

LOS NUEVOS CIMIENTOS DE LA NUEVA CATEDRAL

SILVANO JORGE TREVISÁN (*)

Al observar las nuevas torres de la Catedral de La Plata no debe olvidarse que *“lo que el árbol tiene de florido, vive de lo que tiene sepultado”*, como con indudable belleza expresara Francisco Luis Bernárdez.

Conceptos liminares

En *MUSEO* de noviembre de 1994 publicamos un trabajo con el –hoy– sugestivo título *¿Se pueden completar las torres de la Catedral de La Plata? Un análisis geotécnico*.

Transcurridos apenas cinco años –muy pocos en la escala de tiempo de las Catedrales–, las obras a las que hacíamos referencia en aquel artículo han culminado con todo éxito: las torres se han completado ¡115 años después de iniciadas!

Parece apropiado, entonces, retomar el tema y explicar de la manera más simple posible –es decir, sin recurrir a complejas ecuaciones matemáticas ni a conceptos teóricos demasiado especializados– cómo se reforzaron, finalmente, los antiguos cimientos, tarea previa sin la cual no hubiese sido posible construir las elegantes agujas góticas que hoy contemplamos con admiración.

Los trabajos que sintéticamente vamos a describir forman parte de las investigaciones geotécnicas, estudios, cálculos, análisis de antecedentes históricos disponibles y diseños realizados durante el último quinquenio por el suscripto juntamente con el Profesor Eduardo Nuñez –distinguido colega, miembro de la Academia Nacional de Ingeniería–, con el propósito de transformar las fundaciones existentes en otras capaces de sostener las pesadas nuevas torres.

Como es obvio, tales trabajos de submuración no se ven, están enterrados. Es que, como bien sostenía Karl Terzaghi, el genial creador de la Mecánica de Suelos, *“no hay gloria en las cimentaciones”*. Ello no importa, pues, al decir del Principito, *“lo esencial es invisible a los ojos”*.

La catedral

La Catedral de La Plata es un monumental edificio construido en estilo neogótico, con la peculiar apariencia que le brindan el color y la textura de sus muros de ladrillos rojizos y sus ornamentos de símil-piedra. Diseñada a fines del S. XIX por el Ing. Pedro Benoit y el arquitecto Ernesto Meyer, nunca se completaron sus dos torres principales de 112 m de altura que enmarcan la fachada principal. Hubo que esperar hasta el 19 de noviembre de 1999 para verlas penetrar el cielo platense con todo su encanto.

Los cimientos originales se emplazaron a unos 5 m de profundidad mediante una construcción de mampostería de ladrillos directamente apoyada sobre el terreno luego de realizada la excavación.

El completamiento ahora efectuado incrementó el peso de

cada torre en unas 2000 toneladas. Pero, además, apareció un factor nuevo: el efecto del viento, antes despreciable. En el análisis de las nuevas cargas se previó una presión de viento de 250 kg/m², actuando sobre las caras de cada torre. Su resultante se supuso aplicada a 75 m por arriba de la cota de fundación, lo que generó un momento volcador importante que se tradujo en un significativo aumento de la presión sobre el suelo.

Como consecuencia del mayor peso y de la acción eólica, los cimientos históricos –que satisfacían en condiciones límites los estados de equilibrio motivados por las cargas preexistentes– resultaron ser insuficientes para soportar la nueva estructura con un grado de seguridad compatible con la importancia histórica, religiosa y arquitectónica de semejante edificio. Se hizo necesario, entonces, reforzar la subestructura original mediante la instalación de micropilotes de acero y hormigón inyectados a alta presión los que, además de penetrar 12 m dentro del terreno virgen subyacente, quedaron encastrados en la antigua mampostería de fundación, solidarizados con ella y entre sí, mediante un robusto cabezal de hormigón armado.

