

cimentaciones actuales de los rascacielos de Chicago

ALVARO LOPEZ RUIZ (*) Dr. en Química Industrial
Senior Soil Engineer

483 - 8

sinopsis

Se presentan las características principales del terreno y de la roca de apoyo y se describe someramente la forma de ejecución actual de las cimentaciones profundas de Chicago. Esta ciudad tendrá en breve varios de los rascacielos más altos del mundo apoyados en cimentaciones profundas sobre roca y, posiblemente, también el edificio más alto apoyado sobre suelo.

La construcción de pilotes de gran diámetro apoyados sobre roca y hormigonados en seco, según prescribe el código de la ciudad, presenta el punto débil de que en ocasiones se precisa introducir mucho en la roca el tubo de revestimiento permanente para conseguir la estanquidad requerida o bombear cantidades importantes de agua del fondo de las excavaciones. Esto último puede provocar arrastres de terreno de las cimentaciones adyacentes apoyadas sobre suelo a una cota más alta, así como el abatimiento del nivel freático, con el riesgo consiguiente de producir asientos apreciables y aun socavones. Para resolver este problema hemos realizado por primera vez en Chicago el presellado, mediante inyecciones químicas, de la roca de apoyo de los pilotes periféricos de una cimentación profunda, por medio de un taladro practicado en el centro de cada pilote, que ha servido al mismo tiempo para reconocer la naturaleza del subsuelo, antes de proceder a la perforación de cada pilote. La operación se ha llevado a cabo en los pilotes de gran diámetro de la cimentación del rascacielos Northern Trust Bank, actualmente en construcción, con resultados muy satisfactorios. Se describe el método de presellado de la roca utilizado y los resultados obtenidos.

Posiblemente a fines de 1972 se habrá completado en Chicago la superestructura del edificio «SEARS», actualmente en construcción, que con sus 440 m de altura (110 plantas y 15 m de sótano) será el edificio más alto del mundo, con una ventaja de 30 m sobre el World Trade Center, de New York, que es actualmente el más elevado. Tanto aquel rascacielos como el Standard Oil, en construcción avanzada, que tendrá 346 m, y el ya terminado John Hancock, de 100 plantas y 337 m de altura, así como el First National Bank y otros de gran altura, están apoyados en la roca. La cimentación de estos edificios consiste fundamentalmente en pilotes cilíndricos de gran diámetro, con la base empotrada en la roca situada a unos 30 m, a 40 m de profundidad respecto del nivel de la calle, a diferencia, por ejemplo, de los rascacielos de New York, donde la roca aparece casi en superficie.

Además de las cimentaciones profundas sobre roca son muy frecuentes en Chicago, en edificios de hasta 70 pisos, como es el caso del «Lake Point Tower», otras cimentaciones no tan profundas, a base de pilotes de gran diámetro en «pata de elefante», es decir, con base ensanchada, apoyados en «hardpan». Este suelo está constituido por arcilla limosa con algo de arena, muy dura y preconsolidada, que se presenta frecuentemente entre los 20 y 30 m de profundidad. Inmediatamente sobre el hardpan va una capa de arcilla semidura, seguida por otra de arcilla blanda. Entre el hardpan y la roca aparece generalmente un terreno muy compacto, más incoherente y permeable, con mayor contenido en arena y grava y, frecuentemente, con presencia de bolos.

En la zona correspondiente al centro comercial de Chicago (Loop area), el nivel freático suele estar situado a unos 10 m de profundidad, lo que significa que sobre la base

de las cimentaciones apoyadas en roca actúa una presión de unos 25 m de agua. La roca es de naturaleza caliza o dolomítica y, aunque en general es de buena calidad, presenta frecuentemente grietas, diaclasas y fisuras, con una permeabilidad global a veces elevada.

Un corte medio aproximado del subsuelo en el sector central de Chicago es el siguiente:

Corte aproximado del subsuelo en el sector central de Chicago

De 0 a 6 m	Material de relleno o arena fina.
De 6 a 17 m	Arcilla blanda o muy blanda a semidura, gris oscura; en ocasiones con intercalaciones de capas de arena.
De 17 a 22 m	Arcilla semidura a dura, gris; en algunos casos con intercalaciones de capas de arena.
De 22 a 30 m	Arcilla limosa con algo de arena, muy dura y preconsolidada, gris; hardpan.
De 30 a 35 m	Limo algo arcilloso, con arena, grava y frecuentemente bolos, muy denso.
De 35 m en adelante ...	Roca caliza o dolomítica de buena calidad, algo agrietada y, frecuentemente, algo meteorizada en superficie.

(*) Director Técnico de Soil Testing Española, S. A.

El código de la ciudad de Chicago (2) prescribe que los pilotes de gran diámetro se hormigonan en seco, es decir, con apenas agua en el fondo (2,5 a 5 cm de altura de agua como máximo). Esta condición, aunque los pilotes de gran diámetro apoyados en la roca llevan preceptivamente un tubo de revestimiento permanente de acero, que penetra en la roca, frecuentemente obliga a bombear cantidades importantes de agua mientras se realizan los trabajos finales, manuales generalmente, de terminado y limpieza del fondo de cada excavación, así como la inspección de la roca de la base y subyacente mediante un taladro de reconocimiento como mínimo y la medida de las dimensiones de dicha base de apoyo. Esta operación de bombeo puede provocar el arrastre de cantidades apreciables de suelo, procedente de la zona inmediatamente inferior a la base de las cimentaciones adyacentes apoyadas en hardpan, con el peligro consiguiente para las mismas. Asimismo, el achique puede producir un descenso del nivel freático de dichas cimentaciones adyacentes y originar asentamientos.

Cuando la roca es muy permeable, la solución usualmente adoptada consiste en proseguir la perforación haciendo penetrar a rotación el tubo de revestimiento permanente de acero, que va provisto de dientes, en la roca, hasta que la afluencia de agua sea inferior a un cierto caudal, en general del orden de 20 litros/minuto. Esta operación es muy costosa y no se tiene la certeza de encontrar roca suficientemente impermeable. Cuando esto sucede no queda más remedio que hormigonar bajo agua o lodo bentonítico con tubería de hormigonar, operación que sólo se acepta en último extremo, y a condición de demostrar, mediante uno o varios sondeos posteriores con toma continua de testigo, que el hormigón colocado es satisfactorio a todo lo largo del pilote (1).

