

APLICACION DE FUNDACIONES ESPECIALES PARA INTRAESTRUCTURA DE PUENTES

por

Ing. Civil Horacio E. Salerno

0. INTRODUCCION

Las fundaciones especiales comprenden un conjunto de técnicas que se han ido difundiendo en la construcción desde principios de este siglo, y que en la actualidad han alcanzado un grado de desarrollo notable. Experimentadas inicialmente en problemas de alta complejidad, su aplicación se ha difundido hasta resultar alternativas válidas de los sistemas tradicionales. Los puentes son en este sentido un buen ejemplo: bautismo de fuego de muchas de las fundaciones especiales, hoy su uso se ha generalizado en las infraestructuras de los mismos.

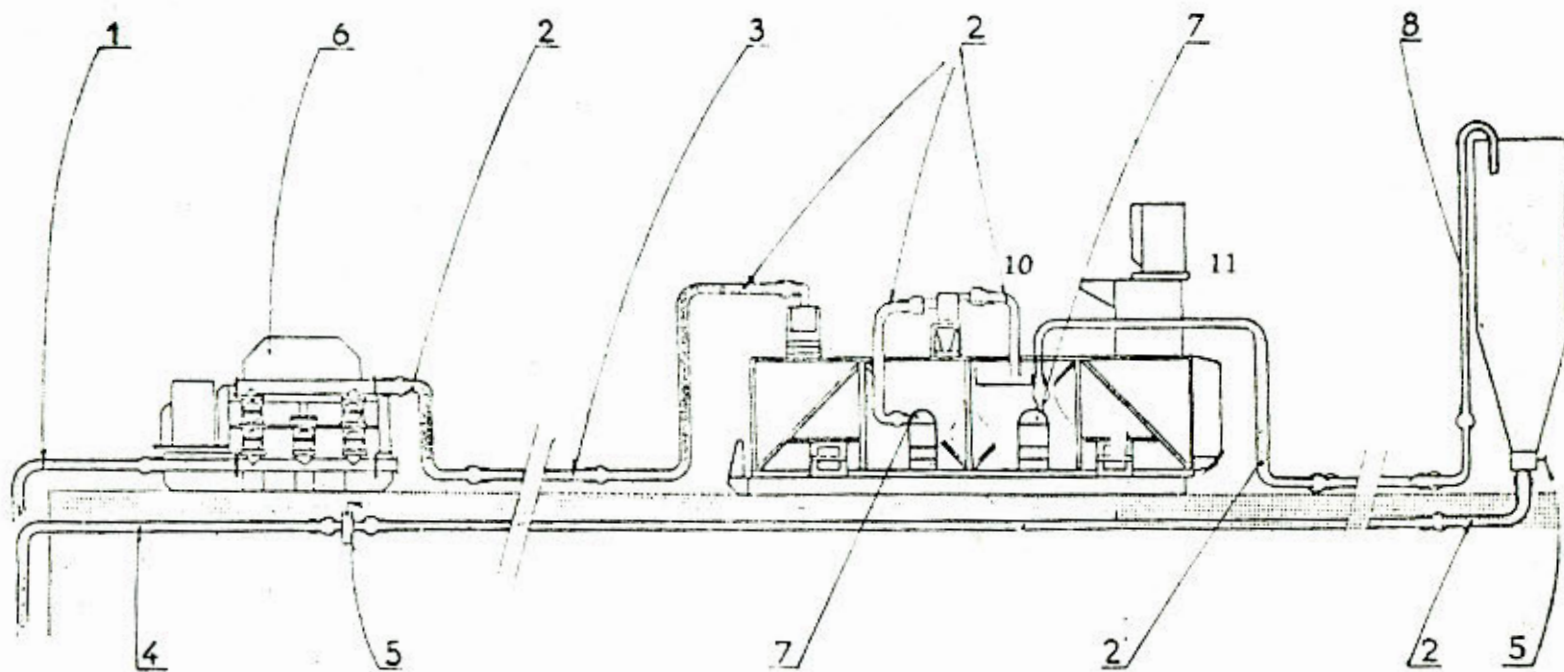
Si bien el tema puede llegar a hacerse exageradamente extenso, en esta oportunidad se intentan mostrar algunos aspectos vinculados a posibilidades reales en nuestro medio, particularmente en lo referente a pilotes de gran diámetro, muros colados y anclajes inyectados.

1. PILOTES DE GRAN DIAMETRO

No se podría decir que constituyen una novedad en cuanto a su aplicación en puentes del país. Desde la construcción de Chaco-Corrientes se han difundido notablemente en nuestro medio, desplazando a los pilotes hincados y presentándose como alternativa de fundaciones directas.