El suelo de fundación

El subsuelo de La Plata, correspondiente a lo que se conoce como formación pampeana, está constituido por arcillas limosas preconsolidadas por desecación. Estos sedimentos del cuartario, de unos 45 m de espesor, se apoyan sobre arenas finas y medianas, densas, llamadas *puelchense*. Se considera que las dos terceras partes superiores del pampeano son de origen eólico, mientras el tercio inferior es de origen fluvial. El

paquete sedimentario ha experimentado en todo su espesor el efecto de períodos secos y húmedos, y la acción de desecación y fisuración correspondiente. Además, carbonatos y óxidos de calcio y magnesio han cementado en forma no homogénea las arcillas y limos originales por precipitación, infiltración y/o impregnación. Estas circunstancias han producido estratos más o menos continuos, o lentes y bancos distribuidos erráticamente, con propiedades diferenciadas de resistencia y compresibilidad. Así, los suelos con relativamente baja impregnación calcárea denominados *suelos toscos* son compactos a muy compactos desde el punto de vista de la ingeniería; pero las partes fuertemente cementadas –denominadas localmente *toscas*– conforman estratos muy duros con características tan resistentes que permiten clasificarlos, en ciertos casos, como *rocas muy blandas*.

La figura 1 muestra la profundidad de fundación de las torres existentes y los resultados del Ensayo Normal de Penetración.

Un análisis ponderado de las características conocidas sobre los sedimentos de la formación pampeana y de los valores obtenidos a partir de los ensayos triaxiales (Anexo I), condujeron a las siguientes conclusiones: a) la

cimentación anterior debía ser reforzada para tomar las nuevas cargas; b) las cargas podían transferirse a los estratos duros más profundos (Zona B), cuyos parámetros resistentes son óptimos.

Sistema de subcimentación

Luego de analizar diversas alternativas capaces de satisfacer las dos condiciones precedentes, se optó por la solución conocida como *micropilotes inyectados a alta presión*, técnica moderna utilizada con frecuencia en la restauración o refuerzo de monumentos históricos.

Esta solución consistió en la construcción de pilotes de hormigón bombeado de sección relativamente pequeña (diámetro del orden de 15 cm) en cuyo centro se colocó un tubo de acero de alta resistencia de diámetro exterior

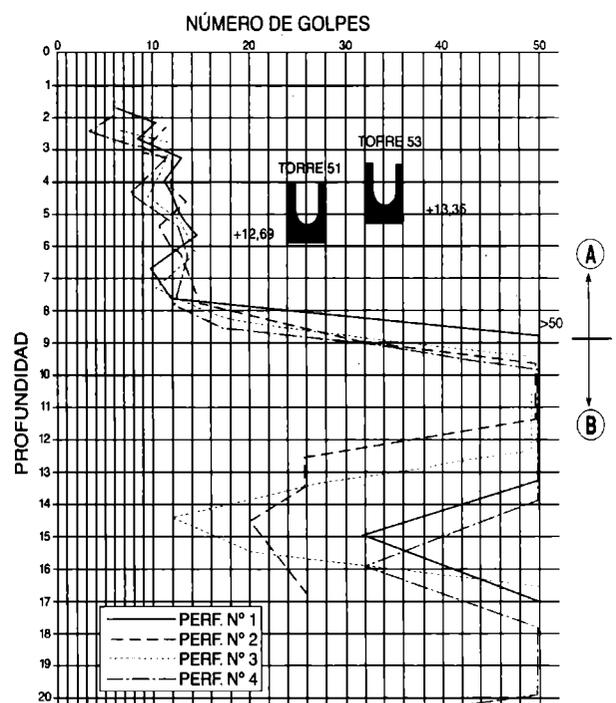


Fig. 1. Ensayo normal de penetración; plano de cimentación y techo del estrato de toscas.

Se aprecia que la resistencia a penetración aumenta bruscamente a partir de una profundidad del orden de 9 a 10 metros, definiendo con claridad los *suelos toscos* (parte A) y las *toscas* (parte B). También se observa que el plano de fundación original se sitúa en la zona A, pero a muy pocos metros del techo del estrato más resistente B, dato éste de suma importancia en la selección de la solución finalmente adoptada para reforzar la cimentación.

60 mm y 9 mm de espesor, aproximadamente (Fig. 3).

