

# EMPLEO DE LODOS TIXOTROPICOS EN OBRAS DE INGENIERIA CIVIL

Por LUIS FERNANDEZ-RENAU

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, M. S.  
Cimentaciones Especiales, S. A.  
Procedimientos Rodio.

*"En nuestro número de septiembre publicamos la primera parte de este interesante artículo. A continuación se exponen diversas aplicaciones de los lodos bentoníticos a la construcción de pantallas continuas y pilotes de gran diámetro, moldeados en el suelo".*

(Continuación.)

## IV. Características del hormigón armado de las pantallas.

La inspección directa de las numerosas pantallas excavadas permite tener absoluta garantía de que el hormigón colocado con embudo desplaza perfectamente al lodo, sin entremezclarse. En la interfase lodo-hormigón hay una tendencia del cemento a hacer flocular el lodo, por lo que se interpone un agente defloculante, en general pirofosfato o hexametáfosfato sódico, o lignosulfito.

Dada la importancia del tema, la sociedad GIOVANNI RÓDIO, S. p. A., ha ejecutado sondeos verticales a rotación en el seno de una pantalla y entregado los testigos, para su análisis, al Politécnico de Milán.

La propia perforación a rotación es ya un índice de la calidad del hormigón, pues si ésta baja, la corona de perforación desagrega y rompe el hormigón. El porcentaje de testigo recuperado fué de 95 por 100, con piezas de longitud 5 y 10 veces su diámetro ( $\phi$  78 mm.).

Resumimos los resultados del laboratorio:

	Media Kg./cm <sup>2</sup> .	$\sigma$ %
Resistencia a flexo-tracción .....	79,4	16,4
Compresión simple .....	397	11,5
Tracción (ensayo brasileño) .....	31	13,2
Peso específico aparente .....	2,31	1,45

(Dosificación cemento: 350 Kg./m.<sup>3</sup>. Edad de las probetas: 180 días.  $\sigma$  = desviación típica.)

Los ensayos no acusaron correlación sensible con la profundidad del testigo, a excepción de

un ligero aumento del peso específico con la profundidad.

Las resistencias a tracción, particularmente en el ensayo brasileño, demuestra una excelente adherencia del mortero a la grava, fruto de la ausencia de contaminación del hormigón por el lodo, cosa lógica, pues los hormigones sumergidos, colocados por embudo, no se deslavan por el agua. Las desviaciones típicas son francamente bajas, lo que prueba que el hormigón de las pantallas es de calidad uniforme.

En general, se emplean dosificaciones de 350-400 Kg. de cemento por metro cúbico, utilizándose plastificantes y, en algunos casos, retardadores, según sea el volumen del panel en comparación con el ritmo de hormigonado, es decir, según sea la planta de hormigonado de que se disponga. En obras grandes se ha utilizado el bombeo del hormigón.

Normalmente, se emplean hormigones con "slump" de 14-18 cm., que se colocan fácilmente. El tamaño máximo de árido debe limitarse a 30 mm.

Naturalmente, las brillantes resistencias de los hormigones ensayados en el Politécnico de Milán son el resultado de un hormigonado de gran calidad. Pero también es preciso conocer y aplicar sanos criterios para obtener buenas resistencias en los hormigones aéreos, no sumergidos.

Cuando se busca el lograr impermeabilidad y cierta deformabilidad de la pantalla se recurre a hormigones "plásticos", o mejor, bastardos, en que el cemento se reduce a expensas de arcilla. La relación entre estos últimos puede ir de 1:1,5 a 1:7, acomodándose a la deformabi-

lidad del terreno circundante. El coeficiente de permeabilidad es del orden  $10^{-6}$  cm./seg.

La deformación, en rotura o compresión simple, de un hormigón plástico, llega a ser del orden 5 por 1 000, cifra a comparar con un 0,01 por 1 000 para hormigones convencionales. Las resistencias a compresión simple son de algunas decenas de Kg./cm.<sup>2</sup>. Las deformaciones bajo carga constante son grandes: bajo 5 Kg./cm.<sup>2</sup> pueden llegar a ser del orden  $10^{-4}$  en veinticuatro horas.

La plasticidad de tales hormigones es, pues, muy notable, lo que facilita su puesta en obra, pero dificulta la formación de las juntas entre paneles.

Estos hormigones fueron empleados por SOLETANCHE en la presa de Serre-Ponçon. La Sociedad ROBRAS, de Brasil —GRUPO RODIO—, en la presa de Arroio Duro utilizó con éxito un hormigón plástico con relación arcilla : cemento de 7 : 1; se trataba de una pantalla en arcillas y arenas limosas, de 40 centímetros de espesor y profundidad máxima de 36 metros.

CIMENTACIONES ESPECIALES S. A., ha ejecutado recientemente una pantalla, bajo el núcleo de la presa de Celemín, con hormigón plástico, cuyo módulo de elasticidad a veintiocho días era de 30.000 Kg./cm.<sup>2</sup>, es decir, comparable al de los plásticos duros de cloruro de polivinilo.

Según la forma y dimensiones de los paneles, suelen utilizarse uno o dos embudos de hormigonado. El hormigón tiene que ser estudiado cuidadosamente para cada caso. Hay que poner especial énfasis en la determinación de las curvas rigidez-tiempo del mortero obtenido por cribado a través de malla 2 mm., mortero que puede tomarse como patrón. Fijado el tiempo para una rigidez de 5-10 gr./cm.<sup>2</sup>, hay que buscar armonía entre el volumen del panel y el ritmo de colocación del hormigón, a fin de no exceder dicho tiempo durante la operación de hormigonado y de que así no cobre rigidez excesiva aquel hormigón que se colocó el primero, es decir, el que es remontado a superficie por las posteriores masas de hormigón.

Estudiado adecuadamente el hormigón a utilizar, no es preciso más control que el habitual muestreo por toma de probetas para rotura a tres edades (siete, veintiocho y noventa días).

Pasemos a hablar de las armaduras. Para una fácil colocación es preferible no sobrepasar los

40 kilogramos de armadura por metro cuadrado. Normalmente, las armaduras principales de flexión son verticales y se dispone una armadura horizontal de reparto en el interior, así como barras diagonales y espaciadores entre las mallas de trasdós e intradós. Estos dos últimos tipos de armadura persiguen dar rigidez e indeformabilidad a las jaulas de armaduras. El recubrimiento de las barras principales es de 6-10 cm. y se consigue mediante unos pequeños tacos de mortero que se sujetan exteriormente a las armaduras verticales u horizontales en puntos discretos de las mismas.

La preparación y colocación de las armaduras es, por tanto, un trabajo cuidadoso, pero no especial.

Pueden preverse armaduras de espera para enlace con vigas de arriostramiento o forjados previo picado de la pantalla, para despliegue de aquéllas.

La solución de continuidad de las armaduras horizontales, que supone la existencia de juntas entre paneles, no suele ser determinante, por cuanto son las armaduras verticales las que el proyectista prevé para la absorción de momentos flectores.

El problema fundamental que las armaduras plantean es el de adherencia hierro - hormigón, puesto que las jaulas se colocan dentro del lodo bentonítico. La firma SOLETANCHE ha ejecutado ensayos de adherencia que demuestran que la resistencia a tracción pura se ve sensiblemente disminuida, aunque no por debajo de los límites que las instrucciones de hormigón armado admiten. Este último extremo ha sido comprobado en ensayos de flexión de vigas. Vale la pena resumir dichos ensayos y anticipar las precauciones a tomar en favor de una suficiente adherencia acero - hormigón.

Los ensayos de tracción pura se han hecho sobre probetas de hormigón, vertido en ambiente de lodos. Estas probetas fueron cubos de 30 y 40 cm. de arista, en que las armaduras  $\phi$  30 mm. se embebían en el hormigón 17 centímetros, ora horizontalmente, ora verticalmente. También se ejecutaron otros ensayos sobre armaduras verticales en probeta cilíndrica de 60 centímetros de altura y 40 centímetros de diámetro.

Se utilizaron barras lisas y barras de acero "Tor",  $\phi$  30 mm., así como lodos de distintas concentraciones, elaborados con bentonita (LL = 353) y arcilla de Apt (LL = 103), cuyas visco-

idades variaron entre 37 y 55 seg. Marsh, valores comunes en obra.

Se prepararon probetas - testigo, sin presencia de bentonita, con acero liso normal y acero "Tor" y aceros liso y "Tor" engrasados.

Pese a la importante dispersión de los ensayos, se vio que la posición del hierro lógicamente no influía en las probetas - testigo. La adherencia en los testigos liso y "Tor" fué comparable — del orden de 55 Ton. — y en los testigos engrasados bajó notablemente — orden de 5 Ton. —.

cativos: los ensayos a flexión. Estos ensayos se realizaron con vigas de  $0,16 \times 0,15 \times 1,00$  metros (canto  $\times$  ancho  $\times$  luz), armadas, en su cara inferior, con  $1 \phi 12$  y  $2 \phi 9$  que se terminaban, solapándose, en la zona central de la viga, simplemente apoyada. La rotura por flexión se cebó por dos muescas dejadas a propósito en la cara inferior de la viga, en el punto de terminación de armaduras en la zona central (véase fig. 15).

