió adoptar el criterio de fluencia plástica en pruebas de corte directo drenadas, con carga controlada.

Con tal criterio se analizó la estabilidad de los taludes del tramo mencionado, habiéndose obtenido un factor de seguridad de 1.1 contra falla por deslizamiento lateral de taludes, y de 0.9 en el análisis bidimensional de una superficie cilíndrica profunda. Condiciones tan críticas obligaron a atacar las excavaciones en áreas cuadradas, a fin de convertir el problema de la estabilidad del fondo en un caso tridimensional.

Siendo desconocido el factor de seguridad logrado con este sistema, se construyó un tramo experimental, con resultados satisfactorios.

A partir de estos resultados, se estableció un procedimiento constructivo que limitaba los avances a 6 m, para garantizar el trabajo del suelo en tres dimensiones. Asimismo se exigió abatir el nivel freático antes de excavar para limitar y controlar las expansiones que se produjeran durante la excavación,

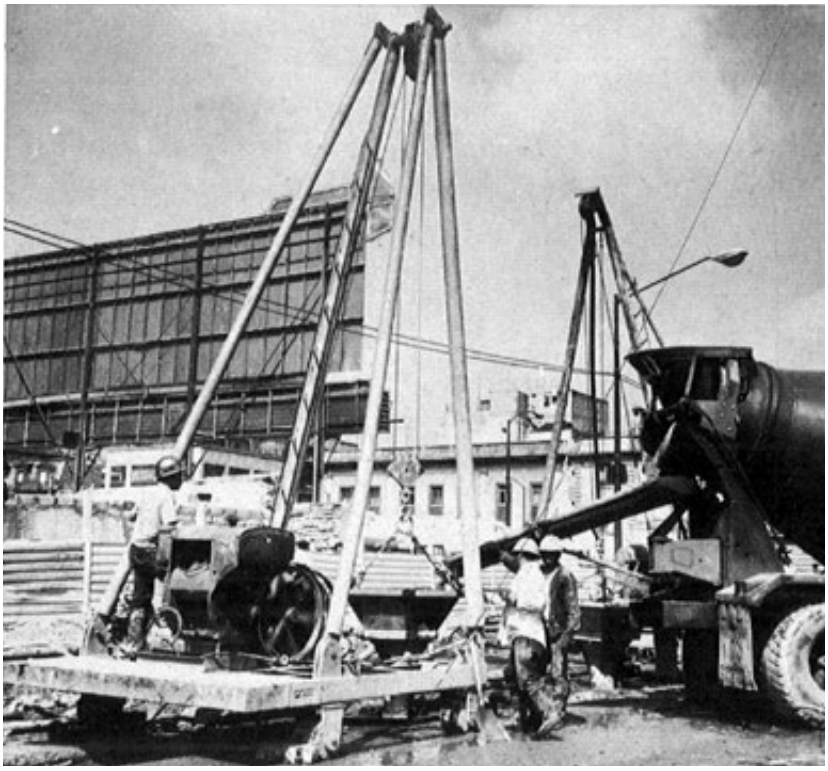


Figura 14. El tubo tremie operado con malacates durante el colado de los muros, lo cual indudablemente resulta más económico que el procedimiento que se muestra en la imagen anterior.

Figuras 15 y 16.
Excavando con cucharón de almeja entre dos muros ademe debidamente troquelados. Abajo: operando con gatos hidráulicos un troquel que debe actuar –con presiones predeterminadas– con los muros laterales.

Fue hasta 1967, con el proyecto del metro, cuando tuve la gran satisfacción de participar, como director técnico, en la nueva empresa ISTME, creada para realizar el proyecto y la coordinación técnica de la obra, cuando mi contacto con él se volvió frecuente. Bernardo había aceptado el reto de diseñar, construir y poner en operación los primeros 42 kilómetros del Sistema de Transporte Colectivo de esta ciudad, en un reducido plazo de tres años y medio, reto que parecía casi imposible si se tenía en cuenta el alto grado de dificultad y la casi total inexperiencia de nuestra ingeniería mexicana en este tipo de obra. Pero él tenía gran confianza en su propia capacidad como hombre guía de un grupo de personas acostumbradas a aceptar y vencer nuevos retos, y así se convirtió de inmediato en el director general de proyecto y en el ingeniero residente de toda la obra, funciones cuya responsabilidad asumió de manera permanente hasta el día en que el metro inició su servicio al público, en la fecha prometida, al final del sexenio. En este breve periodo pude apreciar la gran capacidad realizadora de Bernardo, basada en su innata habilidad para delegar en sus colaboradores la autoridad sin abdicar y, al mismo tiempo, compartir totalmente con ellos la responsabilidad.

Enrique Tamez, *Testimonios sobre Bernardo Quintana Arrioja*

En 1966, al llegar don Alfonso Corona del Rosal al gobierno del Distrito Federal, las cosas cambiaron como del negro al blanco. El metro se contrató a principios de enero de 1967 y las excavaciones se iniciaron en junio. Visitando obras de este tipo en muchas ciudades, fue que adoptamos la técnica del muro Milán, que es de concreto colado dentro del agua, y que aquí fue el "muro México".

Uno de los argumentos que se tenían en contra del metro era que no se podía construir un túnel largo en subsuelo fangoso. Pues ya pasaríamos 16 metros por debajo de la Torre Latinoamericana… y no ocurrió nada. Sin embargo, los especialistas en mecánica de suelos, cuando supieron de la viabilidad del proyecto, aunque no se oponían abiertamente se mostraron bastante escépticos ante la idea. Entonces me dice Bernardo: "Vamos a hacer por nuestra cuenta un tramo de túnel, que sea de muestra, pero sin decirles nada". Y trabajando en un terreno de su hermano Arturo Quintana, en la colonia Agrícola Oriental, excavamos y levantamos los muros de ese túnel de prueba, como si fuera un secreto de guerra.

Aquí nació la empresa Solum, que ha sido líder en el análisis de la mecánica de suelos, y el ingeniero Enrique Tamez que laboraba en ella fue un factor muy importante en nuestro avance. Sin embargo, cuando Corona del Rosal estaba a punto de aprobar el proyecto, nos preguntó: "¿Y esto quién me lo garantiza?"

Fue cuando hablamos de nuestros estudios en mecánica de suelos… pero él dijo: "No, reúnan a los sabios en geología, los mejores ingenieros de México, para que escuchen todo esto y opinen". Entonces se organizaron unas

Continúa p. 29

de manera que no provocasen disminución de la natural resistencia al corte de las arcillas.

Para controlar aun más dichas expansiones, la losa de piso se colaba dentro de las 24 horas siguientes a la terminación de las excavaciones.

6. ESTABILIDAD DEL FONDO DE LAS EXCAVACIONES

La falla del fondo de las excavaciones con muros ademe colados en el lugar se debe al desequilibrio de presiones entre el interior y el exterior de la excavación, si la arcilla no tiene la suficiente capacidad al corte para resistir los esfuerzos generados, o si, aun teniéndola inicialmente, las expansiones producidas por la descarga hacen que dicha resistencia se reduzca, al permanecer la excavación abierta varios días.

Otra causa de falla es el flujo de agua no controlado, que origina fuerzas ascendentes de filtración. Todas las causas expuestas son más graves en zonas donde hay construcciones próximas.

Como en el caso de la estabilidad de los taludes, los métodos convencionales para determinarla sobrestiman el factor de seguridad contra la falla del fondo en las excavaciones en arcillas blandas.

Tras estudios exhaustivos se adoptó el criterio de Bjerrum y Eide, por más cercano a la realidad, ya que considera la posibilidad de una falla local en excavaciones profundas cuya relación de profundidad a anchura es mayor que 3.

Se tomaron en cuenta, además, otras consideraciones tales como despreciar la adherencia entre suelo y muros ademe, ya que a los muros –colados bajo lodo tixotrópico– se les forma una película de cemento y lodo en las caras que tienen en contacto con el suelo; se despreció también la resistencia al corte a lo largo del plano de falla vertical que limita el bloque deslizante, hasta una profundidad igual a la de la excavación.

Se consideró también la redistribución de los diagramas de presiones mencionada al final del apartado 4 (figura 5).

Para incrementar el factor de seguridad, los muros se prolongaron con espolones abajo del desplante, y se consideró como fondo de la excavación el extremo de los espolones, cuya profundidad es de 0.5 a 2.5 m a partir del fondo de las excavaciones, y en algunas ocasiones hasta de 5.2 m.

En el avance de una excavación, debido a sus dimensiones, es evidente que una falla, en caso de ocurrir, sería en sentido transversal (figura 18).

Se especificaron normas para el procedimiento constructivo, el abatimiento del nivel freático, el avance de la construcción, la colocación de puntales, el tiempo de exposición del fondo de las excavaciones, etc., a fin de mantener siempre un factor de seguridad mayor de 1.1 contra la falla de fondo.

7. INFLUENCIA DE LOS SISMOS

Atendiendo al Reglamento de las Construcciones del Distrito Federal se consideró un incremento de las fuerzas horizontales en un lado de la estructura, y un decremento igual y simultáneo en el lado opuesto, y se empleó un coeficiente sísmico de 0.1. El comportamiento satisfactorio de la estructura quedó comprobado en el sismo de agosto de 1968, que alcanzó el grado VI de la escala de Mercalli.

8. PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN

Previamente a las excavaciones a cielo abierto con taludes –cuyos problemas se expusieron en los apartados anteriores– se abatió el nivel freático hasta

una profundidad de 10 m mediante electrósmosis, a fin de acelerar el flujo del agua, para lo cual se perforaron pozos profundos de 30 cm ø, en cuyo interior se instalaron bombas de tipo eyector dentro de unos tubos metálicos de 10 cm ø, los cuales actuaron como cátodos, y se dispusieron a 6 m uno de otro a lo largo del pie de ambos taludes de excavación; entre estos cátodos se hincaron los ánodos, formados por varillas de 1" ø (figura 17).

El abatimiento freático creó una sobrecarga en el área por excavar, con lo que se redujo la magnitud de las expansiones debidas a las descargas del suelo al excavarlo, y en consecuencia se limitaron tanto la disminución de su resistencia al corte como los asentamientos diferenciales, debidos a la recuperación de las expansiones que ocurre al cargar el terreno con el peso de la estructura y los materiales de relleno.