La clave de su buena ejecución está en el sistema de contención de las paredes de la perforación. La utilización de lodos bentoníticos o camisa metálica queda condicionada por: el tipo de suelo, la presencia de agua, el equipamiento del constructor. Las perforaciones con lodos bentoníticos son simples y rápidas, pero presentan ciertas complejidades que merecen comentarse.

Estos lodos son emulsiones de bentonita, una arcilla coloidal constituida fundamentalmente por silicato de aluminio, en agua. El tamaño de las partículas puede ser tan pequeño como 10 Å (millonésima de mm), resultando una superficie desarrollada de 80 a 150 m²



PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS BENTONITICOS

1. Tubería de succión 2. Tuberías de transferencia entre equipos 4. Tubería de reenvío a excavación
 5. Válvulas (en general tipo mariposa) 3. Válvula clapet (para evitar el retorno del fluido a bomba)
 6. Bomba de aspiración de la perforación (en este caso de membrana) 7. Bombas sumergibles
 8. Silo de lodo bentonítico 10. Desarenador (reciclado del lodo) 11. Mezclador.

para 1 gr del producto (según su estado de hidratación). Sus propiedades esenciales son: de absorción, ligantes, reológicas (tixotropia y viscosidad) y colmatantes (cake). La capacidad que tienen las soluciones de bentonita en agua para contener a los suelos de las paredes de una perforación resultan de la combinación de estas propiedades que se traducen en efectos de arco en los suelos, diferencias relativas de densidades y reacciones físico-químicas.

Un lodo bentonítico utilizado en la ejecución de una fundación debe:

- a) mantener la perforación, ejerciendo una presión contra las paredes,
- b) permanecer en la perforación sin escurrir dentro del suelo,
- c) mantener los detritus de la excavación en suspensión.

Además debe permitir:

- d) su desplazamiento por el hormigón durante el colado de éste, sin afectar la adherencia con las armaduras,
- e) su tratamiento mediante tamizado o con ciclones, para remover los detritus, permitiendo así su reutilización,
- f) un fácil bombeo

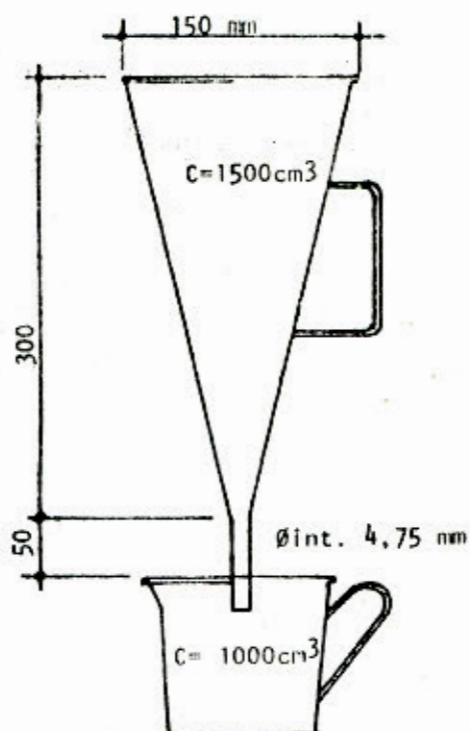
Aquí se presenta la primera dificultad, mientras por un lado satisfacer las condiciones a, b y c requiere de lodos densos, para las d, e y f los lodos deben ser muy fluidos. El conflicto se supera mediante el uso de bentonitas probadas, su adecuada dosificación, su control y tratamiento en obra.

No todas las bentonitas son iguales; aparte de las calidades conocidas localmente como "metalúrgica" y "petrolera", sus propiedades difieren notablemente según el origen. Por ese motivo las empresas encargadas del pilotaje deberían disponer de series de ensayos de las diferentes bentonitas. Además se pueden presentar circunstancias propias en cada obra (por ejemplo características del agua de mezclado), que obliguen a realizar estudios específicos.

Tampoco las dosificaciones son constantes. Para poder alcanzar los mismos resultados con bentonitas diferentes, en cada caso las cantidades de producto necesarias para obtener la misma cantidad final de lodo variarán. Además se pueden agregar aditivos para mejorar algunas de sus propiedades. Por ejemplo para asegurar una mayor reutilización del lodo se puede emplear "Carboximetilcelulosa"; en este caso se realiza un programa de ensayos en laboratorio que comprende: sobre muestras de bentonita disuelta en agua con y sin el agregado del cemento que se utilizará en obra, variando la cantidad de aditivo, determinando en cada caso: viscosidad Marsh (0 y 24 hs.), decantación (2 y 24 hs.), filtrado a 7 bar durante 30' (0 y 24 hs.) y cake (0 y 24 hs.).