Se hicieron vigas con armaduras testigo (sin lodo), con acero engrasado y con armaduras en

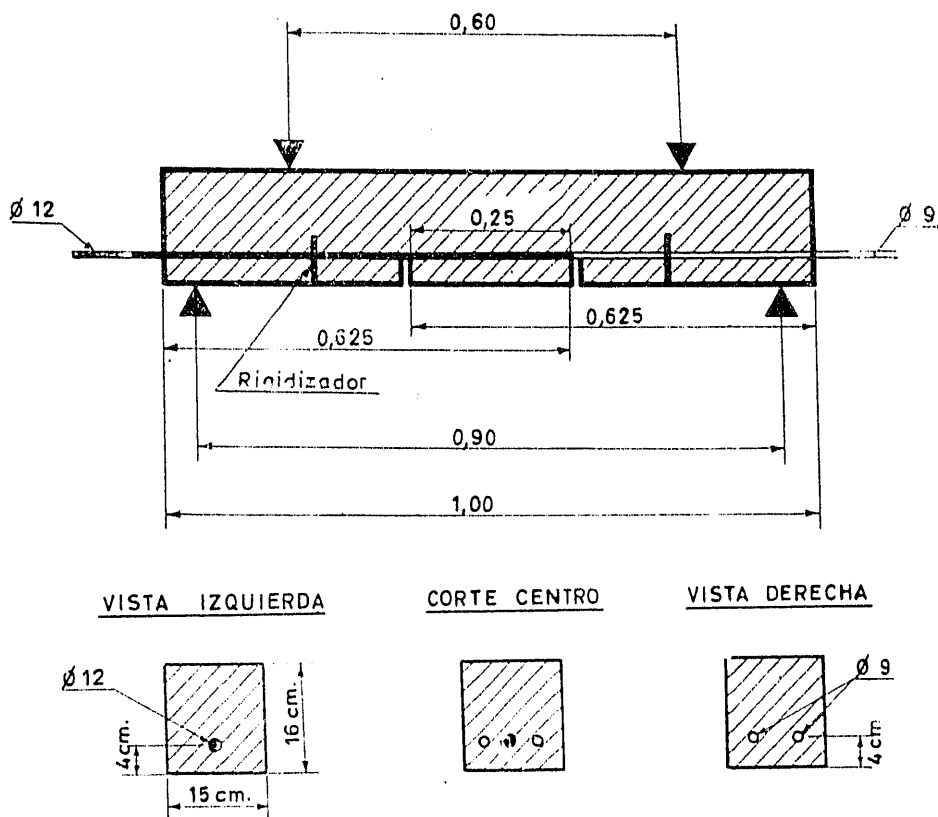


Fig. 15. — Ensayo de rotura de vigas a flexión.

La adherencia en los hierros verticales, que es la única interesante a efectos prácticos, bajó al 30-50 por 100 de la adherencia en las probetas - testigo. La pérdida fué ligeramente mayor para el acero "Tor" que para el normal y aumentó notablemente con la viscosidad del lodo.

El efecto del lodo no puede compararse con el de una película de grasa. La película de lodo alrededor de las armaduras se mezcla con el cemento del hormigón y se rigidifica. La grasa, en cambio, no sufre modificación al contacto con el hormigón.

Pasemos a describir los ensayos más signifi-

hormigón vertido en el seno del lodo. La viga con armaduras engrasadas rompió para una carga del orden del tercio de la carga de rotura de la viga-testigo y de la viga hormigonada en presencia de lodo. Estas últimas rompieron para cargas iguales.

Resultados análogos se han obtenido en ensayos hechos en el Politécnico de Milán. El doctor Veder ha confirmado estos resultados en la Escuela Técnica Superior de Munich [12].

El buen resultado de adherencia en los ensayos de flexión proviene de que la disminución causada por el lodo no llega a descender

por debajo de los valores de la Instrucción (7 Kg./cm.<sup>2</sup>).

Para mejorar la adherencia deberá hormigonarse en presencia de un lodo sin rigidez, de pequeña viscosidad — menor de 40 seg. Marsh — y sin floculación. Para lograr esto último, según ya se ha dicho, entre lodo y hormigón debe interponerse un dispersante, tal como el pirofosfato sódico, que se introduce al final de la perforación y antes del hormigonado.

(Aunque prácticamente no se usan en la Ingeniería Civil, debe saberse que los coloides orgánicos (CMC, almidón) son poco miscibles con la lechada de cemento y no son incorporables o rigidificables por la misma razón, por lo que anulan la adherencia acero-hormigón.)

El cálculo de las pantallas continuas se aborda como el de una pared flexible, utilizando los medios puestos a punto para los tablestacados, en particular los métodos de la viga equivalente de Blum y las simplificaciones empíricas basadas en los ensayos de la Universidad de Princeton [25].

## V. Aplicaciones de los métodos de construcción de pantallas continuas.

Las más importantes aplicaciones de la pantalla continua son:

- Muros de sostenimiento.
- Pantallas de impermeabilización.
- Cimentaciones profundas.

Como muro de sostenimiento, y a veces también ataguía para construcción bajo la capa freática, encuentran especial aplicación en la ejecución de sótanos de edificaciones urbanas. Muchas ventajas de este procedimiento coinciden en este caso:

- a) Posibilidad de acercarse a las medianerías sin comprometer su estabilidad.
- b) Trabajo poco ruidoso, del orden del que produce el tráfico diurno. Vibraciones mínimas.
- c) Posibilidad de excavar bajo la capa freática sin agotamientos ni sifonamientos del terreno. El recinto impermeable, constituido por la pantalla, se completa con un fondo estanco, bien por empotramiento en una capa impermeable o bien por una adecuada inyección del terreno.

- d) Las máquinas ocupan poco espacio, con lo que puede trabajarse en solares reducidos.
- e) Se logra un rápido progreso de los trabajos, lo que tiene gran interés en centros urbanos, en que la obra afecta al tráfico rodado.
- f) Evita métodos penosos, más peligrosos y de difícil estimación de costo, como son las entibaciones y encofrados de los procedimientos convencionales.
- g) Es obra incorporable al proyecto definitivo, y no meramente provisional, y ello tanto desde el punto de vista de las cargas verticales como de las horizontales.
- h) Suministra información sobre el suelo durante la ejecución de los trabajos.
- i) Su costo es determinable de antemano, con suficiente aproximación como para evitar desagradables imprevistos.

La ventaja *a)* es fruto de que el lodo estabiliza las paredes de la zanja, cuyas deformaciones son del orden milímetros, y además el volumen de tierras excavadas es totalmente sustituido por hormigón, con lo que prácticamente se evita el descompactar el terreno circundante. Como se dice bajo *f)*, los procedimientos convencionales llevan consigo mayores desplazamientos del suelo, horizontales y verticales —por lo menos, a la escala centímetro—.

Esta ventaja quedó patente en la ejecución de los sótanos de la Caja de Ahorros de Sevilla, situada en el viejo centro de la ciudad, en que la mayor parte de los trabajos se ejecutaron junto a medianerías muy fisuradas y sin cimientos prácticamente —sobre un viejo relleno, el cimiento apenas bajaba 30-50 cm.—. La figura 4.<sup>a</sup> ilustra bien este difícil trabajo, en que las fisuras de los viejos edificios sólo aumentaron, sin el menor peligro, al excavar el interior del recinto de sótano y deformarse la pantalla elásticamente como un voladizo, pero no durante la apertura de las zanjas por el equipo CIS-58, procedimiento RODIO-MARCONI.

En la figura 16 se ve una pantalla para ejecución de un doble sótano en terreno arenoso para el Banco Pastor (La Coruña) con la capa freática a la cota —1,10 m. La pantalla tuvo que bajar por debajo de las cimentaciones

del edificio medianero, a saber, pozos sobre jabre (granito descompuesto), sin que se produjese movimiento alguno.

En cuanto a *b)*, citaremos las mediciones efectuadas por la Policía municipal de Bienne, Suiza, país restrictivo en cuanto a la prohibición de ruidos, que dieron para una máquina CIS-58, a diez metros de distancia, un ruido de 70-72 fo-

En la figura 17 se ven las excavaciones de Marekolsheim-Rhinau. La pantalla continua se ejecutó con hormigón bastardo, utilizando los propios lodos de la perforación, pues no debía soportar esfuerzos, ya que se conservaron taludes en el interior del recinto excavado, cuyo fondo se trató por inyección del acarreo del Rhin.

