

## LECCIONES GEOTÉCNICAS DE LA TORRE MILLENNIUM EN SAN FRANCISCO

En los últimos años, la Torre Millennium en San Francisco ha despertado un especial interés mediático tanto a nivel social como técnico, debido a la magnitud del asentamiento registrado, el cual supera a la fecha los 55 cm, y que ha generado una inclinación que podría comprometer la estabilidad futura de la estructura. A esto se suman los litigios asociados, ya que los costos de las obras de mitigación superarían los 100 millones de dólares. Por lo cual, es de gran interés identificar las principales causas de lo ocurrido y las enseñanzas que se pueden extraer, en especial desde una mirada geotécnica.

La Torre Millennium es una estructura de hormigón armado de 58 pisos y un nivel de subterráneo. Su fundación consta de una losa sobre 945 pilotes hincados de hormigón, de sección cuadrada de 35.6 cm de lado. El suelo de fundación está compuesto de estratos con propiedades geotécnicas complejas, siendo el más crítico una capa de arcilla marina sobreconsolidada conocida como Old Bay Clay, con un espesor total entre 36.5 y 48.8 metros. Bajo esta capa, se reporta una arena rígida, alcanzando el basamento rocoso a una profundidad de entre 67.0 y 76.2 metros.

El diseño de un proyecto como la Torre Millennium, con un costo aproximado de 600 millones de dólares, estaría respaldado por un riguroso programa de exploración geomecánica, que permitiría generar un diseño con el más alto estándar, y donde problemas como un asentamiento progresivo y de gran magnitud podrían ser prevenidos. Pero entonces, ¿a qué se debe lo que está ocurriendo en la Torre desde el punto de vista técnico?

Aunque se realizó un completo programa de exploración, hay varios factores que impidieron predecir con mayor precisión las magnitudes del asentamiento. Un primer factor es originado por la incertidumbre inherente de los métodos de cálculo usados, donde comúnmente se idealiza cada capa de suelo con propiedades homogéneas, lo cual distaba de las condiciones estratigráficas del terreno. Un segundo factor fue que las variaciones de la compresibilidad del suelo en profundidad no fueron completamente reproducidas en laboratorio, lo que generó una variación en los parámetros de deformación medidos de las capas de suelo, respecto de las condiciones in situ.



A lo anterior se sumaron los efectos del proceso de excavación y de las obras de rebajamiento del nivel freático, así como de la construcción de estructuras adyacentes, no cuantificados de forma directa en el diseño, los cuales generaron importantes variaciones en los esfuerzos sobre la arcilla. Lo anterior produjo una diferencia entre la magnitud y tiempo de consolidación calculado, y los valores posteriormente registrados, produciéndose en solo un año y cuatro meses un asentamiento por consolidación de 40 cm, en comparación con los 22 cm esperados en 10 años.

Posterior a ello, se inició el proceso de comprensión secundaria donde el suelo siguió deformándose lentamente bajo cargas sostenidas, generando un asentamiento adicional de aproximadamente 16 cm hasta 2020.

Debido a que las deformaciones eran progresivas en el tiempo, en 2009 se instaló un extensivo sistema de monitoreo, a partir del cual se ha registrado que la inclinación de la Torre generó un desplazamiento horizontal de 40 cm hacia el oeste y de 17 a 18 cm hacia el norte. Lo anterior se produce debido a que las heterogeneidades identificadas en el depósito de suelo generaron que las deformaciones no fueran homogéneas en toda la planta de fundación.

El sistema de monitoreo ha sido crucial para el diseño de los sistemas de mitigación, ya que los datos recopilados permitieron suministrar información para modelar de manera más realista la respuesta de la fundación, lo que permitió evaluar el comportamiento de la estructura bajo los diferentes escenarios de carga propia y de las obras aledañas, así

como también de las condiciones del suelo. A partir de ello, una de las soluciones propuestas y parcialmente implementadas para estabilizar la torre, fue la instalación de pilotes preexcavados alrededor del perímetro de la fundación existente. Estos pilotes de 79 m aprox. de largo y 1.2 m de diámetro, se diseñaron para transferir la carga directamente al basamento rocoso, lo que busca también reducir la tasa de asentamiento diferencial, ayudando a la estabilidad de la Torre.

Los asentamientos e inclinaciones registrados desde el término de la construcción de la Torre Millennium, dan cuenta de un comportamiento claramente variable en el tiempo, y de cómo las heterogeneidades del perfil estratigráfico pueden llegar a tener una gran influencia en la respuesta del sistema de fundación. Así mismo, el caso también permite resaltar la necesidad de considerar efectos de ejecución de la obra en la evaluación y diseño del comportamiento de la fundación, donde en terrenos complejos los procesos constructivos y las condiciones del entorno, producen alteraciones en su respuesta.



**EDGAR GIOVANNY DIAZ-SEGURA**  
 Doctor en Ciencias de la Ingeniería  
 Académico de la Escuela de Ingeniería Civil  
 Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile  
<https://orcid.org/0000-0002-8534-5387>

Es clara la necesidad de realizar diseños con una visión integral de la mayor cantidad de variables involucradas, y con un trabajo interdisciplinario genuino, que aporte elementos para la toma de decisiones tanto en las etapas de diseño, como ante la necesidad de ejecutar obras de mitigación de manera oportuna, cuando dichos diseños han fallado.