En obra se prepara el lodo según una dosificación preestablecida (que puede variar entre 35 y 70 kg/m³). Se utilizan mezcladores, que en algunos casos incluyen dispositivos desfloculantes, con los equipos mecánicos el tiempo empleado para cada m³ es de 3 a 5

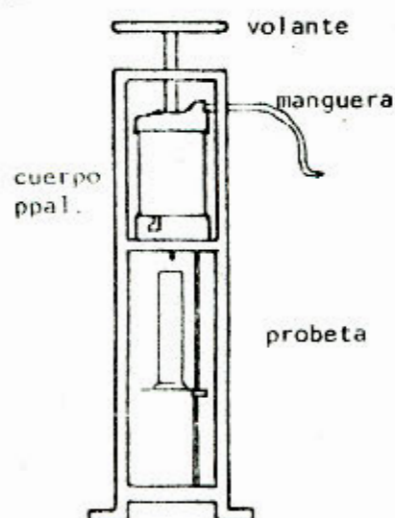
VISCOSIMETRO "MARSH"



Se mide el tiempo que tarda en llenarse el recipiente inferior

Intervalo de valores típicos: 30 a 100 seg.

FILTRO-PRENSA "BAROID"

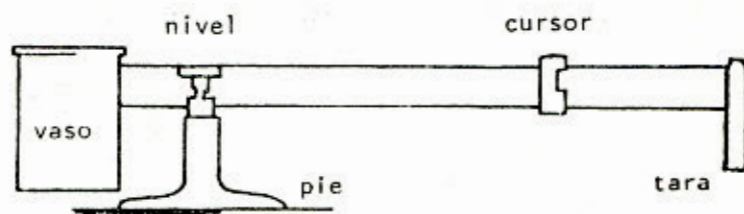


Se llena el cuerpo principal con lodo (600 cm³), en la base se coloca: junta de goma, papel filtro, tamiz. Se dan 7 Kg/cm² de presión durante 30'. Se mide el volumen de agua libre recogido en la probeta.

Intervalo de valores típicos: 12 a 15 cm³

Se mide el espesor del Cake: 0,5 a 1,5 mm. (dep. s/papel filtro)

BALANZA DE LODOS "BAROID"



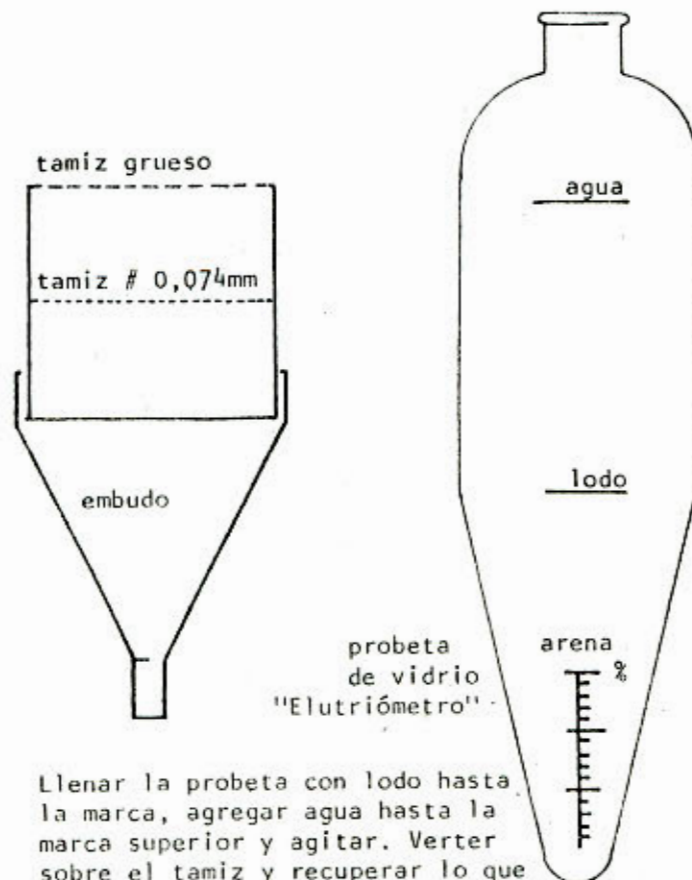
Se llena el vaso a ras, y se equilibra el brazo horizontal, leyéndose directamente con el cursor móvil.