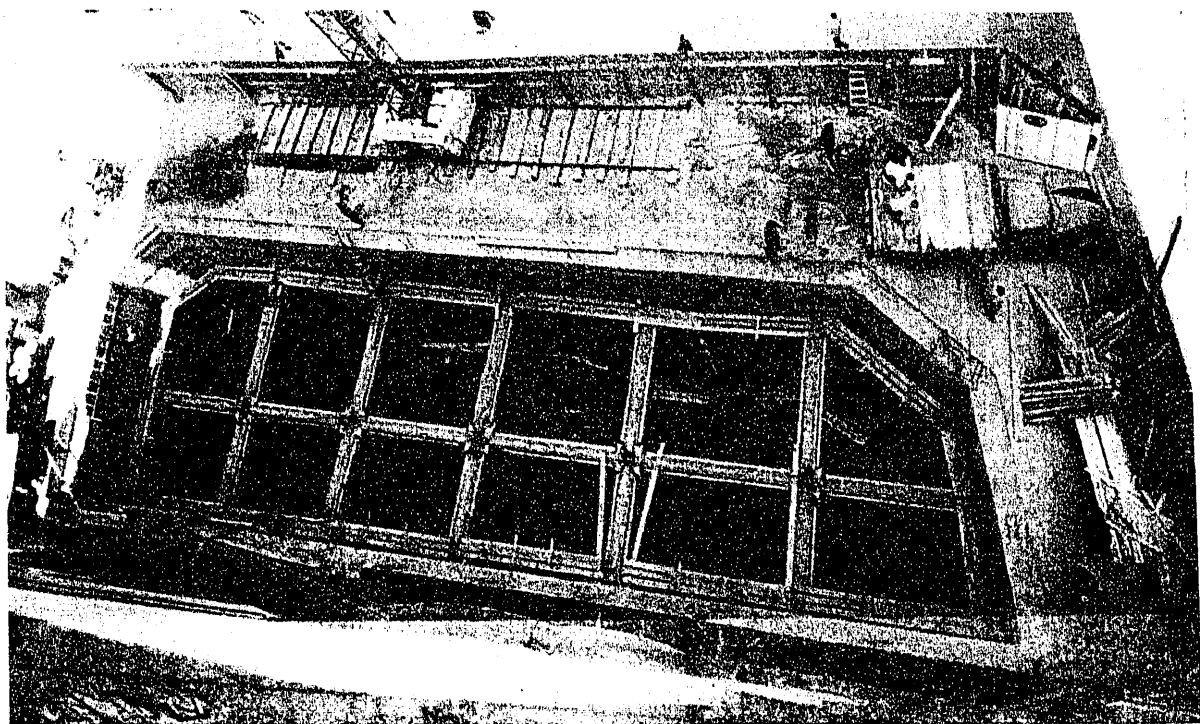


Fig. 16. — Pantalla para sótano, Banco Pastor, La Coruña

nos. A título de comparación damos valores relativos a otras fuentes de ruidos.

Ruido de aspirador .....	60 fonos.	
Ruido de calle (medio).	80-90	»
Ruido de compresor .....	90-105	»
Ruido de motor de avión.	120	»

El contrapunto a la pantalla, en cuanto a ruidos y vibraciones, lo constituyen las tablestacas.

La ventaja *c)* queda también ilustrada por la figura 4.<sup>a</sup> El fondo impermeable lo constituía la arcilla entre cotas — 7,00 y — 10,50 metros. En algunos puntos la pantalla se empotraba en las arenas y gravas subyacentes, pues servía de cimentación de los pilares periféricos del edificio y de las propias paredes del sótano.

El punto *d)* queda, asimismo, ilustrado por la figura 16.

Con respecto al punto *e)*, citemos el bien conocido caso del "Metro" de Milán, ejecutado por ICOS [12]. Durante la ejecución de las paredes desde la superficie, sólo se corta la mitad del tráfico. Este se corta totalmente sólo para una primera excavación, que permite hormigonar la bóveda del túnel, enlazada a las paredes. Inmediatamente después se rellena y rehace la calle. La excavación del túnel se hace en mina por tramos de 500 metros, dejando sin excavar los 1,50-2,00 metros inferiores, para mejor apoyo de las paredes. La solera se hace por "bataches" de 2,00 metros, dejando para posterior ejecución tramos de 3,00 metros intermedios.

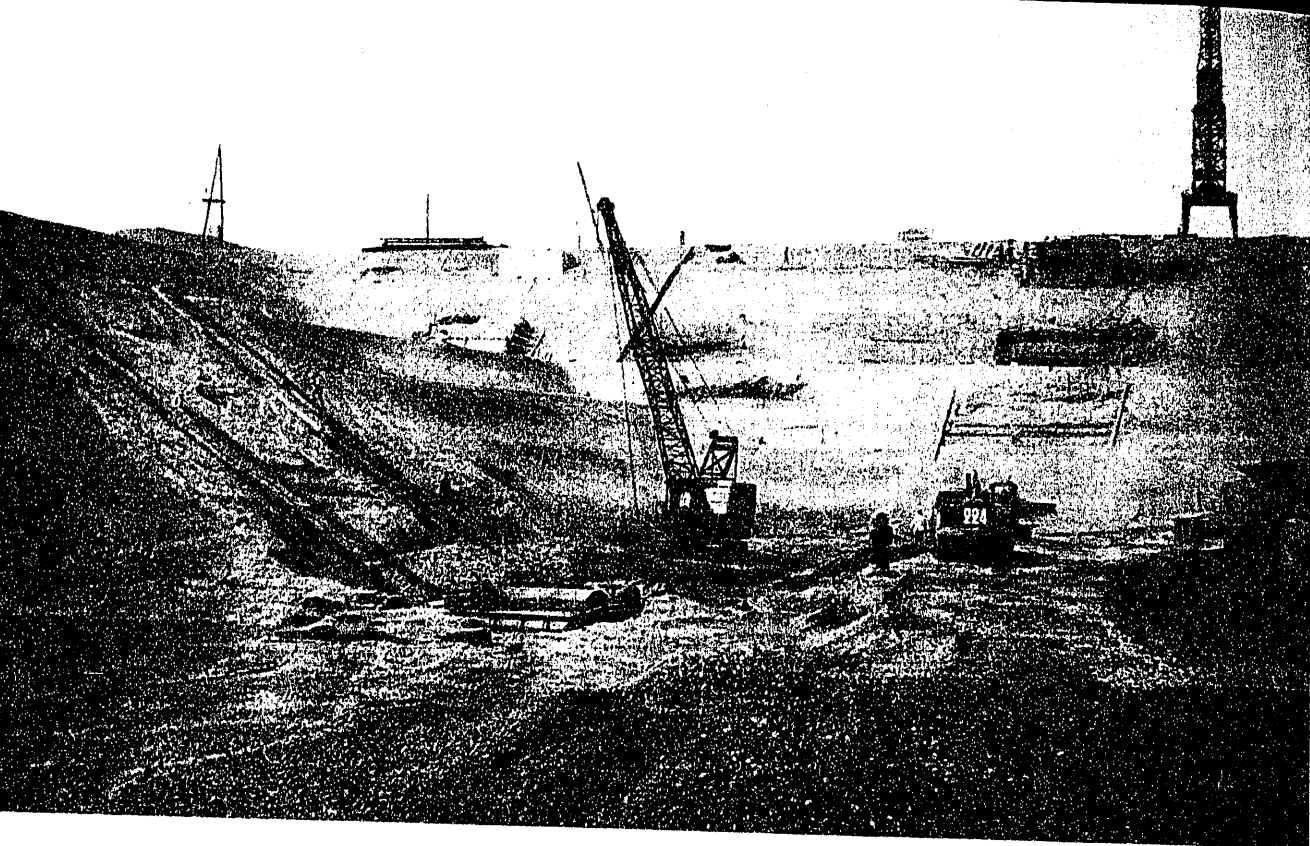


Fig. 17. — Excavaciones en Marckolsheim-Rhinau. (Doc Soletanche).

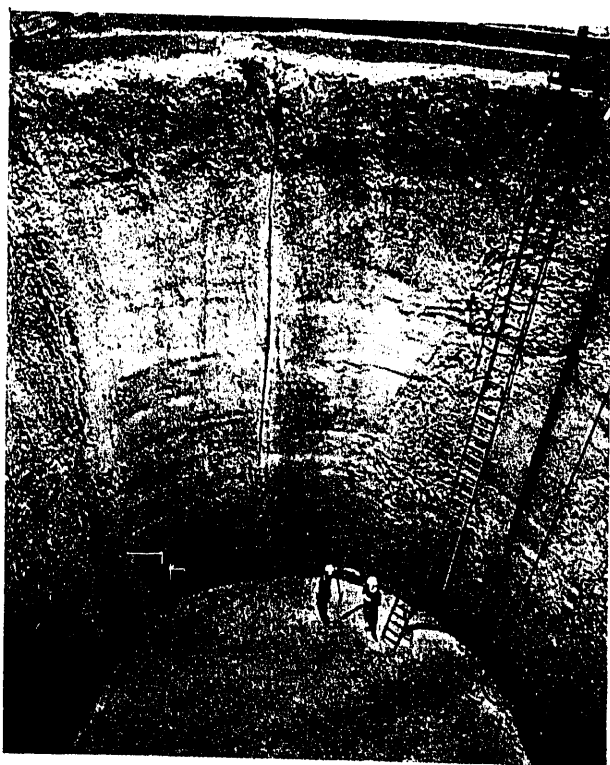


Fig. 18. — Pantalla circular para un puente, en Burdeos. (Doc. Soletanche).

Los puntos *g*), *h*), *i*) no merecen más aclaraciones después de los ejemplos dados.

Según profundidad, clase de terreno y localización de la capa freática, puede ser necesario apoyar la pantalla a uno o varios niveles. En tales casos, se hace recurso a anclajes "in situ" perforados a través de la propia pantalla o a apeos hacia el interior, combinando las posibilidades estructurales que cada caso particular presenta. En la figura 16, una vez hecha la viga continua de coronación, se excavó hasta la cota de primer sótano. Desde superficie se hizo ejecutar 5 pilotes "in situ"  $\phi$  630 mm., que sirvieron de pilares definitivos para el segundo sótano y permitieron la construcción, al nivel del primer sótano, de las vigas definitivas de la estructura, que provisionalmente servían de apeo para poder proceder a la terminación de las excavaciones. Las vigas en cuestión terminaban en cartelas horizontales para repartir las reacciones al empuje del terreno. Se previeron armaduras horizontales en la propia pantalla continua para crear así una "viga" que recogiese las flexiones inducidas en la pantalla por las vigas de apeo acarteladas. Las juntas entre paneles se dispusieron en los puntos de inflexión teóricos de di-

cha "viga" horizontal. El proyecto descrito respondió plenamente, pues no se notaron ni fisuras ni movimientos de juntas después de las excavaciones. A este respecto, mencionaremos que la adherencia del hormigón a los redondos de

de diámetro interior y excavadas en el interior hasta 12 metros de profundidad (fig. 19).