Con el fin de resolver este problema, la empresa SOIL TESTING ha propuesto y llevado a cabo recientemente, por primera vez en Chicago, el presellado de la roca y de la capa granular inmediatamente superior a ésta, en la cimentación del edificio Northern Trust Bank, mediante inyecciones químicas. Adyacentes a este edificio hay otros dos edificios (el United States Gypsum y otro menor de 19 plantas) y un paso elevado, con cimentaciones profundas apoyadas en el hardpan. Enfrente y al otro lado de la calle, se eleva el rascacielos SEARS, actualmente en construcción avanzada y que, como se ha indicado, tendrá 110 plantas.

Antes de referirnos al método utilizado para el presellado de la roca, se describen someramente a continuación las características principales y la forma usual de ejecución actual de las cimentaciones profundas de Chicago, apoyadas: a) sobre hardpan, y b) sobre roca. En todos los casos se mantiene una inspección continua de todos los trabajos, así como el control de calidad de los materiales por una o varias Compañías especializadas independientes.

Las cimentaciones profundas de Chicago sobre hardpan

Como se ha indicado anteriormente, el hardpan forma una capa sedimentaria resistente del subsuelo de Chicago, en general de 3 a 12 m de espesor, que suele estar situada entre los 20 y 30 m de profundidad respecto del nivel de la calle. Este suelo está constituido por una arcilla limosa algo arenosa, grisácea, muy dura, de origen

glaciario, altamente preconsolidado en el pasado por el peso de un manto de hielo de enorme espesor.

Algunas características geotécnicas del hardpan figuran en la tabla 1.

TABLA 1
Características geotécnicas medias del hardpan de Chicago

Humedad natural	10-13 %
Límite líquido	24-30
Límite plástico	14-16
Índice de plasticidad	10-16
Densidad seca	2-2,10
Contenido de arena	10-30 %
Resistencia a compresión simple	7-12 kp/cm ² .
Deformación en la rotura a compresión simple	7-9 %
Ensayo de penetración standard	> 100 golpes/30 cm
Ensayo triaxial:	
— consolidado, sin drenaje.	$\phi = 30^\circ$; $C = 1,5$ kp/cm ²
— consolidado, con drenaje.	$\phi = 36^\circ - 38^\circ$; $C = 0$
Ensayo de consolidación:	
— máxima presión de pre-consolidación	30 kp/cm ²
— índice de compresión	$C_c = 0,20 - 0,30$
— índice de recompresión	$C_{cr} = 0,044$

Evidentemente en el hardpan el índice de recompresión es de mayor importancia práctica que el de compresión, dado que las cargas unitarias de trabajo que se emplean son bastante inferiores a la máxima presión de preconsolidación.

En las figuras 1 y 2 se representa la curva granulométrica y la curva edométrica, respectivamente, hasta una carga de 170 kp/cm² de una muestra típica de hardpan.

En obra, los ensayos de rutina más frecuentemente empleados para comprobar la capacidad portante de un estrato de hardpan, consisten en cortar una muestra inalterada de terreno del fondo del pilote de gran diámetro y determinar su resistencia a la compresión simple, su humedad y su densidad.

Con este tipo de suelo la capacidad portante puede deducirse a partir de su resistencia a la compresión simple mediante la fórmula:

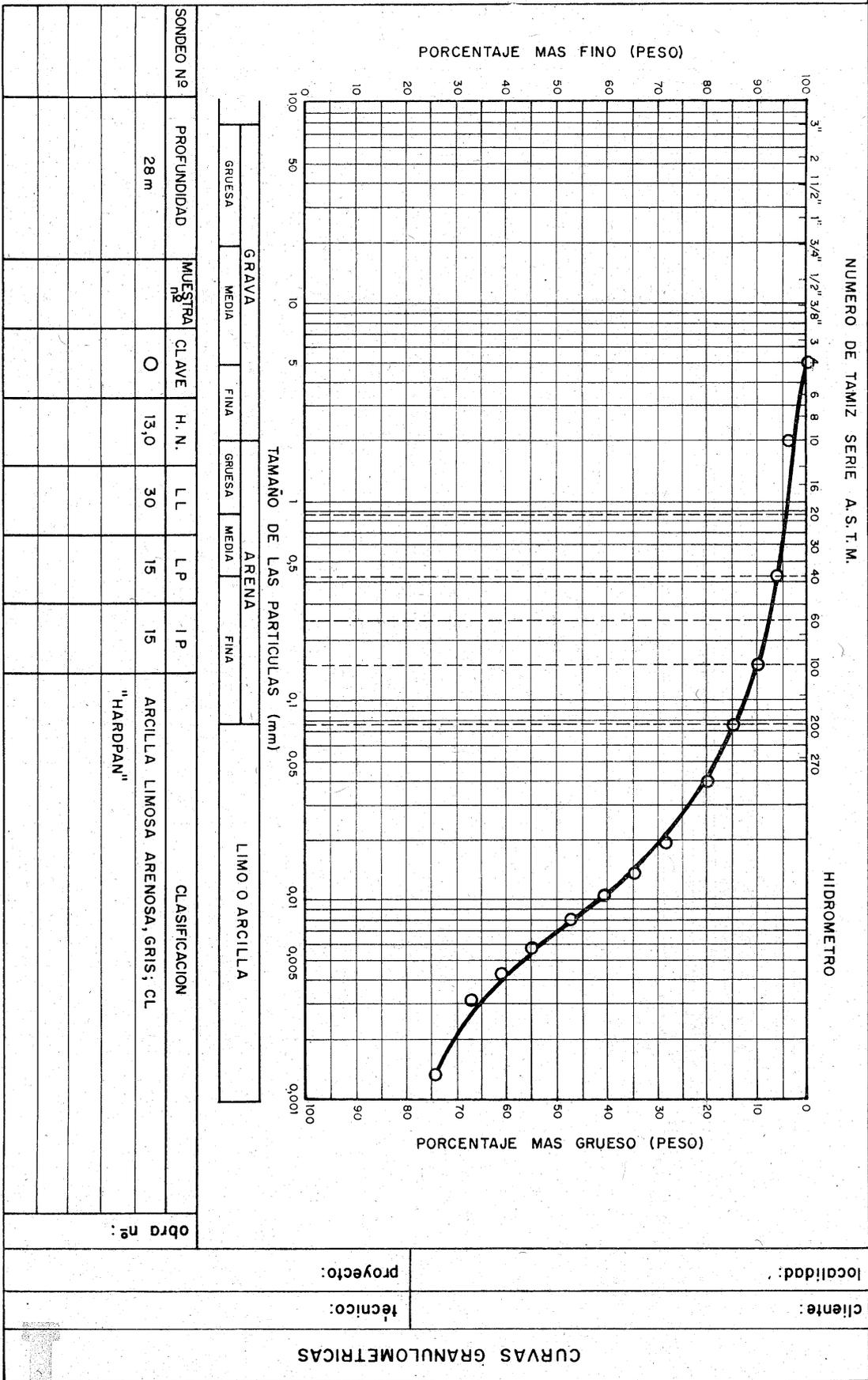
$$\text{Capacidad portante} = \frac{4,5 \times \text{resistencia a la compresión simple}}{\text{factor de seguridad}}$$

Un factor de seguridad de 3 es normalmente aceptado.