En el Anexo II se describen algunos detalles técnicos de los ensayos realizados, y sobre las formas de calcular la capacidad de carga de cada micropilote a partir de los datos disponibles.

Capacidad de carga y asentamientos

La capacidad de carga de cada micropilote y el total de unidades requeridas calculadas a partir de los datos disponibles, resultó la siguiente: 100 micropilotes por torre (en la práctica se emplearon 113) y una carga de 20,5 toneladas para cada uno (Anexo II).

Metodología constructiva

El método constructivo de los pilotes se ajustó a las secuencias que se detallan en el Anexo III.

Ensayos de cargas

Antes de la instalación de los micropilotes en el interior de las torres se efectuó un ensayo de carga para verificar su comportamiento tenso-deformable. Ello permitió, además, realizar un ajuste de metodología constructiva, secuencias, mezclas y presiones aplicadas. El ensayo se ejecutó sobre un pilote *tipo* construido fuera del cuerpo de la Catedral, en las proximidades de la torre de la avenida 53.

Además, se realizaron ensayos de carga sobre micropilotes de servicio instalados dentro de las torres. Estos micropilotes se eligieron al azar, uno en cada torre, utilizándose otros micropilotes próximos, solidarios a la fundación, como anclaje para disponer de las necesarias reacciones. Estos ensayos mostraron una buena correlación entre los valores proyectados y los

experimentales. Finalmente, se hicieron *ensayos de arrancamiento* de barras estructurales empotradas en la albañilería de la cimentación existente.

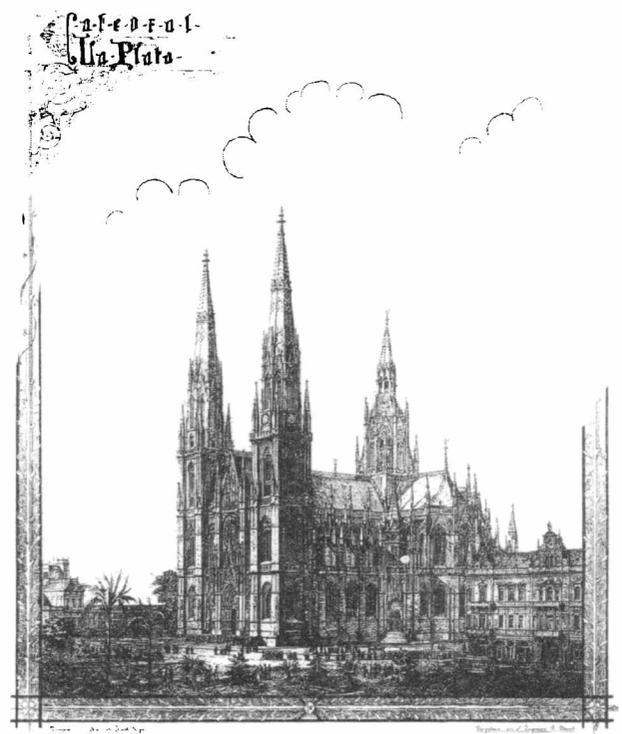
En las pruebas desarrolladas se comprobó que el comportamiento de las piezas de transferencia solidarias a la mampostería era satisfactorio, dentro del nivel de esfuerzos considerado en el diseño.

Asentamientos registrados

A lo largo de todo el proceso constructivo de las torres (1998-1999) se registraron las deformaciones verticales producidas en función del tiempo y del progreso del incremento de carga. Las mediciones continuaron luego de la conclusión de los trabajos. Los datos disponibles hasta este momento (marzo 2000) indican que los asentamientos medidos (aproximadamente 0,35 cm) son inferiores a los previstos.

