



CASO PRÁCTICO DE SUB-EXCAVACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Javier Alonso¹ y Manuel Juárez¹

RESUMEN

Debido al crecimiento sin precedente en la construcción en CDMX, y a las restricciones impuestas por los códigos, ha sido necesario adaptar procedimientos que permitan lograr la construcción con la seguridad requerida, pero con tiempos y costos planeados por los desarrolladores. En el caso de este proyecto, se siguió un proceso de sub-excavación que permitió acelerar el proceso de obra, maximizar los espacios disponibles en el sitio afectando lo menos posible a vecinos y asegurar la estabilidad de una excavación de 25.0 m. En este trabajo se presentan las guías generales seguidas en la planeación, diseño y construcción de esta construcción.

ABSTRACT

Due to the last-years growth in CDMX construction, and the restrictions imposed by the codes, it has been necessary to adapt construction process that achieve the required structural safety, but according with the time and cost considered by the investors. In the case of this project, a sub-excavation process was followed that allowed a faster construction process, optimizing available spaces on the site and disturbing as little as possible to the neighbors, but ensuring the stability of a 25.0 m excavation. This paper presents general guidelines followed in the planning, design and construction of the basement.

INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México ha presentado un crecimiento sorprendente en los últimos 20 años. La construcción de torres de vivienda, oficinas, centros comerciales y espacios de usos mixtos se puede ver en cualquier sector de la Ciudad. Las demandas de la sociedad y la oferta de los desarrolladores parece no tener límite, y en una ciudad como la CDMX cuya planeación no ha seguido reglas de un riguroso urbanismo estudiado, el proceso de construcción de nuevas estructuras genera molestias en las comunidades vecinas y afecta la eficiencia en los procesos de construcción.

El proyecto objeto de este artículo es un desarrollo de usos mixtos que contempla 5 torres de vivienda de 26 niveles y 3 torres de oficinas de 19 niveles desplantadas sobre un basamento con uso comercial y 8 sótanos para estacionamiento.

El predio se ubica en el No. 498 de la Av. Río San Joaquín y colinda al Norte con la propia avenida, al Sur con la calle Andrómaco, al Oriente con un edificio de vivienda y un predio desocupado y al Poniente con la calle Neuchatel y otro edificio de vivienda.

La primera fase de este proyecto consistió en la construcción de las primeras dos torres de vivienda y 8 sótanos de estacionamiento, en la fracción Sur del terreno, la cual está limitada por la calle Andrómaco, la calle Neuchatel, un edificio de vivienda y una parte del propio predio que será construido a futuro.

De acuerdo al Estudio de Mecánica de Suelos las características del terreno en los primeros 12.0 m presentaban condiciones indeseables para lograr una excavación que pudiera ser estabilizada mediante anclas activas. Adicionalmente, la geometría del predio y del propio proyecto a construir impedían una excavación con taludes. Resultaba entonces necesario considerar o bien una excavación estabilizada con troqueles o bien un proceso de

¹ Alonso y Asociados, SC Proyecto Estructural; Av. Paseo Loma de la Palma 150 – 101; Lomas de Vistahermosa; CDMX 05100. Teléfono, (55) 21 67 00 70; javier@alonsoasociados.com.mx; manuel.juarez@alonsoasociados.com.mx

sub-excavación en el cual la propia estructura pudiera proporcionar soporte al empuje lateral del subsuelo. Los análisis preliminares de costo y tiempo, llevaron a la conclusión de utilizar un sistema de sub-excavación.

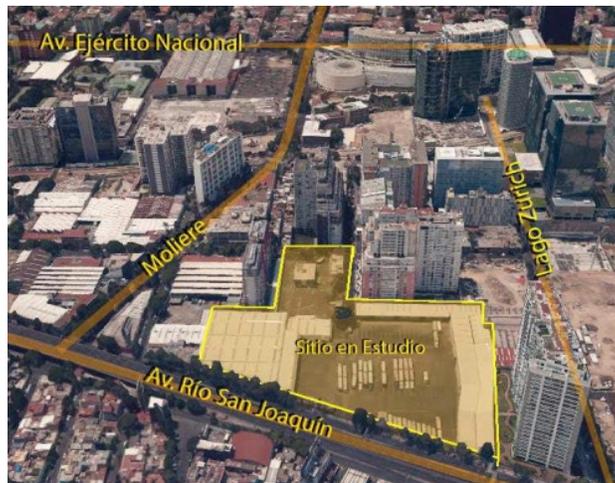
En la Figura 1 se presenta la ubicación del predio en el que se construye el desarrollo mencionado y en la Figura 2 se presenta la zona correspondiente a la Fase I del conjunto. En la Figura 3 (cortesía CGS) se presenta una vista aérea en la que se aprecia de manera más clara las colindancias existentes.



Figura 1 Ubicación del proyecto



Figura 2 Zona de la Fase I del proyecto en la fracción Sur del predio



Vista aérea



Colindancia Sur



Colindancia Este



Colindancia Poniente

Figura 3 Zona de la Fase I del proyecto en la fracción Sur del predio

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL SITIO

El Estudio de Mecánica de Suelos fue desarrollado por CGS en septiembre 2016. En la Figura 4 (cortesía CGS) se presentan los resultados de las características estratigráficas en uno de los sondeos. En la Figura 5 (cortesía CGS) se presenta un corte general que muestra los resultados de sondeos varios en la dirección transversal y longitudinal del sitio. En la Figura 6 (cortesía CGS) se muestra la distribución de presiones que debía utilizarse para el diseño del sistema de contención.

En estas figuras se aprecia que el suelo presenta un material de mala calidad en una profundidad media de 12.0 m medida a partir del nivel banquetta. Este primer estrato de mala calidad está conformado por rellenos, desperdicios de ladrillo, arcillas, limos y arenas. Subsecuente a este primer estrato, se identificó una toba arenosa con gravas hasta una profundidad media de 20.0 m, con resistencia variable entre 30 y 100 Nspt. Por debajo de la toba arenosa se identificó un aglomerado de gravas y arenas, con resistencia superior a 150 Nspt y una profundidad variable entre 20.0 y 24.0 m. Estas intercalaciones entre tobas y aglomerados se encontraron en el resto de la exploración geotécnica hasta la máxima profundidad excavada que fue igual a 60.0 m.

En todos los sondeos realizados en la exploración del predio (6 sondeos de penetración estandar SPT, un sondeo de muestreo selectivo SMS y 4 pruebas estáticas de cono) no se encontró el nivel de agua freática. En la Figura 6 (CGS) se presenta la distribución de la exploración efectuada en el sitio.