La excavación se atacó en tramos de 6 m de longitud –en algunos casos de suelos con suficiente resistencia al corte se ampliaron a 13 m–. Antes de excavar un nuevo tramo se colaba la losa de fondo, para asegurar la estabilidad del fondo y reducir las expansiones.

Para que el terreno no perdiera capacidad de carga al corte se limitó el tiempo de exposición de las excavaciones.

Sucesivamente se efectuaron el colado de los muros, el de la losa superior, la suspensión del bombeo y la colocación del relleno de los taludes, para así mantener un avance continuo de la construcción.

Excavaciones con muros ademe:

En el área urbana, por limitaciones de espacio, la excavación a cielo abierto se confinó entre dos muros ademe, construidos como sigue:

Primeramente se procede a excavar las zanjas de los muros por construir hasta una profundidad de 1.5 m, revistiéndola a continuación con un brocal de concreto reforzado de 10 cm de espesor, que sirve de guía al equipo de ataque.

La excavación se hizo en tramos alternados de 5 m de longitud, y con profundidades de 7.5 a 12.5 m (0.5 a 5.2 m abajo de la losa de fondo –desplante de los espolones, apartado 6–), donde el suelo fue particularmente duro se efectuaron dos perforaciones en los extremos del tablero y una en el centro, con perforadoras Caldweld, para que sirvieran de guía a la herramienta de excavación (figura 4).

La excavación se ejecuta con un cucharón de almeja dirigido (figura 6), que después de extraer el material lo deposita en una canastilla operada eléctricamente, que lo tira en camiones de volteo (figura 7). Las excavaciones se estabilizan inyectándoles lodo bentonítico que se mantiene hasta un determinado nivel, y que reacciona de manera fisicoquímica con las arcillas, formando una membrana en el paño de la excavación, que estabiliza las paredes.

La bentonita sódica con que se prepara el lodo bentonítico fue sustituida, previos estudios de laboratorio, con arcilla del propio suelo, lográndose con ello iguales resultados y una gran economía.

Tanto en uno como en otro caso, se practicaron ensayos en los cuales se determinó que estos lodos afectan ligeramente el grado de adherencia entre el fierro y el concreto, factor que se tomó en cuenta en el diseño de los muros estructurales.

Terminada la excavación de un tablero se introducen en sus extremos piezas prismáticas de acero de igual profundidad y ancho que el tablero y que sirven para procurar el mejor acabado de las juntas entre tableros y la mejor liga entre los concretos de los dos colados. En los muros estructurales estas piezas prismáticas llevan una banda de CPV que queda ahogada en el concreto del

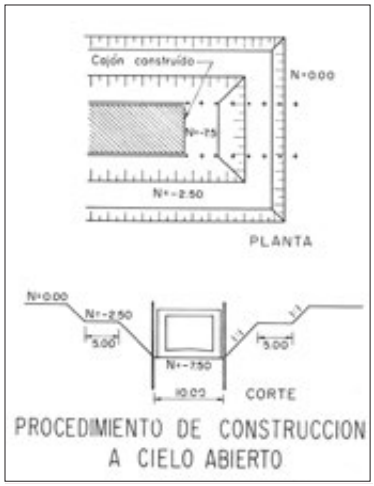


Figura 17

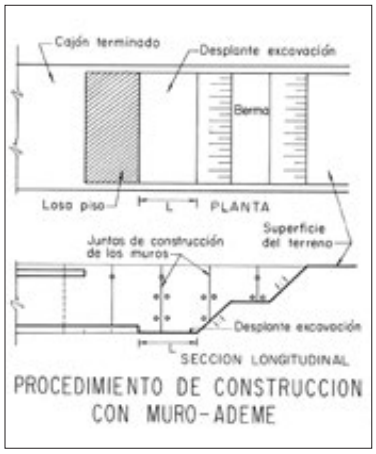
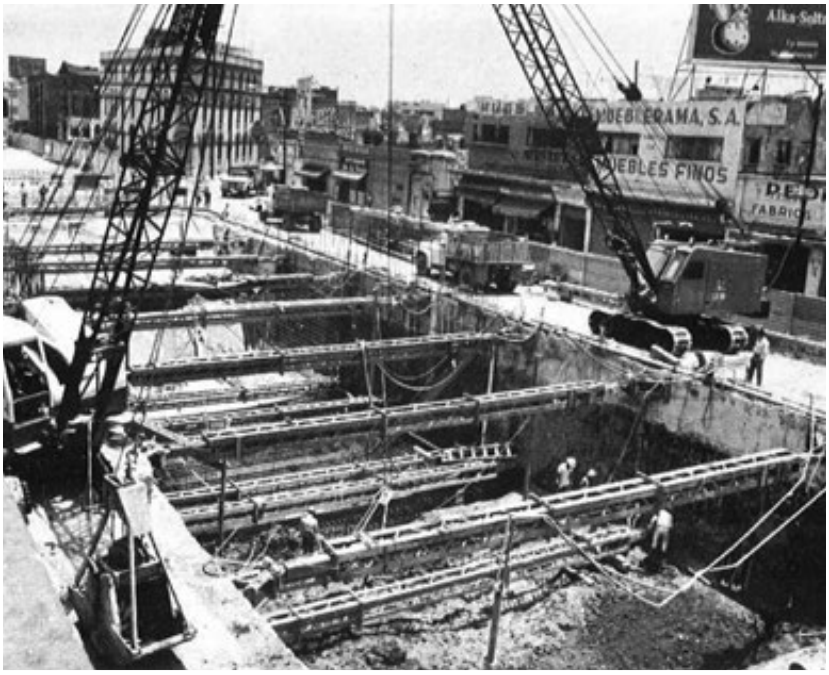


Figura 18.

Figura 19.
Excavando con dos grúas –equipadas con cucharón de almeja– entre los muros laterales hasta el nivel de desplante de la losa de fondo. Los muros, por razones de estabilidad del suelo, se desplantan más abajo.

Figura 20.
Ya armado el fierro de la losa del fondo, y anclada convenientemente a los muros laterales, se procede a su colado.



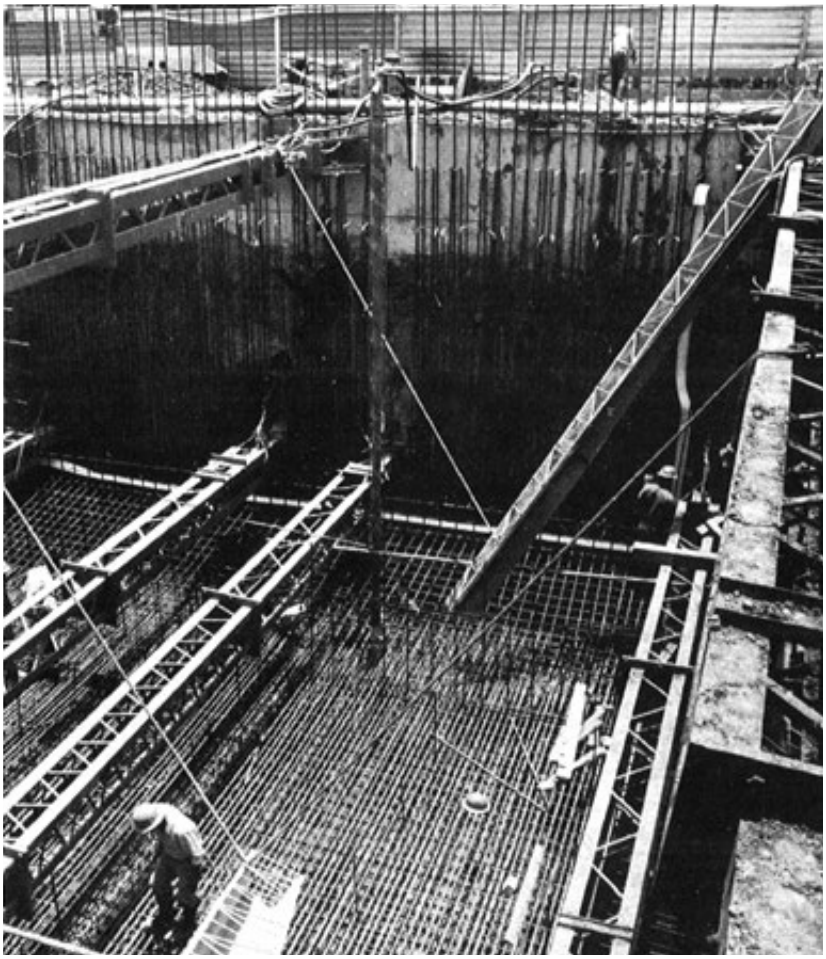


Figura 21.
Curando a vapor en la planta las placas prefabricadas y pretensionadas que se colocarán sobre los muros laterales de la sección cajón.

Figura 22.
Colocando placas prefabricadas en los diferentes niveles de la estación Tacubaya. Obsérvese en primer término (al igual que en una de las fotografías anteriores) el fierro de continuidad que se instala sobre los precolados para reforzar el firme que trabaja en colaboración con éstos.

muro y liga con el concreto del muro contiguo, para dejar una junta impermeable. Una vez colocadas las piezas prismáticas se introduce el fierro de refuerzo (figura 8) y a continuación el tubo de colado (figura 9) que dispone de una tolva en su extremo superior, cuya boca se descarga al iniciar el colado, se bloquea con un tapón plástico a fin de retener suficiente concreto para desalojar el lodo dentro del tubo de colado, cuyas paredes son herméticas, estando formado por tramos conectados con rosca.

El concreto empleado para los muros estructurales es de f'c = 175 kg/cm^2, 18 cm de revenimiento, agregado máximo de 3/4", contenido de cemento de 310 kg/m^3 y 100 de puzolana. En igual orden para el muro ataguía: 140, 18, 1 ½", 250 y 75). La adición de puzolana es para efectos de impermeabilidad y trabajabilidad, y ahorro de cemento.

Durante el proceso de colado dentro del lodo bentonítico, se precisa mover el tubo hacia arriba y hacia abajo, para que la mezcla escurra, lo que se logra accionándolo con una grúa o malacate tal como se observa en las figuras 10 y 14, debiéndose tener cuidado de que la base del tubo permanezca siempre sumergida en el concreto a fin de que el lodo no penetre en el tubo (véase figura 12).

