

Madero Office: Fundaciones con barretas y contenciones premoldeadas

Alfredo. A. LOPEZ¹, Gastón QUAGLIA and Alejo O. SFRISO
SRK Consulting, Rivadavia 926 Suite 901, C1002AAU, Buenos Aires, Argentina.

Abstract. La torre Madero Office, de 33 pisos, tiene una estructura principal que consiste de dos núcleos que soportan aproximadamente 270MN. Estos núcleos fueron fundados sobre grupos de barretas de alta capacidad, atravesando los suelos de la Formación Pampeano y penetrando en la Formación Puelche. El sector central de la estructura está fundado sobre pilotes y cabezales. El diseño y construcción de las barretas empleadas en Madero Office constituye la primer experiencia con esta técnica de fundaciones especiales en Argentina. La submuración perimetral fue ejecutada íntegramente con un sistema de pantallas delgadas premoldeadas de hormigón armado. Al igual que las barretas, fue la primera vez en emplearse esta técnica en Argentina. En este artículo se presentan algunos detalles técnicos del proyecto de fundaciones y contenciones.

Keywords. Barretas, pantallas premoldeadas, fundaciones profundas, muros anclados

Introducción

En este artículo se presentan los elementos salientes del diseño de fundaciones y contenciones de la Torre Madero Office. La torre es un edificio de 33 pisos, tres subsuelos y 133 metros de altura ubicado en Puerto Madero, Buenos Aires, Argentina. Tiene dos núcleos extremos conformados por tabiques de 10 x 14 metros y un sector central formado por losas, vigas y columnas de hormigón armado (Figura 1).



Figura 1. Vista de la Torre Madero Office terminada.

¹ Corresponding author.: alopez@srk.com.ar

La cimentación de la torre estaba diseñada como una gran platea de hasta 6.0m de espesor, necesarios para soportar hasta 270MN de carga de diseño en cada núcleo de tabiques y hasta 670MN de carga total. También se consideró el empleo de una fundación convencional con pilotes excavados de más de 40m de longitud.

Debido a que una de las caras de los núcleos estaba ubicada en el perímetro de la excavación, los elementos estructurales de esa cara debían cumplir una doble función: i) fundación de los tabiques de los pisos superiores; y ii) sostenimiento lateral de la excavación. Para reducir costos y plazos de construcción y para mejorar la seguridad de la obra se decidió modificar el diseño de las fundaciones, reemplazando los pilotes por barretas – tramos aislados de muro colado – cuya alta capacidad de carga permitió eliminar la platea-cabezal original y reducir el consumo de hormigón de fundaciones en un 18%. Las fundaciones de Madero Office fueron la primer experiencia con esta técnica de fundaciones especiales en Argentina. La cimentación del sector central de la estructura se mantuvo sobre pilotes y cabezales.

Para diseñar esta innovación tecnológica se requirió un detallado programa de investigación de campo, incluyendo ensayos presiómétricos (PMT) y un estudio de las deformaciones esperadas en cada tipo de fundación (barretas y cabezales con pilotes) con diferente niveles de cargas. Se emplearon curvas carga-desplazamiento para demostrar la compatibilidad del funcionamiento conjunto y para diseñar las juntas de conexión entre sectores de fundación.

Otro aspecto innovador del proyecto es el diseño de la contención perimetral de su caja de subsuelos. Ubicada a pocos metros de los espejos de agua de los diques de Puerto Madero, fue ejecutada íntegramente con un sistema de pantallas delgadas premoldeadas de hormigón armado de 12.70m de longitud y 32.5cm de espesor. Al igual que las barretas, fue la primera vez en emplearse esta técnica en Argentina.

1. Condiciones geotécnicas del sitio

Las condiciones geotécnicas del sitio se resumen en la Figura 2. Las características de los suelos pueden consultarse en numerosas referencias [1-7]. Sucintamente, el perfil está conformado por: i) rellenos antrópicos y rellenos fluviales recientes de unos 9.0m de espesor en el sitio de obra; ii) loess modificado, preconsolidado por desecación y cementado de la Formación Pampeano, de unos 19.0m de espesor; y iii) arenas densas a muy densas de la Formación Puelchense, que tienen un espesor aproximado de 25m en el sitio de obra y que constituyen el horizonte de fundación más profundo que se emplea en las construcciones de la Ciudad de Buenos Aires.