En las figuras 20 y 21 aparece otra aplicación muy interesante de las pantallas continuas: la prolongación, dentro del terreno, de los nú-

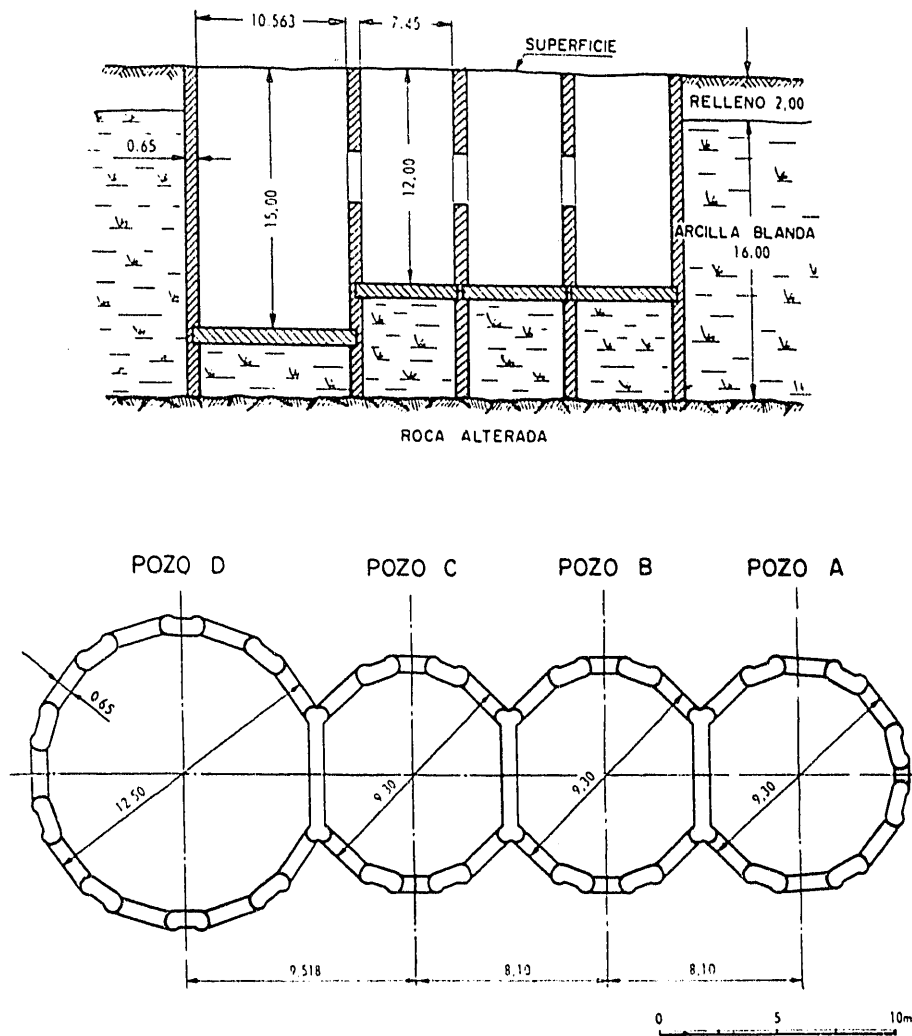


Fig. 10. -- Pantalla continua de hormigón. Procedimiento de excavación RODIO-MARCONI.

la "viga" horizontal fue suficiente, aun cuando indudablemente debió verse disminuida por la presencia del lodo.

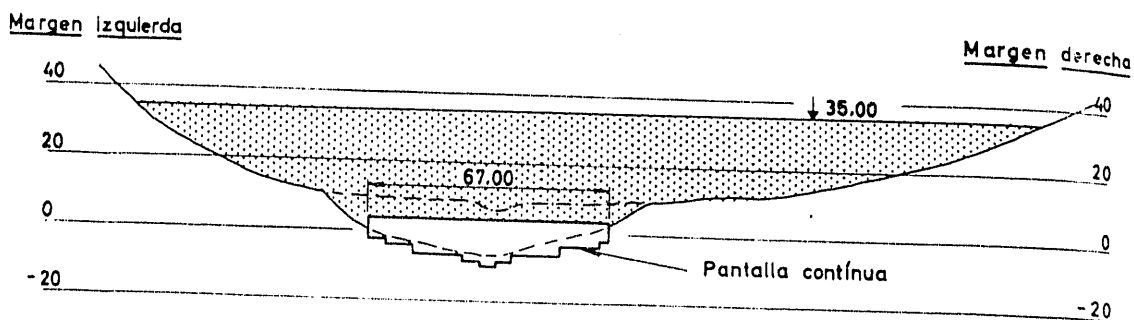
La figura 18 (excavación a 14 metros de profundidad para un puente en Burdeos) y figura 19 (pozos en Carepa, Sao Paulo) presentan dos interesantes obras de pantalla circulares y poligonales — casi circulares —. En estos casos, las armaduras horizontales no son necesarias y las verticales, según los casos, pueden llegar a ser evitadas. Sin armaduras se han hecho paredes circulares de 0,60 metros de espesor, 16 metros

de diámetro interior y excavadas en el interior hasta 12 metros de profundidad (fig. 19).

En estos casos suele recurrirse al empleo de un hormigón plástico, ya descrito anteriormente.

Existe en estos casos un efecto "cuchillo", que consiste en la tendencia a ser punzonado el núcleo de la presa por la pantalla de hormigón, que no sigue, en general, los asientos de aquél. Ello puede paliarse por la ejecución de una galería perimetral, enhebrada en la pantalla continua, o bien por la creación de un verdadero cuchillo metálico en la coronación de la pantalla.

## PERFIL LONGITUDINAL



## CORTE TRANSVERSAL

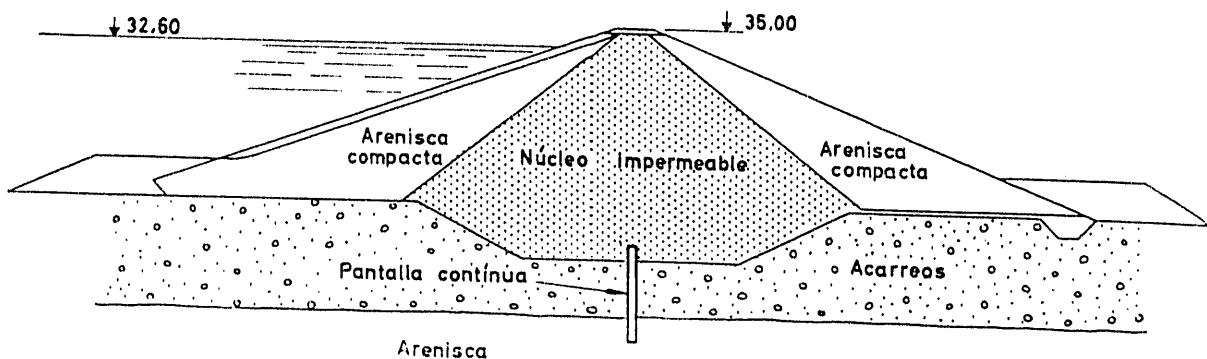


Fig. 20. — Pantalla continua de hormigón, cemento-arcilla. Presa El Celemin (Cádiz).

La primera solución ha sido la ejecutada en la presa de Vernago (Italia) (fig. 22). La segunda solución es una sugerencia aún no llevada a la práctica.

En presas de altura media — digamos 50 metros —, cuidando que la pantalla empotre suficientemente en el núcleo, el efecto "cuchillo"

no debe tener consecuencias graves. Si el núcleo se rompe localmente, las superficies de corte deben cerrarse en el tiempo, al irse deteniendo la progresión de los asientos.

No conocemos más caso real en que se haya constatado este tipo de accidente que el de la presa de tierra de Neversink, Delaware (U. S. A.)

## SECCION TIPO

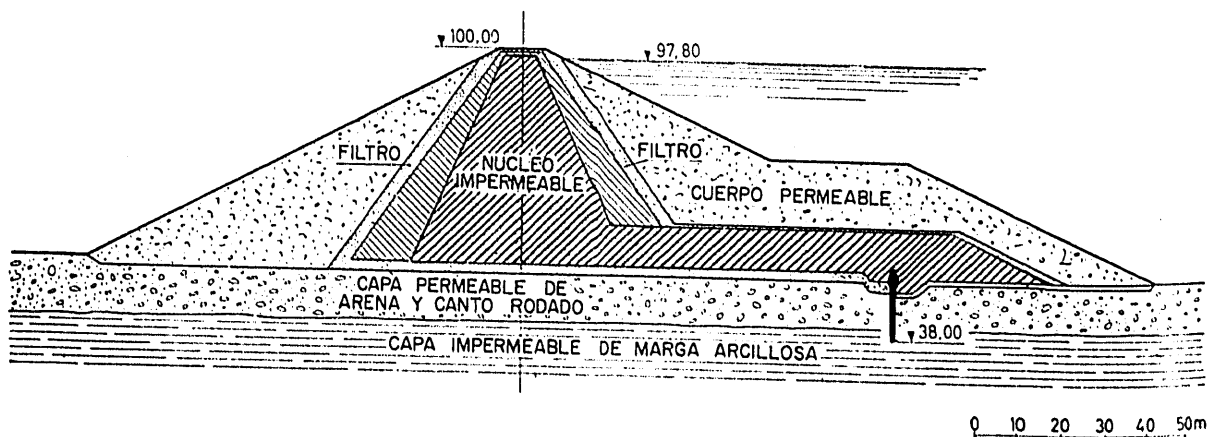


Fig. 21. — Dique de Pinios, Grecia.