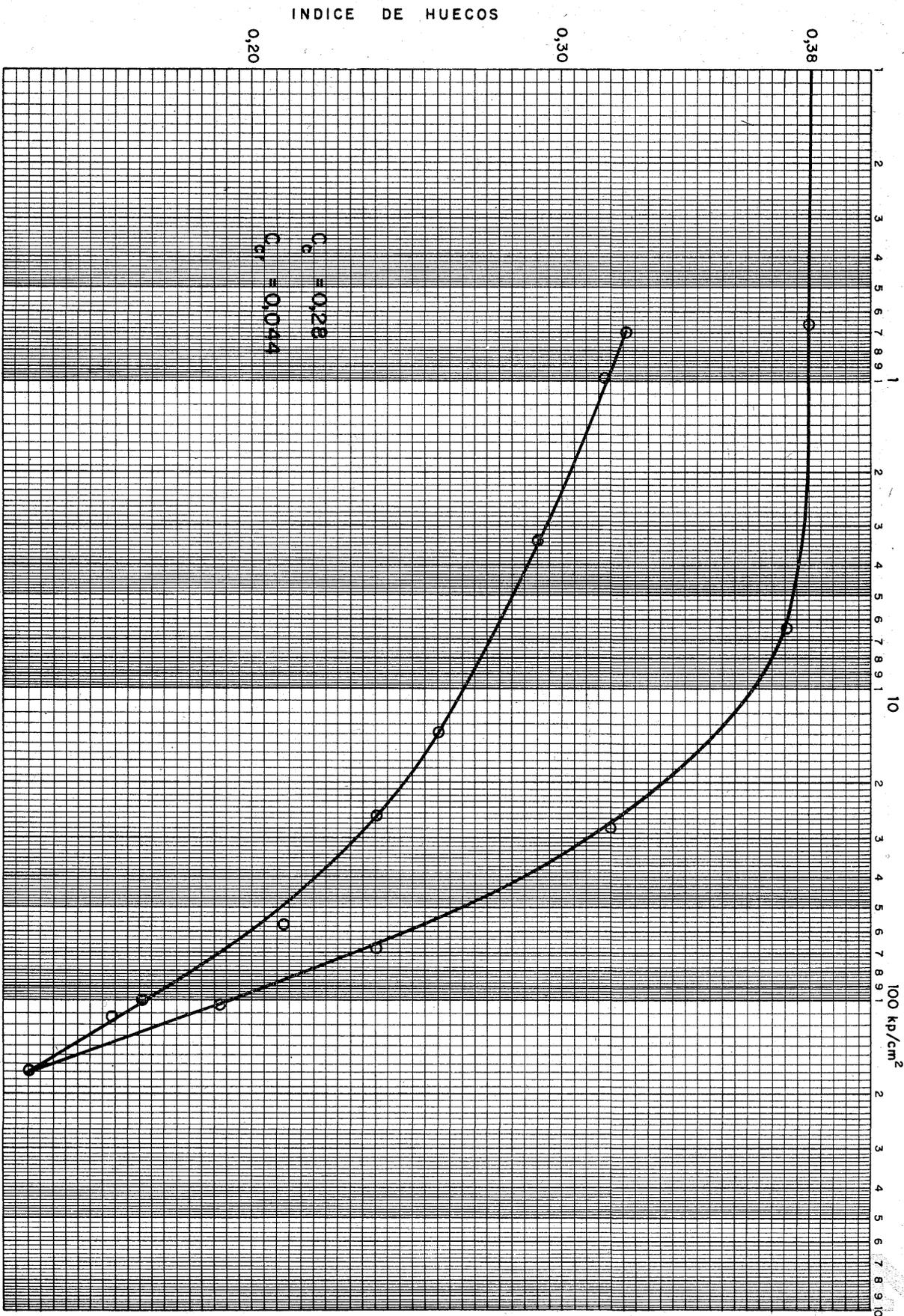
Sin embargo, aun en los pilotes de gran diámetro empotrados en el hardpan de mejor calidad no se permiten cargas unitarias medias de trabajo superiores a 15 kilopondios/cm², siendo 12,5 kp/cm² la carga de trabajo máxima más frecuentemente utilizada.

En el rascacielos «Lake Point», de 70 plantas, edificado recientemente y situado a orillas del lago Michigan, la

CURVA granulométrica de una muestra de hardpan



muestra de hardpan - ensayo edométrico



carga unitaria media de trabajo de los pilotes con pata ensanchada es de 15 kp/cm², estando la base empotrada 1,5 m en el hardpan, que dio una humedad próxima a 10 %. Con estas cargas de trabajo los asentos totales reales a largo plazo son menores de 20 mm, cuando el terreno subyacente es igual o menos comprensible que el hardpan, como es el caso general en Chicago.

En este tipo de pilotes la base ensanchada tiene un diámetro como máximo igual a 3 veces el diámetro del fuste, es decir, un área hasta 9 veces mayor que la del fuste. El ángulo respecto a la horizontal de las paredes inclinadas de la base ensanchada es como máximo de 60°, según se indica en la figura 3. Los diámetros máximos de las bases ensanchadas actualmente, ejecutadas en este tipo de pilotes, son de 6,5 m cuando los ensanchamientos se realicen con máquina, o de 8,5 m cuando son hechos manualmente.