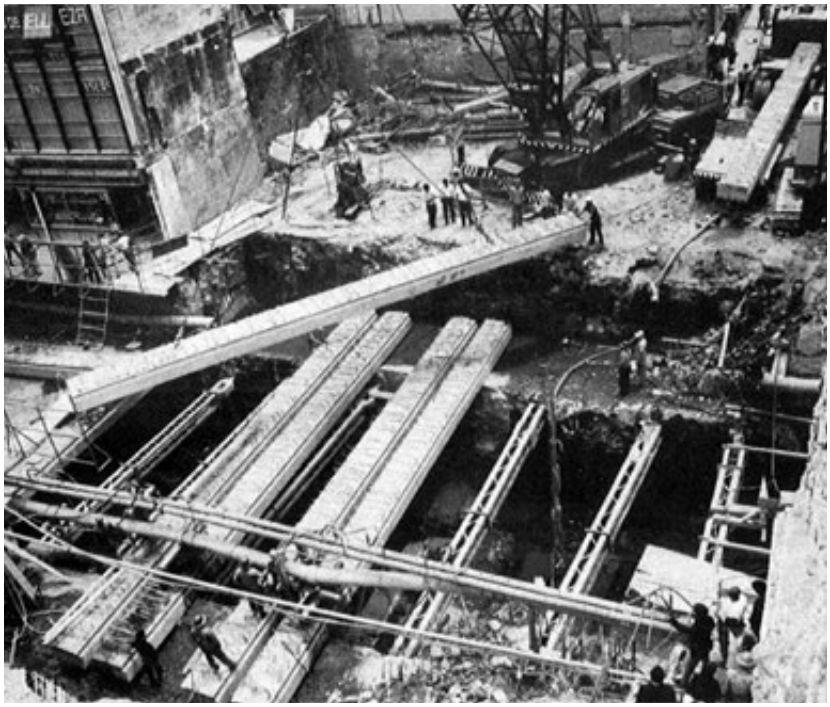
El tubo se irá recuperando a medida que progresa el colado. Con este sistema el concreto, a excepción de una capa superior de unos 15 cm que se desplaza al aumentar el volumen de concreto, presenta la misma calidad que si se efectuara en seco.

Terminada la construcción de un largo tramo de muros, se abate el nivel freático mediante bombeo hidráulico o bombeo con tratamiento electrosmótico según se trate respectivamente de subsuelo con capas permeables o de subsuelo totalmente impermeable, con objeto de crear una sobrecarga en el fondo, antes de excavar el material.

Con esto se elimina la subpresión en algunas capas de arena confinada por arcilla bajo el fondo de la excavación, y se evita la falla del fondo y se reducen las expansiones.

Logrado el abatimiento, se excava hasta 2.5 m de profundidad, nivel donde se colocan a cada 5 m los primeros puntales, a los cuales –provistos de gatos de tornillo– se les aplica una carga hasta de 30 t (figura 16). El segundo nivel de puntales se instala a la mitad de la profundidad de la excavación, y se les aplica una carga máxima de 60 t, y de 90 t a los últimos puntales, situados a 1.5 m arriba del fondo de la excavación (figura 19).

Figuras 23 y 24.
Colocando placas prefabricadas en los diferentes niveles de la estación Tacubaya. Obsérvese en primer término (al igual que en una de las fotografías anteriores) el fierro de continuidad que se instala sobre los precolados para reforzar el firme que trabaja en colaboración con éstos.



Los puntales reducen los desplazamientos de los muros, y evitan la formación de grietas fuera de la excavación. Terminada ésta, se retiran los puntales intermedios y se cuela la losa de fondo (figura 20), dentro de las 24 horas de concluida la excavación. Los colados se efectúan según el caso, ya sea directamente en canalones, o bien empleando una armadura con

El regente Corona del Rosal visita el sitio de construcción del metro.

autopropulsión –que libra la separación de los muros–, dotada de una tolva fija para la carga del concreto, de una banda sinfín para transportarlo y una tolva móvil de descarga, para vaciar el concreto a través de una trompa de elefante en el lugar indicado.

Las placas prefabricadas que forman la losa superior son pretensadas, de sección rectangular (0.25 × 0.70 × 7.30 m) con dientes en la cara de arriba, para que con el firme colado *in situ* integren una sección compuesta, empotrada mediante anclajes en los muros estructurales.

Se colocaron bandas de polivinilo en todas las juntas de construcción, para evitar filtraciones (figura 2).

Las dimensiones de los precolados fueron el resultado de estudios de producción, a fin de aprovechar las mesas de colado en forma óptima.

En las estaciones donde el claro por librar es de 14.30 m, la sección elegida fue una trabe cajón que también trabaja como compuesta mediante conectores para efectos de fuerza cortante (figura 13).

Trabes de este tipo se emplearon en la construcción de la glorieta de Insurgentes, y sobre ellas se coló un firme de continuidad, por consideraciones esencialmente de rodamiento, ya que los posibles asentamientos de los marcos de apoyo no hacían aconsejable el tomar en cuenta condiciones de continuidad en el diseño.

El fierro de los marcos de apoyo (figura 24) fue prolongado del nivel superior de colado para dar anclaje de continuidad al concreto del firme.

En las figuras 21 a 24 se muestran respectivamente vistas del curado a vapor de las placas prefabricadas, de su montaje y finalmente del colado del firme. El equipo de montaje fue, obviamente, el que estas piezas reclamaban tanto por su peso como por sus condiciones de montaje.

Se empleó un sinnúmero de elementos prefabricados de diferentes características, de acuerdo con las exigencias estructurales del caso.

Viene de p. 24

reuniones para confrontar nuestro proyecto, que hasta parecían juicio sumario. Asistieron las personas más destacadas en la materia: Raúl Marsal, Fernando Hiriart, Marcos Mazari, Emilio Rosenblueth y el propio Tamez. La estrategia de Bernardo fue avanzar con pie firme y sin comer ansias. Eran reuniones muy estimulantes. Poco a poco los fuimos convenciendo. La reunión final fue en el auditorio de la Compañía Mexicana Aerofoto –que acabábamos de adquirir–, y aunque ya los habíamos persuadido y no surgían más dudas en el nivel teórico, les quedaba aún ese gesto de suspicacia en el semblante. Entonces les dijo Quintana: "¿Nos quieren acompañar a ver un experimento?" Y fuimos todos al terreno de la colonia Agrícola Oriental. Ahí estaba ese tramo de túnel, como de 120 metros, construido en el antiguo fondo del lago, a 6 metros de profundidad. Era la materialización de todo lo que se había estado discutiendo en esos días. A la semana estábamos ya firmando el contrato para construir el metro […] pero el licenciado Corona del Rosal le advirtió: "Ustedes van a hacer la obra, pero toda, de cabo a rabo, porque ustedes son los que la han promovido y los que saben lo que se tiene que hacer … y van a meter todo lo suyo de garantía."

Ángel Borja Navarrete,
Corazón de arquitecto.

Maduración de un proyecto

Luis Vieitez Utesa

El metro traslada hoy tantos pasajeros en una semana como lo hace el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México en un año. Tal es el tamaño de la movilidad que brinda a 50 años de su puesta en marcha. Es el transporte colectivo por excelencia. También colectiva fue y ha seguido siendo su realización.

La fruta no madura hasta que madura. El metro, después de varios intentos que fueron cuajando a partir, al menos, de 1952, maduró como idea y proyecto en 1967 con una combinación de circunstancias muy bien aprovechadas. El nicho de oportunidad a que dieron lugar conjuntó capacidades de organización técnicas y de construcción con respaldos económicos y financieros y con decisiones políticas propicias todas ellas.

El proyecto "llave en mano" que se estructuró y se llevó a buen término fue un extraordinario ejemplo de una colectividad de voluntades, bien capacitadas y orientadas al logro de un bien comunitario.

La masa crítica de empresas jóvenes y muy activas en el desarrollo reciente de México hizo posible afrontar con responsabilidad el compromiso de producir un kilómetro de metro por mes hasta completar 40. Una de esas empresas, la más propiamente técnica, fue Solum, heredera de la saga de Nabor Carrillo, Fernando Hiriart y Raúl Marsal y bajo la responsabilidad de Enrique Tamez.

Apenas en sus cuarenta, al profe Tamez se le dio la estratégica tarea de defender la certeza de que el metro podría construirse en el suelo de la Ciudad de México, en particular en su modalidad subterránea. Sus argumentos, después de no siempre tersas discusiones, fueron aceptados. Fueron la llave que abrió el proyecto. Como premio, formó y condujo a buen puerto la empresa ISTME, a la que se le encargó proporcionar el sustento técnico para llevar a cabo la construcción de este medio invaluable de transporte colectivo de la ciudad.

A 50 años el metro sigue. El profe Tamez, también.

"Masa crítica" ni es masa ni es crítica, pero da a entender que se emprende algo no intentado antes, algo insólito y trascendente y no a trompa y talega, sino con agarraderas, con respaldos confiables que son eso: masa crítica.