Conclusiones

a) La solución *micropilotes inyectados a alta presión* proporciona una respuesta técnicamente adecuada, relativamente económica y de fácil ejecución. Esta apreciación es válida aun en el caso de longitudes y diámetros significativamente mayores a los utilizados en este caso. En



La Catedral según perspectiva de Benoit-Meyer, 1885, impresa en los talleres del Museo.

definitiva: estos elementos estructurales son idóneos para transferir cargas importantes a estratos aptos profundos.

b) Los asentamientos registrados hasta el momento están dentro del rango de valores preestimados. Las magnitudes definitivas se tendrán luego de un cierto tiempo de concluida la obra (2 a 3 años) cuando las cargas estructurales y las deformaciones alcancen el equilibrio final.

c) La capacidad de carga teóricamente prevista en el diseño primario es muy similar a la deducida de la interpretación de los resultados de los ensayos de carga ejecutados *in situ*.

d) Teniendo en cuenta los volúmenes de cemento inyectados y las presiones utilizadas, debe señalarse que durante los trabajos no se registraron movimientos ascendentes de las fundaciones en ninguna de las torres.

Tabla I. Parámetros resistentes

Nivel	Parte superior (A)		Parte inferior (B)	
	No drenado	Drenado	No drenado	Drenado
Cohesión (t/m ²)	$C_u = 10$	$C' = 5$	$C_u = 15$	$C' = 7,5$
Fricción	$\phi_u = 10^0$	$\phi_d = 20^0 / 25^0$	$\phi_u = 10^0$	$\phi_d = 20^0 / 25^0$
Módulo (t/m ²)	$E_{iu} = 6.000-7.500$		$E_{iu} = 12.000-15.000$	

Colofón

Llegado el final de este trabajo -casi coincidentemente con el final del segundo milenio de la era cristiana- parece apropiado recordar aquel también bimilenario trozo de la epístola de San Pablo a los Corintios: “Yo, cual perito ingeniero, puse los cimientos; otros edificarán sobre ellos.”

Anexo I

Parámetros geotécnicos de diseño

Un análisis ponderado de todos los valores obtenidos a partir de los ensayos triaxiales realizados para este proyecto y de datos proporcionados por otros estudios sobre la formación pampeana, permitió llegar a los valores estadísticos indicados en la tabla I.

Los cálculos realizados utilizando los parámetros de la tabla I revelaron que el coeficiente de seguridad a rotura, para las cargas originales, variaba de 2,5 a 3, pero se reduciría a menos de 2 si las torres se completasen manteniendo la cimentación original. Por otra parte, el análisis de deformaciones permitió predecir asentamientos diferenciales del orden de 2 cm ± 30%. Este valor y la posibilidad de una pequeña rotación adicional llevó a la conclusión de que alguna fisura podría aparecer en la mampostería de ladrillos de las torres.

Anexo II

Sistema de subcimentación

Los micropilotes diseñados conformaron 4 familias, con las siguientes inclinaciones:

- a) Pilotes verticales 25
- b) Pilotes inclinados 1: 6 24
- c) Pilotes inclinados 1: 3 28
- d) Pilotes inclinados 1: 2 36

Total: 113 pilotes por torre

Se proyectaron y ejecutaron micropilotes de unos 12 m de longitud útil, a través de cuyo tubo metálico central se bombeó un hormigón de granulometría fina que relleno el hueco entre las paredes del terreno y el tubo metálico. La camisa metálica, o *armadura*, está preparada con *manguitos* elásticos que cubren orificios a través de los cuales se inyectó la lechada de cemento a alta presión, previa rotura de la envolvente de hormigón en proceso de endurecimiento. De esta manera, se produjo una deformación lateral del terreno y el eventual agrietamiento radial que permitió la penetración de la lechada en el interior del subsuelo circundante. Se adoptaron como mínimo, tres niveles de inyección, resaltes del tubo metálico para garantizar el corte en la interfaz hormigón-acero, presiones mínimas del hormigón bombeado y de las lechadas cementicias inyectadas, y disposición concéntrica de los micropilotes con inclinación de hasta IV : 2H para la envoltura exterior (Fig. 2).

La unión entre los extremos

superiores de los micropilotes y la actual fundación de ladrillos de las torres se logró mediante un cabezal de hormigón armado que tomó la totalidad de dichos extremos.

Los trabajos pudieron ejecutarse desde el vano interior de cada torre sin necesidad de realizar excavación ni rotura alguna desde el exterior, de manera que la vista original del monumento no resultó afectada por las labores de submuración.