Para la realización de los pilotes con base ensanchada, si el terreno no se mantiene, se coloca un tubo de revestimiento corrugado temporal en la zona no estable o muy permeable, que se prolonga hasta penetrar en la arcilla semidura o dura lo suficiente para conseguir un buen sellado. Hasta esta cota se perfora con lodo bentonítico. Una vez colocado el tubo de revestimiento se bombea el lodo a otro pilote abierto y se continúa la perforación en seco hasta el hardpan. A continuación se procede a la ejecución de la campana o base ensanchada, bien a máquina, bien a mano. Una vez limpiada cuidadosamente la excavación y comprobada la excentricidad y la plomada del pilote, se procede a la inspección visual del mismo y a la toma de muestras inalteradas del fondo. Durante los trabajos manuales o de inspección dentro del pilote, se coloca un tubo de revestimiento temporal. En ocasiones, si el terreno no ofrece garantías por ser demasiado permeable o demasiado blando, se exige dejar dentro del terreno el tubo de revestimiento.

En la figura 4 aparece la fotografía de una máquina que permite ensanchar las bases de los pilotes de gran diámetro en suelo cohesivo desde 2,1 a 6,4 m.

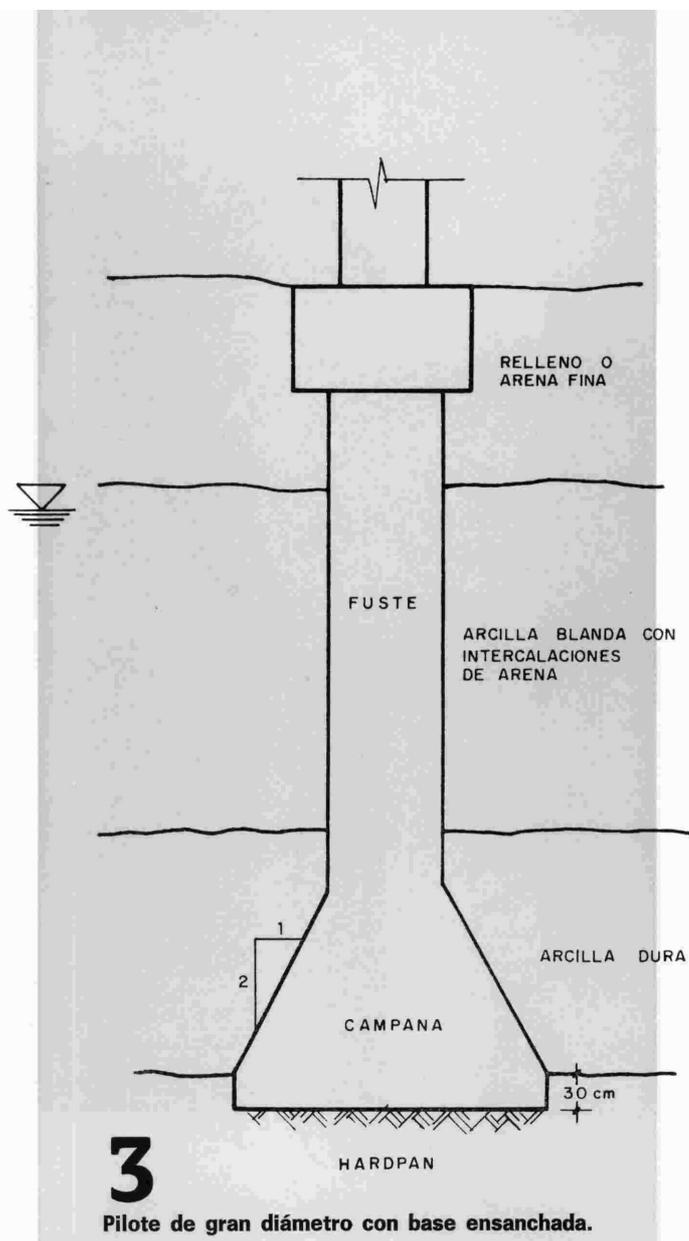
La carga axil máxima permitida en el hormigón de estos pilotes, sin tubo de revestimiento permanente, es de 1/4 de su resistencia a la compresión a 28 días en probeta cilíndrica. Al hormigón se le exige frecuentemente una resistencia mínima de 350 kp/cm² y un asiento de 6 a 12 cm, lo que significa una carga unitaria máxima permisible del hormigón de 87 kp/cm².

El hormigón preparado, de consistencia plástica, procedente de los camiones-hormigonera, se vierte en caída libre en el centro de los pilotes de forma que no golpee directamente las paredes, según puede verse en la figura 5.

Las cimentaciones profundas de Chicago sobre roca

Hasta la década de los años 40 los edificios elevados de Chicago se apoyaban en el hardpan; sin embargo, a partir de entonces, al desarrollarse los equipos de perforación de gran capacidad y al aumentar la altura de los edificios, se han ido generalizando las cimentaciones profundas hasta la roca, que aparece frecuentemente a unos 35 m del nivel de la calle.

La roca es de naturaleza caliza o dolomítica y, en general, de buena calidad, si bien está algo meteorizada en super-



3
Pilote de gran diámetro con base ensanchada.

ficie; presenta algunas grietas y juntas, en ocasiones de elevada permeabilidad. La resistencia a la compresión de testigos cilíndricos no fisurados es del orden de 600 a 700 kp/cm².

La carga unitaria máxima a que usualmente se suele cargar la roca sana es de 100 kp/cm², cuando la base del pilote está situada a 30 cm de la superficie de dicha roca sana, admitiéndose un incremento de 20 kp/cm² por cada 30 cm adicionales que se profundice la excavación, hasta un máximo de 200 kp/cm². Por debajo de la base de apoyo la roca debe tener un espesor mínimo de 2,5 m, sin grietas, bolsas o capas de arcilla y limo, o zonas desintegradas. Para determinar esto es obligatorio practicar un taladro como mínimo, de dicha profundidad, en el fondo de la excavación, generalmente con martillo de aire comprimido, y seguidamente, después de lavar el taladro, determinar la presencia y espesor de posibles grietas, capas de arcilla y limo, oquedades, etc., con un palpador o con una cámara de televisión apropiada.