Solum, a principios de los sesenta, había alcanzado esa condición para lanzarse a la tarea del metro. Poseía la información del suelo de la ciudad, heredada de Laboratorios ICA más la proveniente de varios nuevos estudios de cimentaciones y de variantes preliminares de lo que fueron después los túneles y lumbreras del Sistema de Drenaje Profundo. Tenía el historial de

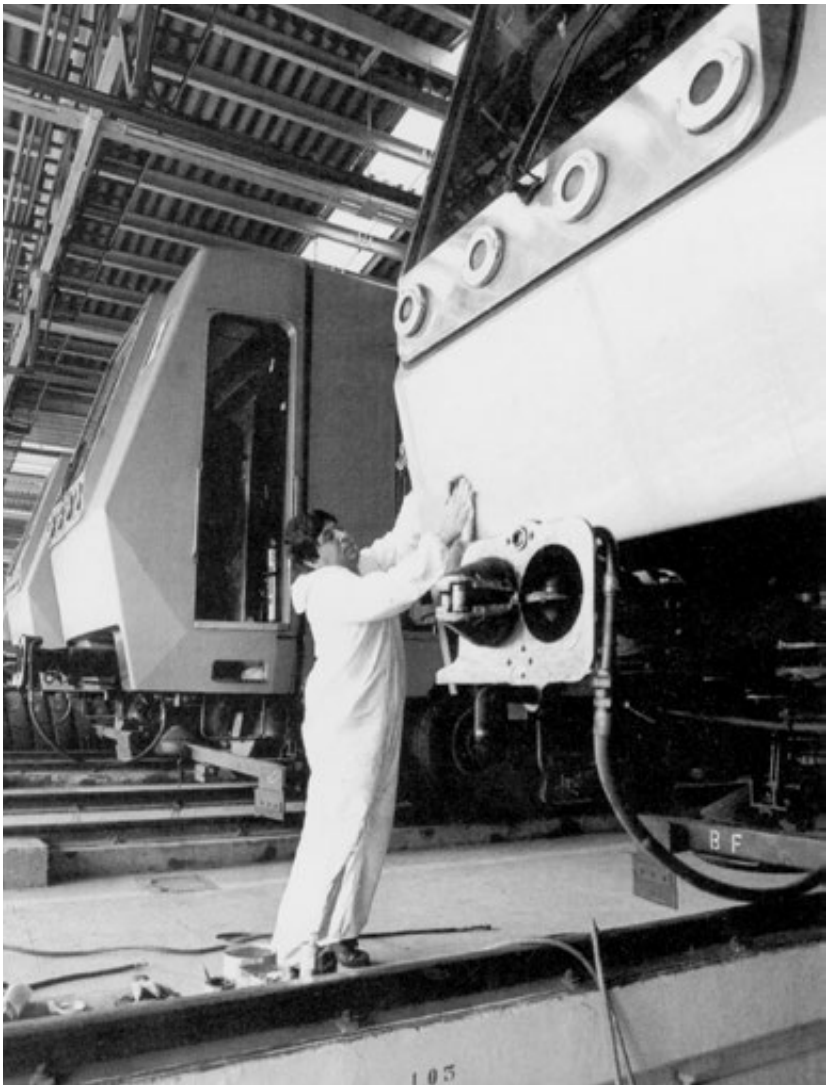
Imagen página anterior
Proceso constructivo de la estación Bellas Artes.

comportamiento de una variedad importante de edificios antes y después del sismo del 57 y del 62. Contaba con perforadoras y toma de muestras de amplia gama, y con un laboratorio equipado para procesar de inmediato las muestras provenientes de varios sondeos a la vez, como se hizo en el estudio de los primeros 30 km del Anillo Periférico. Se conocían con detalle los procedimientos de excavación y contención de cimentaciones profundas para la época, así como el control y abatimiento del manto freático. El personal, bien capacitado, aleccionado y dispuesto, respondía con entusiasmo a cualquier nueva tarea, más si traía el sello de innovadora.

Así dicho, se seleccionó a un grupo de ese personal, se le pidió que interrumpiera sus vacaciones de fin de año y se concentrara en una discreta y secreta oficina a arrastrar el lápiz. Fue el invierno que nevó en la ciudad; desde entonces no se ha repetido y quizá antes no se dio. Pertenecía la oficina a otra empresa del grupo que, también con discreción, venía estudiando la vialidad y movilidad en la ciudad y sus posibles soluciones a futuro, a la par de sus funciones regulares. Se decía que esa empresa había concluido planos y documentación de la supercarretera a Puebla con los que se había negociado, a cambio tener acceso a la información de la ciudad para hacer una propuesta alternativa al pulpo camionero. Esa propuesta fue un sistema de ferrocarril metropolitano para la Ciudad de México.

Se concentraron los estudios preliminares en la solución subterránea que sería la más utilizada, dada la traza de calles y avenidas en que era dable alojarla para responder a la demanda de transporte previsible. Con el gálibo de un material rodante real, se determinaron las geometrías de estructura necesaria en diferentes sitios de la zonificación geotécnica disponible. Dadas las condiciones de compensación de pesos recomendable en cada caso, se estableció que las secciones respectivas estarían determinadas principalmente por su peso. Después se pasó a considerar las opciones de construcción, todas a cielo abierto ya que resultaban más económicas que en túnel, y además esta última tecnología no estaba suficientemente desarrollada para perforar en las arcillas del suelo de la ciudad.

Vías e instalaciones eléctricas del metro.



Mantenimiento menor de equipo rodante.

A estos análisis se añadieron los de las estaciones, y también primeros planteamientos de flujos de origen y destino de viajes en la ciudad y de trazo de las primeras tres líneas de transporte colectivo. Los resultados de lo antes reseñado se expresaron en láminas descriptivas y en una amplia información de apoyo. Fueron base de la presentación que se hizo a las autoridades y sus asesores para conseguir su visto bueno de continuar con una propuesta formal técnica y financiera.

En Solum se conocían las propiedades y manejo de lodos bentoníticos para la estabilización de perforaciones y zanjas. También la fabricación de suelo-cemento y lodo-cemento y el colado de concreto bajo lodo. Algunas de estas técnicas se habían aplicado en pantallas impermeables y en pilas. De estancias de algunos de sus ingenieros en Francia y visitas a Italia y Portugal, se obtuvo información valiosa de la aplicación de muros pantalla, muros tablestaca y muros conocidos como Milán. Para el metro, se consideró que la contención de las excavaciones dentro de la traza urbana debía estar confinada, en calles y avenidas, por muros tipo Milán, colados en sitio bajo

Medallas conmemorativas de la inauguración del metro de la Ciudad de México.

lodo bentonítico, con ventajas claras de eficiencia y eficacia de construcción; además contribuirían a darle peso a la estructura definitiva para reducir su evidente sobrecompensación, dentro de márgenes no inconvenientes para el entorno.

Para no dejar dudas del método de contención seleccionado en principio, se acometió, en un predio cercano a las instalaciones de la empresa, un ensayo a escala natural en el que al excavar quedaron al descubierto los aciertos y también las fallas del procedimiento empleado y de la pertinencia del método, el mismo que se ha empleado tanto en las primeras tres líneas como en las subsecuentes y en infinidad de cimentaciones, algunas de 40 m y más, que se encuentran repartidas por todo el casco urbano.

Todo ocurrió con rapidez después de aquellas presentaciones y de la prueba, de modo que en pocos meses, en oficinas ya más en regla cercanas al Monumento a la Madre, se fue conformando el grupo de origen de lo que fue la empresa encargada del proyecto y supervisión de las obras del metro, encabezada por el profe Tamez: ISTME, que llegó a tener larga y fructífera trayectoria.

Las áreas de Mecánica de Suelos, Topografía del Proyecto y la Vía, Obras inducidas –principalmente hidráulicas–, Tránsito y Vialidad, y Supervisión de Obra Civil quedaron adscritas a la Gerencia de Ingeniería Civil, y se integraron con gente joven, incluso recién salida de la carrera, que actuó siempre con gran responsabilidad y sentido de solidaridad y compromiso, en un ambiente de jovialidad y de libertad del ejercicio de su profesión. Las instrucciones puntuales, los procedimientos de construcción y las especificaciones se gestaron en estas áreas y formaron parte de folletos descriptivos y manuales que se repartieron en los diferentes frentes de trabajo para su reglamentación obligatoria y vigilancia periódica.

Operador de vagón en las instalaciones del metro.

Proceso constructivo del metro, Plaza de la Constitución.

En cuanto a mecánica de suelos se refiere, se contó con el valioso respaldo de Solum, que atendía oportunamente las solicitudes de exploraciones, sondeos y pruebas de laboratorio a un paso casi frenético pero no improvisado. Fue así que se buscó atender la demanda de resultados de ensayes con pruebas que no consumieran mucho tiempo: las triaxiales se prefirieron para calibrar otras pruebas y para casos especiales; el torcómetro se aplicó en las caras expuestas de las muestras antes de sacarlas de sus tubos para establecer rangos probables de variación de la resistencia al corte del suelo; con estos valores y los de contenido de agua y clasificación SUCS, se ubicaban los ensayes de corte directo con aparatos tipo NGI que habrían de precisar los valores correspondientes, dentro de dichos rangos.

La velocidad de las diferentes etapas de cada frente de obra resultaron ser benéficas para mantener la resistencia al corte dentro de los valores así determinados; la geometría de los taludes cabeceros y de las excavaciones, así como el control del sentido y presión de las filtraciones freáticas, beneficiaron la estabilidad. Los muros Milán, con sus patas empotradas suficientemente abajo del nivel de piso excavado, fueron muy útiles para agilizar todo el proceso: los puntales se distribuían en arreglos más abiertos para facilitar el paso de las almejas de excavación y se conseguía una redistribución de esfuerzos en el suelo adecuada a un buen balance de los empujes de tierra. El hecho de mantener la respuesta del suelo dentro del rango elástico resultó en un buen desempeño ante solicitaciones dinámicas, especialmente las sísmicas; además, los cajones y estaciones del metro resultan ser estructuras lineales cuyo periodo de vibrar característico se sitúa muy fuera del periodo natural de vibración del suelo y de su posible resonancia.

El privilegio de haber participado

Luis Bernardo Rodríguez González

Ingresé a la empresa ISTME (Integración de Sistemas de Transporte Metropolitano, S. A. de C. V.) del Grupo ICA un lunes 29 de enero de 1968, con 22 años de edad, por invitación del Ing. Enrique Tamez González, quien fue mi director de tesis y mi profesor en la maestría en Mecánica de Suelos en la UNAM.

Todos los jóvenes que estudiamos la maestría en ese año de 1967 teníamos un especial interés en trabajar en una obra que sin duda iba a cambiar los destinos y la movilidad de nuestra ciudad, y sobre todo de participar en los análisis y diseños geotécnicos de las excavaciones, procedimientos constructivos y estructuras del metro en un suelo tan particularmente difícil como el de nuestra ciudad.

Esa experiencia constituyó una aventura sensacional; tuve la fortuna de trabajar una gran parte de mi vida profesional en el proyecto y muy de cerca en la construcción de todas las líneas de metro de nuestra ciudad, y durante las primeras líneas, bajo la orientación del profe Tamez, como le decíamos, y del Ing. Luis Vieitez.

Recuerdo que las oficinas de ISTME estaban ubicadas en Arcos de Belén, esquina con Doctor Vértiz, en un edificio de 14 pisos que se derrumbó con los sismos de 1985.