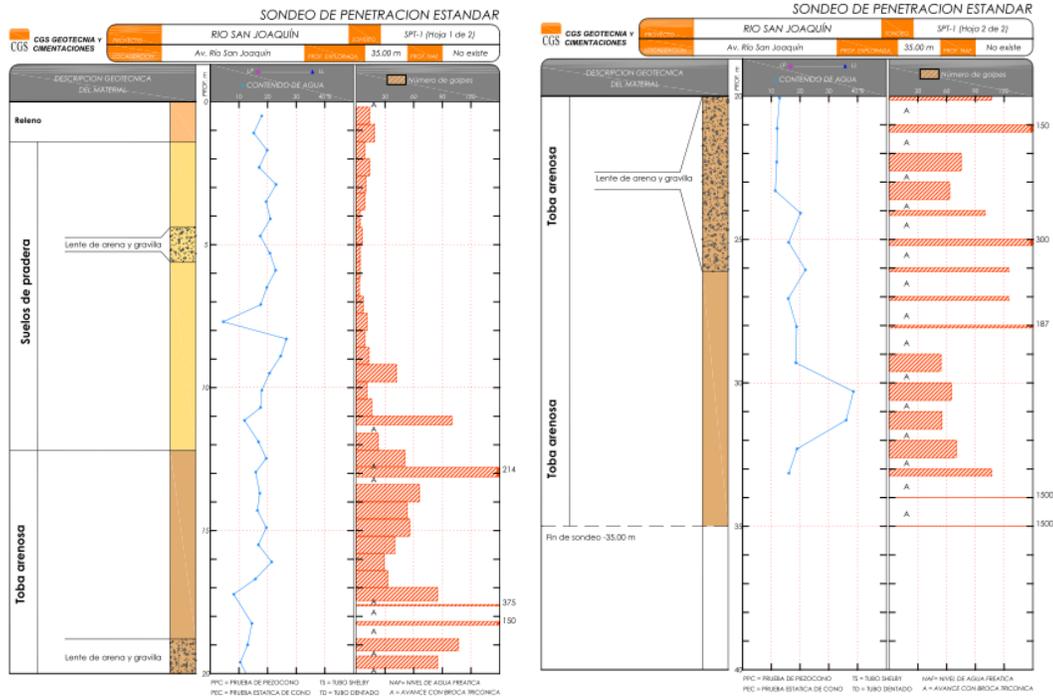


Figura 4 Corte estratigráfico para el sondeo SPT-1

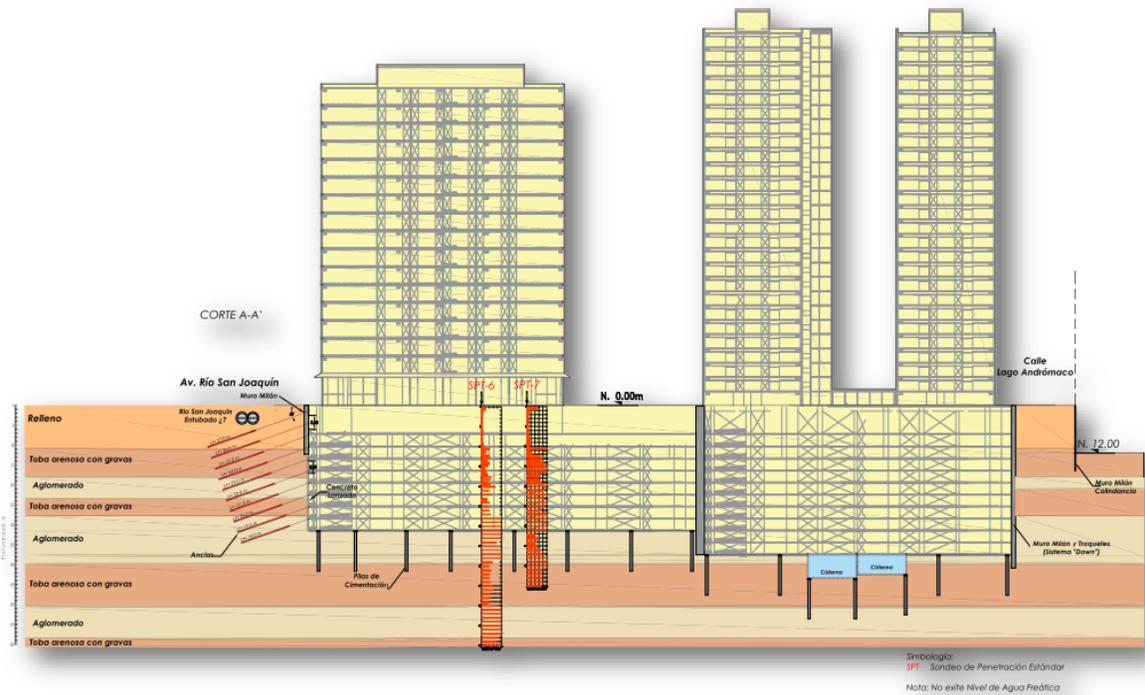


Figura 5 Corte longitudinal

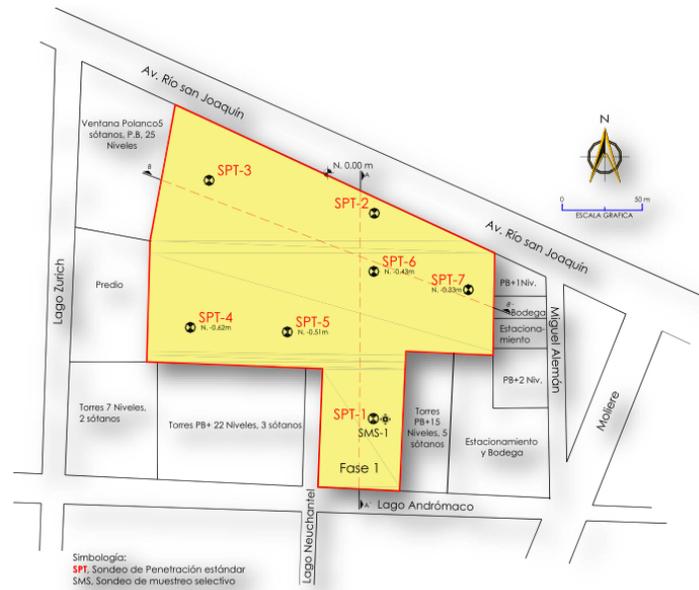


Figura 6 Exploración geotécnica

El Estudio de Mecánica de Suelos identificó el sitio como “Zona de Lomas” (terreno firme), con coeficiente sísmico $c = 0.16$ (NTC2004), asentamiento regional nulo y concluyó que la solución de cimentación sería mediante pilas coladas “in situ” desplantadas 10.0 m por debajo del último nivel de excavación. En la Tabla 1 (cortesía de CGS) se presenta la capacidad de carga estimada para las pilas de cimentación.

Tabla 1 Capacidad de carga en pilas de cimentación

Diámetro \varnothing (m)	Capacidad de carga Q_{adm} Compresión (T)	Asentamiento δ (cm)	K_v (T/cm)	Q_{adm} Tensión (T)
0,80	787	2,81	280	329
0,90	952	2,93	325	372
1,00	1131	3,06	370	415
1,20	1534	3,34	459	502
1,40	1996	3,62	551	591
1,50	2249	3,77	597	636
1,60	2516	3,92	642	633
1,80	3096	4,21	735	713

El Estudio de Mecánica de Suelos referido concluye que la estabilización de la excavación tendrá que realizarse mediante un sistema de sub-excavación en la zona de la Fase I, y que para otras zonas del desarrollo podrán utilizarse anclas activas por debajo de la cota -12.0 que identifica el fina de los suelos incompetentes. En las zonas de excavación interior del predio, podría utilizarse una excavación a cielo abierto con el talud de reposo del material existente. Para mayor referencia sobre las propiedades del predio, referirse al Estudio de Mecánica de Suelos desarrollado por CGS en septiembre 2016 y a las Notas Geotécnicas subsecuentes.

CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

La Fase I de este desarrollo contempla la construcción de 2 torres residenciales de 26 niveles y 8 sótanos de estacionamiento más un sótano destinado a cisternas y plantas de tratamiento. En la Figura 7 se presenta el sótano 9 para cisternas, el sótano tipo y una planta arquitectónica típica y en la Figura 8 se muestra un corte transversal.

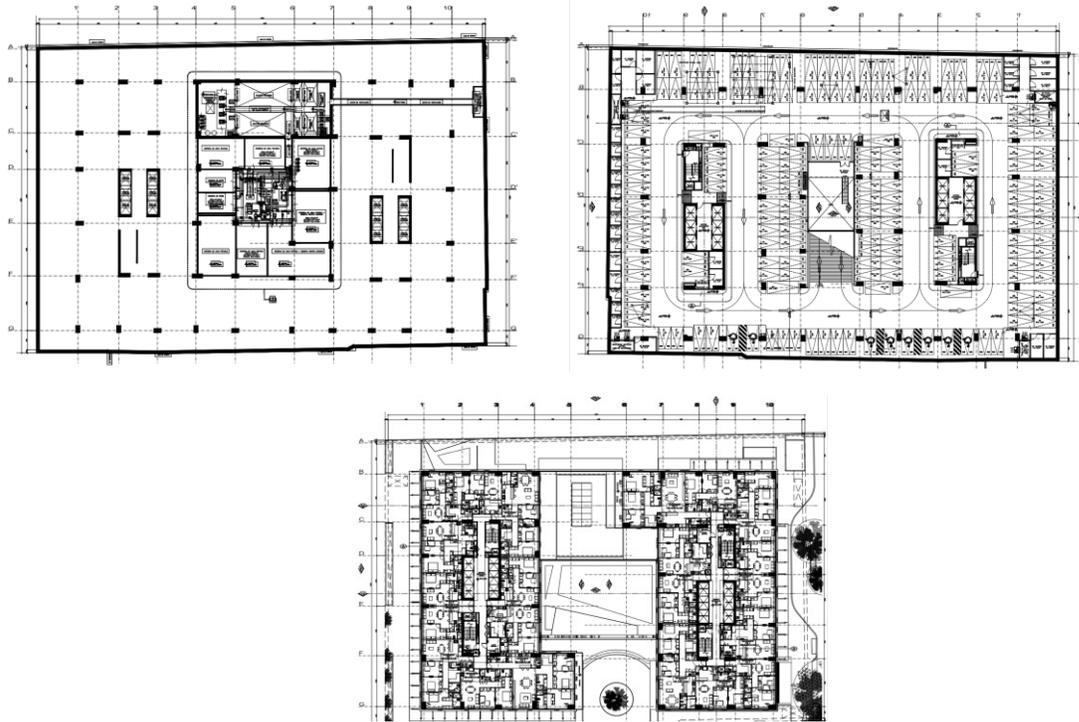


Figura 7 Plantas tipo (cisternas, estacionamientos y residencias)



Figura 8 Corte transversal tipo

La superestructura está resuelta mediante un sistema de marcos rígidos y muros de rigidez de concreto colado “in situ”; el sistema de losas está formado por una losa reticular con casetones de poliestireno. Los sótanos están constituidos mediante columnas y muros de rigidez y un sistema de losas planas de 30 y 35 cm de peralte. En la Figura 9 se presenta una vista del modelo estructural 3D utilizado para el análisis y diseño.

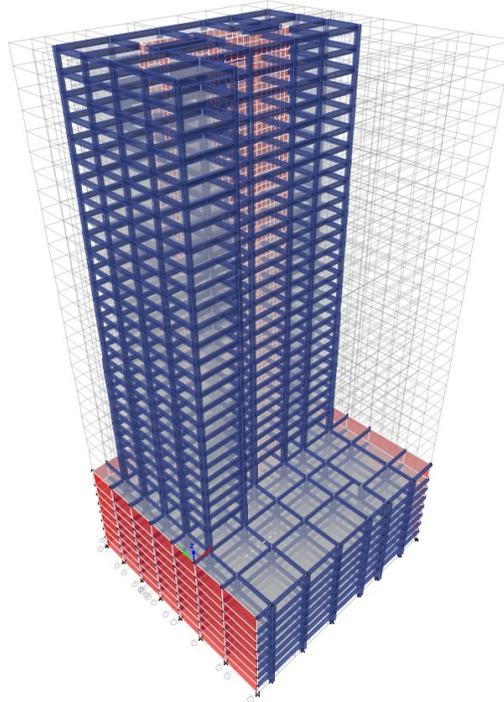


Figura 9 Vista 3D del modelo estructural

PROCESO PARA LA EXCAVACIÓN

En base a las recomendaciones del Estudio de Mecánica de Suelos y al estudio de logística de CIMESA (empresa contratista para la construcción de la sub-excavación), el proceso constructivo implica la construcción de un Muro Milán perimetral al mismo tiempo que se construyen las pilas de cimentación considerando que el equipo de perforación se ubica en el Nivel de Terreno Natural; al mismo tiempo que se construyen las pilas, se fabrican los perfiles metálicos que se insertarán en el concreto recién colado de las pilas. Estos perfiles metálicos pre-cimentados, serán los responsables de soportar la estructura de los sótanos en la medida en que se avanza con la excavación y se cuelan las diferentes losas de los niveles de sótano.

De manera simplificada, el proceso incluye las siguientes actividades:

- Trazo
- Construcción del brocal perimetral
- Construcción del Muro Milán perimetral
- Simultáneamente a la construcción del Muro Milán, se procederá con la construcción de las pilas de cimentación que a su vez implica las etapas siguientes:
 - Excavación hasta la profundidad de proyecto de la perforación para la pila
 - Habilitado del acero de refuerzo de la pila
 - Fabricación de los perfiles metálicos que habrán de ser pre-cimentados
 - Inserción del acero de la pila
 - Colocado de la pila
 - Inclusión del perfil metálico pre-cimentado

- Relleno (con material producto de la excavación) de la perforación generada para el colado de la pila, con objeto de permitir el tránsito de personal y vehículos
- Terminada la construcción de las pilas y la colocación de los perfiles metálicos pre-cimentados, se puede dar inicio al proceso de excavación, siguiendo las etapas siguientes:
 - Excavación hasta el nivel -3.0 m para la colocación de cimbra del Nivel PB
 - Habilitado y colado del Nivel PB
 - Excavación hasta el nivel -9.99 para la colocación de cimbra del Nivel S2
 - Habilitado y colado del Nivel S2. Inicio del habilitado y colado del Nivel S1.
 - Excavación hasta el nivel -15.19 para la colocación de cimbra del Nivel S4
 - Habilitado y colado del Nivel S4. Inicio del habilitado y colado del Nivel S3
 - Excavación hasta el nivel -21.19 para la colocación de cimbra del Nivel S6
 - Habilitado y colado del Nivel S6. Inicio del habilitado y colado del Nivel S5
 - Excavación hasta el nivel -25-50 para construcción de la cimentación (S8)
 - Construcción del S8 (dados y traves de liga). Inicio del habilitado y colado del Nivel S7

En la figura 10 se presenta una secuencia esquemática del proceso seguido para la subexcavación.