Se han propuesto los siguientes valores, como espesores máximos acumulados admisibles de grietas, huecos, etc.,

4



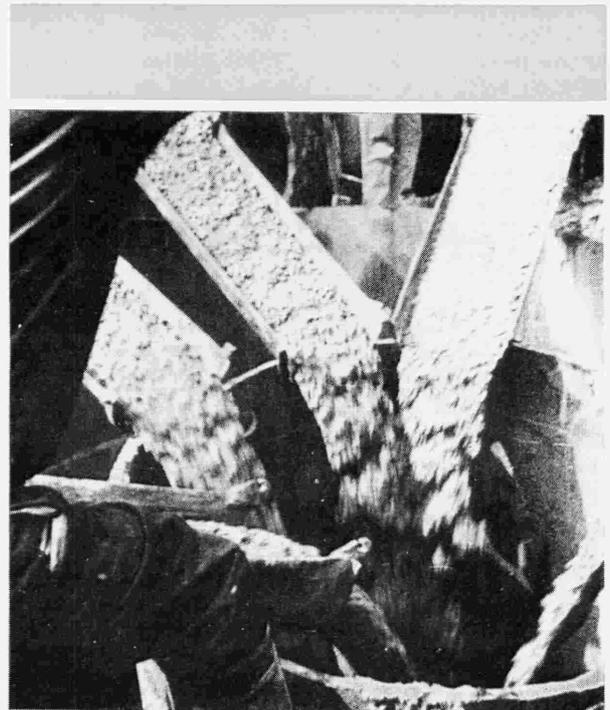
debajo de la base de los pilotes, en función de su diámetro D, para que puedan aplicarse las cargas anteriores:

Profundidad debajo de la base de apoyo de los pilotes de gran diámetro	Espesor máximo permisible de grietas, huecos, etc., acumulado en la roca subyacente
--	---

$0 - \frac{1}{4} D$	0
$\frac{1}{4} D - \frac{1}{2} D$	0,005 D
$\frac{1}{2} D - D$	0,0075 D
$D - 1,5 D$	0,01 D

Si la roca inferior correspondiente al bulbo de presiones no cumple con las condiciones anteriores, se continúa la excavación hasta que las cumpla.

Ya se indicó anteriormente que estos pilotes llevan un revestimiento permanente de acero, a lo largo del pilote, con espesor suficiente para soportar adecuadamente la



Hormigonado en seco de un pilote de gran diámetro con cinco camiones-hormigonera simultáneamente.

5

presión del agua y del terreno. El espesor mínimo permitido es de $0,0075 D$. El límite elástico aparente del acero normalmente empleado es de 2.500 kp/cm^2 , aproximadamente.

En este tipo de pilotes con revestimiento permanente, la máxima carga unitaria axial permitida sobre el hormigón no deberá ser superior a $0,30 R_c + 1,5 \frac{t \cdot L}{D}$ y en ningún caso excederá de $0,4 R_c$, donde:

R_c = Resistencia a compresión a 28 días en probeta cilíndrica (kp/cm^2).

t = Espesor del revestimiento después de eliminar el posible espesor corroído (cm).

D = Diámetro interior del pilote (cm).

L = Límite elástico aparente del acero del revestimiento (kp/cm^2).

El tubo de revestimiento permanente va provisto de dientes para penetrar en la roca a rotación. Como ya se ha indicado, si en el terreno superior a la roca aparece alguna capa acuífera o incoherente o muy blanda se perfora el terreno con lodo bentonítico, con un diámetro de barra superior al del tubo de revestimiento permanente, que se coloca en el taladro una vez que la excavación ha llegado a la roca. Posteriormente se hace penetrar a rotación el tubo de revestimiento hasta que penetre en la roca la profundidad prevista, debiendo producir un buen sellado para que no pase el agua del terreno lateral dentro del pilote. Seguidamente se perfora la roca con una batería de gran diámetro hasta la profundidad deseada, frecuentemente unos 100 cm. Seguidamente se bombea al exterior parte del lodo bentonítico y se mide la entrada de agua en el pilote. Si el caudal de entrada es reducido, se bombea el lodo bentonítico a otro pilote o a un tanque de almacenamiento; si dicho caudal es excesivo, se continúa la penetración a rotación del revestimiento en la roca hasta que se consiga un sellado adecuado. Una vez bombeado el lodo bentonítico, se lava la roca y se mide el caudal de entrada de agua. El caudal máximo permitido es usualmente de 20 litros/minuto. Después se procede a completar la excavación en la roca hasta las dimensiones requeridas —en general, manualmente por medio de martillos neumáticos—, a su limpieza y a la ejecución de al menos un taladro de reconocimiento de 2,5 m de longitud mínima, por debajo de la base de apoyo.

A continuación el inspector representante del cliente o del arquitecto, o ambos, inspeccionan el fondo de la excavación, el taladro o taladros de reconocimiento, las dimensiones del pozo practicado en la roca, así como la verticalidad del pilote y su excentricidad. Si las condiciones son las requeridas, se procede a la inyección del espacio libre lateral exterior al tubo de revestimiento con mortero de arena-cemento y después al hormigonado del pilote. En el momento del hormigonado, el espesor de la capa de agua acumulada en el fondo debe ser inferior a 2,5 ó 5 cm. El hormigonado se realiza vertiendo libremente el hormigón en el centro del pilote, en general mediante camiones-hormigonera. El hormigón tiene usualmente un tamaño máximo de 20 a 25 mm, y debe presentar consistencia plástica para que se comporte como

un fluido continuo y no se produzca segregación en la caída. Frecuentemente, como es el caso de la cimentación del edificio Northern Trust, que se cita a continuación, se exigen resistencias de 350 kp/cm^2 a 28 días a este tipo de hormigones.

Presellado de la roca de apoyo de pilotes de gran diámetro hormigonados en seco

La permeabilidad del fondo de los pilotes de gran diámetro apoyados en roca de las cimentaciones profundas de Chicago, constituye posiblemente el único punto débil de este tipo de cimentaciones. Como ya se ha indicado, la situación puede ser crítica cuando la cimentación es adyacente a otros edificios apoyados sobre suelo, y se precisa bombear un caudal importante de agua del fondo de los pilotes, antes de proceder a su limpieza, inspección y hormigonado en seco.

En los sondeos de reconocimiento del subsuelo para la cimentación del edificio Northern Trust Bank, de 35 plantas, situado en la zona central de Chicago, se había observado que la roca presentaba alta permeabilidad, especialmente en dos esquinas próximas a los dos edificios elevados adyacentes. Con el fin de resolver este problema, que podría crear serias dificultades durante la ejecución de los pilotes de gran diámetro empotrados en la roca, a propuesta de la Empresa SOIL TESTING SERVICES se ha procedido por primera vez en Chicago al presellado de la roca de apoyo y de la capa granular inmediatamente superior, mediante inyecciones químicas, en los 21 pilotes periféricos de la cimentación, que se compone de un total de 44 pilotes.