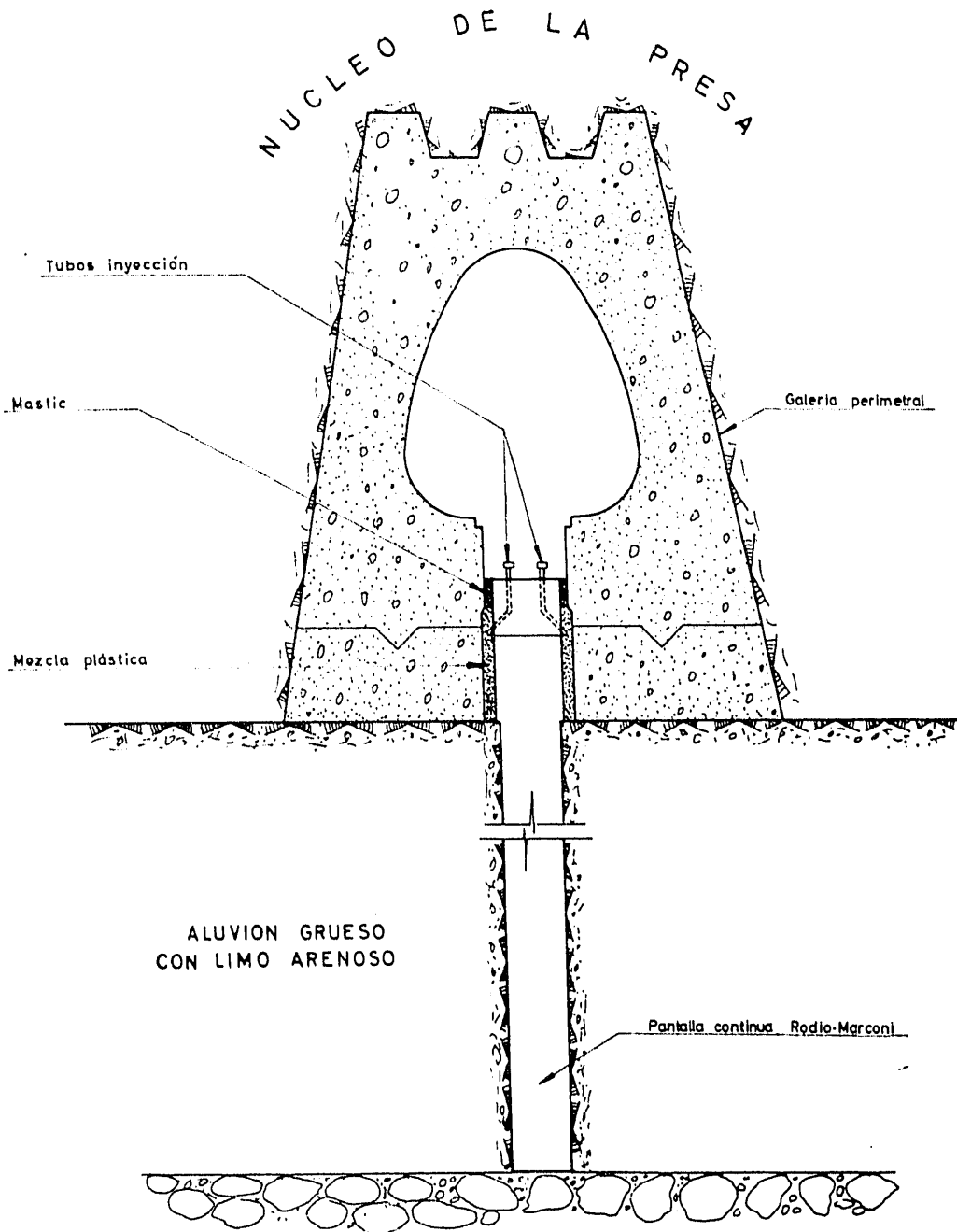


Fig. 22. — Galería perimetral dique Vernago, Italia.

de 104 metros de altura, donde se descubrió una zona permeable en el núcleo, atribuida a concentración de tensiones en la parte alta de la pantalla de hormigón, que continuaba el núcleo dentro del terreno.

Esta concentración de tensiones puede ir asociada a cierto alivio de tensiones en otras zonas, de donde la creación de fisuras, que, por otra parte, se corrigieron por inyección desde el exterior sin consecuencias extremas.

La galería perimetral, tipo presa Vernago, es solución que dificulta el apisonado del núcleo en las inmediaciones de la galería. Así se resuelve el efecto "cuchillo" procedente del asiento del cimiento; sin embargo, la consolidación del núcleo, si la presa es alta, puede cebar un fenómeno de esta especie, pero ya a una escala pequeña.

• • •

Para terminar, digamos que en los ejemplos citados se han descrito casos frecuentes, pero en realidad cada proyecto necesita un análisis específico.

Cuando hayan de ejecutarse rellenos provisionales para la instalación de los equipos de pantalla, deben preferirse los rellenos arenosos o bien deben ejecutarse los rellenos coherentes con buenas técnicas de compactación. De otra manera, hay que recurrir a más elaboradas técnicas de lodos de perforación — empleo de colmatadores —, pues la formación del "cake" se ve dificultada.

Un caso curioso de aplicación de los lodos bentoníticos ha sido hecha por el profesor Lorenz en Tempelhof (Berlín), donde una pantalla permanentemente rellena de lodo ha servido para aislar una imprenta de las vibraciones del ferrocarril metropolitano durante su construcción y posterior explotación. La profundidad de la pantalla debe ser, al menos, del orden de la longitud de la onda perturbadora y su implantación próxima al edificio a proteger. En este caso, la pantalla tenía 15 m. de profundidad y 35 centímetros de ancho. La amplitud de las vibraciones descendió de 5 mm. delante de la pantalla, a 1 mm. detrás de la misma.

Se tuvieron dificultades para evitar la contaminación del lodo por electrolitos extraños flocculantes, que pueden llegar a aumentar el espesor del "cake" al punto de crear puentes a través de la zanja y disminuir su eficacia aisladora [17].

Otras aplicaciones interesantes de los lodos de perforación, que se salen del marco del tema de las pantallas continuas, se refieren a la hincas de cajones [14], [15], [16], [17], [19], a la hincas de pilotes *in situ* apisonados [14], a la ejecución de sondeos de reconocimiento sin entubación, felizmente empleados por el GRUPO RODIO, desde que tal procedimiento fué puesto a punto en el estudio de las cimentaciones del puente de Maracaibo, y a la hincas de tuberías prefabricadas por debajo de terraplenes de carreteras y de vías de ferrocarril [15], sin necesidad de interrumpir el tráfico.

## VI. Pilotes de gran diámetro ejecutados con lodos bentoníticos.

Convencionalmente se consideran como pilotes de gran diámetro, aquéllos cuyo diámetro es superior a 1,00 m.

Para la ejecución de estos pilotes se imponen los métodos de circulación inversa, pues así es posible:

- Mantener un lodo bien depurado para evitar la sedimentación del terreno en suspensión sobre el fondo de la perforación. (Debe disponerse de una correcta instalación de regeneración del lodo — tamices vibrantes, ciclones —. La circulación del lodo, una vez terminada la perforación, permite extremar su depuración, de capital interés para el hormigonado posterior.)
- Evitar la descompresión del terreno, suspendiendo el trépano a 0,50-1,00 m. del fondo y manteniendo, según dicho, la circulación del lodo.
- Conseguir perforaciones cilíndricas, debido a la forma del trépano-campana, lo que corresponde a la forma habitual de los pilotes *in situ*, y facilita su hormigonado.
- Guiar el trépano, garantizando así la verticalidad y forma regular del pilote.

Cuanto para las pantallas se ha dicho, referente a las características del hormigón y la adherencia acero-hormigón, es válido para los pilotes de gran diámetro. Como hasta ahora no se emplean como elementos de tracción, no cabe hacer reserva al respecto. En caso muy particular de una tal aplicación, procedería una cierta cautela, orientada por los ensayos de tracción pura ya descritos.

Como todo pilote *in situ* perforado, la ejecución permite un conocimiento de los terrenos atravesados, complementario, naturalmente, de los estudios geotécnicos avanzados, que necesariamente han de preceder a todo proyecto consciente.

Las grandes luces impuestas por los modernos puentes y las cargas de construcciones urbanas e industriales, también siempre crecientes, han conducido a la necesidad de ejecutar pilotes con capacidades portantes ya en el orden de los 1 000 Tn., y ello, por cierto, en terrenos cada vez de peor resistencia.

Cuando se pasa a ejecutar pilotes de más de 60 cm. de diámetro, la perforación protegida por una tubería recuperable, es cada vez más penosa. Sin embargo, una buena técnica, en especial en el caso de terrenos arenosos, obliga a que la tubería de revestimiento siga inmediatamente al útil perforador.

Las fricciones sobre tales tuberías son grandes y se recurre a mantenerlas en continuo movimiento. Es el caso del movimiento "louvoyant" de los equipos BENOTO, alternativamente ascendente-descendente y rotativo en un sentido de giro y el opuesto. Naturalmente las tuberías, sometidas a importantes esfuerzos, ven su espesor aumentado (4 cm.), los equipos requieren potencias altas (180 CV.) y el roscado convencional entre tubos se ve sustituido por el bulonado. Los equipos se convierten en verdadera maquinaria pesada (32 Tn.) y, pese a ello, tienen su limitación en profundidad, función del terreno.