La noche del mismo lunes que ingresé, me llamó el profe Tamez pidiendo lo acompañara a ver un muro Milán que había "pateado" en la estación Salto del Agua, y después de revisar el problema salimos como a la 1 de la mañana. Pensé que si así iban a estar todos los días de trabajo, no tendría mucha oportunidad de divertirme, y efectivamente, la historia del trabajo en los siguientes cuatro años fue similar a esa situación.

En esa época, el Departamento de Mecánica de Suelos era dirigido por el ingeniero Heriberto Estrada Guadarrama, mejor conocido como *el Gordo* Estrada, y en su equipo de trabajo estuvimos los ingenieros José Tinajero Sáenz, Ezequiel Saavedra Nieto y un servidor, a quienes nos repartieron los proyectos de toda la línea 1. A mí me tocó desde la estación Merced hasta la Gómez Farías en la Calzada Zaragoza, y la cimentación de los edificios PCC (Puesto Central de Control) Técnico y Administrativo, ubicados en la calle de Delicias en el centro de la ciudad; después me daría cuenta de que

Imagen página anterior
Proceso constructivo del metro, calle Tacuba.

Uso de las instalaciones del metro Chabacano.

el tramo que me tocó se ubicaba en suelos con arcillas de las más blandas que hay en la ciudad.

Al frente del Ing. Estrada estaba nuestro jefe, el Ing. Luis Vieitez Utesa, hoy un excelente amigo y compañero.

Estudiamos la compensación de las cimentaciones de tramos y estaciones, con los criterios de descargas que fueron fijados por el profe Tamez; calculamos las expansiones a largo plazo que iban a sufrir estas estructuras, apoyados en las pruebas de consolidación unidimensional efectuadas en Solum, y con las propiedades indicadas en el libro de El subsuelo de la Ciudad de México, de Raúl J. Marsal y Marcos Mazari. Con esta información diseñamos los lastres de tramos y estaciones, cuidando no sobrepasar los valores fijados por el profe Tamez.

Las expansiones en las estaciones eran particularmente difíciles de calcular debido a su forma irregular, por lo que hacíamos algunas simplificaciones geométricas.

Estábamos lejos aún del empleo generalizado de las computadoras y de los programas y modelos de elementos finitos que surgieron años después.

Los análisis de taludes, las fallas de fondo, los empujes y el cálculo de las tablestacas los desarrollamos con los métodos existentes en la bibliografía técnica, así como la solución de la estabilidad de los taludes "calculados a pie" mediante el empleo de círculos y tanteos para determinar el factor de seguridad mínimo.

En los análisis de taludes fue fundamental el tipo de pruebas de resistencia al corte directo no drenado que el profe Tamez desarrolló en los laboratorios de Solum, las cuales representaban muy bien el tipo de falla progresiva del cuerpo de los taludes arcillosos y permitieron obtener muy buenos resultados en la predicción de la estabilidad de los taludes.

Los análisis de las fallas de fondo en las excavaciones también fueron muy certeros. La teoría de Terzaghi que aparecía en sus libros fue sustituida por la

Boleto del STCM conmemorativo de los 50 años del metro.

falla circular de Prandtl, aplicando el criterio de Bjerrun y Eide que el profe Tamez propuso, ya que se trataba de suelos puramente cohesivos y este criterio representaba mejor la falla de fondo de las excavaciones en arcillas.

En pocas construcciones realizadas en la ciudad, antes del metro, se habían hecho excavaciones de 8.0 m de profundidad o mayores.

En los empujes sobre las tablestacas rígidas tipo Milán, también el profe Tamez aportó algunos criterios que representan adecuadamente el comportamiento de los empujes redistribuidos del suelo con la presencia del nivel freático, y su empleo en el diseño y análisis de las excavaciones derivó en un comportamiento satisfactorio durante la construcción y el comportamiento de las estructuras.

El hundimiento regional representó otra característica por considerar en los tramos y estaciones del metro, especialmente en las zonas donde la ubicación de las líneas abarcó zonas de suelos de transición y de suelos blandos, como el caso del tramo de la estación Tacubaya a la estación Juanacatlán. Afortunadamente, estas transiciones fueron graduales, no así en el caso del tramo Oceanía-Terminal Aérea, de la línea 5 (Peñón de los Baños), o en el tramo Guelatao-Peñón Viejo-Acatitla de la línea A.

Otro aspecto técnico que tengo presente fue la solución de la unión entre los edificios de los accesos de la línea 2 en la Calzada México Tacuba y las estaciones.

Los edificios aprovechaban la excavación de las estaciones como cajón de cimentación y tendían a hundirse, y las estaciones estaban sobrecompensadas y tendían a emerger.

Los edificios de acceso se resolvieron con pilotes de fricción buscando que la diferencia de cargas edificio-estación fuera la menor posible.

La unión entre estos elementos se resolvió colocando una junta de cortante entre ambas estructuras, con el fin de que se pudiera presentar un pequeño giro, pero no un escalón. Creo que después de 50 años se han comportado favorablemente.

El empleo del bombeo con puntas eyectoras fue otra aportación del metro en las excavaciones; su principal finalidad fue abatir las presiones hidrostáticas en las lentes de arena localizadas por debajo del fondo de las excavaciones para evitar una posible falla por subpresión.

Es indudable que esta escuela de diseño sobre las excavaciones profundas que se utilizó en el metro, y en especial en las arcillas blandas, constituyó un parteaguas en la geotecnia de las cimentaciones de la Ciudad de México y en la geotecnia mexicana. Hay un antes y un después en los análisis de las cimentaciones profundas de nuestra ciudad.

Actualmente es común encontrar excavaciones profundas en los edificios cuyas cimentaciones fueron construidas a 20 m de profundidad o más.

Recuerdo que en una de las reuniones nacionales de mecánica de suelos se generó una discusión cuando un grupo de especialistas comentaba que el bombeo no servía de nada, y otro argumentaba sus bondades, lo que refleja el desarrollo de la práctica profesional de la geotecnia en nuestra ciudad en esa época.

Los sábados salíamos a recorrer la obra en los tramos que nos correspondían, y en más de una ocasión nos topamos con el recorrido que el Ing. Quintana, el Arq. Borja, el Prof. Tamez y otros directivos de ICA realizaban cada semana a la obra. El involucramiento de los directivos en la obra fue fundamental para el éxito alcanzado.

El sistema de transporte colectivo subterráneo de la Ciudad de México fue y sigue siendo el proyecto de transporte urbano más importante en la historia de la capital. Existían serias dudas y preocupaciones respecto a la factibilidad de construir una obra de este tipo en uno de los suelos blandos más difíciles del mundo. Sin embargo, en 1968 se pudo inaugurar la primera línea. Tal éxito fue también un acierto de la mecánica de suelos. Para el procedimiento constructivo se recurrió a una técnica entonces de vanguardia: los muros de concreto armado colados en el lugar o muros Milán, técnica que se adaptó con audacia a las condiciones de la zona lacustre de la ciudad. El diseño se apoyó en el estado del conocimiento de la época en materia de empujes sobre muros de contención, seguridad contra falla de fondo, seguridad contra falla por subpresión, técnicas de bombeo, etcétera. Además se promovió la realización de un programa amplio de instrumentación, de pruebas de laboratorio y de modelaciones numéricas recurriendo al entonces balbuceante método del elemento finito. Fue posible así evaluar los problemas de expansión del suelo al realizar la excavación, estabilidad del frente de excavación, calidad deseable del lodo bentonítico empleado para estabilizar las trincheras, empuje del suelo y fuerzas transmitidas a los puntales, la profundidad de desplante óptima de la "pata" del muro Milán, etc. Gracias al esfuerzo combinado de diseñadores, constructores e investigadores se construyó esta obra con relativa facilidad, velocidad y economía. Su buen comportamiento durante el sismo de 1985 muestra que su concepción ingenieril es sana. Sin embargo, los enormes asentamientos que se han presentado en la ciudad a consecuencia del bombeo de agua en el acuífero han afectado con cierta frecuencia el servicio de algunas líneas y obligado a realizar trabajos de mantenimiento importantes.

El siglo de la mecánica de suelos

Hubo varios hallazgos importantes, uno de ellos fue la Coatlicue, nombre que significa "la de falda de serpientes", y que corresponde a la madre de todos los dioses del panteón azteca. Además, en el cruce de las avenidas Pino Suárez y 20 de Noviembre se encontró un templo completo; evidentemente era de una deidad de menor categoría, y en este caso se le creó un ambiente especial para que permaneciera en su lugar, donde hasta la fecha es preservado.

Enrique Tamez,
Ingeniero a profundidad

Fueron más de tres años de intenso trabajo que los equipos de ingenieros que formábamos las áreas de Topografía, Proyecto Geométrico, Vías, Estructuras, Mecánica de Suelos, Arquitectura, Proyectos Viales, Estudios del Transporte e Ingeniería Electromecánica, entre otras, afrontamos con dedicación, entusiasmo, y con muchas ganas de aprender a dominar todos los aspectos que constituyen el gran proyecto del metro de la Ciudad de México.

Otro capítulo muy interesante de los inicios de las obras del metro fue el empleo del escudo en el tramo Tacubaya-Observatorio.

Este escudo tenía forma circular y fue diseñado para excavar y colocar el revestimiento del túnel, constituido por tres dovelas prefabricadas de concreto reforzado. El escudo fue fabricado en nuestro país; tenía casi 9.0 m de diámetro por 4.50 m de longitud. Estos trabajos estuvieron a cargo del Ing. Andrés Moreno Fernández. Con este escudo se excavaron los suelos rígidos del poniente de la ciudad.

La parte de la exploración geotécnica y las pruebas de laboratorio corrieron a cargo de la empresa Solum, que tuvo que conjuntar un equipo de máquinas perforadoras, especialistas, ingenieros y laboratoristas para cumplir con la presionante demanda de servicios que representó el proyecto ejecutivo del metro.

Ingenieros jóvenes participamos en las primeras tres líneas de metro; pronto tuvimos una responsabilidad en un proyecto multidisciplinario con el ejemplo y la guía de los ingenieros que fueron nuestros jefes y con los que aprendimos a cumplir bien con nuestro trabajo y a trabajar en equipo, lo que poco a poco fuimos asimilando de la filosofía de ICA, empresa mexicana que se caracterizó por hacer bien los proyectos y las obras, y terminarlas a tiempo.