La penetración mínima prevista para el tubo de revestimiento permanente en la roca sana era de 30 cm, y la excavación mínima de la roca, por debajo de dicho revestimiento, de 75 cm. La carga de trabajo prevista para la roca fue de 150 kp/cm^2 . El diámetro interno de los pilotes variaba de un mínimo de 106 cm a un máximo de 200 cm, y el espesor del tubo de acero de revestimiento permanente, de un mínimo de 9,5 mm a un máximo de 22 mm. El diámetro medio de los pilotes periféricos fue de 130 cm, que corresponde a una carga máxima permisible de 2.000 Mp. Las características generales del terreno eran parecidas a las reseñadas anteriormente para el subsuelo de la parte central de Chicago, estando situado el nivel freático a unos 26 m sobre la base de los pilotes.

Para la ejecución del presellado de la roca y del terreno granular inmediato a la superficie de la roca se practicó primeramente un taladro en el centro de cada pilote, que sirvió para reconocer el terreno y determinar previamente la profundidad exacta de la roca, así como su naturaleza y permeabilidad. Posteriormente, el mismo taladro se empleó para la inyección química.

La perforación del terreno hasta cerca de la roca se hizo con tricono y lodo bentonítico. Una vez entubado el taladro e inyectado el terreno situado inmediatamente sobre la roca se continuaba la perforación por el interior del tubo de revestimiento, con batería provista de corona de

diamantes, que permitía extraer testigo continuo de la roca. La longitud mínima de testigo continuo tomado en la base de cada pilote fue de 3,6 m, y la máxima, de 6 m. Los testigos se observaban y median cuidadosamente, y según el tanto por ciento de recuperación de testigo y la eventual presencia de grietas, huecos y capas delgadas de arcilla o limo, se proseguía o no la toma continua de testigo hasta que la roca reunía las condiciones exigidas. Seguidamente, y previo lavado del taladro y colocación de un obturador, se procedía primeramente a la determinación de la absorción de agua de la roca y después a su inyección.

Los ensayos de absorción de agua en la roca se realizaron con una presión de 2,8 kp/cm² en la boca del taladro. Las absorciones de agua variaron de 5 a 75 litros/minuto, con un valor medio de 20 litros/minuto para una longitud media de taladro de 4,5 m, si bien se pudo constatar, en general, una apreciable disminución de la permeabilidad con la profundidad.

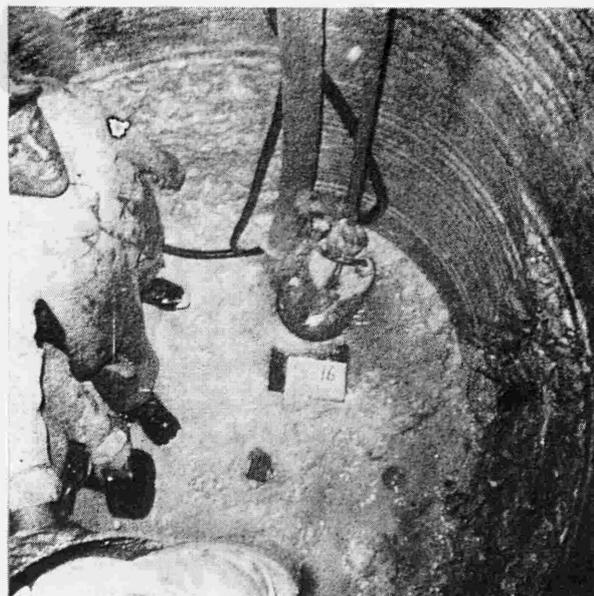
En el terreno inmediatamente superior a la roca, excepto en dos casos en que las absorciones fueron próximas a 40 litros/minuto, en el resto la media de las absorciones fue inferior a 5 litros/minuto, para una longitud libre de taladro del orden de 1,5 m.

Para el sellado se empleó el producto G-3, a base de silicato sódico y reactivo orgánico, que produce un gel duro, ligeramente expansivo. La mezcla líquida es monofásica y homogénea. La solución silicato y la solución reactivo se inyectaron a través de tuberías separadas que se juntaban en una tubería única cerca de la cabeza del taladro. La mezcla líquida constituye un líquido newtoniano, con una viscosidad aparente inicial de 4 a 4,5 centipois. El tiempo de gel se ajustó entre 5 y 40 minutos, en función de los resultados del ensayo previo de absorción de agua, siendo el tiempo medio de gel de 15 a 20 minutos. Los volúmenes de G-3 inyectados por pilote variaron entre un mínimo de 600 litros y un máximo de 6.000, con una media de 1.500 litros.

Actualmente se han perforado y hormigonado satisfactoriamente todos los pilotes periféricos de la cimentación. La afluencia media de agua al interior de los pilotes, después de bombear al exterior el lodo bentonítico empleado en la perforación, fue menor de 5 litros/minuto, frente a un valor máximo permisible de 20 litros/minuto.

Apareció gel en la roca extraída de alguno de los pilotes interiores y en uno de los cuatro taladros próximos practicados para alojar los inclinómetros que se han colocado en el exterior del área de cimentación, con objeto de medir los posibles movimientos del terreno exterior durante los trabajos de excavación y construcción de las cimentaciones. Sin embargo, en algunos de los pilotes interiores la afluencia de agua resultó superior a 400 litros/minuto, en condiciones similares a los de la periferia.

En conclusión, el método empleado de inyecciones químicas para el presellado con gel duro de la roca de apoyo de pilotes de gran diámetro ha dado un resultado satisfactorio, dado que la afluencia de agua en el interior de los pilotes se ha mantenido por debajo del límite requerido, sin necesidad de hacer penetrar el tubo de revestimiento más de 30 cm en la roca. Asimismo, al término de la construcción de la cimentación, no se ha apreciado ni en



Fondo presellado de la excavación para un pilote de gran diámetro, apoyado en roca, con la base a 25 m bajo nivel freático.

los inclinómetros ni en las referencias fijas colocados en los edificios adyacentes, ningún movimiento vertical u horizontal del terreno superior a la sensibilidad de los aparatos. Actualmente se está empleando el mismo método en otro rascacielos de Chicago, el Harris Trust, de 40 pisos.

Apéndice

Comparación del «tosco» de Madrid con el «hardpan» de Chicago

Se denomina «tosco» a una capa de terreno típica del subsuelo de Madrid, que constituye un buen firme para el apoyo de cimentaciones (3). El tosco, como el hardpan de Chicago, está constituido por arcilla limosa arenosa, muy dura y muy poco permeable. Se diferencian ambos suelos entre sí, principalmente, en que el hardpan está mucho más preconsolidado, pero tiene menor contenido en arena que el tosco.