Ante tal panorama, la idea de perforar sin tubería es atrayente, y así se ha llegado al pilote perforado con lodos bentoníticos.

Que el "cake" es, en general, superabundante para mantener las paredes de la perforación, es obvio. Recordemos su mecanismo seguro, aunque mal conocido, en el soporte de zanjas, donde los efectos arco no pueden ayudar.

Naturalmente, en la ejecución de pilotes, que, en casos, como pieza única, deben soportar cargas enormes, es preciso un conocimiento profundo de todas las posibles incidencias, para evitarlas, o, por lo menos, detectarlas y obrar en consecuencia.

El hormigonado con tubo es ya una técnica antigua y superada, pero es delicada.

El proceso de rigidificación del hormigón tiene que ser convenientemente retardado y controlado en la obra. La ganancia en rigidez del hormigón durante su vertido es secuela de defectos, a veces graves:

- Armaduras sin recubrir.
- Cortes en el hormigón (si para forzar su expulsión se recurre al expediente erróneo de embeber poco el tubo de hormigonado).
- Segregación del hormigón (si se maniobra exageradamente el citado tubo en un afán de movilizar la masa de hormigón).
- Obtención de una zona central hueca, moldeada por el propio tubo de hormigonado.
- Ascensión del hormigón con distinta velocidad en la superficie y en centro del pilote, con posibles contorneos del hormigón homogéneo al hormigón segregado.
- Ascensión de las armaduras por excesiva fricción o empuje del hormigón sobre las mismas.

Las armaduras deben garantizar la fácil fluidez del hormigón a su través. No deben ejecutarse jaulas tupidas; puede ser preferible utilizar menor número de hierros de mayor sección:

Además es fundamental verter el hormigón en el seno de un lodo bien depurado y, tanto por evitar su floculación, como para mejorar la adherencia acero-hormigón, conviene disponer una interfase de lodo defloculado por un dispersante y limitar la viscosidad del lodo hacia los 40 seg. Marsh, a lo sumo.

Se comprende la importancia de disponer de una buena instalación de regeneración del lodo, y de extremar esta operación al final de la perforación.

Hemos ejecutado perforaciones en el eje de pilotes y practicado ensayos de hincas bajo la punta, comprobando no existe zona de terreno decomprimida, ni sedimento, pues si este último se ha controlado y limitado a unos pocos centímetros, la primera masa de hormigón lo incorpora. Así, al final del hormigonado, aparece el tapón empleado para cierre provisional del tubo de hormigonado, siendo necesario sanear los 30 cm. superiores del pilote.

En todo pilote *in situ* con tubería recuperable, hay una acomodación del hormigón al hueco dejado por el espesor del tubo, en general, de 4 cm., en los pilotes de gran diámetro. Esta segunda acomodación no tiene lugar en los pilotes ejecutados con "agua densa", lo que es ventajoso.

La perforación con lodos deja el terreno en un estado de empuje activo, que es casi el empuje al reposo, circunstancia favorable al rozamiento lateral. En las perforaciones con tubería es inevitable una mayor distensión del terreno.

Y llegamos al punto de más fácil crítica, al procedimiento que describimos: la importancia del "cake" en la fricción lateral.

Ya en 1942 SOLETANCHE hizo pilotes de  $\phi$  1,00 m., en Bône (Argelia), con circulación directa de lodos y camisa de hormigón armado perdida, cuyo interior llenaban de hormigón en ambiente de agua. Se trataba de pilotes-columna, pioneros. Después hicieron, con el auxilio de lodos, las cimentaciones de la central térmica de Vitry, con ejecución previa de un tranquilizador ensayo de carga.

En pilotes en terrenos incoherentes, en arenas, entendemos no cabe plantearse el problema de una posible lubricación por el "cake".

El mecanismo de rotura del suelo puede esquematizarse según la figura 23.

La resistencia del pilote deriva fundamentalmente de la punta y parte baja del fuste.

Las superficies de corte, cuyo desarrollo depende del ángulo de rozamiento interno, tienen su sede en zonas que no pueden ser afectadas, "contaminadas" por la bentonita, luego la capacidad portante del pilote no puede ser disminuida por la presencia del "cake", aun cuando ésta se admitiera plenamente.

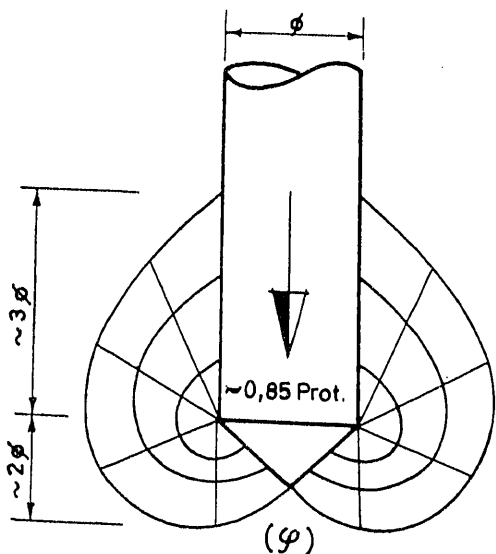


Fig. 23. — Mecanismo de rotura de la punta de un pilote.

El "cake", en una perforación correctamente ejecutada, tiene espesor de milímetros y es parcialmente destruido por el hormigón ascendente. Además, es también, en parte, rigidificado por los iones calcio del cemento.

Además, el contacto terreno-pilote no debe imaginarse como geoméricamente perfecto a lo largo de las generatrices de un cilindro. Existen irregularidades, particularmente en terrenos incoherentes, sobre todo, cuando son de granulometría gruesa.

Pretender que el "cake" lubrifiqué la superficie del pilote, al extremo de anular la fricción lateral, es injustificadamente pesimista, aun sobre una base teórica.

Pero este es tema que merece justificación práctica. Remitimos, al efecto, a ensayos comparativos entre pilotes "al agua densa" y convencio-

nales con tubería recuperable, ejecutados en la central térmica de Montereau [7].

Se trataba de dos pilotes  $\phi$  560 mm., con su punta en arenas, uno ejecutado con "agua densa", y otro, con tubería recuperable. Los resultados indicados en la figura 24, muestran cómo los asientos de un pilote perforado con lo-

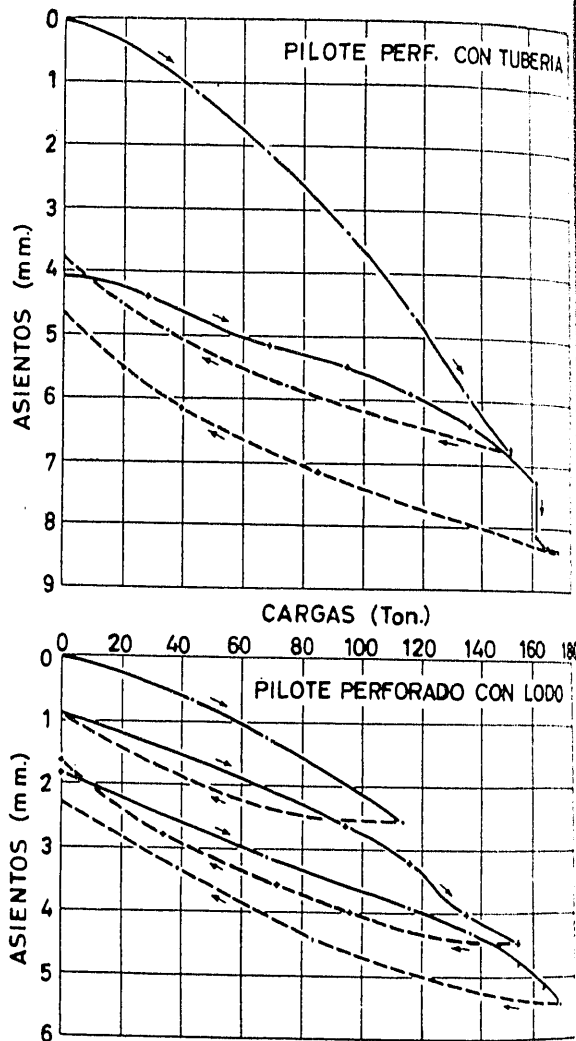


Fig. 24. — Prueba de carga de un pilote  $\phi$  560 mm. (Montereau; Doc. Soletanche).

dos pueden resultar menores que los de un pilote convencional, para estados de carga alejados de la rotura, en que la fricción lateral es importante. Se inyectaron posteriormente las puntas de los pilotes. La inyección fué eficaz, es decir, hizo disminuir los asientos, sólo en el caso del pilote ejecutado con tubería provisional, prueba de que el procedimiento por agua densa no había descomprimido la punta.

El GRUPO RODIO ha ejecutado pruebas de carga sobre pilotes de gran diámetro en las obras

Fig. 25. — Autopista Venecia-Trieste.  
 Puente sobre el río Tagliamento.