El proyecto llave en mano que adquirió ICA con el metro llevó a establecer un récord que hasta la fecha ningún país ha logrado superar, y que corresponde a proyectar, diseñar, construir, adquirir los trenes, instalar los equipos y los componentes electromecánicos, instalar las vías, realizar las pruebas en vacío y la puesta en marcha para inaugurar 40 km de las líneas 1, 2 y 3 del metro en 40 meses.

De acuerdo con los compromisos adquiridos por el financiamiento de las obras, se contó con la presencia de una delegación de asesores franceses que principalmente se enfocó en la revisión y lineamientos del proyecto eléctrico, electromecánico y electrónico; en contraste con lo anterior, en el área de la ingeniería civil muy poco participaron.

Cuando se inició el proyecto de la línea 4 elevada, las autoridades pidieron que un grupo de especialistas franceses revisara el proyecto, por lo que se realizaron sesiones maratónicas muy exigentes; finalmente se tomaron en cuenta las recomendaciones que emitieron para la mejora del proyecto.

Un importante esfuerzo de un grupo de profesionistas, especialistas, ingenieros de obra, sobrestantes, obreros especializados y personal administrativo, todos ellos comandados por el grupo encabezado por el Ing. Quintana, el Arq. Borja y el Prof. Tamez, fueron los grandes hacedores de los inicios del metro en las líneas 1, 2 y 3 de la Ciudad de México.

¿Anécdotas?, hay muchas. De entre todas las que acuden a mi memoria, me referiré a tres.

Una mañana nos avisaron que había fallado una tablestaca de madera en la cabecera norte de la estación Balbuena. Luis Vieitez llamó al Ing. Heriberto Estrada y le pidió que fuera a ver el problema, y el Ing. Estrada me pidió que lo acompañara.

Vías e instalaciones eléctricas del metro, línea 3, Universidad.

Cuando consideramos haber revisado todo el problema regresamos a la oficina y comentamos con Luis Vieitez todos los detalles y entonces surgió la pregunta de éste al Ing. Estrada acerca de cómo estaba el bombeo, y Heriberto, sabiendo que ese tema lo habíamos pasado por alto, de inmediato le respondió: "¡Normalazo, Luis, normalazo!"

En otra ocasión, estábamos varios ingenieros en una junta con la supervisión en la caseta de la estación La Raza de la línea 3, entre ellos Alejandro Vázquez Vera y yo, cuando un ingeniero muy connotado, que participaba en ese tiempo con la supervisión, nos preguntó sobre el procedimiento para el cruce de las vías del ferrocarril con el cajón del metro de la línea 3, y al recordar que el ferrocarril también había cruzado sobre el cajón de la línea 2 en Popotla, le contesté de inmediato: "Como en Popotla", y quedó satisfecho. Al terminar la junta me preguntó Alejandro Vázquez Vera cómo hicimos para cruzar en Popotla, y le respondí: "No sé, pero si lo averiguamos, lo debieron hacer de una manera satisfactoria."

Recuerdo también aquella celebración del primer 3 de mayo, día de la Santa Cruz, que se llevó a cabo en los futuros talleres del metro en Zaragoza, y a la cual asistimos unas 10 mil personas, entre las cuales se encontraban el regente de la ciudad, general Alfonso Corona del Rosal; los directivos de ICA, ingenieros constructores, proyectistas, especialistas y todo el personal de la construcción.

En la actualidad la ciudad ha crecido hasta tener una población conurbada del orden de 22 millones de habitantes, una de las 10 más grandes del mundo. La red del metro deberá seguir creciendo para resolver los grandes desafíos que implica este crecimiento poblacional, que viene aparejado con el aumento de la demanda de los viajes-persona-día que se generan diariamente en nuestra ciudad y con el de los automóviles particulares.

He considerado siempre un privilegio el haber formado parte de ese grupo de jóvenes profesionistas que ingresaron al proyecto del metro y que me brindó la oportunidad de darle a la ciudad en la que nací mi esfuerzo y mi trabajo a esta gran obra y crecer como ingeniero y como persona.

El Túnel Tacubaya

Andrés A. Moreno y Fernández

En una época en que la carrera por la conquista del espacio por parte de Estados Unidos y la Unión Soviética desató el desarrollo de muchos sistemas de control y automatización en una amplia gama de disciplinas de la ingeniería, la construcción del Túnel Tacubaya, parte de la línea 1 del Sistema de Transporte Colectivo Metro, constituye un parteaguas en la ingeniería de túneles en México. En efecto, su gran diámetro (9.14 m), las dificultades técnicas que sería necesario enfrentar para solventar diversos cruces con infraestructura preexistente, así como la complejidad del subsuelo y la escasa experiencia constituyeron en su momento todo un reto para los ingenieros mexicanos.

Hacia finales del año 1968 hicimos un viaje a Los Ángeles, California, los ingenieros Víctor San Miguel, Enrique Tamez y yo para visitar a Al Mathews y Arthur P. Chase, con el propósito de dialogar sobre el proyecto pionero que consistía en hacer un túnel para la línea 1 del metro en el poniente del Distrito Federal; de igual manera, tuvimos oportunidad de visitar una planta de dovelas similar a la que tendríamos que montar para llevar a cabo nuestro proyecto.

De golpe y porrazo, me habían designado el superintendente del proyecto, en una época en la cual contaba con muy escasa experiencia en la construcción de túneles, pero existía un gran entusiasmo por aprender.

El proyecto fue un gran desafío técnico, ya que teníamos que perforar un gran túnel de 9.14 m de diámetro, con muy poca cobertura (< 10 m), además de la necesidad de cruzar la Av. Parque Lira, el Anillo Periférico, pasar bajo dos manzanas de casas, cruzar el Interceptor del Poniente, con una fuerte restricción que consistía en no producir asentamientos, para lo cual se requería un trazo lleno de curvas y cambios de pendiente. El terreno era una mezcla de suelos, la Zona de Transición y la Zona de Lomas.

Perforamos desde arcillas consolidadas hasta mezclas de arena y gravas del río Tacubaya, tobas y suelos cementados en los cuales tuvimos que usar explosivos.

Formé un equipo de trabajo muy sólido y prometedor: Walter Paniagua, Enrique Farjeat, Alejandro García de León, Ricardo Gutiérrez, Carlos Peñaloza, Diego de Ortigosa, Rafael Suárez, Ángel Alamilla, Tufic Jamit y Jacobo Levy. Contratamos a un sobrestante estadounidense: Walter Elliot, quien nos enseñó a manejar el escudo. Dicho escudo y los moldes para las dovelas se fabricaron en Industria del Hierro de Querétaro; compramos los gatos hidráulicos en Nueva York y nosotros nos pusimos a hacer una planeación de detalle y a conseguir el lugar para la planta de dovelas, las oficinas y a preparar la rampa para el acceso del escudo en la Av. Jalisco.

El proceso constructivo se facilitó gracias a la geometría con la que fue diseñado el escudo, básicamente un anillo de acero con un espesor promedio de 2 ¾ pulgadas, con un diámetro exterior de 9.14 m y una longitud de 4.70 m, con una relación largo/diámetro = 0.51, la cual le proporcionó la capacidad

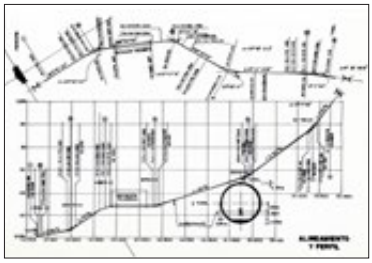
Imagen página anterior
Proceso constructivo,
Plaza de la Constitución.

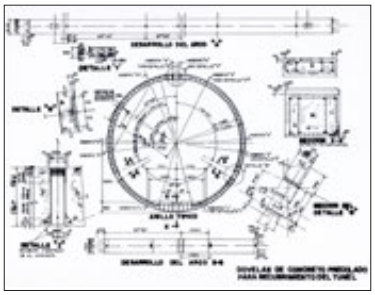
para cambiar con facilidad de dirección, tanto en sentido vertical como horizontal, para así poder seguir el complejo trazo obligado por la infraestructura existente antes mencionada.

En el frente, el escudo contaba con una cachucha de 1.55 m de longitud que permitía a los operadores trabajar con seguridad sobre las plataformas deslizantes que colocadas estratégicamente permitían excavar y ademar el frente de arriba abajo.

El escudo contaba con 17 gatos frontales de 68 t cada uno y en la parte central superior se encontraban alojados los sistemas de control de todos los gatos hidráulicos y brazos erectores. En el perímetro de la parte central del escudo se encontraban ubicados 28 gatos de 182 t cada uno y una carrera de 0.91 m, permitiendo por ende un empuje total máximo de 5096 t.

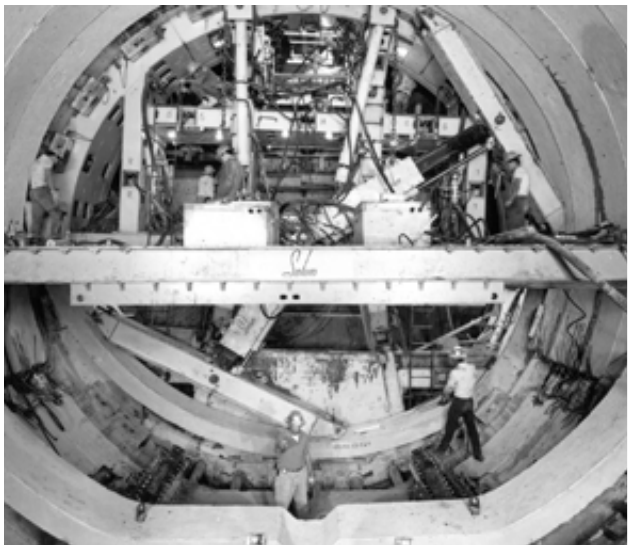
El revestimiento primario consistía en anillos de concreto formados por tres dovelas, dos de clave y una de piso, con un ancho de 0.75 m y un espesor de 0.25 m. Las dovelas de clave se conectaban entre sí mediante una rótula, razón por la cual el espesor aumenta a 0.35 m. La dovela de piso consistía en una superficie horizontal que proporcionaba el piso de rodamiento para los procesos de construcción (rezaga, dovelas, etc.). Además, contaba con una canaleta para el manejo de filtraciones.