El tosco aparece frecuentemente en los niveles altos o medios de Madrid a profundidades de 10 a 30 m de la superficie, si bien en algunas ocasiones aflora al exterior, presentándose en espesores a veces superiores a 20 m. Esta capa se suele continuar en profundidad por una arcilla verdosa o azulada de mayor resistencia, de alta plasticidad. Encima del tosco se apoya frecuentemente una capa de espesor variable de arena algo limosa («arena de miga»), bastante permeable, que en ocasiones se encuentra bajo nivel freático o sumergida en agua colgada. Algunas características geotécnicas medias del tosco figuran en la tabla 2.

TABLA 2
Características geotécnicas medias del toско de Madrid

Humedad natural	13-18 %
Límite líquido	30-40
Límite plástico	15-22
Índice de plasticidad	10-20
Densidad seca	1,80-1,95
Contenido en arena	30-60 %
Resistencia a la compresión simple	4-9 kp/cm ²
Deformación en rotura a la compresión simple	3-5 %
Ensayo de penetración standard	80-100 golpes/30 cm

Ensayo triaxil:

- consolidado, sin drenaje $\Phi = 28-32^\circ$; C = 1,0-1,5 kp/cm²
- consolidado, con drenaje $\Phi = 35-39^\circ$; C = 0 kp/cm²

Ensayo de consolidación:

- máxima presión de preconsolidación aproximadamente la correspondiente a la capa de cobertura
- índice de compresión medio 0,035-0,065

Estos valores se han deducido a partir de ensayos edométricos realizados con presiones máximas de 10 kp/cm². Sería interesante confirmar estos resultados mediante ensayos edométricos hasta 100 kp/cm². El bajo valor obtenido para el índice de compresión del toско puede posiblemente explicarse por su considerable contenido en arena y limo y, acaso, por un efecto adicional de preconsolidación por desecación.

Creemos que los pilotes de gran diámetro con base ensanchada, hormigonados en seco, con la campana alojada en el toско, podrían constituir, al menos en determinadas zonas, un tipo de cimentación profunda muy apropiado para el subsuelo de Madrid, especialmente en edificios de gran altura o en estructuras muy cargadas, que deban experimentar asientos muy reducidos.

De la comparación de las características geotécnicas del hardpan y del toско se puede anticipar una carga unitaria máxima admisible de trabajo típica para el toско, en pilotes con base ensanchada y profundidad mínima de 10 m, sin revestimiento permanente y hormigonados en seco, de 7 kp/cm², pudiendo posiblemente alcanzar valores de hasta 10 kp/cm² para los toscos más densos y resistentes, con la campana del pilote excavada en el propio toско.

Aparte del valor de la compresión simple sobre muestra inalterada con la humedad natural, creemos es de gran interés conocer su contenido en humedad natural, su densidad seca y su contenido en arena, para juzgar sobre sus características resistentes y de deformación. Los valores anteriores representan órdenes de magnitud, y las cargas unitarias admisibles reales deberían determinarse en cada caso.

Si se supone un pilote con un diámetro de fuste de 1,5 y de 4,5 m en la base y una carga unitaria media de trabajo de 7 kp/cm² sobre el toско, este pilote podría trabajar con una carga máxima de 1.100 Mp. Según el criterio del Código de Chicago, anteriormente citado, la mínima resistencia del hormigón a 28 días debería ser de 250 kp/cm².

Comentario sobre la técnica de presellado en pilotes de gran diámetro apoyados sobre rocas pizarrosas

El método citado de presellado de pilotes de gran diámetro, hormigonados en seco, apoyados sobre roca, puede tener especial interés en el caso de rocas pizarrosas, tales como, por ejemplo, la típica «cayuela» de Bilbao.

Como es sabido, en estos casos tiene una gran importancia para definir las cargas de trabajo de la roca: el ángulo de buzamiento de la estratificación, la naturaleza y características del material de relleno de las juntas, el estado de la superficie de contacto, la permeabilidad de la roca, su susceptibilidad frente al agua, y su grado de meteorización. El conocimiento de la geología de la zona constituye también una gran ayuda para la solución del problema, especialmente si se teme un efecto de grupo de los pilotes de gran diámetro.

En ocasiones el buzamiento es muy pronunciado, por lo que la ejecución previa de un sondeo con toma de muestra continua de la roca, hasta una profundidad mínima de dos veces el diámetro del pilote por debajo de la base de apoyo prevista, en el centro de cada pilote de gran diámetro, con realización de ensayos de absorción de agua, permite conocer en cada caso la profundidad de la roca, su permeabilidad y su naturaleza. Con estos datos se puede anticipar la profundidad de la perforación a ejecutar, la conveniencia de preinyectar la roca, y la longitud de los tubos de revestimiento permanentes, si no es de temer un fallo general de la cimentación por efecto de grupo. En caso contrario, es decir, si se teme un efecto de grupo, como ha sucedido en alguna ocasión en este tipo de roca, la longitud de los pilotes sería mayor que en el caso que se presenta.

Aparte de la mayor seguridad que supone el hormigonado en seco, una de las mayores ventajas del método consiste en poder confirmar, una vez realizada la perforación, la resistencia y características anticipadas de la roca, o decidir sobre la conveniencia de profundizar más el pilote, o de variar los supuestos de cálculo, si llegara el caso.

Una vez inyectada la roca, si el ensayo previo de absorción de agua lo hubiera justificado, y practicada la excavación del terreno y de la roca y su limpieza, hasta la profundidad prefijada, la inspección de la roca inferior al tubo de revestimiento puede consistir en lo siguiente: medida del caudal de entrada de agua una vez achicada la excavación, observación directa de la roca de apoyo y de su estratificación, medida de las dimensiones de la excavación en la roca, y toma de muestras inalteradas grandes para su ensayo en el laboratorio. En ocasiones, especialmente donde no haya experiencia anterior sobre el comportamiento de la roca en cuestión, puede ser interesante tallar pedestales en las paredes laterales de la roca, determinar con precisión su estratificación y buzamiento, y proceder a determinar su carga de rotura con un gato.