Intervalo de valores típicos de densidad: 1,05 a 1,10

pH DEL LODO

Determinación con papel pHímetro.
Intervalo de valores típicos: 7 a 12

TENOR DE ARENA



Llenar la probeta con lodo hasta la marca, agregar agua hasta la marca superior y agitar. Verter sobre el tamiz y recuperar lo que pasó. determinar el % de arena en la probeta.

Intervalo de valores típicos: 0,2 a 0,4 %

minutos. A medida que se va perforando se va ajustando la cantidad de bentonita que se agrega en función de la naturaleza del suelo encontrado. Se realizan controles regulares que incluyen: densidad, viscosidad (Marsh), tenor de arena, filtrado, espesor del cake y pH.

El lodo cubre un ciclo en la obra que comprende: fabricación, almacenamiento (curado), utilización en la perforación, reemplazo previo al hormigonado, reciclado, reutilización, evacuación. Los movimientos del fluido se realizan ya sea por gravedad, o con bombas (de membrana, rotativas, o de pozo). Como se trata de construcciones que por quedar enterradas no permiten observar eventuales defectos, su ejecución debe ser cuidadosa. Una parte importante de los inconvenientes se suelen deber, directa o indirectamente, a las operaciones con los lodos. De ahí su importancia. Dos son los inconvenientes que más fácilmente pueden presentarse: los derrumbes y los bolsones de bentonita contenidos dentro del hormigón del pilote. Los primeros se deben vincular a lodos mal dosificados o a no haber tenido en cuenta las características del suelo o al menos de algunos de sus mantos. Los segundos son atribuibles a lodos muy cargados, generalmente donde no se ha recirculado antes del hormigonado.

2. MUROS COLADOS

El desarrollo de los muros colados o pantallas enterradas pudo tener lugar a partir del aprovechamiento de los beneficios de la utilización de lodos bentoníticos. Básicamente se trata de abrir una trinchera (el ancho depende del equipamiento del contratista; por ejemplo puede ser 40, 50, 60, 80, 100, 120 y 150 cm), hasta una profundidad que puede alcanzar los 50 m. Las herramientas utilizadas son cucharas de sección rectangular en planta, ya sea de accionamiento mecánico (a cable) o hidráulico. Permiten realizar formas con mayor momento de inercia, y esa es una de las razones por la que se las aplica en estribos de puentes. Otra posibilidad de aplicación es la ejecución de las paredes de cajones con este tipo de pantallas (como para la fundación de uno de los macizos de anclaje del puente colgante de Burdeos; 2 de $\phi=11,1$ m, $h=22$ m y 3 de $\phi=11,1$ m, $h=37$ m).

Un ejemplo interesante es el del puente sobre la autopista A-86 y vías de la SNCF en el Boulevard D'Estrasbourg (Nogent-Le Perreux; Dpt. Val de Marne; Francia). Se trata de un puente carretero que salva una autopista y 4 vías electrificadas; vano central de 29,816 m y dos luces laterales de 15,51 m c/u. Forma un ángulo de $\approx 61^\circ$ con las vías y tiene una pendiente longitudinal de 0,03854%. Dado que se trata de un paso de tránsito intenso, se realizó la obra por mitades (octubre-noviembre 79 y enero-febrero 81), habilitando medio tablero por vez.

La constructora presentó como variante al proyecto oficial una fundación del estribo mediante muro colado con forma de "tablestacado". Se trató de la segunda aplicación de este tipo en el mundo.