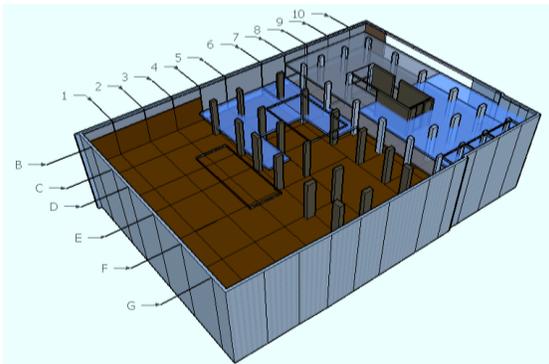


Figura 10a Construcción de la losa de PB

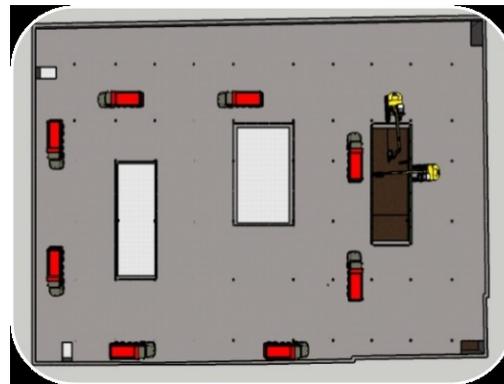


Figura 10b Lumbreras en el Nivel PB



Figura 10c Sub-excavación al Sótano 2



Figura 10d Colocación de cimbra para el Sótano 2

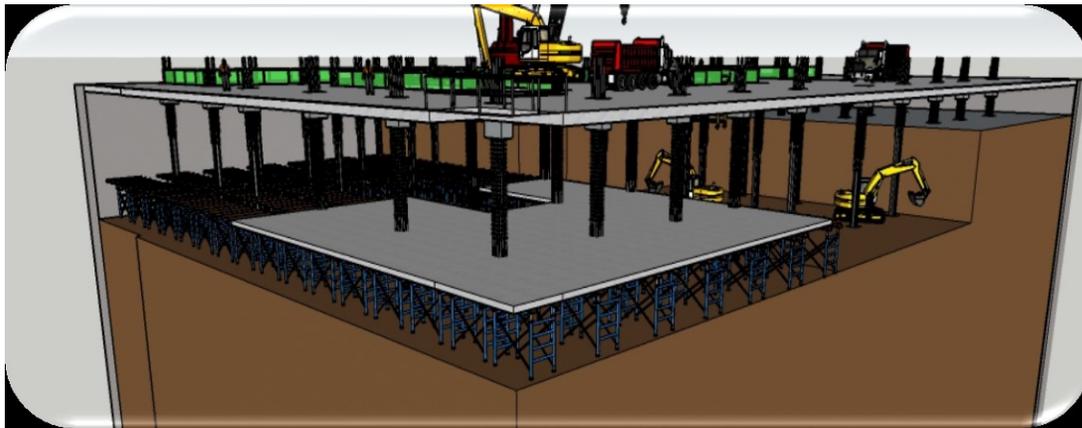


Figura 10e Construcción del Sótano 2

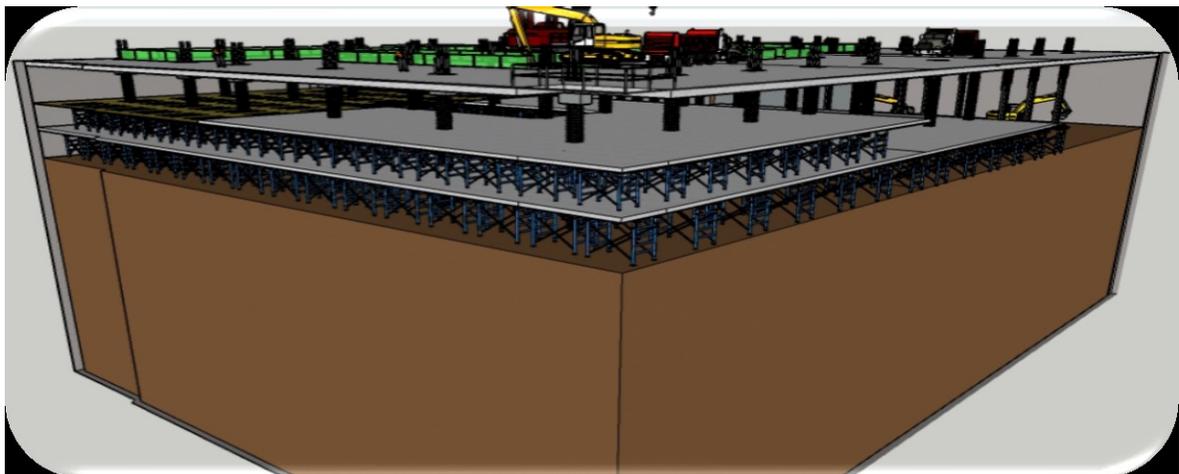


Figura 10f Construcción del Sótano 1



Figura 10g Continua sub-excavación para el Sótano 4

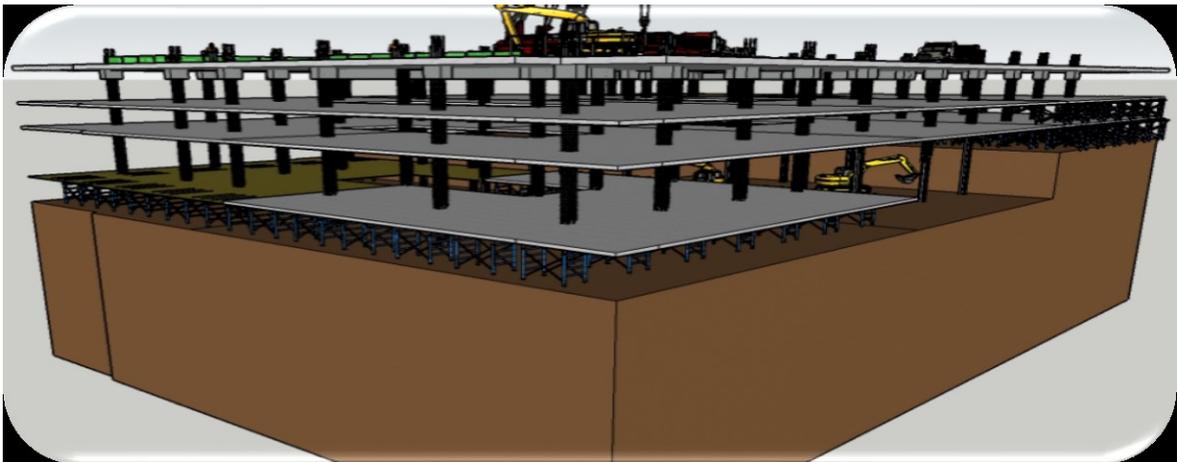


Figura 10h Construcción del Sótano 4

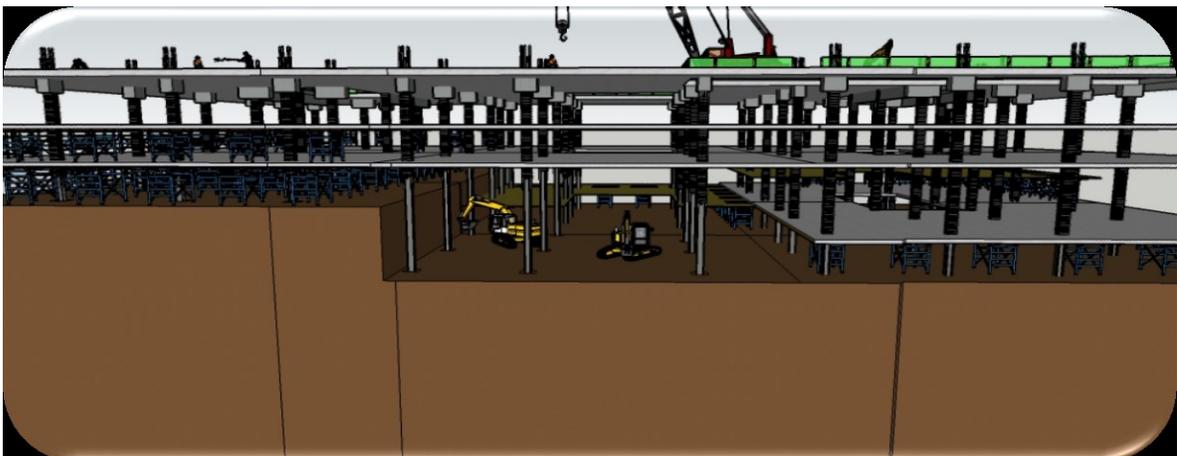


Figura 10i Construcción del Sótano 3 y continuación de sub-excavación al Sótano 6

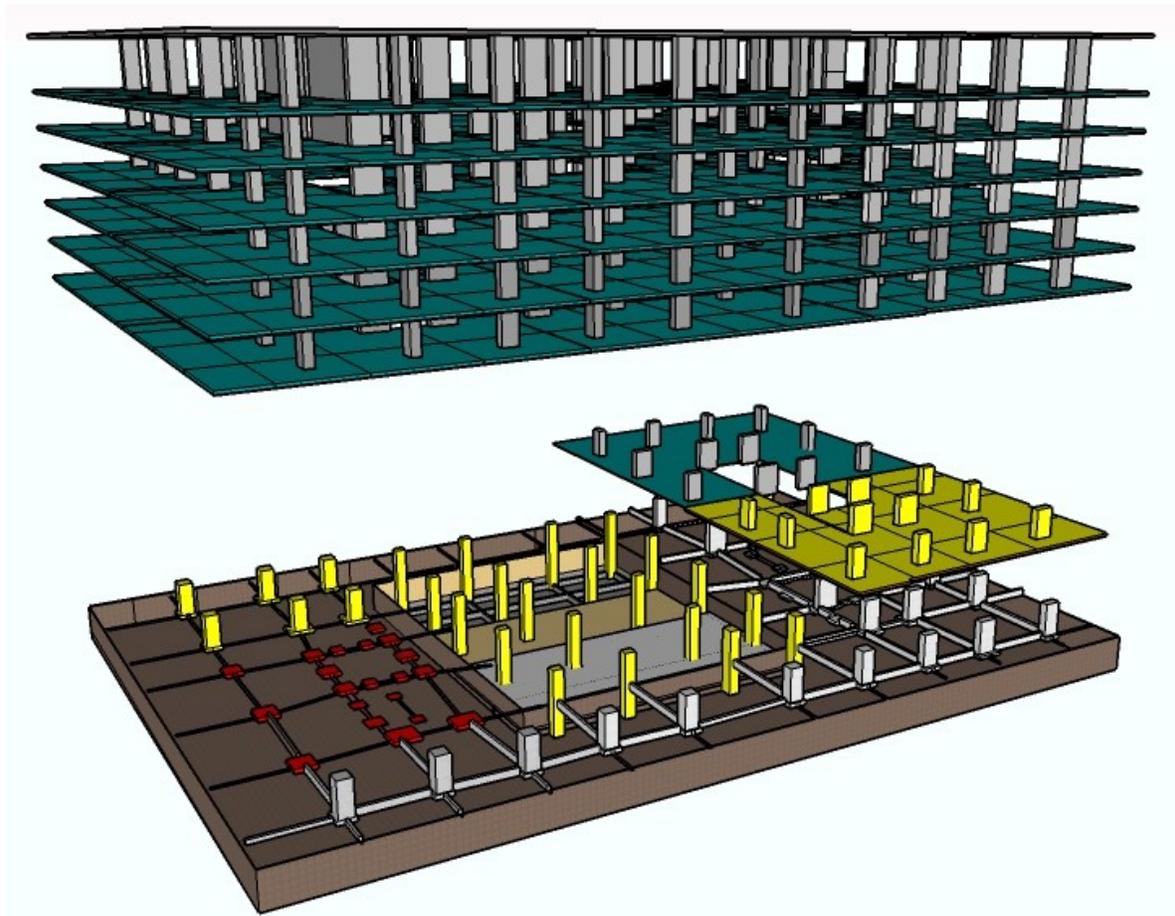


Figura 10j Sub-excavación hasta el Sótano 8, construcción de dados, traves de liga, cisternas y de manera serial se construye el Sótano 7

De esta forma, al terminar el proceso de excavación se habrá ejecutado la construcción de la cimentación y se habrán utilizado las propias losas de los sótanos ya construidas como un diafragma que restringe y soporta el empuje lateral del suelo circundante.