El procedimiento constructivo para la colocación del revestimiento primario es el siguiente: armar el primer anillo dentro del faldón, colocando las dovelas de clave con los dos brazos erectores; a continuación se coloca un troquel horizontal y una conexión de acero en la clave, ambos aditamentos garantizan la geometría de las dovelas de clave dentro del escudo; a continuación se coloca la dovela de piso en su sitio, de esta manera está armado el primer anillo dentro del faldón.

A continuación, se procede a desplazar el escudo mediante los 28 gatos de empuje, al avanzar el escudo, el anillo de dovelas pasa a la posición del segundo anillo y la dovela de piso sale del faldón gracias a un corte que tiene el escudo en la parte inferior del faldón, así se realiza la primera etapa de la expansión del anillo al estar en contacto la dovela del piso con el suelo. Al terminar el empuje, se procede a la excavación de 75 cm de suelo que ha avanzado dentro del escudo, terminada la excavación y el ademe de frente



se procede al siguiente empuje, es decir el tercer que al terminarse, el anillo sale fuera de la cola del escudo en este momento, las dovelas de clave serán expandidas mediante el uso de gatos de expansión colocados entre la dovela de piso y las de la clave y mediante un troquel que empuja la conexión de la clave hacia arriba, de esta manera se termina la expansión del anillo y se procede a colocar unos pequeños troqueles de tubo entre las dovelas para sustituir a los gatos de expansión, finalmente se procede a soldar las barbas de las dovelas y a colar con expansor la unión de las dovelas.

Como resultado de la operación del escudo, los avances obtenidos variaron entre 6 y 9 anillos por día, es decir, entre 4.5 y 6.75 m/día, lo cual se consideró como un avance muy satisfactorio dado el gran diámetro del túnel y el complicado trazo.

En el primer túnel, mientras se adiestraba el personal y se perfeccionaba el procedimiento de expansión, se presentaron asentamientos variables entre 3 y 8 cm. Los asentamientos medidos en superficie fueron en general menores de 3 cm.

Cuando fue necesario usar explosivos para excavar el frente del túnel, se usaron plantillas de barrenación y cargas controladas para no producir vibraciones exageradas, daños o pánico entre los vecinos. Se estuvieron midiendo las vibraciones y siempre se pudieron mantener dentro de los rangos recomendados.

Nos arrancamos con la obra, y a pesar de todos los estudios, yo traía un susto con lo del subsuelo. Cuando abrieron la zanja en el Zócalo, frente a Palacio Nacional, reportaron unos ligeros hundimientos que ¡híjole!… pero después vimos unas fotos de 1957 y comprobamos que eran del terremoto de ese año. Luego cuando pasamos frente a Catedral… a dos metros de ella, le digo a Bernardo: "Ingeniero Quintana, si se cae la Catedral, a usted y a mí nos linchan…", pero él tan tranquilo. Y 25 años después no ha pasado nada.

Alfonso Corona del Rosal,
¿Y el subsuelo?

CONCLUSIONES

La exploración geológica necesaria para la construcción del Túnel Tacubaya presentó enormes dificultades debido a la gran variedad de los materiales, así como la heterogeneidad de los depósitos encontrados. La realización del estudio geológico regional, de sondeos exploratorios mixtos, además de la utilización de métodos geosísmicos y lumbreras de exploración, permitieron conocer con detalle la estratigrafía y propiedades de los suelos y tobas a lo largo del trazo del túnel, situación que permitió a los ingenieros conducir y operar el escudo de manera exitosa a pesar la gran variedad de materiales y consistencias, aunado al trazo complicado requerido para solventar la infraestructura existente.

El diseño del escudo, dotado de un ingenioso y novedoso sistema de expansión permitió cumplir de manera por demás satisfactoria con la restricción establecida por Covitur, en el sentido de no producir asentamientos mayores del 1% del diámetro del escudo. Adicionalmente, el hecho de que los anillos constituidos por las tres dovelas hayan quedado finalmente como revestimiento único del túnel permitió una economía importante en la construcción de éste.

El Ing. Victor Hardy, querido maestro, se interesó mucho en el proyecto y frecuentemente nos visitaba y revisaba los procedimientos de construcción, los rendimientos y los asentamientos producidos en superficie. Siempre estuvimos aprendiendo de sus consejos y sugerencias.

La construcción del Túnel Tacubaya constituye una obra formidable por su magnitud y grado de dificultad, en la cual se logró superar los retos constructivos gracias al esfuerzo y entrega del equipo de trabajo.

En efecto, el gran equipo formado por el personal de Covitur, Solum y sus asesores mexicanos y estadounidenses, así como la buena disposición de todos sus integrantes, permitió generar una armonía, rendimiento y eficiencia que llevaron a la conclusión exitosa de este proyecto pionero.

Medalla conmemorativa de la construcción del metro de la Ciudad de México.

BRIGGS

Apuntes de un jefe de frente

Alfonso Chávez

Mayo de 1969, estando con el gerente de Estructuras y Cimentaciones, entra a su oficina un ingeniero medio malencarado y dice:

—Oiga, Guz,* le presento a Chávez. Se lo encargo.

Mi primera obra en ICA: jefe de frente en la ECSA214, tramo Pino Suárez de la línea 2 del metro, entre las estaciones Zócalo y Pino Suárez, con un importante colector en República del Salvador, y por lo tanto un tramo profundo en el que por encima del espacio para el cajón del metro se aloja el concurrido pasaje peatonal que hoy se conoce como "el kilómetro de libros". La primera etapa: la construcción del muro Milán de 14 metros de profundidad.

A contrarreloj se trabajaba las 24 horas de lunes a sábado; el domingo, día de descanso, se dedicaba a reponer las actividades no cumplidas en el programa semanal de avance, y por lo tanto, ¡cuál descanso!, no había tiempo para la novia, era ella la que tenía que ir a la obra.

Sin suspender el tráfico de automóviles proveniente del Zócalo sobre Pino Suárez y haciendo casi simultáneamente las reubicaciones de las "interferencias" –agua potable, drenaje, luz y teléfonos, nuestra oficina sobre la plaza, en la Rinconada de Jesús profanando un poco la figura de Francisco Primo de Verdad para ubicar la planta de bentonita, el almacén de obra, la planta de concreto y con el patio habilitado de acero por limitaciones de espacio a más de 500 metros. Muy lejos de los grandes ingenieros en mecánica de suelos, que idearon con éxito un metro posible dadas las condiciones del suelo en la Ciudad de México, pero muy cerca de los problemas del frente de trabajo y sus urgencias, la Nena montada sobre el brocal para guiar el equipo Williams excavando el muro a escasos cuatro metros frente al Museo de la Ciudad de México, el hermoso edificio colonial que fuera casa de los condes de Calimaya. Las paredes de la excavación no se sostenían, el suelo se desgajaba: jefe de frente, primera obra, una de la mañana. No sabía en ese momento si quería que mi jefe estuviera conmigo o que mejor ni se me apareciera. Afortunadamente no estaba en su oficina Salvador Novo por cuestiones de horario, y tampoco, pero por cuestiones de calendario, el alarife Guerrero, a quien me habría gustado preguntarle por la cimentación del edificio; las que sí estaban eran las pinturas de Clausell y todo el acervo del museo, aunque seguramente en eso no pensaba. Y… sí, se apareció el superintendente:

—¿Que está haciendo, Chávez?

Imagen página anterior
Proceso constructivo de la estación Allende.

—Pues aquí, ingeniero, intentando que la excavación avance, pero a pesar de la bentonita no hay manera.

Mateo el operador de la draga seguía en el intento y se avanzaba con dificultad. Después de unos minutos, el ingeniero se fue:

—Ahí sígale.

Y ahí me dejó. Se fue con su experiencia y me dejó con mi vivencia. Mucho tiempo después lo entendí. No puedo decir que quedó impecable, pero cuando hicimos la excavación para alojar el cajón, el muro Milán al descubierto lucía razonablemente bien, y la obra siguió su curso. Del edificio no se rompió ni un vidrio, y por esos días Joan Manuel Serrat hizo en el histórico edificio su primera presentación en México; nosotros, jóvenes ingenieros de la obra, en primera fila.

La presión del programa, la convivencia con la intensa vida en esas calles del centro con su cantidad de gente, sus comercios, tiendas de ropa, zapaterías, talabarterías y hoteles, la Suprema Corte de Justicia, la iglesia del Hospital de Jesús, la Ciudad de los Espejos, refugio temporal de trabajadores e ingenieros… el restaurante Rinconada en la casa colonial, el cual, fuera del –inexistente– horario de trabajo funcionaba como nuestra oficina alterna, y en una de cuyas mesas hoy escribo de corrido, porque los recuerdos se agolpan, mezcladas las vicisitudes de la obra con los cotidianos reportes de avance, los programas semanales, las estimaciones, revisiones de precios y volúmenes, el cálculo del destajo los jueves y el aceptar que yo era el jefe de frente, pero bien sabía que como producto de su trabajo, con los destajos y las bonificaciones por avance que semanalmente les firmaba,

Proceso constructivo de las vías del metro.

Vías e instalaciones eléctricas del metro, línea 3.

Ángel el maestro fierrero, los operadores de la draga y el sobrestante ganaban más que yo. Alguna razón había: ellos llevaban el ritmo de la obra, mientras que con mis tres compañeros jefes de frente nos las arreglábamos para, sin querer cometer nuestras travesuras, un domingo haciendo una zanja y dejando sin luz el Palacio Nacional, muchos días rogando la presencia del ingeniero Eduardo Molina que se sabía de memoria las redes de agua y drenaje para, a falta de planos, ubicarlas antes de excavar y evitar afectarlas, aunque no fueron pocas las veces que lo logramos, y además desconectamos muchos pares de cables de teléfono mientras en nuestras narices menudeaban los hallazgos arqueológicos: la diosa Xochipilli, las pequeñas reliquias de barro, algunas de las cuales –muy pocas– terminaban en nuestra bolsa escapando de la vigilancia del supervisor del INAH, las justificaciones con la supervisión, la complicidad de la Coneja, el "tamarindo" en el cruce con Venustiano Carranza para permitirnos a la hora pico que la motogrúa sorteara el tráfico vehicular con la parrilla prearmada de siete metros de alto para introducirla antes del colado de un nuevo muro con ayuda del tubo tremie, etcétera, etcétera. Pero todo esto era poco. La hora de la verdad era cuando llegaba la visita intempestiva en la que, después de la rigurosa revisión del programa y del recordatorio –sin decirlo– de la responsabilidad que ICA ponía en las acciones cotidianas de nosotros, impulsivos aprendices de ingenieros, el ingeniero Quintana terminaba por darnos una palmada para continuar con la obra.