CUCHARA A CABLE
PARA EXCAVACION DE MUROS COLADOS

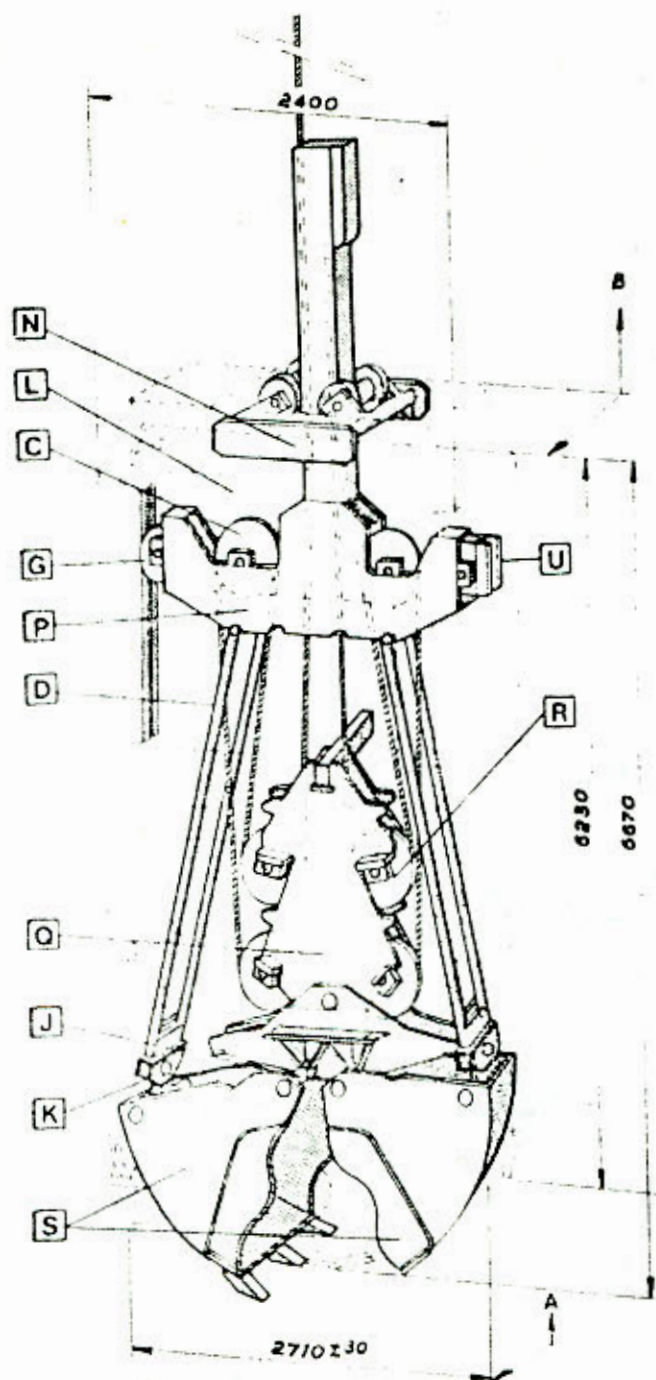