Para el diseño de los elementos pre-cimentados y la losa de PB, se consideró que el Nivel PB tendría una carga viva durante el proceso de construcción igual a 2.0 ton/m^2 y que las losas tipo de estacionamiento tendrían una carga viva de operación de la construcción igual a 0.1 ton/m^2 .

DISEÑO DE LA CIMENTACION

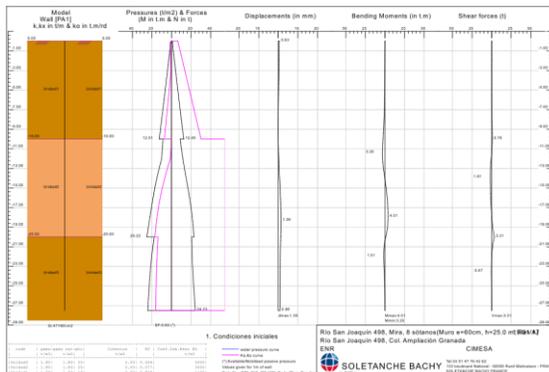
Muro Milán

Haciendo uso de la distribución de presiones laterales generadas por el suelo y considerando la posible variación de estas presiones durante el proceso constructivo, se diseñó el Muro Milán como un elemento plano de ancho unitario.

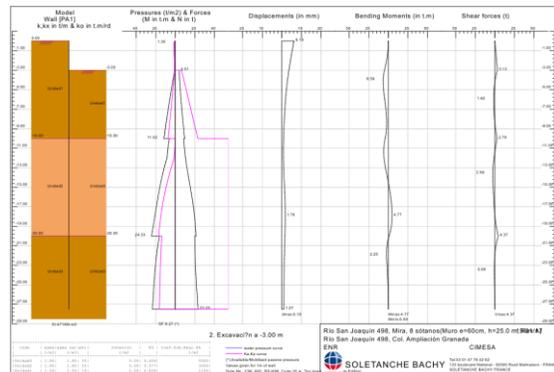
En la Figura 11 se muestra la distribución de presiones actuando sobre el muro en función de la etapa de excavación considerada, así como la envolvente de los momentos flexionantes y fuerzas cortantes resultantes.

El muro tiene un espesor de 60 cm y está fabricado con un concreto con resistencia a los 28 días $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$; el contenido mínimo de cemento deberá ser igual a 375 kg/m^3 de concreto. Se consideró un módulo de

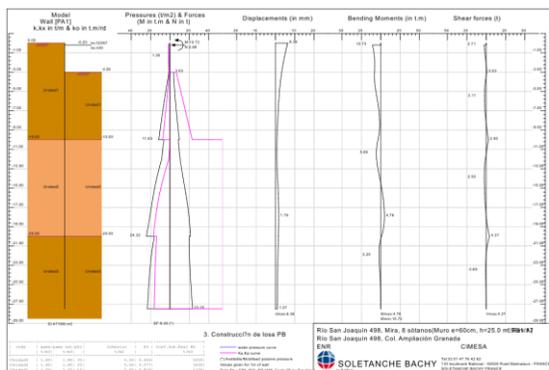
elasticidad no menor a $E_c = 260,000 \text{ kg/cm}^2$. El acero de refuerzo del muro será $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$. La longitud de los paneles de Muro Milán es variable en función de la distribución de los mismos en cada uno de los lados del perímetro del predio, pero en promedio se puede decir que tienen una longitud igual a 6.70 m.



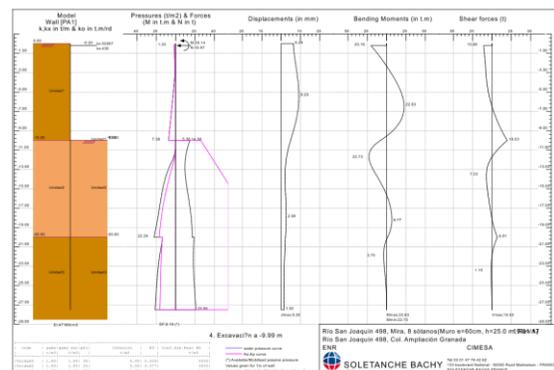
Condiciones iniciales



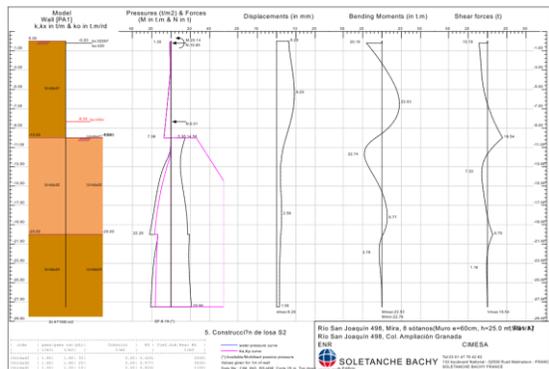
Excavación a -3.00 m



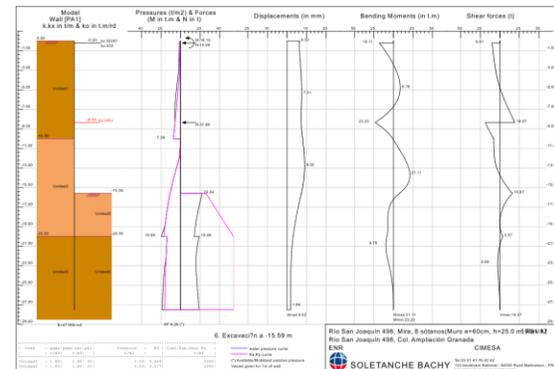
Construcción losa PB



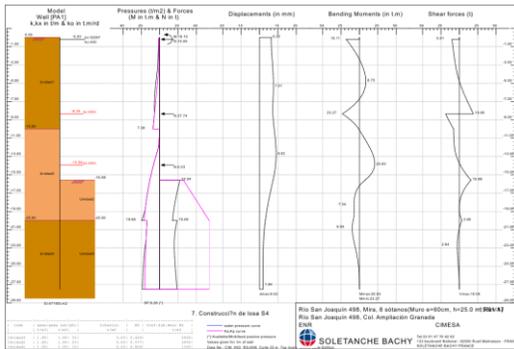
Excavación a -9.99 m



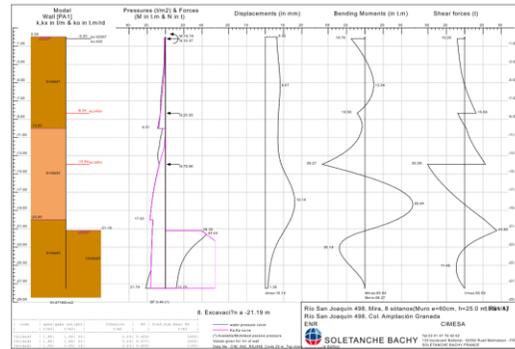
Construcción losa S2



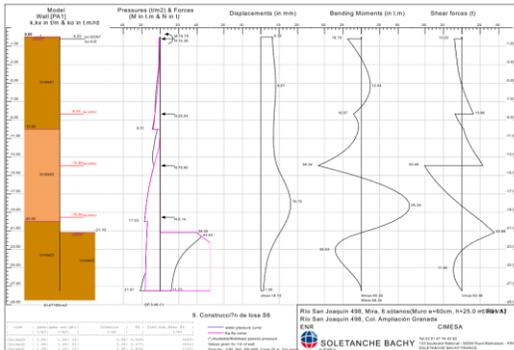
Excavación a -15.59 m



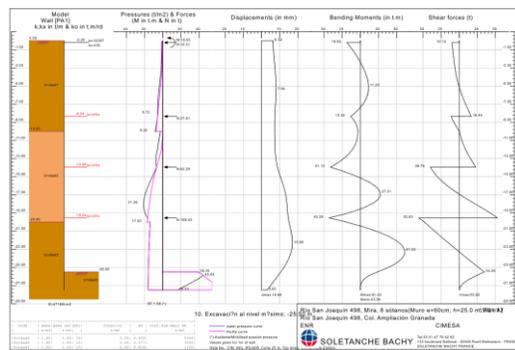
Construcción losa S4



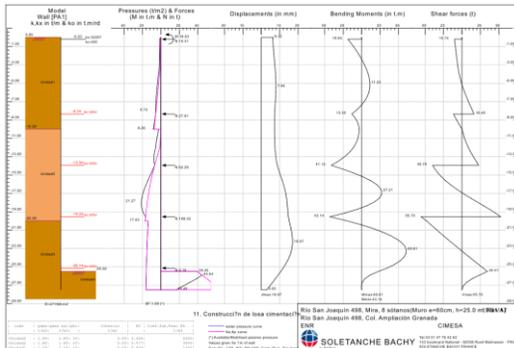
Excavación a -21.19 m



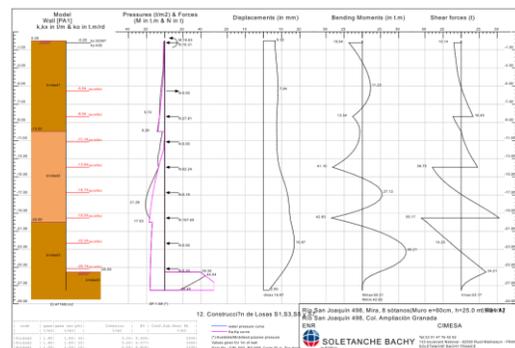
Construcción losa S6



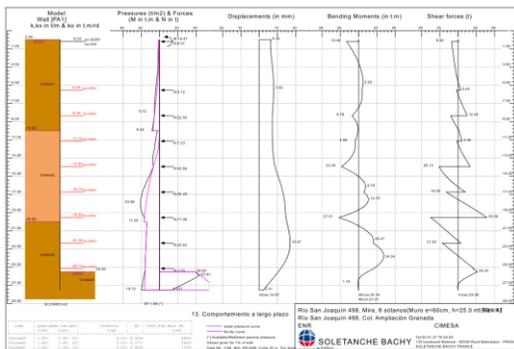
Excavación a -25.50 m



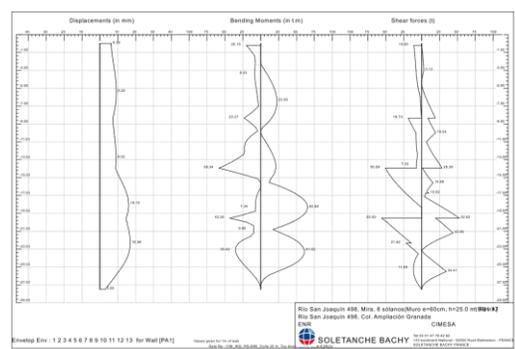
Construcción losa S8



Construcción losas S1, S3, S5 y S7



Comportamiento a largo plazo



Envolvente

Figura 11 Distribución de presiones en Muro Milán en función del proceso de construcción de sótanos