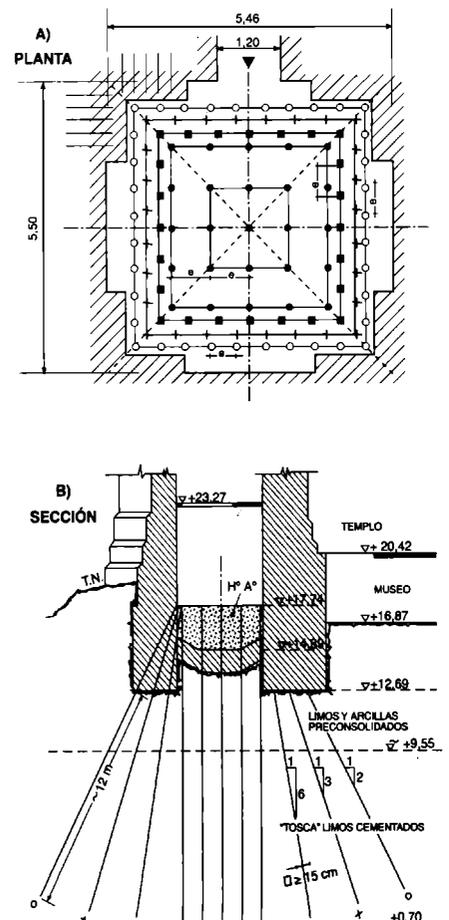


Fig. 2. Conjunto de micropilotes.

Capacidad de carga y asentamientos

La capacidad de carga de cada micropilote se calculó a partir de los datos disponibles.

Considerando una fricción admisible hormigón-suelo $f = 0,3 \text{ kg/cm}^2$ y una resistencia unitaria por punta $P_{adm} = 20 \text{ kg/cm}^2$, resultó, para cada micropilote proyectado, una capacidad de carga de 20,5 toneladas. Siendo 2000 toneladas el incremento total de carga, la cantidad necesaria de micropilotes resultó de 100 unidades por torre. Sin embargo, el número final fue de 113 micropilotes para disponer de una distribución simétrica.

Para la estimación de los asentamientos probables se siguió una línea de cálculo que tomó en cuenta el módulo secante, el coeficiente de reacción del terreno, la presión transmitida

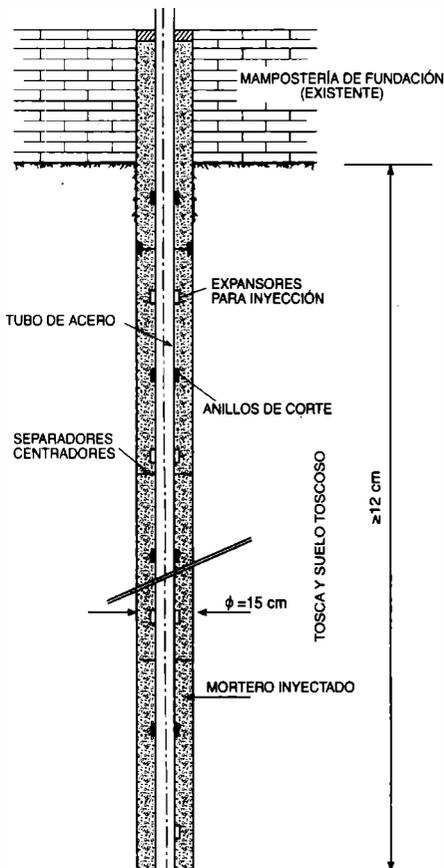


Fig. 3. Micropilote.

por la fundación hasta 25 m de profundidad, la eventual predeformación del terreno durante la ejecución del micropilote, el efecto de grupo, etcétera. El asentamiento diferencial estimado teóricamente resultó de 2,2 centímetros.