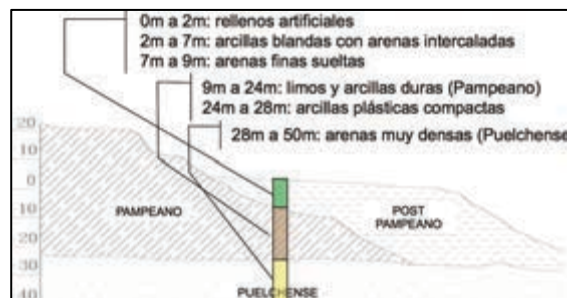


Figura 2. Perfil geotécnico del sitio.

Con el objeto de corroborar capacidades y asentamientos se especificó una campaña geotécnica incluyendo ensayos de penetración standard (SPT) y presiómetros de Menard (PMT). En la Figura 3 se muestran los resultados de uno de los sondeos. Se indica la presión límite p_L , el módulo presiométrico E_M y la fricción última para pilotes f_s obtenidos de los ensayos PMT. En la Tabla 1 se presentan los parámetros adoptados para el diseño de fundaciones. Estos estudios complementarios permitieron aumentar la carga admisible por la punta a 3.4 MPa, la fricción admisible de las arenas a 60kPa y del Pampeano a 40kPa y ajustar la cota de fundación de -38m a -35m.

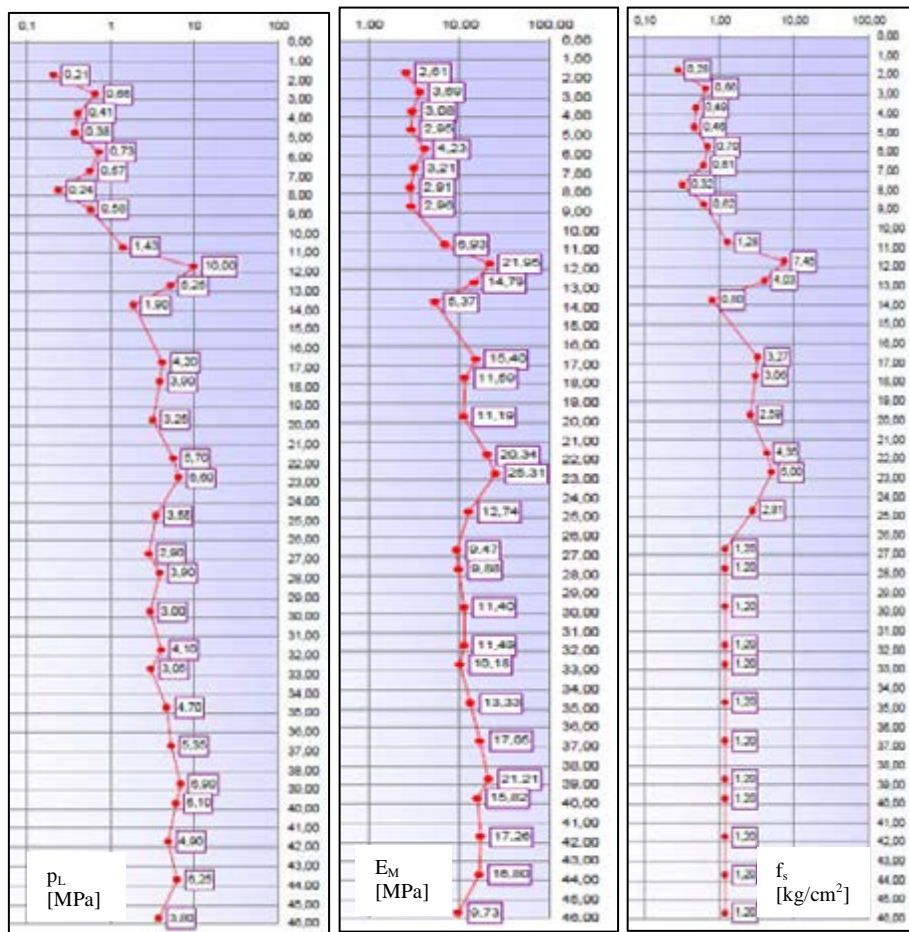


Figura 3. Resultado de un sondeo PMT.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos adoptados para el diseño de fundaciones.