La profundidad del Muro Milán fue igual a -27.50 m (considerando 0.00 el nivel banquetta) en tres de los lados del muro (Sur, Oriente y Poniente). Para el caso de la colindancia Norte, la profundidad fue igual a -31.0 m debido a la presencia de los sótanos del futuro desarrollo de oficinas. El muro fue construido teniendo en cuenta una tolerancia en la verticalidad del mismo igual a 1.0% de la longitud del mismo. En la figura 12 se presenta una vista frontal de la sección Norte del Muro Milán.

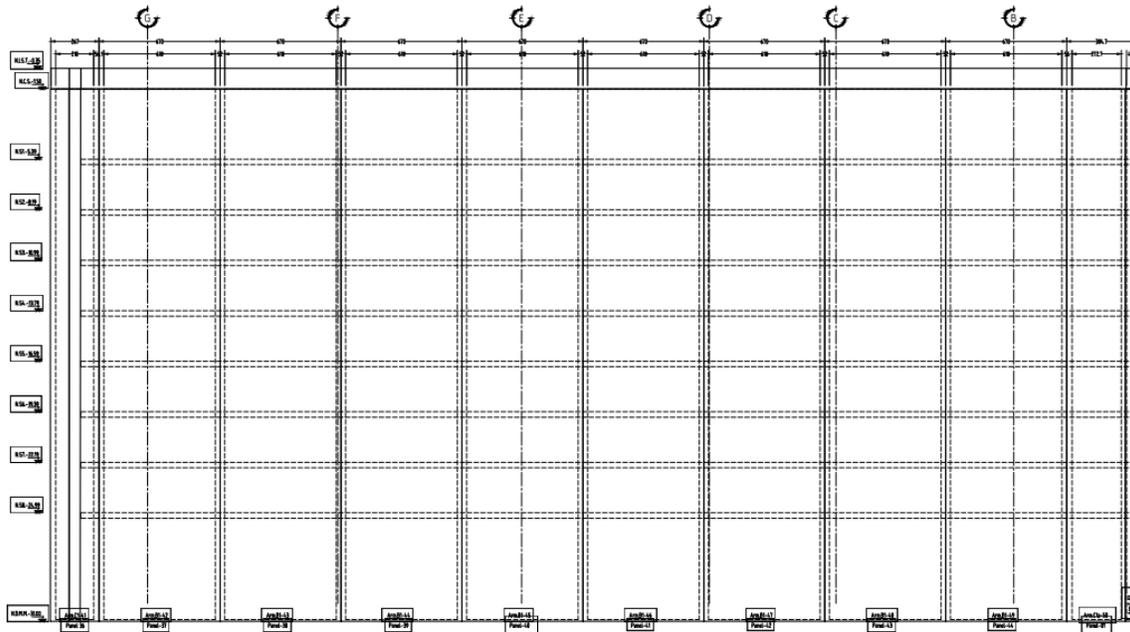


Figura 12 Distribución de presiones en Muro Milán en función del proceso de construcción de sótanos

En la figura 13 se muestra una vista frontal del refuerzo del Muro Milán y en la figura 14 un acercamiento a una sección de esta vista. En la figura 15 se presentan algunos detalles para diversas secciones del muro. En la figura 16 se presenta una foto de una sección del Muro Milán en proceso de colocación del refuerzo en la zona excavada.

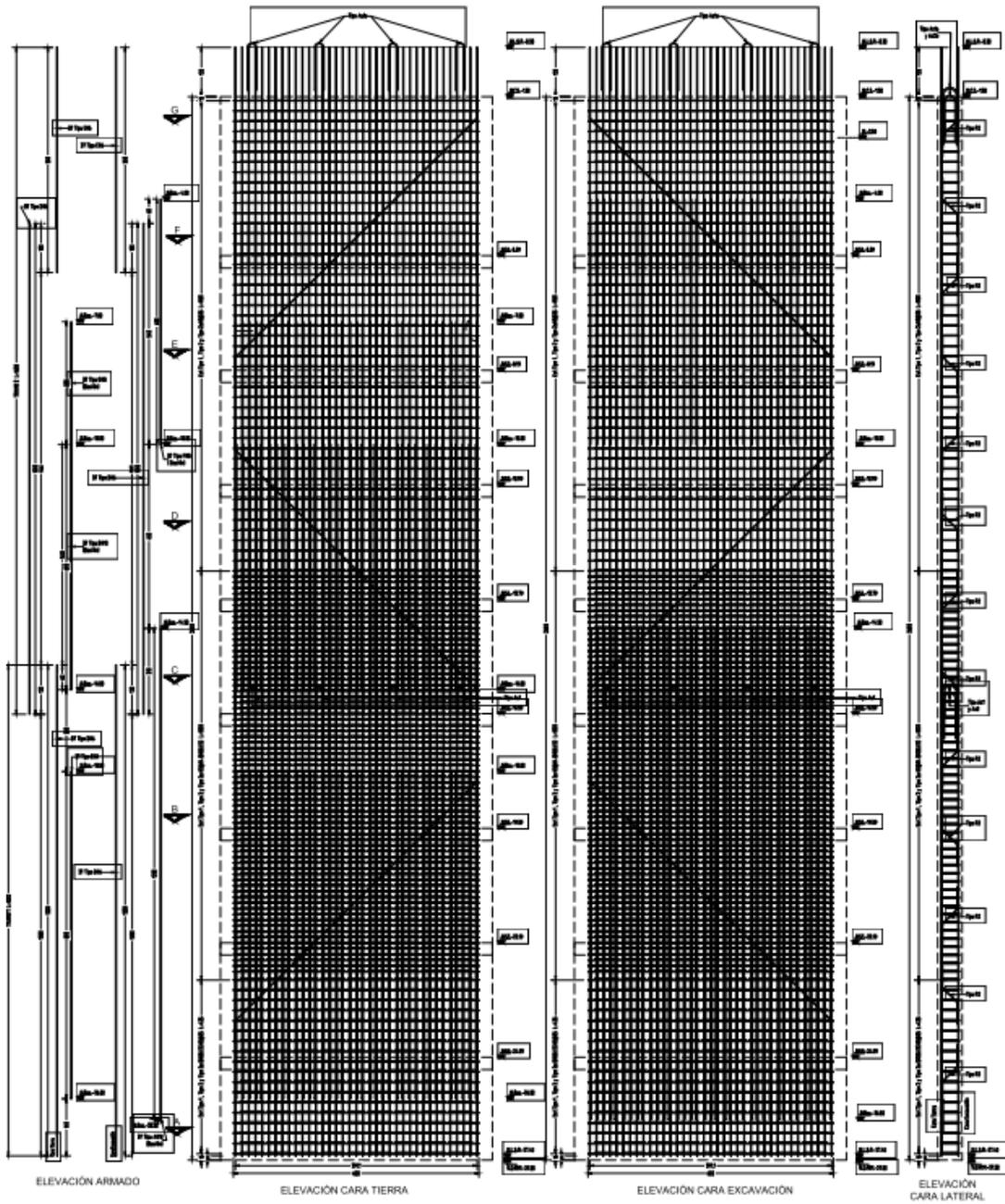


Figura 13 Vista frontal del refuerzo del Muro Milán



Figura 16 Desplante de muro Milán

Pilas de cimentación

Las pilas fueron diseñadas utilizando las descargas que se generan en un modelo 3D del proyecto completo y siguiendo las recomendaciones del asesor en geotecnia y las especificaciones del NTC del Reglamento de la CDMX.

El diseño de estas pilas fue revisado por el procedimiento de construcción considerando las tolerancias de un posible desvío del perfil metálica que habría que pre-cimentar. Considerando un tolerancia en la desviación del perfil no mayor que 0.5% y una longitud de 30 m en el perfil metálico, se obtuvo que el diámetro mínimo de las pilas que habrían de soportar perfiles metálicos no sería menor que 1.60 m aunque el cálculo de la pila especificara diámetros menores.

Las pilas tienen una longitud de 10.0 m debajo del último sótano. Tienen diámetros variables (1.0 m a 2.0 m) en función a la descarga máxima que habrán de recibir. Fueron diseñadas con un concreto con $f'_c=350\text{kg/cm}^2$. La figura 17 presenta una planta con la distribución de las pilas de cimentación y en la figura 18 se muestra un detalle del refuerzo de una pila de 1.60 m de diámetro. En la figura 19 se presenta el diagrama de interacción para esta pila. La carga máxima última estimada para estas pilas fue igual a 2,800 ton.

Sólo como referencia podría ser interesante resaltar que las pilas de cimentación podrán tener cargas de servicio durante la vida útil de la estructura comprendidas entre 700 ton y 3,600 ton, mientras que durante el proceso de construcción estas pilas podrían tener cargas nominales comprendidas entre 250 ton y 750 ton.