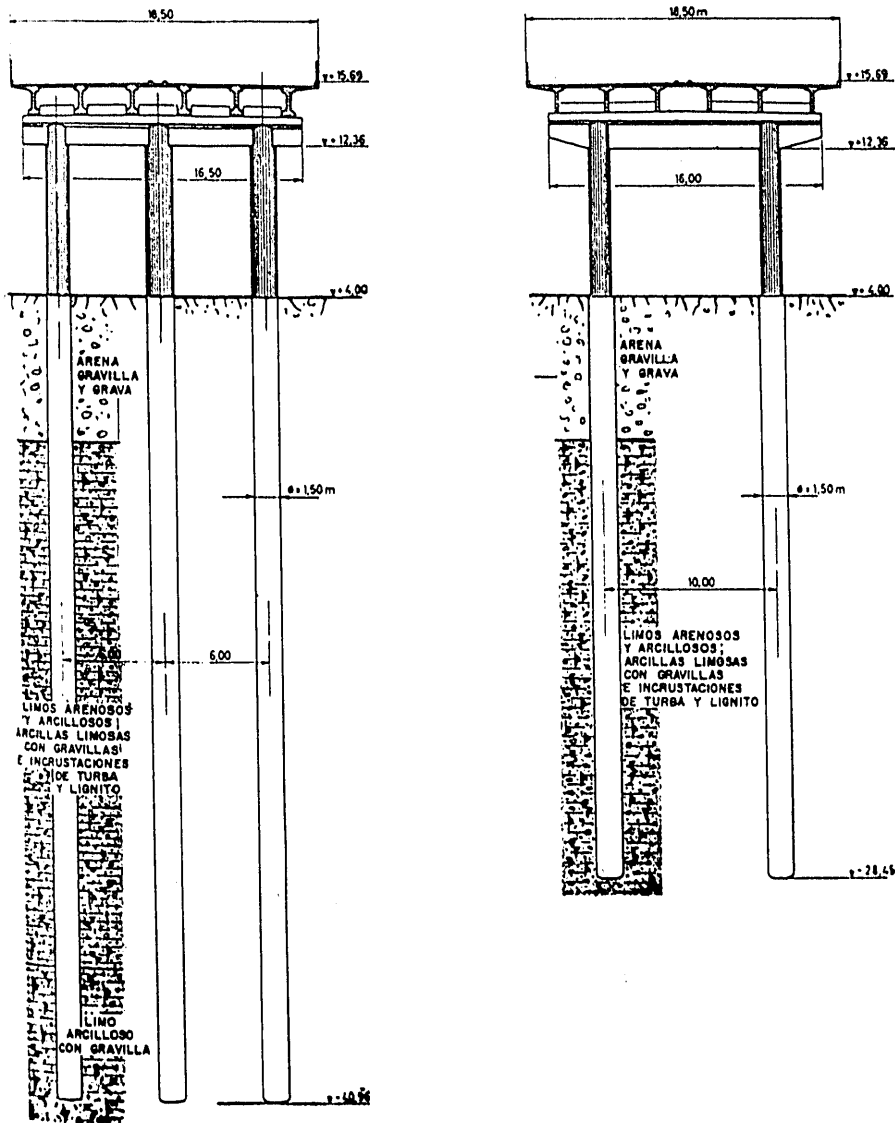
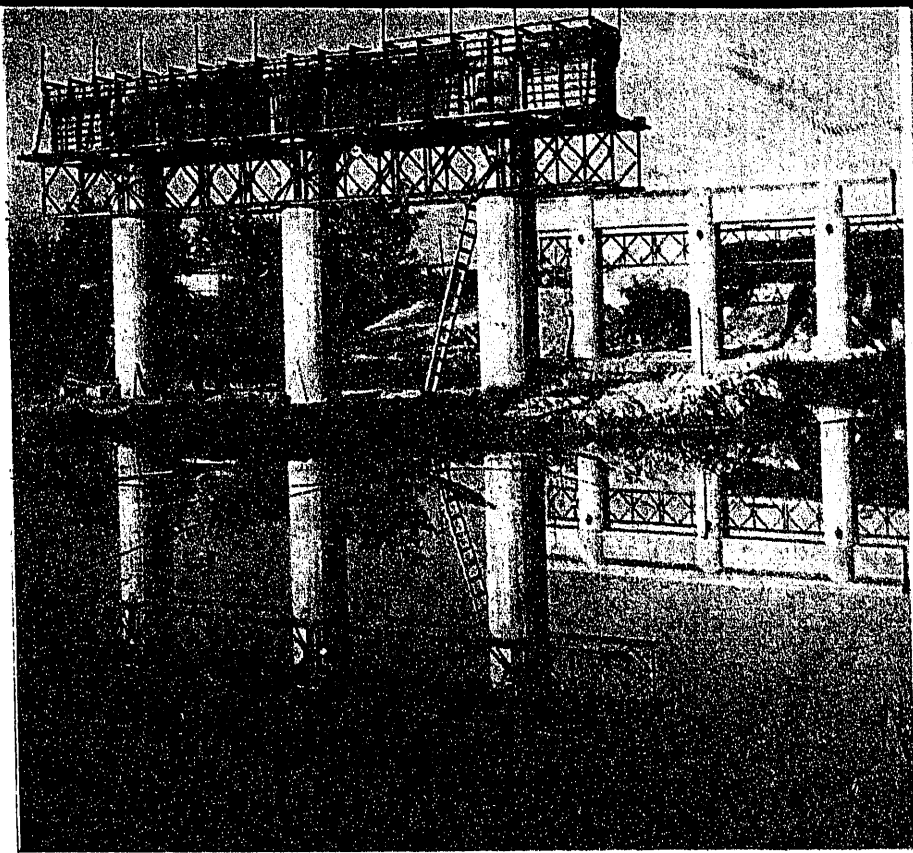


Fig. 26. — Puente sobre el río  
 Tagliamento.

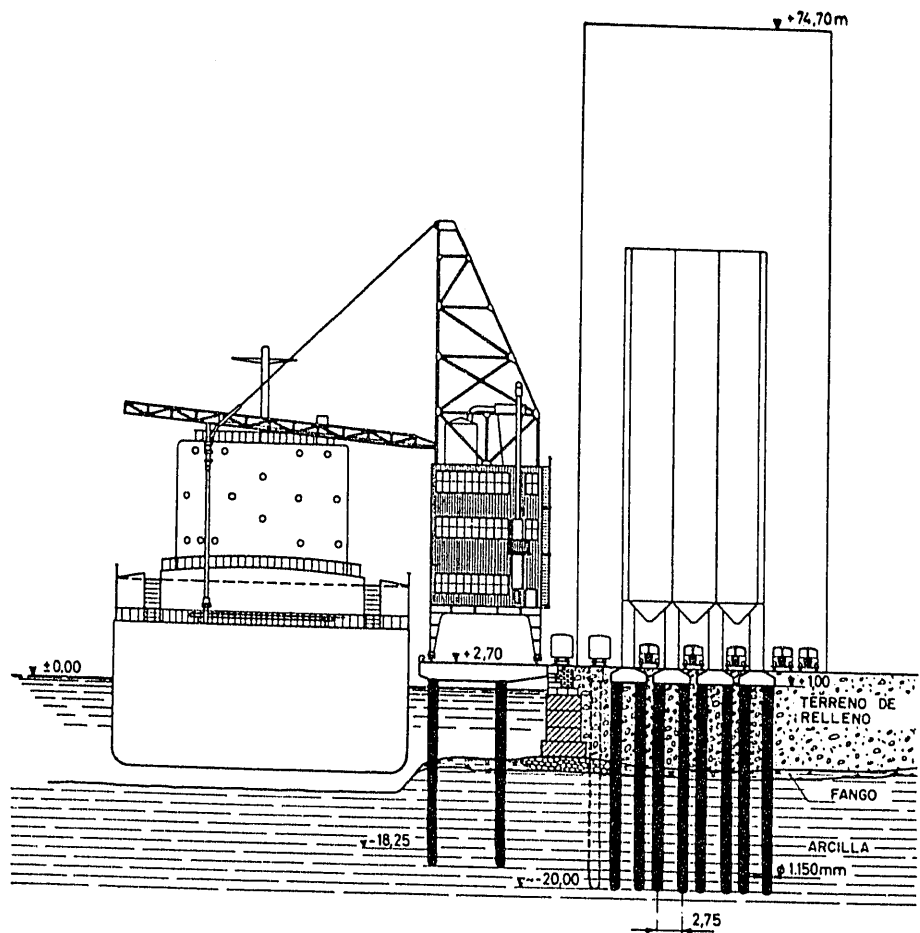


Fig. 27. — Pilotes de cimentación  $\phi$  1.150 mm. Procedimiento de excavación RODIO-MARCONI.

de autopista Venecia-Trieste y silo de Génova, que aparecen en las figuras 25, 26 y 27. Las pruebas dieron resultados plenamente satisfactorios. Adjuntamos copia del gráfico de la prueba de carga realizada en la autopista Venecia-Trieste, puente sobre el río Tagliamento (figura 28). El corte sucinto del terreno está reflejado en la figura 26. Se trata de un verdadero pilote flotante, donde no cabría esperar resultados positivos de haber existido "cake" lubricante.

Las características principales del suelo son:

Prof. m.	$W_n$ %	$W_L$ %	I. P. %	$q_u$ Kg./cm. <sup>2</sup>	$\delta$ %
14,70	22,2	38,9	20,0	1,10	8,9
25,20	24,8	43,1	18,3	3,41	8,9
29,40	—	36,6	16,9	—	—
38,50	—	44,3	18,1	—	—
39,20	23,3	41,6	17,7	0,70	5,0
41,70	32,4	41,1	17,2	—	—
44,20	28,3	47,2	24,8	0,40	7,0

La notación empleada es:

$W_n$  = contenido natural de agua.

$W_L$  = límite líquido.

I.P. = índice de plasticidad.

$q_u$  = resistencia a compresión simple.

$\delta$  = deformación en rotura.

Ensayos de extracción de paneles arrojaron un valor medio de fricción lateral de 10 Tn./m. en las arenas en que se ejecutó el metro de Milán [12].