	Un.	Artificial	Fluvial	Pampeano	Puelchense	Descripción
γ	kN/m ³	18/19	16/18	18/20	20/21	Peso unitario
c	kPa	0	0	10/35	0	Cohesión efectiva
ϕ	°	26/28	25/27	29/33	32/38	Fricción efectiva
ψ	°	0	0	0/5	2/8	Dilatancia
E_i	MPa	60	20/30	180/250	220/300	Rigidez inicial
ν	-	0.2/0.3	0.2	0.25	0.18	Módulo de Poisson efectivo
K_0	-	1.00	0.55	0.80	0.50	Coef. empuje en reposo

2. Fundaciones de núcleos

2.1. Descripción

Cada uno de los dos núcleos de tabiques se fundaron sobre 21 barretas de 2.70m x 0.80m x 35m de profundidad con una ficha del orden de 7/8m en el estrato Puelchense. Las barretas se unieron mediante una viga de coronamiento de gran rigidez sobre la cual se fundaron los núcleos de tabiques de gran altura del edificio. En la Figura 4 se muestra un esquema de la fundación y una foto de la construcción terminada. En la foto se puede ver el tramo de muro colado (barreta) que también sirve también como contención lateral y los paños de panel premoldeado adyacentes (panasoles).



Figura 4. Planta de la fundación de los núcleos con barretas y foto de la construcción terminada.

2.2. Aspectos del diseño

El diseño de las fundaciones con barretas está controlado principalmente por asentamientos. Se analizaron condiciones de largo plazo con la sobrecarga de uso y un 25% del viento de diseño, y de corto plazo con el 100% del viento de diseño.

Para calcular la respuesta de las fundaciones se implementó el método de curvas de carga-desplazamiento de Kraft, Ray y Kagawa presentado en [8] (Figura 4). Tanto para el corto como largo plazo se asumió un comportamiento elastoplástico en la interacción suelo-fundaciones. Para el largo plazo se incluyó además el efecto de deformación diferida en arcillas mediante la reducción de la rigidez del fuste en el tramo embebido en el Pampeano. Se adoptó el asentamiento máximo entre el de la barreta aislada, el de una línea de barretas y del cajón de 13m x 22m. Las condiciones de carga y los asentamientos calculados se indican en la Tabla 2. Todo el análisis tiene una incertidumbre estimada en +/- 30%.

El procedimiento de cálculo de asentamientos fue repetido para los pilotes del sector central, para los que se determinaron valores en el rango 6mm a 15mm a largo plazo. Por lo tanto, el asentamiento diferencial probable entre barretas y pilotes es del orden de 20 mm +/-30%.

Tabla 2. Cargas de diseño.

	Un.	Peso propio	Sobre carga	Viento	Asentamiento [mm]	
					Corto plazo	Largo plazo
Barreta aislada	MN	10.0	2.2	4.1	6.0	7.0
Línea de barretas	MN	48.0	9.4	2.4	5.0	6.0
	MN	30.0	6.0	25.6	6.0	8.0
Grupo de barretas	MN	180.0	36.0	+/-25.6	20.0	30.0

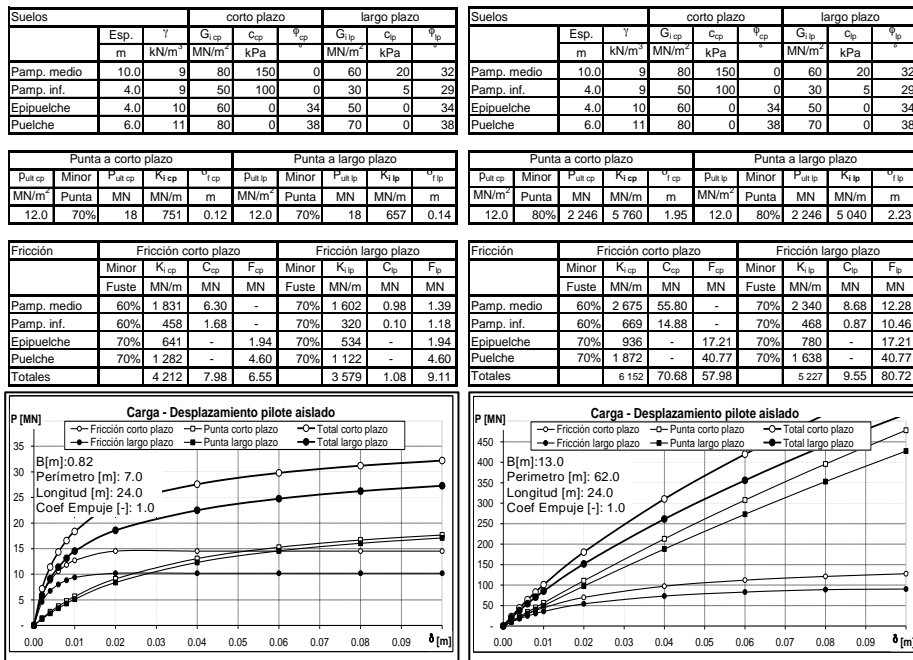


Figura 5. Planilla de cálculo y con parámetros adoptados y curvas carga-desplazamiento para una barreta aislada y para el cajón de 21 barretas.