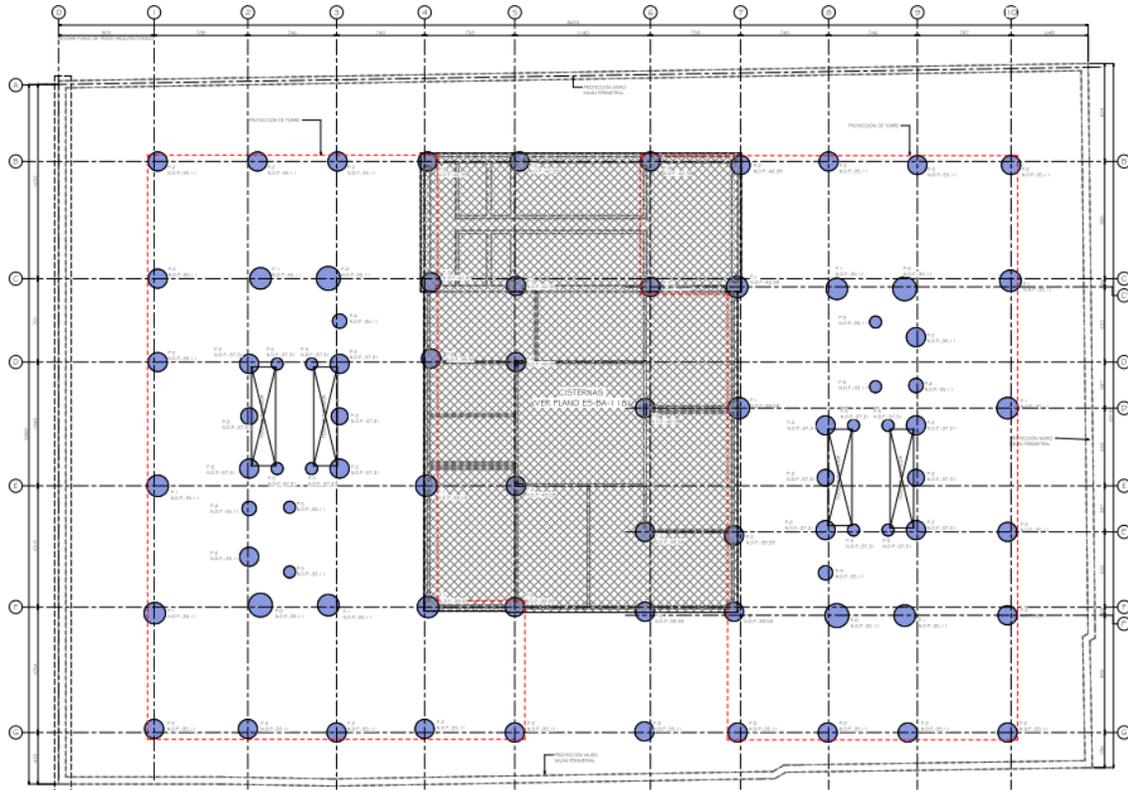


Figura 17 Planta de distribución de pilas

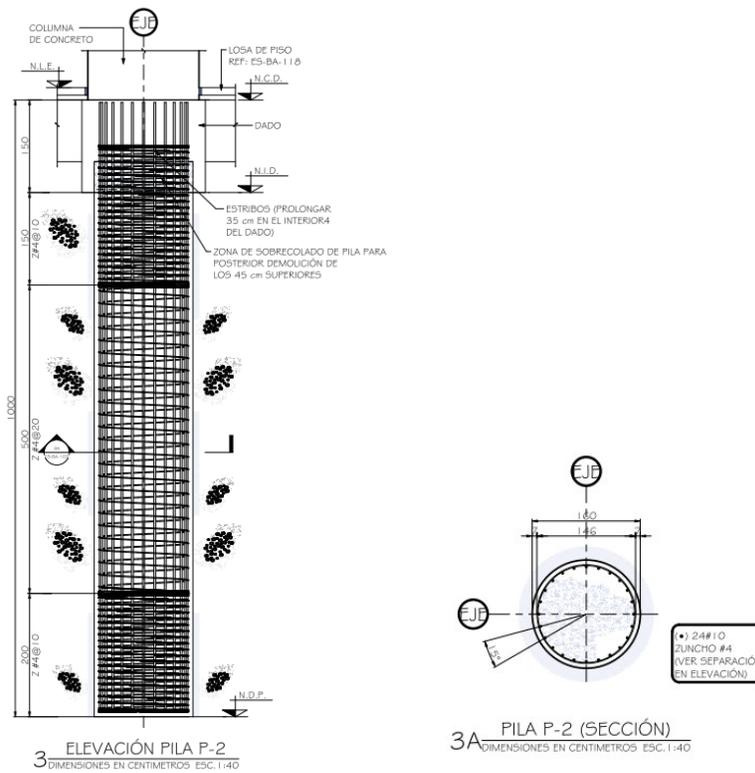


Figura 18 Detalle pila tipo P-2 con diámetro 1.60 m

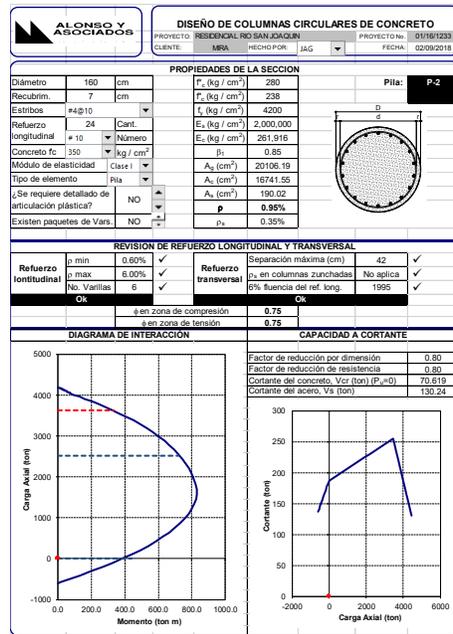


Figura 19 Diseño pila tipo P-2 con diámetro 1.60 m

Dados y trabes de liga

Los datos y trabes de liga del proyecto se diseñaron tomando en cuenta las posibles excentricidades que pudieran darse en el proceso de colado de pilas y de hincado de los perfiles pre-cimentados. Se contemplaron para esto 0.5% desviación, la cual se estableció como tolerancia durante la obra. Para el diseño de las trabes de liga se tomaron en cuenta los momentos producidos por estas excentricidades, adicionales a los obtenidos del análisis. Al llegar a la etapa final de excavación (al nivel de cimentación), se encontraron algunos casos que algunas pilas tuvieron una desviación mayor a la contemplada en diseño. Esta desviación en el pero de los casos, resultó igual al 2% de la profundidad de la excavación (mayor al 1.5% originalmente estimado en la etapa de proyecto). En estos casos se realizaron refuerzos adicionales en los datos y trabes de liga, a manera de resistir los momentos adicionales generados por las excentricidades. En la figura 20 se aprecia uno de estos casos de excentricidad mayor a la esperada.



Figura 20 Pila con desviación mayor a la considerada en proyecto

Los refuerzos necesarios para soportar el incremento en las demandas se diseñaron de manera particular para cada caso. Para esto, las secciones y refuerzos de las tabes de liga se incrementaron en la dirección de la excentricidad, de manera que alcanzaran la resistencia necesaria para soportar este momento adicional. Adicionalmente, se incrementaron las secciones de los dados ya que la geometría de proyecto ya no era suficiente para albergar las columnas y pilas. En estos dados se añadió acero longitudinal y transversal, a manera de mitigar las demandas adicionales.

PERFILES PRE-CIMENTADOS

Estas columnas metálicas se diseñaron para soportar las cargas máximas que se generarían durante el proceso de construcción de la excavación.

Se diseñaron 24 tipos diferentes de perfiles pre-cimentados, dependiendo la carga axial soportada y su longitud sin soporte lateral. Con esta diversificación en los perfiles se logró optimizar al máximo el volumen de acero de proyecto. Los perfiles utilizados se describen en la siguiente tabla:

Tipo de perfil pre-cimentado	Tramo				Carga axial (T)
	PB-S4	S4-S6	S6-S8	S8-S9	
CM-1	IR 356x236.5	IR 356x287.7	IR 356x382.9	N/A	900
CM-2a	IR 356x262.3	IR 356x382.9	IR 356x511.5	N/A	970
CM-2b	IR 356x236.5	IR 356x346.9	IR 356x421.9	N/A	812
CM-3a	IR 356x262.3	IR 356x287.7	IR 356x382.9	N/A	805
CM-3b	IR 356x236.5	IR 356x314	IR 356x382.9	N/A	853
CM-4a	IR 356x236.5	IR 356x287.7	IR 356x349.9	N/A	843
CM-4b	IR 356x262.3	IR 356x287.7	IR 356x349.9	N/A	712
CM-5a	IR 356x216.3	IR 356x216.3	IR 356x314	N/A	603
CM-5b	IR 356x216.3	IR 356x216.3	IR 356x262.3	N/A	441
CM-6a	IR 356x236.5	IR 356x287.7	IR 356x314	N/A	660
CM-6b	IR 356x262.3	IR 356x287.7	IR 356x314	N/A	725
CM-7	IR 356x287.7	IR 356x287.7	IR 356x346.9	N/A	682
CM-8a	IR 356x216.3	IR 356x314	IR 356x592.5	IR 356x592.5	1147
CM-8b	IR 356x236.5	IR 356x346.9	IR 356x592.5	IR 356x592.5	1101
CM-9	IR 356x178.8	IR 356x236.5	IR 356x552	IR 356x552	893
CM-10	IR 356x236.5	IR 356x314	IR 356x552	IR 356x552	874
CM-11	IR 356x162.1	IR 356x162.1	IR 356x421.9	IR 356x421.9	435
CM-12	IR 356x216.3	IR 356x287.7	IR 356x421.9	IR 356x421.9	928
CM-13	IR 356x178.3	IR 356x178.8	IR 356x346.9	IR 356x346.9	540
CM-14	IR 356x162.3	IR 356x196.5	IR 356x421.9	IR 356x421.9	538
CM-15	IR 356x236.56	IR 356x287.7	IR 356x287.7	IR 356x421.9	860
CM-16a	IR 356x314	IR 356x346.9	IR 356x346.9	IR 356x511.5	1043
CM-16b	IR 356x236.5	IR 356x314	IR 356x314	IR 356x511.5	963
CM-16c	IR 356x236.5	IR 356x314	IR 356x314	IR 356x511.5	1104

La distribución de los perfiles indicados en la tabla anterior se indica en la planta de la figura 21.