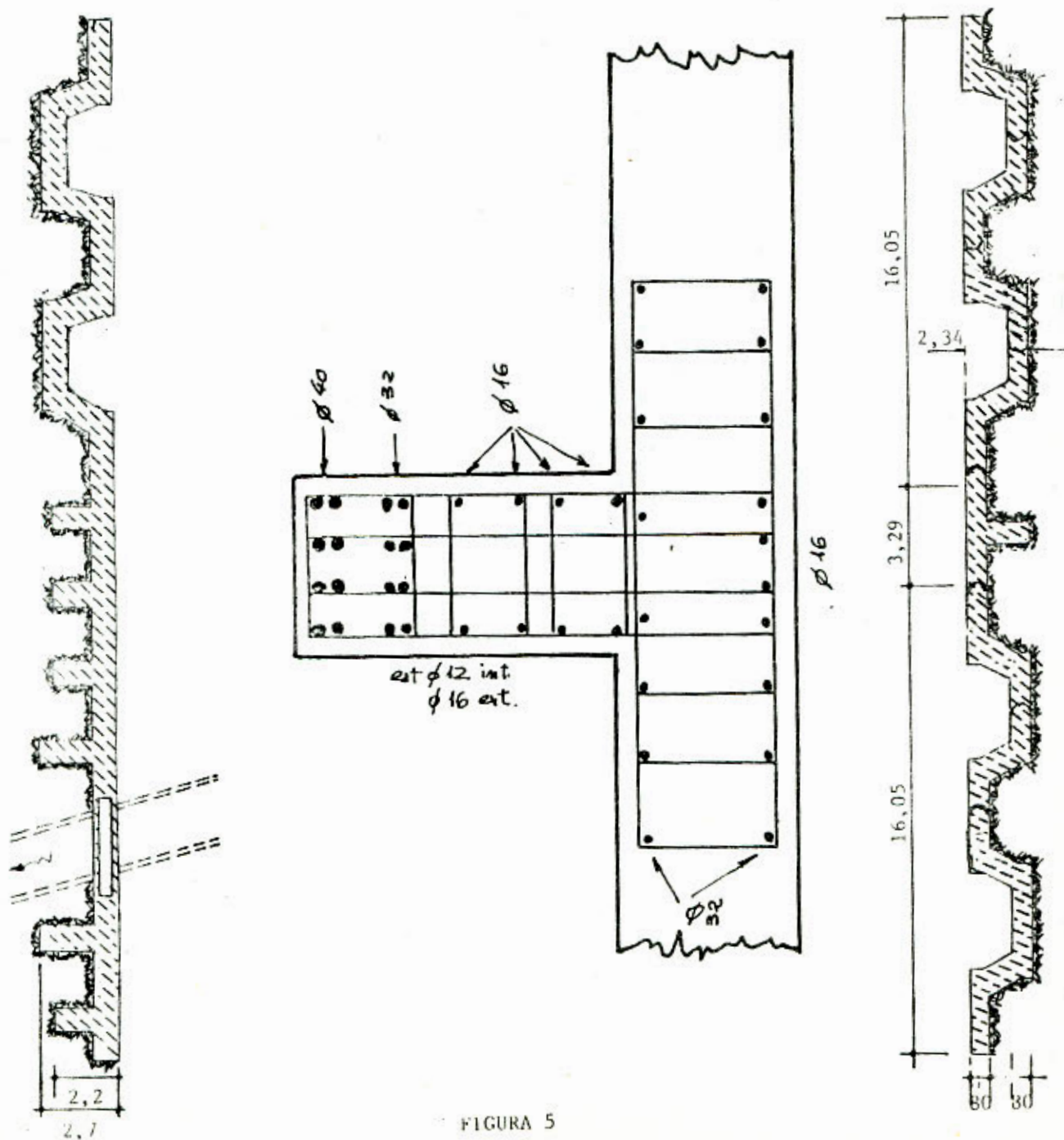
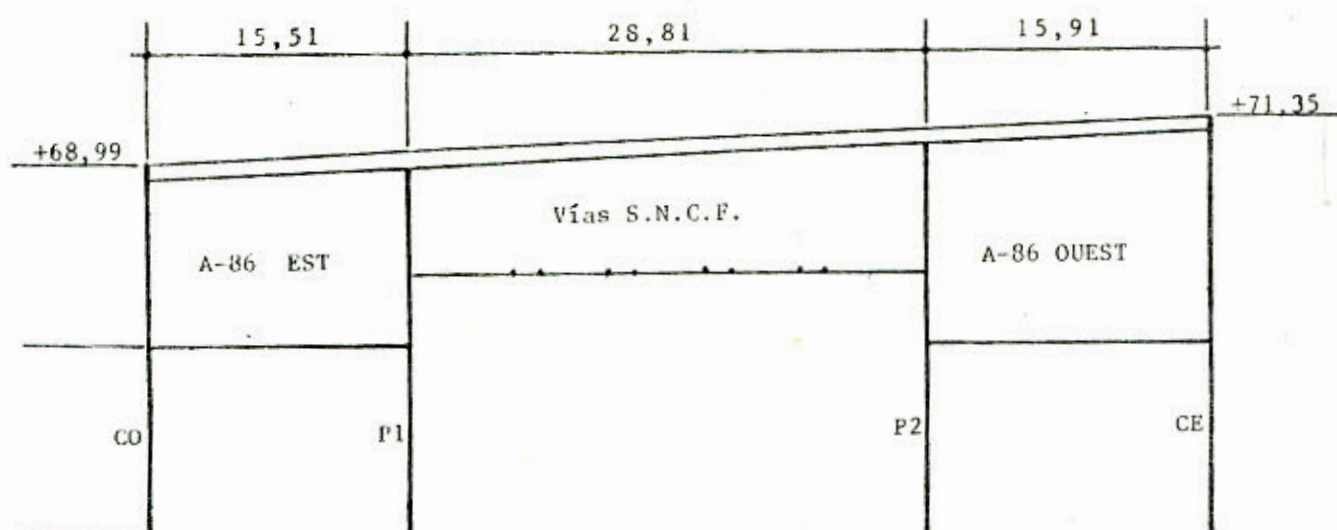