2.3. Aspectos constructivos

A partir de los asentamientos estimados en el diseño de las fundaciones, se decidió realizar un corte en la losa de subpresión de la caja de fundaciones lo que implicó incluir un conjunto de juntas constructivas diseñadas para un asentamiento diferencial de 30 mm y una subpresión de 12m de columna de agua. Se especificó una junta Sika water-stop M-27 que no transfiere corte y que garantiza estanqueidad en ese rango de deformación (Figura 5).

El procedimiento de instalación de la junta fue objeto de un estudio particular de la evolución de los asentamientos, ya que el sistema de juntas tradicionales disponibles no pueden garantizar estanqueidad para el rango de deformación calculado.

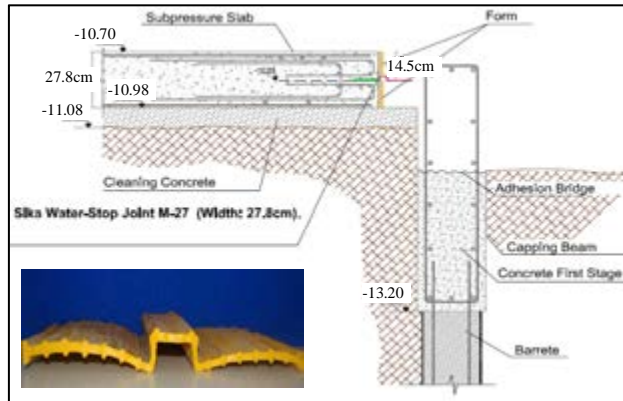


Figura 6. Detalle constructivo de la junta entre fundación de barretas y losa de subpresión.

Luego de un análisis de opciones, y para minimizar los asentamientos que la junta debía soportar, se especificó que la conexión final entre la losa de subpresión y la fundación de barretas se efectuara, luego que estuviera hormigonada la planta 18 de la torre, punto en el que se alcanzaría aproximadamente el 70% de los asentamientos totales. Durante este periodo la caja seca de fundaciones permaneció completamente abatida con bombas perimetrales. La Figura 6 muestra la especificación adoptada. La presión sobre la losa de subpresión (aproximadamente 120kPa) en el sector central es soportada mediante micropilotes de tracción ejecutados en un arreglo de 2.1m x 2.1m

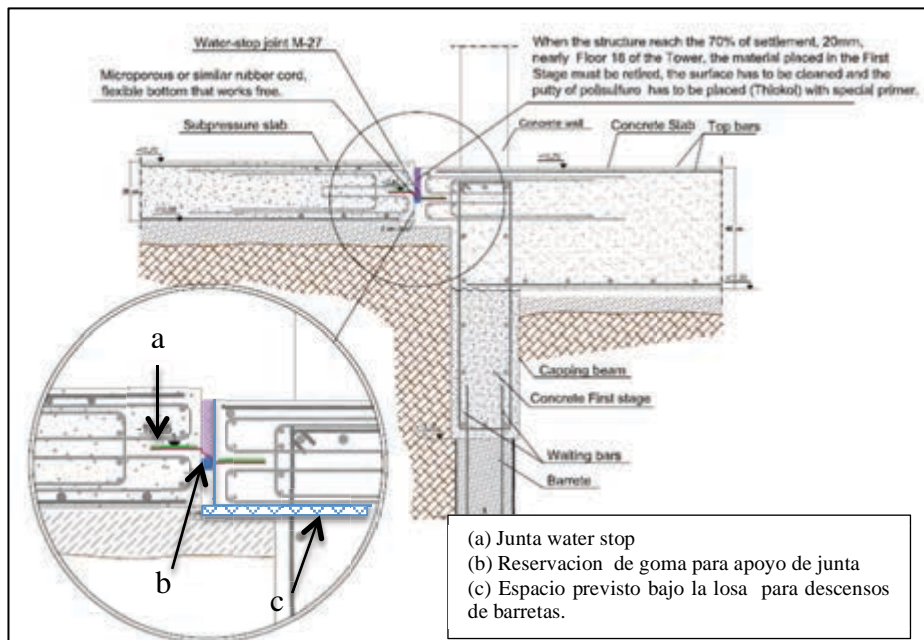


Figura 7. Detalle del sistema de junta wáter stop y pieza de apoyo para garantizar que el asentamiento diferencia pueda ser absorbido por la junta sin dañarse.