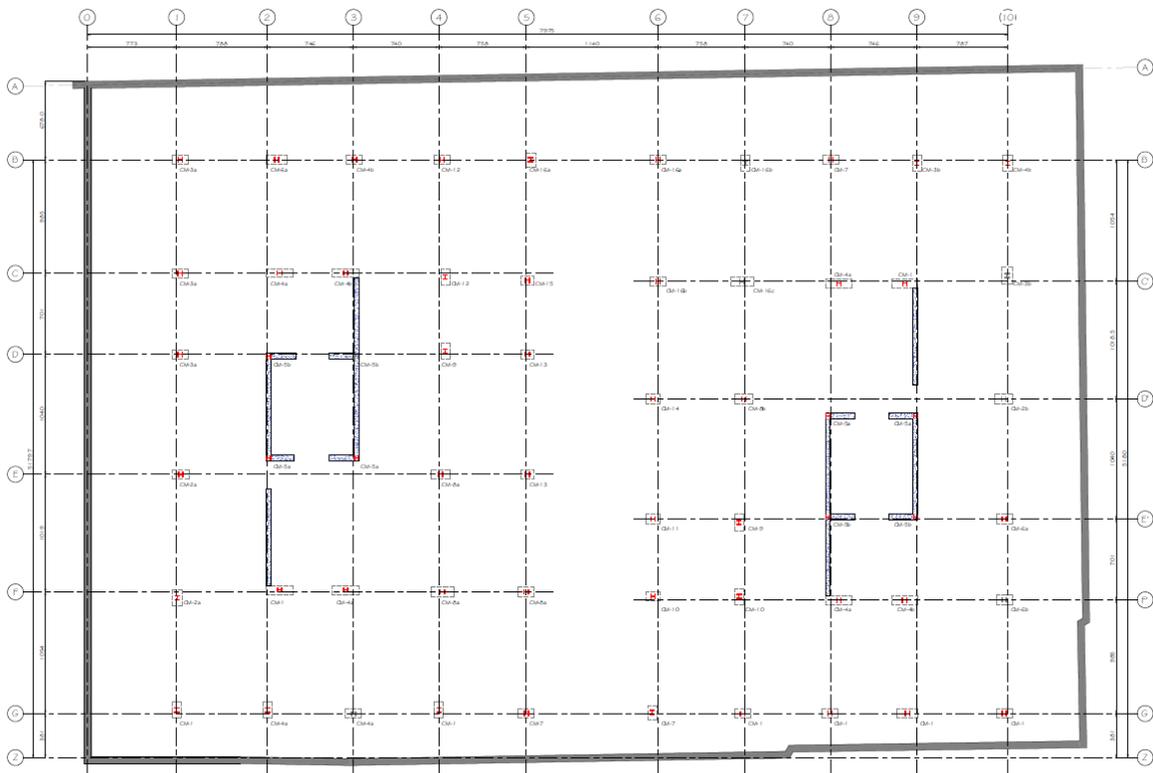


Figura 21 Planta de Perfiles Pre-cimentados

Para estos elementos se utilizaron perfiles IR de acero ASTM A-992. A estos perfiles se les añadieron conectores de cortante, en este caso pernos tipo Nelson, los cuales tienen la función de transmitir la carga de los elementos de concreto en los que están embebidos los perfiles.

Desplante de perfiles pre-cimentados

El proceso de desplante de los perfiles pre-cimentados se realiza paralelo a la construcción de las pilas. Los perfiles se hincan en la pila previo al fraguado del concreto, quedando embebidos en esta. Los perfiles se empotran en la pila por medio de conectores de cortante. Estos conectores deben estar diseñados para resistir mediante esfuerzos cortantes la carga transmitida a la pila, la cual es producto de la carga axial que será soportada durante todo el proceso de excavación. La carga axial considerada para diseño es la suma de las cargas transmitidas del sótano 6 a la planta baja. El sótano 7 no se toma en cuenta en este cálculo ya que, al momento de su construcción, ya estarán habilitadas las columnas del proyecto definitivo de sótano 7 a sótano 8.

Las conexiones entre los diferentes tramos de perfiles se realizaron por medio de soldadura de penetración. Al momento de desplantar los perfiles, estos ya deben contar con su longitud total, de manera que su nivel de remate alcance el nivel de planta baja para poder comenzar el proceso de excavación. Esta situación implicó un reto, ya que se debía contar con una grúa con capacidad suficiente para introducir los tramos de hasta 37.00 m largo, como se aprecia en la figura 22.



Figura 22 Desplante de perfil pre-cimentado

Cargas de entrepiso

En cada entrepiso se transmite la carga a los perfiles pre-cimentados, por lo que la carga que estos soportan se incrementa conforme avanza la excavación. Debido a que la estructura final se compone de elementos de concreto, se requiere de conectores de cortante para transmitir la carga de los entrepisos, parecido al caso de las pilas. Los perfiles quedan embebidos en la estructura definitiva. Como se comentó previamente, las cargas que los perfiles deben transmitir incluyen el peso propio de las losas construidas en cada una de las etapas, así como la carga viva de construcción que fue igual a 2.0 ton/m² para el nivel PB y 0.1 ton/m² para los sótanos.



Figura 23 Conectores de cortante en perfil pre-cimentado

Para la conexión de los perfiles con las columnas, en cada entrepiso se colocan conectores de cortante y se cuela una sección de la columna de concreto lo suficientemente larga para albergar los conectores necesarios para resistir la carga que se transmite a la columna. En este caso las secciones de columna se construyeron de 1.00 m de largo, lo que permitía albergar suficientes conectores para resistir la carga axial transmitida a todos los perfiles de proyecto en cada entrepiso.

Diseño de perfiles pre-cimentados

Para el diseño de los perfiles se realizó un análisis por etapas constructivas, ya que se debe contemplar tanto el incremento de cargas conforme avanza la construcción, como las alturas sin soporte lateral durante la excavación. Para cada etapa constructiva debió considerarse una doble altura, ya que las excavaciones se realizaron en tramos de dos sótanos y adicionalmente se suman 1.50 m de sobre excavación para colocación de cimbra. A esta altura se le resta la longitud del tramo de columna colado para el anclaje del entrepiso. En cada sección del perfil se tomó en cuenta esta longitud sin soporte lateral y la carga axial de todos los entrepisos ya construidos. En la siguiente tabla se describen las longitudes sin soporte lateral utilizadas para el diseño de los perfiles pre-cimentados:

Tramo	Longitud sin soporte lateral de perfiles pre-cimentados (m)
S2 a PB	7.80
S4 a S2	6.10
S6 a S4	6.10
S8 a S6	6.10
Cisternas a S6	8.90
PTAR a S6	10.70

Por ejemplo, para el diseño del tramo de sótano 4 a sótano 6 se toma en cuenta las alturas de los sótanos 5 y 6 (2.80 m cada uno), se suma 1.50 m de sobre excavación para la cimbra y se resta 1.00 m de la sección de columna que se cuela para el anclaje con los conectores de cortante. Sumando estas alturas, se consideran 6.10 m de longitud sin soporte lateral. La carga axial de diseño considera la transmitida por los entrepisos de planta baja a sótano 4, ya que son los que ya estarán construidos al momento de que la excavación alcance el nivel del sótano 6.

En el caso de los perfiles que desplantan en las zonas de cisternas y planta de tratamiento de aguas residuales, las alturas sin soporte lateral son significativamente mayores a los perfiles típicos, ya que a la profundidad de estas zonas se le añade la doble altura de los sótanos de la última etapa del proceso constructivo. Para optimizar el diseño de los perfiles, en estos casos se colocaron arriostramientos a base de puntales metálicos para reducir su esbeltez, como se aprecia en la figura 24.



Figura 24 Arriostramiento de perfiles pre-cimentados

Debido a que los conectores de cortante únicamente se colocan en las zonas de nodos, las columnas no se diseñan como sección compuesta. Posterior al proceso "Down", las columnas de concreto deben tener capacidad suficiente para soportar la estructura por sí solas.

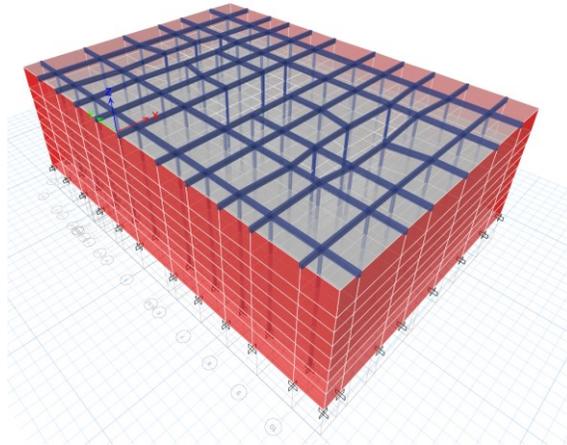


Figura 25 Vista 3D del modelo (sólo sótanos) para el proceso de sub-excavación

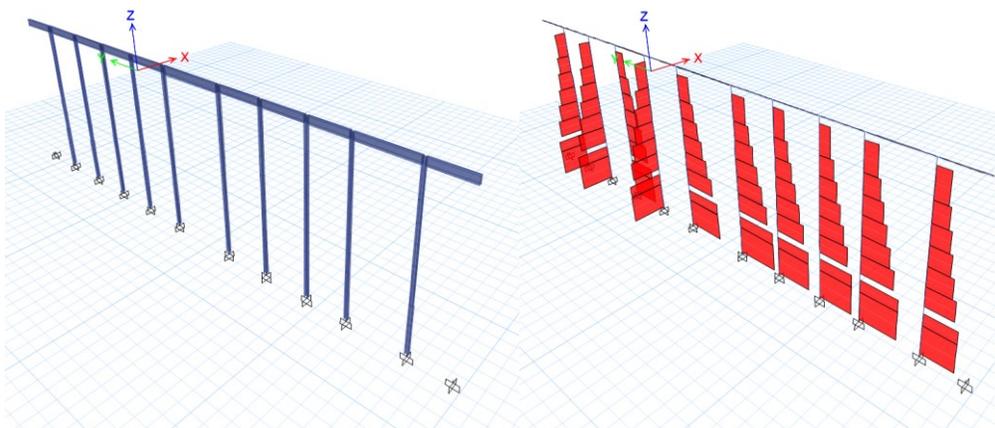
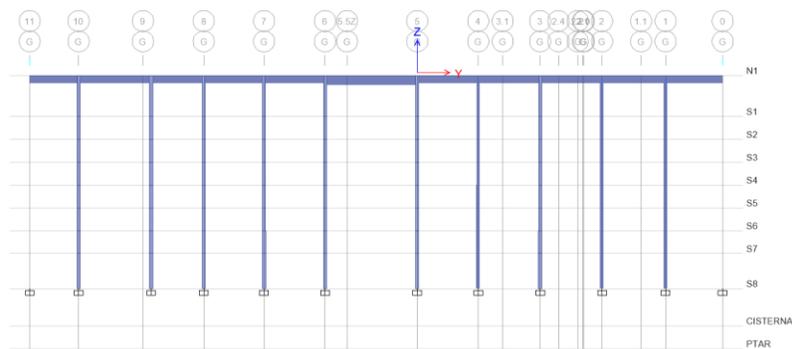


Figura 26 Vistas del modelo de los perfiles metálicos pre-cimentados y cargas axiales variables durante el proceso de construcción

Estructura de concreto definitiva

El proyecto estructural definitivo contempla una estructura de concreto reforzado, por lo que los perfiles pre-cimentados únicamente son temporales y estos deberán estar embebidos en las columnas y muros de rigidez definitivos.