FIGURA 4



Las características del muro colado eran: profundidad máxima a perforar 25 m; ficha del muro 10,5 m; ancho de cuchara 0,80 m; ancho de la sección 2,34 m; momento de inercia $I=0,49 \text{ m}^4/\text{m}$ -como referencia un muro realizado con IPN500 tiene $0,0037156 \text{ m}^4/\text{m}$ -; ancho en el estribo 35,39; desarrollo aproximado del muro -en recta- 59,40 m.

El cálculo comprendió: la capacidad portante respecto de las acciones verticales según los métodos clásicos; para las verificaciones frente a los empujes horizontales se utilizó un programa de elementos finitos que tiene en cuenta los módulos de reacción horizontal de los distintos estratos y la rigidez del muro.

Durante la ejecución de los trabajos se presentaron algunos inconvenientes. En uno de los estribos se tropezó con un conducto de desagüe pluvial, no previsto en el proyecto; se debió modificar la configuración del muro, lo que se pudo hacer sobre la marcha. Las armaduras eran asimétricas y muy pesadas (hasta 12258 Kg en uno de los tramos), lo que obligó a utilizar un dispositivo especial para su colocación. Durante la excavación de uno de los paneles se encontró un obstáculo que desviaba la cuchara; se recurrió a la ayuda de buzos para estudiar el fenómeno, y la obra pudo proseguir con una ligera modificación de la configuración.