3. Contenciones perimetrales

Las barretas que formaron parte del núcleo de fundaciones y que se encontraban sobre el perímetro exterior de la obra, se extendieron hasta el nivel de calle (cota 0.0m). Para soportar los empujes laterales se incluyeron anclajes activos postesados, por lo que las barretas como elemento estructural fueron sometidas a flexo-compresión debido a las cargas verticales de los tabiques y los empujes de suelos y agua sobre los 12m de altura de la excavación.

La submuración perimetral se completó con un sistema de pantallas delgadas premoldeadas de hormigón armado y anclajes activos. Haciendo uso de la técnica de excavación de trincheras para muros colados, los paneles prefabricados fueron izados y colocados en las excavaciones sostenidas por bentonita. Esta solución permitió un ahorro en el volumen de hormigón, una reducción en el tiempo de construcción, y una mejor terminación superficial de los paneles que quedarían expuestos en los subsuelos.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó una descripción de las soluciones geotécnicas empleadas para las fundaciones de la torre Madero Office. La estructura del edificio de 33 pisos de altura presentó como mayor desafío un fuerte desbalance entre las cargas transmitidas por los núcleos externos y las columnas centrales.

Para hacer frente a las elevadas cargas, los núcleos fueron fundados sobre grupos de barretas de alta capacidad, atravesando los suelos de la Formación Pampeano y penetrando en las arenas de la Formación Puelche. El sector central de la estructura fue fundado sobre pilotes y cabezales tradicionales.

El diseño de estas fundaciones fue optimizado mediante una detallada campaña geotécnica que incluyó la ejecución de ensayos de penetración standard (SPT) y presiómetros de Menard (PMT). Particularmente estos ensayos permitieron una mejor determinación de los parámetros de rigidez asociados a las formaciones Pampeano y Puelche bajo la obra. El análisis de asentamientos indicó valores de hasta 30mm para las barretas y entre 6 y 15mm para los cabezales de pilotes. Debido a la gran diferencia de asentamientos se decidió ejecutar una junta en la losa de supresión entre los núcleos y el sector central, y se estableció como condición de diseño un asentamiento diferencial de 20mm.

El diseño y construcción de la junta de subpresión requirió un análisis particular ya que los requerimientos de deformación y presión excedieron los valores soportados para juntas tradicionales que proporcionan estanqueidad. Se especificó una junta Sika water-stop M-27 que fue colocada luego de que se alcanzara aproximadamente un 70% de las deformaciones finales de los núcleos. La losa bajo el sector central incluye micropilotes de tracción instalados en una grilla de 2.10m de lado.

La caja seca de fundaciones se completó con muros perimetrales y anclajes activos. En la zona de los núcleos de fundación las barretas se extendieron hasta la superficie, mientras que en el resto se empleó la excavación en trincheras con bentonita y posterior colocación de pantallas delgadas premoldeadas.

El diseño y construcción de las barretas empleados para las fundaciones y contenciones de Madero Office constituyen la primera experiencia de esta técnica de fundaciones especiales en Argentina.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a Soletanche Bachy por su apoyo y liderazgo para innovar y aplicar nuevas soluciones en el campo de la ingeniería de fundaciones de Argentina, al ing. Vardé por apoyo durante el desarrollo de la obra, al Ing Fainstein por su apoyo para aplicar las soluciones presentadas y para adaptar la ingeniería de la obra de la superestructura al nuevo sistema de fundaciones.

Referencias

- [1] A. J. L. Bolognesi, Compresibilidad de los suelos de la Formación Pampeano, V PCSMFE, (1975) V: 255-302.
- [2] M. Codevilla A. Sfriso, Actualización de la información geotécnica de los suelos de la Ciudad de Buenos Aires, XIV PCSMGE (2011), paper 988 , CD-ROM.
- [3] F. Fidalgo, F. De Francesco y R. Pascual, Geología superficial de la llanura Bonaerense VI Congreso Geológico Argentino (1975), 110 - 147.
- [4] E. Nuñez, *Empujes sobre apuntalamientos en el Centro de la Ciudad de Buenos Aires*, Publicación FIUBA, 1972.
- [5] E. Núñez E, Panel Report: Geotechnical conditions in Buenos Aires City, V Conf. IAEG (1986), 2623-2630.
- [6] E. Núñez y C. Micucci, Cemented preconsolidated soils as very weak rocks, V Conf. IAEG (1986), 403-410.
- [7] A. Sfriso, P. Sagüés, G. Quaglia, M. Quintela y O. Ledesma, Small-strain stiffness of the Pampeano Formation, IS-Atlanta (2008), IV Intl Symp Def Char Geomat I:237-244.
- [8] USACE. *Theoretical Manual for Pile Foundation* EM -1110-2-2906.