En los basamentos las columnas definitivas sufrieron ajustes en su armado debido a los perfiles embebidos en estas. Las soluciones se basaron en arreglos en los estribos y algunas varillas que fueron adicionadas con el objetivo de conformar el acero transversal, como se aprecia en la figura 27. En esta imagen se muestran con color rojo los estribos que debieron modificar su geometría debido al perfil pre-cimentado y también se muestran las varillas adicionales colocadas cerca del paño del perfil metálico, para lograr la ejecución de estos arreglos de estribos.

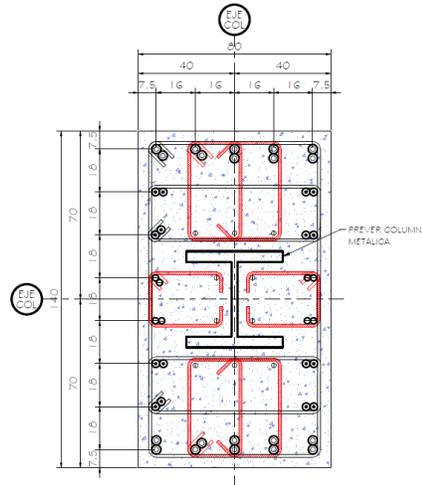


Figura 27 Sección tipo de columna en basamento

Algunos perfiles pre-cimentados tuvieron que colocarse en bulbos de los muros de rigidez. Para esto, se tuvieron que realizar arreglos en los armados longitudinales y transversales, además de que se adicionaron bulbos debido a la interrupción de algunos armados por los perfiles. Este fue un proceso aún más delicado, ya que al tener estos un ancho significativamente menor que las columnas, los posibles desvíos de los perfiles son mucho más críticos. Se prestó especial atención en el desplante de estos perfiles. En la figura 28 se aprecia uno de estos arreglos.

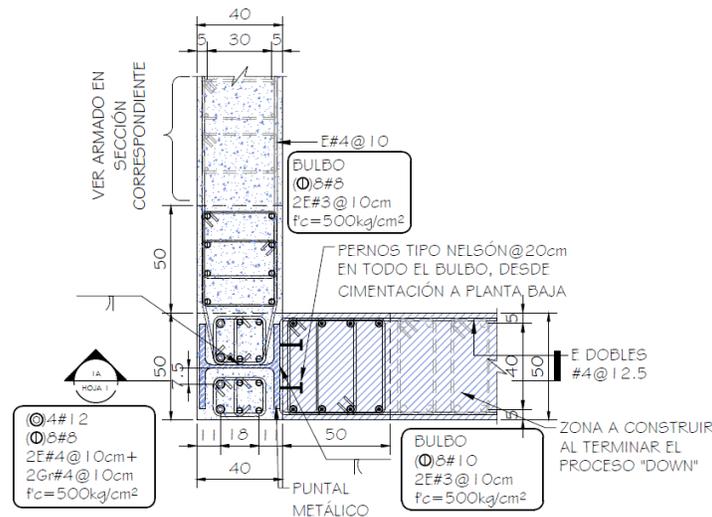


Figura 28 Sección de bulbo de muro de rigidez con perfil pre-cimentado embebido

Problemas durante la construcción

Algunos perfiles presentaron excentricidades importantes que se hicieron evidentes durante el proceso de excavación. En estos casos, se adoptaron diferentes soluciones tanto para garantizar la seguridad de la excavación, como para evitar afectaciones al proyecto arquitectónico.

En los casos en los que la desviación del perfil fuera crítica, los perfiles se arriostraron con puntales metálicos para reducir su esbeltez a manera de contrarrestar las demandas adicionales. Para esto, se colocaban los arriostramientos al momento en que la excavación alcanzara el nivel próximo, cortando por la mitad la longitud sin soporte lateral.

En algunos casos los perfiles desviados alcanzaban el borde de la columna, provocando la necesidad de realizar una ampliación de la misma. Esto se solucionó añadiendo acero longitudinal y modificando el arreglo del acero transversal de manera que el confinamiento de la sección no se viera comprometido. Estos incrementos de sección fueron coordinados con los responsables del proyecto arquitectónicos para evitar afectaciones al mismo. En algunos casos las afectaciones arquitectónicas que un incremento de sección produciría no fueron aceptables. Para estos casos, la solución fue cortar el perfil pre-cimentado al terminar el proceso constructivo. Para esto, se apuntalaron las zonas que transmiten carga a estas columnas en toda la altura del basamento, de manera que los perfiles pudieran cortarse y las columnas de concreto definitivas pudieran colarse de manera segura.

LOSAS DE BASAMENTO

Sótanos

Por agilidad del proceso constructivo y a manera de reducir la profundidad de la excavación, los sótanos están estructurados a base de losas planas macizas. Estas losas son diseñadas con espesor constante y con refuerzo transversal en las zonas de ábacos para resistir el cortante por penetración. Estas losas se cuelan monolíticamente con los tramos de columna de 1.00 de cata entrepiso, los cuales transmiten la carga a los perfiles pre-cimentados por medio de conectores de cortante.



Figura 28 Losa de sótano

Para el anclaje perimetral de cada sótano con el muro Milán, tomando en cuenta que este fue colado previamente, el muro se ranura y se colocan conectores anclados con resina epóxica, como se aprecia en la figura 29. Estos conectores se diseñan para resistir el cortante transmitido por la losa en todo su perímetro. Los

conectores se diseñan para únicamente resistir cortante y el armado de la losa no se ancla directamente al muro, por lo que en el análisis se asume que las losas están articuladas en su perímetro.

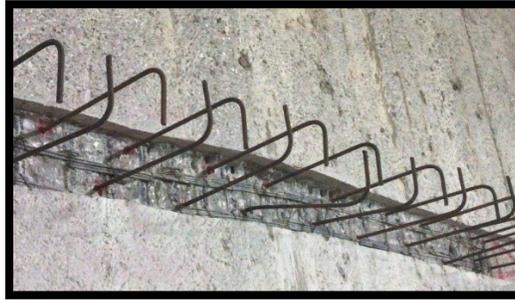


Figura 29 Conectores en muro Milán

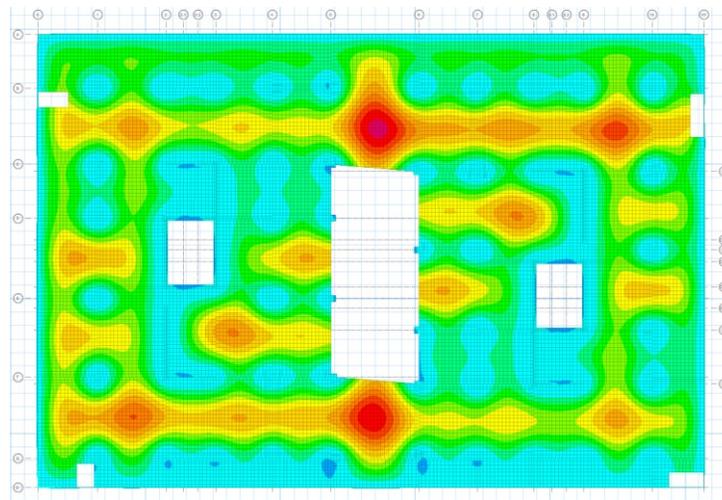


Figura 30 Planta del modelo de losas de sótanos

Planta baja

La planta baja es el primer nivel construido en el proyecto y posterior a la construcción de este nivel inicia el proceso de excavación. Este nivel debe estar correctamente anclado a los elementos verticales que soportarán la estructura durante la excavación.



Figura 31 Construcción de Planta Baja

Este nivel es de singular importancia para el proceso de excavación, debido a que este funge como plataforma de trabajo para la ejecución de todo el basamento. Desde este nivel se retira el material producto de la

excavación por medio de dragas, además de que aquí se almacenan los materiales que son usados en la construcción de los sótanos.

Debido a lo descrito en el párrafo anterior, la carga viva de diseño considerada en este entrepiso es de 2,000 kg/m². Debido a estas cargas considerables y a criterios de diseño por sismo, este nivel es el único del basamento en el que no se utilizó una losa plana. Este nivel está estructurado con traveses de concreto y losas reticulares.

El anclaje de los elementos de planta baja con los perfiles pre-cimentados se logra por medio de tramos de columnas, los cuales transmitirán la carga de entrepiso a los perfiles pre-cimentados a través de conectores de cortante, como se describió anteriormente. El anclaje con el muro Milán en el perímetro se logra por medio de traveses de coronamiento integradas dicho muro, las cuales son coladas monolíticamente con la estructura de este nivel.

Lumbreras

Para el proceso constructivo se mantuvieron tres lumbreras, necesarias para retirar el material producto de la excavación por medio de un proceso de dragado. Una de las lumbreras fue estratégicamente ubicada en la zona de rampas, por lo que estas aberturas permanecerían en la estructura definitiva.

Las otras dos lumbreras fueron ubicadas en los núcleos de elevadores y escaleras de cada torre, por lo que estas zonas deben cerrarse al finalizar el proceso de excavación. Para mantener estas aberturas en las losas, se colocaron traveses metálicos provisionales en los claros en donde la losa sería continua en la estructura definitiva. Al finalizar el proceso de excavación, se construyeron las losas de las zonas de lumbreras. Para esto, el armado de las losas nuevas se ancla a las losas existentes por medio de resina epóxica, de manera que este tenga continuidad y posteriormente se retiran las traveses metálicos provisionales.



Figura 32 Proceso de dragado



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la contribución de muchas personas que participaron de manera muy activa en la planeación, diseño y construcción del proyecto. A pesar del riesgo de olvidar algunos nombres, los autores quieren reconocer específicamente el apoyo incondicional de las siguientes personas.

Los ingenieros Javier Barrios, Carlos Asali, Julio Paradela y Juan Carlos Servín, de MIRA Companies quienes confiaron en el desarrollo del proyecto y estuvieron siempre involucrados en la toma de decisiones. Su juicio crítico, retroalimentación y comentarios siempre sirvieron para mejorar los procesos que originalmente se habían propuesto.

Los ingenieros Jean-Christophe Mercie, Alexis Behanghel, Marco Fontana, Guillermo Clavelina y Dalia Julio, cuya vasta experiencia en estos proyectos son sin duda un valor agregado al éxito del mismo.

Los ingenieros Andrés Pérez, Alejandro Poco y Juan Valeriano de SYASA cuyo seguimiento puntual al desarrollo del proyecto y la construcción y las aportaciones atinadas al mismo, contribuyen de manera importante al aseguramiento de la calidad esperada en estas obras.

A todo el personal de Alonso y Asociados que entusiastamente se involucró en este proyecto.

Y por último, pero en realidad el agradecimiento principal, a todos los obreros mexicanos que participaron en la ardua tarea de hacer realidad lo que todos los ingenieros sólo dibujamos desde la comodidad de nuestro escritorio.