Seguramente muchos otros ingenieros que intervinieron en la obra del metro en sus primeras etapas tendrán vivencias más interesantes. Para mí, ésta de hace cincuenta años fue una experiencia única.

Gracias, Raúl, por la oportunidad.

*Guz era Guillermo Guzmán Isaac, superintendente de obra, mi jefe por ese año y por los 10 siguientes hasta culminar con la obra del Centro Bancomer.

…el regente concluyó diciendo: "Bueno, ingeniero Quintana, ya hemos discutido esto mucho. ¿Cuándo empieza?" Corría el mes de mayo de 1967; haciendo gala de compostura y preparación, Quintana Arrioja respondió que podían estar listos para comenzar en un mes, preguntando en seguida cuál era, entre todas, la opinión del regente en cuanto a la ubicación de las líneas. Corona del Rosal contestó: "¡Ah, qué ingeniero Quintana! ¡Póngalas donde quiera, se le van a llenar!"

Enrique Tamez,
Ingeniero a profundidad

04

Experiencias de un joven ingeniero

Carlos Martínez Molina

Era un jueves de 1967 cuando fui a pedir trabajo al Ing. Manuel Díaz Canales en su oficina de la obra. El día anterior yo había llegado a la Ciudad de México procedente de Tokio, donde estudié Ingeniería sísmica. Platiqué con él y quedé convencido de que era una magnífica oportunidad trabajar en esa empresa y en esa obra. La habilidad del ingeniero y el jet lag hicieron que no preguntara sobre el sueldo. La empresa era ICA, y la obra, la construcción del metro.

Al día siguiente llegué a un edificio en la calle Arcos de Belén, donde se estaba formando una nueva empresa para hacer el proyecto integral de esta obra: arquitectura, estructuras, obra electromecánica, mecánica de suelos, vía y topografía, diseño gráfico, obras inducidas y programación.

Tenía una maestría en Estructuras y se me encargó la dirección de una brigada de cálculo estructural. Pusieron bajo mis órdenes a tres dibujantes y tres ingenieros; uno de ellos era Alejandro Vázquez Vera, Premio Ingeniería 2019. Yo tenía 24 años y el resto de la brigada eran más jóvenes. Esa brigada calculó más de diez estaciones, tramos y el edificio del Puesto Central de Control.

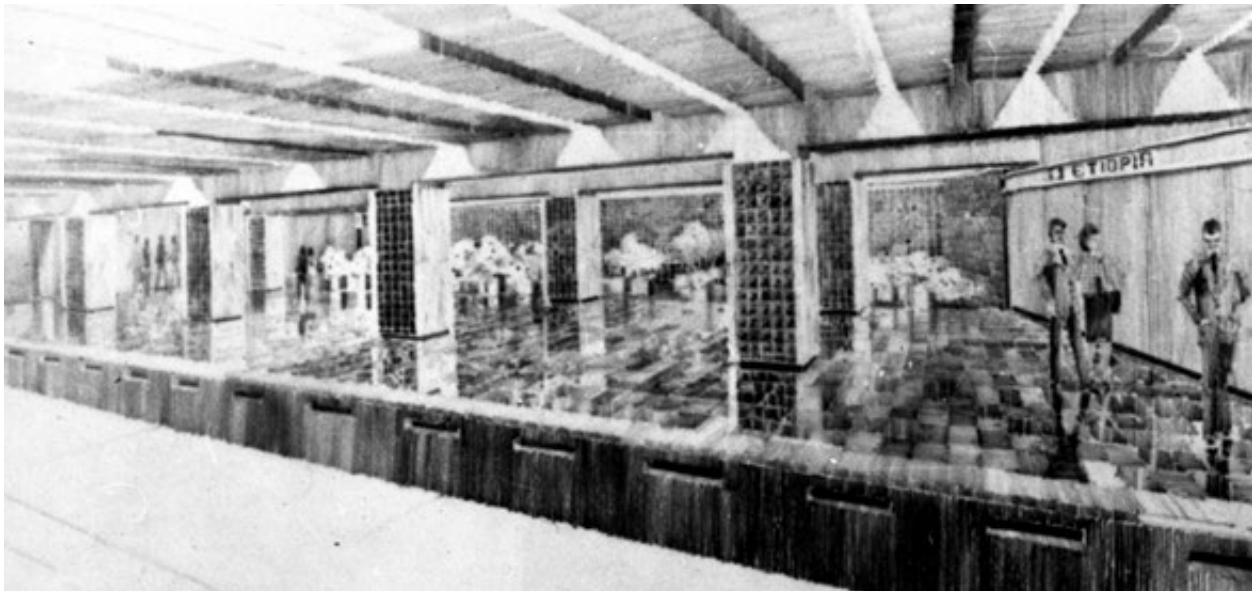
No existían antecedentes de obras subterráneas de esa complejidad dentro de las arcillas del Valle de México.

Primero usábamos la computadora de la universidad, y después la de una filial que estaba instalada con aire acondicionado y piso falso. La alimentábamos con tarjetas y tenía menos capacidad que un teléfono inteligente.

Se me encargó que para este texto contara alguna anécdota de esa época y recordé el temor que sentía cuando entregaba el proyecto para que se ejecutara.

Cuando terminé el diseño de la estación Isabel la Católica me resistía a entregar los planos. Era la primera estación, y en el cálculo se habían hecho varias analogías originales para reducir el medio continuo a un sistema discreto calculable. Revisé varias veces los cálculos, los detalles, el dibujo, y pasó el tiempo. De la obra empezaron a solicitar y después a exigir la entrega de los planos. Mi jefe, el ingeniero Enrique Tamez, me llamó la atención y yo me resistía…

Un día vi que se aproximaban a mi escritorio mi jefe y un constructor. Sin mediar saludo, Tamez me preguntó dónde estaban los planos de la estación.



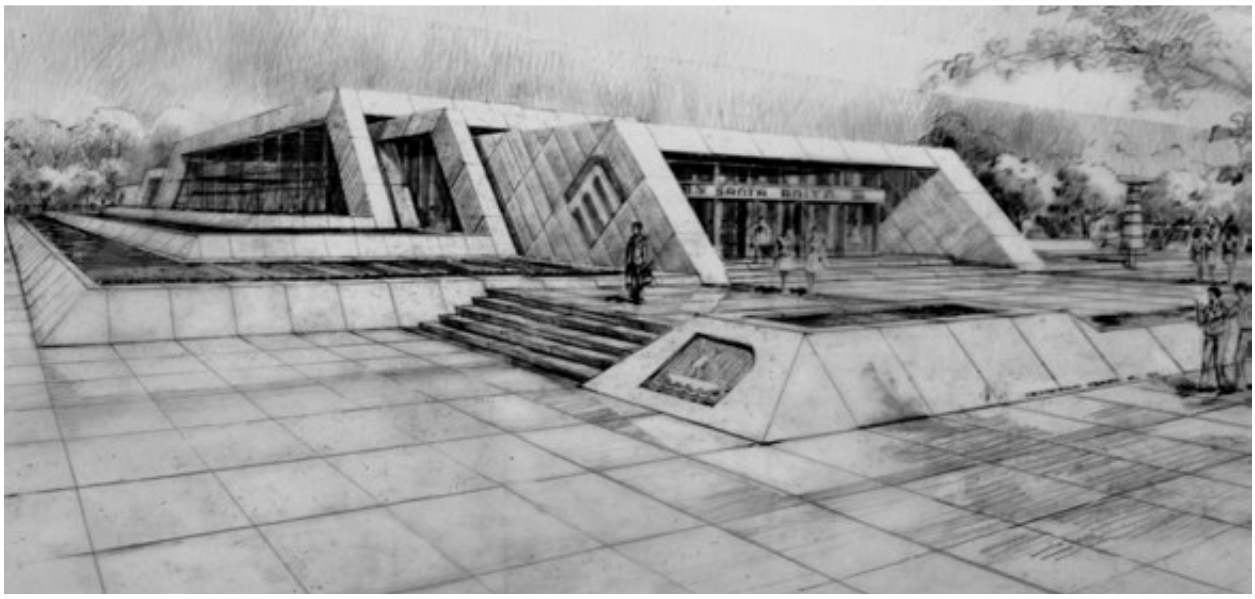


Imagen páginas 50-51
Uso de las instalaciones del metro.

En esta página
Dibujos del uso de las instalaciones del metro, estaciones Etiopía y Santa Anita.

Le señalé el planero que tenía a mi lado. Sacó los planos y se los entregó al constructor. Sólo recuerdo que me dijo: "Ya estuvo bueno."

La estación se construyó junto con todo lo demás. Y tres años después, en la fecha fijada en el inicio, el metro abrió sus puertas a los pasajeros.

Creo que esta obra fue una hazaña de la ingeniería mexicana y siempre agradeceré que a esa edad me permitieran ser una pequeña parte de lo sucedido.

Como en toda hazaña, hay héroes. Un líder, el mejor, el ingeniero Bernardo Quintana Arrioja. Un ingeniero, el mejor, Enrique Tamez González. Y una empresa, la mejor, ICA.

En la fecha fijada desde el principio, el metro abrió sus puertas y entraron los pasajeros. Recuerdo mi emoción y mis lágrimas cuando vi pasar el primer tren.

La Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A. C.
agradece el apoyo de los patrocinadores que hicieron posible
esta edición conmemorativa de los 50 años del metro de la Ciudad de México.

50 años del metro

EDICIÓN CONMEMORATIVA · SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA, A. C. WWW.SMIG.ORG.MX