Anexo III

Metodología constructiva

El método constructivo de los micropilotes se ajustó a la siguiente secuencia (Fig. 3):

a) Utilizando un equipo retropercutor con martillo de fondo y barrido de aire, se ejecutó una perforación de un diámetro no inferior a 15 cm y longitud no menor de 12 m, a través de la mampostería de fundación y de los suelos toscos y toscas que constituyen el subsuelo bajo el nivel original de cimentación.

b) Las perforaciones se realizaron comenzando por las centrales verticales, para concluir con las externas de mayor inclinación (1:2). El programa contempló una ejecución rotativa de perforaciones dentro de la torre, de modo tal que el nuevo orificio estuviese suficientemente distante de los anteriores para evitar así posibles interferencias entre ellos.

c) El orificio se llenó con un hormigón de granulometría fina, contenido de cemento no menor de 380 kg/cm^3 , relación agua-cemento $a/c = 0,35$ a $0,40$, al que se le incorporó un



La Catedral inconclusa.

superfluidificante y un expansor. El llenado se efectuó empleando directamente el manguerote de la bomba o utilizando un tubo *tremie* o *contractor* que permitió conducir el hormigón desde abajo hacia arriba (desde el extremo inferior del pilote hasta el nivel del plano de trabajo) de tal manera de asegurar que el taladro resultase totalmente colmado con el hormigón.

d) Las lechadas empleadas tuvieron una relación $a/c \approx 0,6$, utilizándose una bomba de 80 kg/cm^2 de capacidad. La cantidad de cemento inyectado por válvula varió entre 50 kg para los micropilotes verticales interiores y 150 kg para los inclinados externos. La *rotura* del hormigón anular se efectuó en general entre las 8 y 10 horas del colado, y las presiones empleadas fueron entre los 15 y los 20 kg/cm^2 para los niveles superiores y $50/60 \text{ kg/cm}^2$ para las válvulas más profundas.



La Catedral con sus dos nuevas torres.

e) Inmediatamente de llenado el orificio con hormigón, se introdujo el tubo de acero de alta resistencia de diámetro exterior 60,3 mm y espesor de pared de 8,74 milímetros. Mediante separadores adecuados se aseguró la coaxialidad con el eje de la perforación previa. Dicho tubo metálico fue encastrado en el fondo de la perforación. Para permitir la maniobra completa, el hormigón bombeado se dosificó con un superfluidificante de acción convenientemente retardada. El tubo de acero se construyó con anillos de resalto para asegu-

rar la correcta transferencia de los esfuerzos de corte entre el hormigón y el acero. Además, se le incorporaron, al menos en tres niveles, orificios laterales, adecuadamente protegidos externamente por expansores a través de los cuales, posteriormente, se efectuaron las inyecciones a alta presión.

f) La inyección de lechada de cemento a alta presión a través del tubo coaxial de acero, se realizó dentro de un lapso que permitió la rotura de hormigón que embebía el tubo metálico y la penetración o precompresión lateral del terreno adyacente al pilote. Los valores de presión y tiempo, y la metodología utilizada fueron fijados de acuerdo con los resultados que se obtuvieron en ensayos previamente ejecutados.

** Miembro de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, y de la Academia de la Ingeniería de Buenos Aires.*

Lecturas sugeridas

- Nuñez, E. & S. J. Trevisán.** 1993. Catedral de La Plata. Estudio geotécnico. Ed. Fundación Catedral de La Plata.
- Nuñez, E. & S. J. Trevisán.** 1996. How to Continue La Plata Cathedral: a Geotechnical Approach. *En: A. Croce Memorial Symposium on Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites, Nápoles, Italia, 1996.*
- Nuñez, E. & S. J. Trevisán.** 1999. Main Towers of La Plata City Cathedral, Reinforcement of Foundation. *En: XI. Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz de Iguazú, Brasil, agosto 1999.*
- Trevisán, S. J.** 1994. ¿Se pueden completar las torres de la Catedral de La Plata? Un análisis geotécnico. *MUSEO*, 1, n° 4, noviembre 1994.
- Trevisán, S. J. & E. Nuñez.** 1996. The History of the Brick Neo-Gothic Cathedral of La Plata City (Argentina). *En: A. Croce Memorial Symposium on Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites, Nápoles, Italia, 1996.*