La perforación con lodos bentoníticos en terrenos arenosos, permite no descomprimir el terreno de la punta y evita la sedimentación en el fondo de la perforación, con lo que se consigue la ejecución segura y correcta de la punta del pilote, de donde deriva fundamentalmente su resistencia.

En terrenos coherentes, el rozamiento lateral puede cobrar mayor importancia que la punta, para la que también valen los anteriores razonamientos.

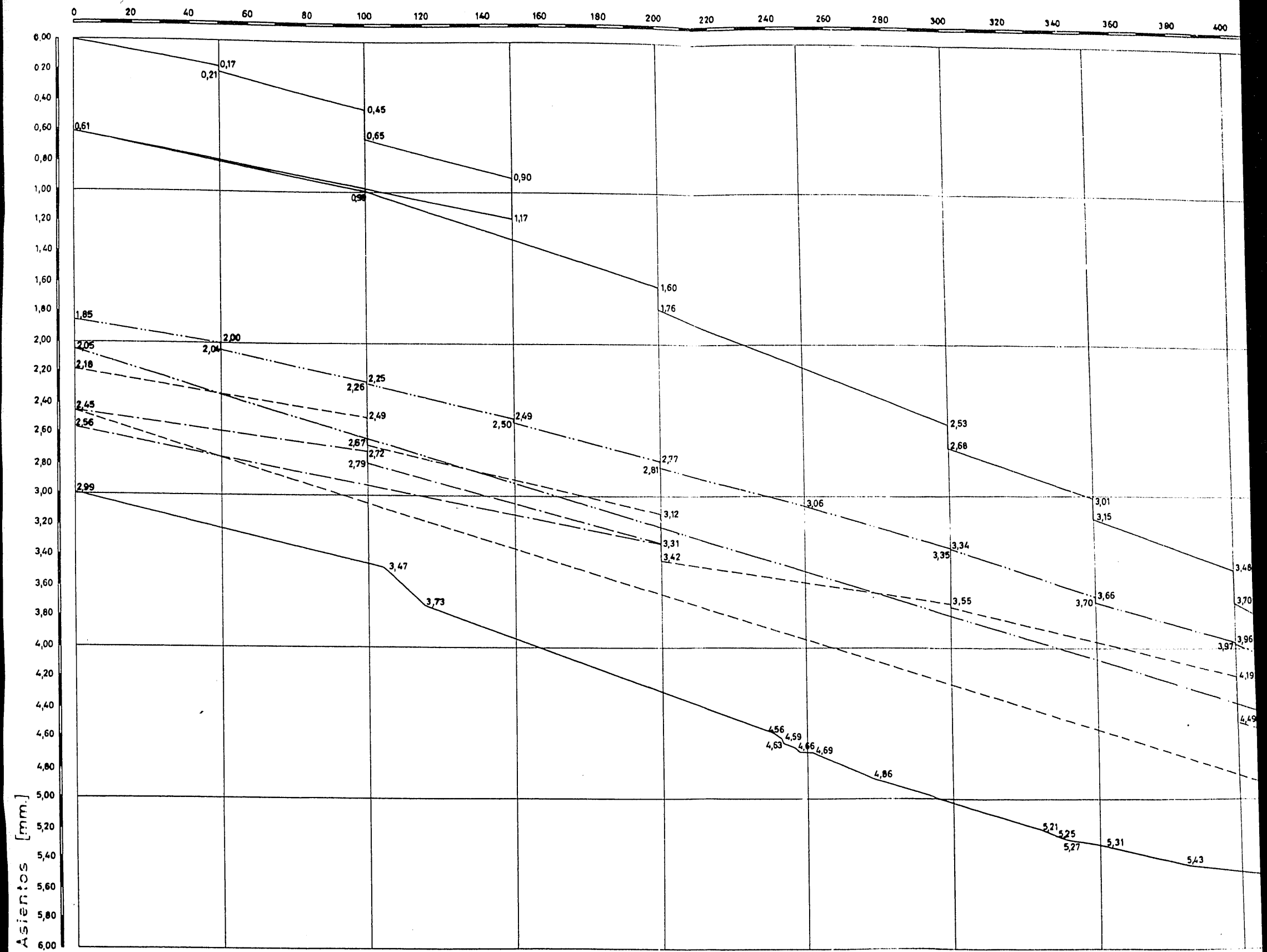
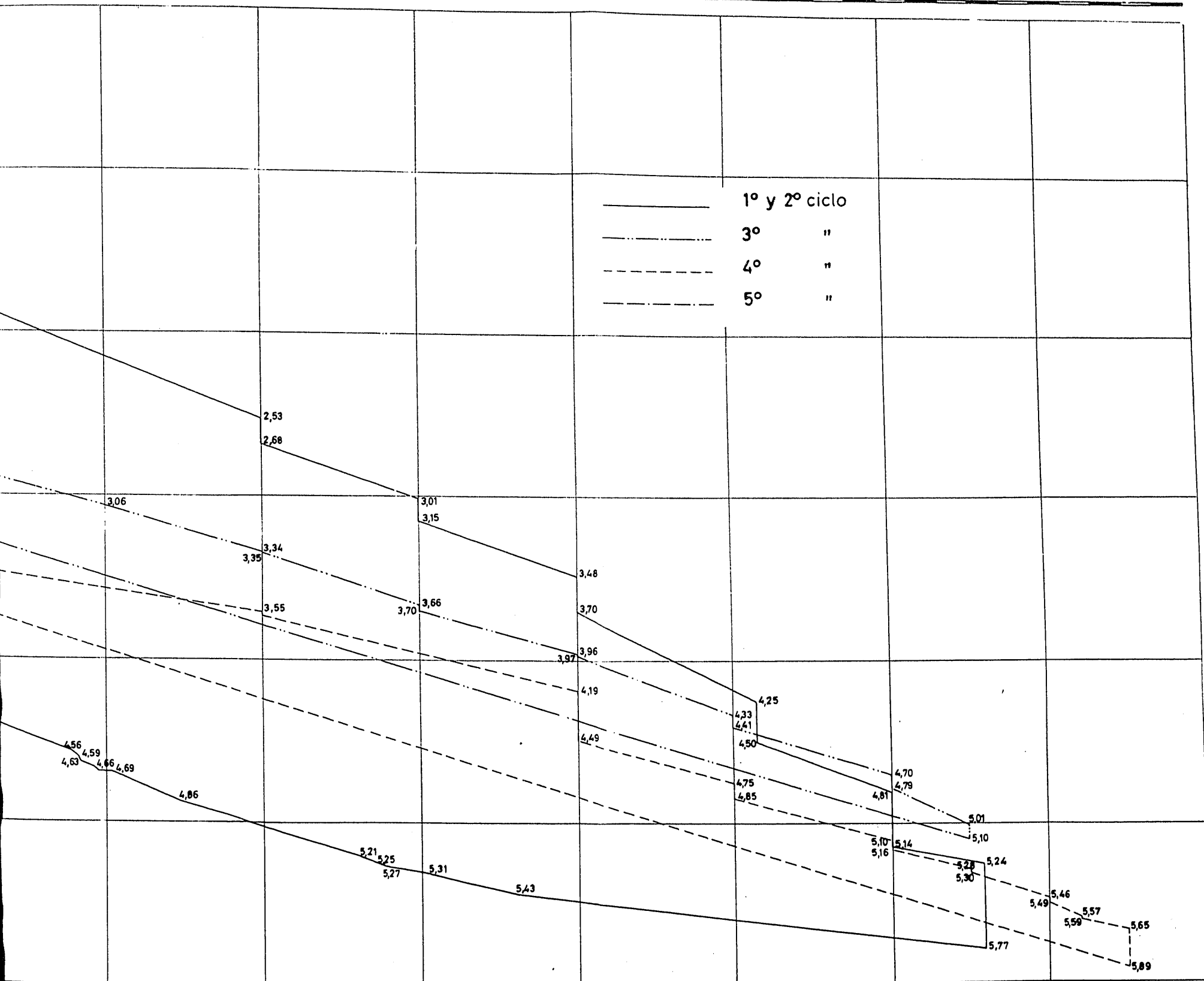


Fig. 28.—Obra puente del río Tagliamento. Ensayo pilote núm. 14  $\phi$  1.500 mm.; longitud 42,25 m. (Revestido con chapa hasta cota

220 240 260 280 300 320 340 360 380 400 420 440 460 480 500 520 540 560 580 600 Cargas [t]



mento. Ensayo pilote núm. 14  $\phi$  1.500 mm.; longitud 42,25 m. (Revestido con chapa hasta cota - 0,00 m.).

Las pruebas de carga demuestran que el "cake" no supone una lubricación del pilote y su efecto sobre el rozamiento lateral, si existe, lo es en escala sin importancia práctica.

La ejecución de pruebas de carga sobre pilotes de gran diámetro, exige dispositivos muy caros, así como la disposición de lastres enormes. Los esfuerzos en este sentido deben atraer la atención y entusiasmo de todos los ingenieros, a fin de llegar a una mejor formulación teórica del mecanismo de rotura del suelo punzonado por los pilotes de gran diámetro, así como de su comportamiento bajo las cargas de servicio [6].

Entre tanto, un minucioso estudio geotécnico del suelo y la aplicación del método empírico de Kerisel [11], en terrenos arenosos, y del método de Skempton-Meyerhof [24], en terrenos coherentes, permitirán la prudente estimación de la capacidad portante de los pilotes de gran diámetro.

En arcillas, el Civil Engineering Research Council (Inglaterra), tiene en curso un prometedor estudio, basado en pruebas de carga a escala real.

*(Continuará.)*