Al menos en algunos pilotes, se deberán confirmar los resultados obtenidos en el sondeo previo de la roca, ejecutando un taladro o más en la base del pilote, con martillo de aire comprimido hasta una profundidad como mínimo de dos veces el diámetro del pilote. Una vez limpio el taladro, se detectarán y medirán con un palpador los espesores de las juntas, huecos o discontinuidades existentes.

A partir de los ensayos de resistencia in situ, con consideración de su estratificación y buzamiento y de la resistencia de los testigos grandes ensayados, aplicando las cargas formando un ángulo respecto a la estratificación

igual a las condiciones reales de trabajo del pilote y con los datos adicionales obtenidos del reconocimiento cuidadoso de la roca de apoyo y subyacente, de la estratificación y de las juntas, se puede deducir la carga unitaria máxima de trabajo a que se puede cargar la roca y decidir si interesa ahondar más la perforación.

Es muy importante que antes de bajar el personal al fondo de los pilotes se analice la presencia de posibles gases nocivos, principalmente metano, monóxido o dióxido de carbono.

El método expuesto puede tener especial interés en el caso de estructuras tales como grandes instalaciones industriales, edificios elevados, viaductos, etc.

Referencias

- (1) Caisson construction problems and methods of correction. Clyde N. Baker and Fazlur Kahn. ASCE Meeting Preprint 1020. October 13-17, 1969.
- (2) Chicago Building Code. Vol. 17, March, 1970, Chicago, Ill.
- (3) Los suelos de Madrid. Ventura Escario. Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, Publ. 25, Madrid, 1970.

résumé

Les fondations actuelles des gratte-ciel de Chicago

Alvaro López Ruiz, Dr. en Chimie Industrielle. Senior Soil Engineer

L'auteur présente les caractéristiques principales du terrain et de la roche d'appui et décrit sommairement la manière dont les fondations profondes de Chicago sont exécutées actuellement. Cette ville aura sous peu quelques-uns des gratte-ciel les plus hauts du monde, appuyés sur des fondations profondes sur roche et aussi, probablement, l'édifice le plus haut appuyé sur le sol.

L'exécution de pieux de grand diamètre appuyés sur roche et bétonnés à sec, d'après les prescriptions du code de la ville, présente le point faible qu'il est nécessaire parfois d'enfoncer beaucoup dans la roche le tube de revêtement permanent, afin d'assurer l'étanchéité exigée, ou pomper des quantités importantes d'eau du fond des excavations. Cette dernière opération peut provoquer des affouillements du terrain des fondations contiguës, appuyées sur le sol à une cote plus élevée, ainsi que l'abaissement de la nappe phréatique, au risque de produire des affaissements appréciables et même des cavitations. Pour remédier à ce problème, on a exécuté, pour la première fois à Chicago, un scellement préalable, par des injections chimiques, de la roche sur laquelle s'appuient les pieux périphériques d'une fondation profonde, à travers un trou pratiqué au centre de chaque pieu, trou qui a servi en même temps à reconnaître la nature du sous-sol avant de procéder à la perforation de chaque pieu. Cette opération a été réalisée sur les pieux de grand diamètre des fondations du gratte-ciel, Northern Trust Bank, en cours de construction, obtenant des résultats très satisfaisants. Enfin, l'auteur décrit la méthode suivie pour le scellement préalable de la roche et les résultats obtenus.

summary

The present foundations of the Chicago Skyscrapers

Alvaro López Ruiz, Dr. of Industrial Chemistry. Senior Soil Engineer

The main characteristics of the land and the supporting rock are given, and the pattern of present performance of Chicago's deep foundations is briefly described. This city probably has some of the highest skyscrapers in the world with deep foundations resting on rock, and possibly as well, the highest building with foundations resting on soil.

The construction of piles of large diameter, resting on rock and concreted dry, as prescribed by the City Code, is the weak point which sometimes makes it necessary to insert a permanent lining tube deep into the rock in order to obtain the required leak-tightness, or to pump out significant quantities of water from the bottom of the excavations. The latter can cause the dragging away of earth from adjacent foundations resting on soil at a higher level, as with the drift of the phreatic level, with the consequent risk of producing appreciable subsidence, and even undermining.

To overcome this problem we carried out for the first time in Chicago, a pre-sealing, by means of chemical injections, of the supporting rock of the periphery piles of some deep foundations, by drilling into the centre of each pile, which has also been useful as a means of examining the subsoil before proceeding to the perforation of each pile. This operation was carried out on the large diameter piles of the foundations of the Northern Trust Bank skyscraper, at present under construction, with very satisfactory results. The method of pre-sealing the rock used and the results obtained are described.

zusammenfassung

Moderne Fundamentierung der Hochhäuser von Chicago

Dr. Ing. Chem. Alvaro López Ruiz. Senior Soil Engineer.

In diesem Aufsatz werden die wichtigsten Merkmale der Bodenbeschaffenheit und des Grundfelsens vorgestellt und kurz die moderne Bauweise der Tiefgründungen in Chicago beschrieben. In Kürze werden in dieser Stadt einige der höchsten Hochhäuser mit Tiefgründung auf Grundfelsen entstehen und möglicherweise auch das höchste Gebäude mit Oberflächengründung.

Um die Gründungspfähle mit grossem Durchmesser, die auf den Felsen aufliegen und trocken betoniert werden, nach den städtischen Bauvorschriften auszuführen, muss man oft die Verkleidungsröhre tief in diesen Felsen einführen, um die nötige Wasserdichtigkeit zu erreichen, oder man muss grosse Wassermengen aus den Bohrlöchern herauspumpen. Diese letztere Methode kann Erdrutsche der benachbarten, höher liegenden, Fundamente verursachen, ebenso wie eine Senkung des Wasserspiegels mit der folgenden Gefahr merkbarer Senkungen und Unterhöhungen. Um diese Probleme zu lösen wurde zum ersten Mal in Chicago ein Versiegelungsverfahren, mittels chemische Einspritzungen, direkt auf der Felsenoberfläche angewendet, und zwar auf den Grundfelsen der äusseren Pfähle, indem man ein Bohrloch in der Mitte der Pfähle ausführt, das gleichzeitig die Erforschung der Bodenbeschaffenheit ermöglicht, bevor man jeden Pfahl einbohrt. Dieses Verfahren wurde bei den Pfählen mit grossem Durchmesser der Fundamente des Northern-Trust-Bank Hochhauses angewendet, welches sich jetzt im Bau befindet, mit sehr befriedigenden Ergebnissen. Das Versiegelungsverfahren und die erhaltenen Ergebnisse werden hier beschrieben.