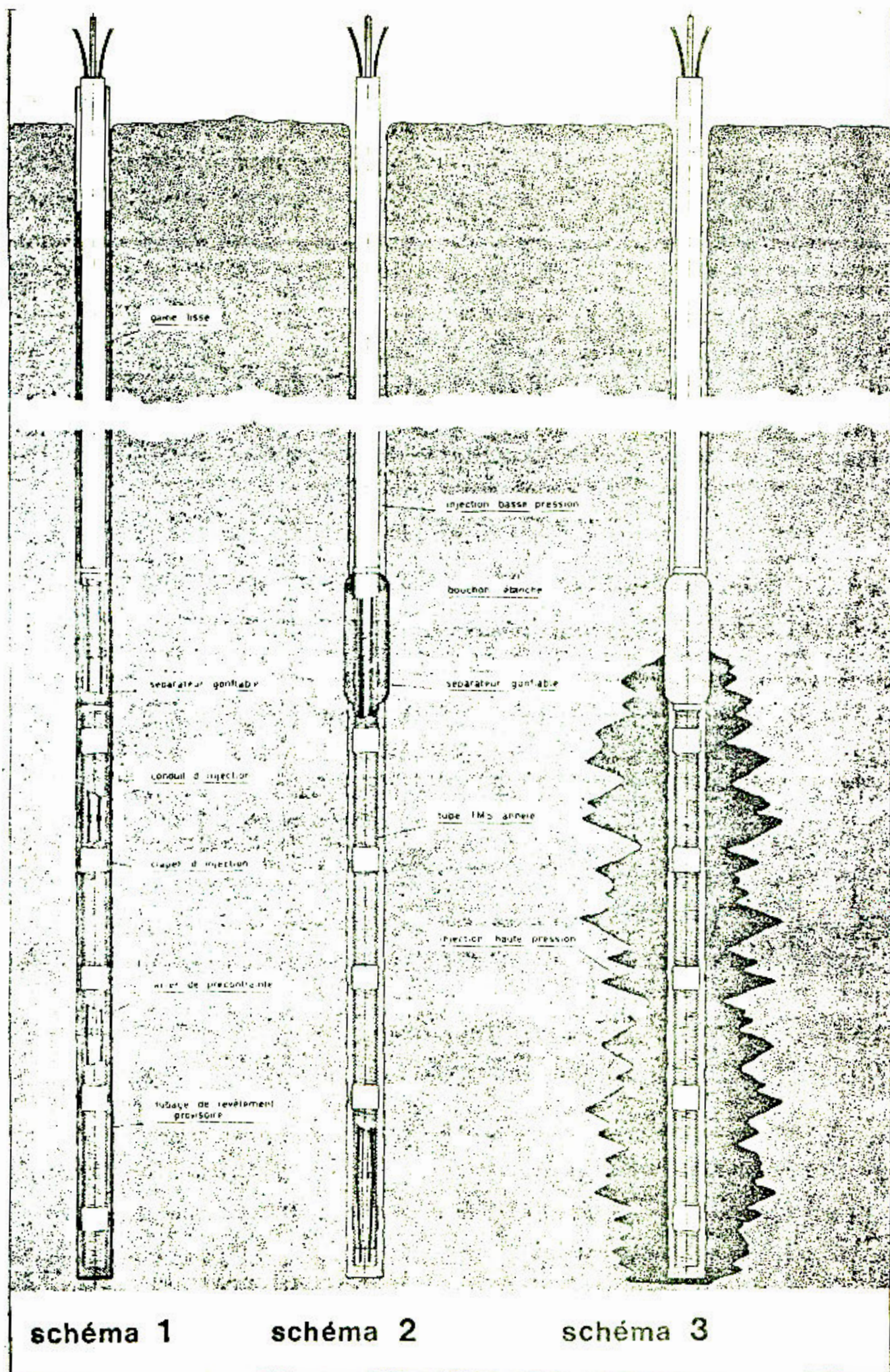
3. ANCLAJES INYECTADOS

Por anclajes inyectados entendamos aquí a los elementos constituidos por uno o varios cables o barras de acero, introducidos dentro de una perforación de pequeño diámetro practicada en el suelo, con posterioridad a lo cual se inyecta y se tesa. Estos pueden ser provisorios o definitivos, según que su uso se limite a una etapa de la obra o formen parte de la solución integral. Extensamente utilizados en roca, su aplicación en obras sobre suelos es más reciente. En esta presentación se han incluido tanto a los traccionados (tirantes de anclaje) como a los comprimidos (micropilotes).

Los tirantes de anclaje permiten utilizar el peso de una masa de suelo para reemplazar al peso propio de una estructura. Los factores que hay que tener en cuenta para su diseño son:

- 1) Capacidad del suelo para soportar las acciones de anclaje
- 2) Evaluación de las interferencias con otras instalaciones: servicios enterrados, otras construcciones.
- 3) Accesibilidad adecuada para perforar e instalar los sensores.

El tipo de anclaje que se suele utilizar tanto en suelos granulares como cohesivos, requiere una perforación de diámetro comprendido entre 75 y 125 mm. Los procedimientos de inyección y colocación de la armadura dependen del constructor (muchos están



protegidos por patentes). Mediante la correcta elección de la presión de inyección se logra la formación de un bulbo de diámetro varias veces superior al de la perforación. Esto depende además, y en gran medida, a la permeabilidad del suelo frente a la penetración del líquido inyectado (en general lechadas de cemento con aditivos). Las presiones de inyección se controlan durante todo el proceso, para asegurarse la continuidad de la operación.

Un anclaje puede presentar diferentes configuraciones de rotura:

- a) dentro de la masa misma del suelo
- b) en la interface suelo-bulbo
- c) en la interface masa inyectada-armadura
- d) en la vinculación del anclaje con la estructura.

La estabilidad general del conjunto debe ser verificada cuidadosamente, pues es en general la que determina la longitud total del anclaje.

Algunas expresiones simplificadas que permiten dimensionar estos elementos son:

* en suelos granulares: $q_u = L \cdot m \cdot \operatorname{tg} \phi'$

donde: L es la longitud del bulbo

m un coeficiente que depende del tamaño de las partículas (40-60t/m para gravas y arenas gruesas y 15 t/m para arenas finas y medianas)

ϕ' es el ángulo de fricción interna

* en arcillas consolidadas: $q_u = 0,3 \cdot C_u \cdot \pi \cdot D \cdot L$

donde: D es el diámetro del bulbo

C_u la cohesión promedio.

Los coeficientes de seguridad recomendados son: 1,6 para tirantes provisorios con un período de utilización inferior a dos años, y 2 para tirantes de anclaje permanentes.

Las cargas a que pueden ser sometidos son importantes, pudiendo alcanzar de 30 a 50 t en suelos cohesivos y de 40 a más de 100 t en granulares.

La diferencia fundamental entre anclajes permanentes y provisorios radica, por sobre todo, en el sistema de protección contra la corrosión. Ambos recurren al envainado en plástico de la armadura en el tramo libre, pero en el tramo anclado los provisorios sólo tienen el cemento inyectado que los defiende. Para los definitivos se suele recurrir a tubos de PVC (de 1 mm de espesor) dentro de los cuales se desliza libremente la armadura, rellenándose el hueco al mismo tiempo que se va inyectando el suelo. En el tubo

de PVC se disponen válvulas (tipo clapet) que permiten realizar la inyección por tramos, distribuyendo la misma regularmente, dispositivos especiales separan el bulbo de inyección del tramo libre.

La realización de ensayos de carga es ineludible. En general se somete al elemento a ensayar a varios ciclos de carga y descarga para obtener las deformaciones elástica y plástica, hasta alcanzar 1,5 veces la carga de rotura.

Una variante de estos elementos está en su utilización como "micropilotes". En el cálculo de la carga intrínseca sólo se tiene en cuenta la sección de acero; las tensiones admisibles (según el reglamento francés) están limitadas a 0,5 σ_{en} para sollicitaciones de primer orden y $2/3 \sigma_{en}$ para las de segundo orden. Desde el punto de vista de la capacidad de carga del terreno, se tiene en cuenta exclusivamente la fricción lateral. Si bien se debe verificar el pandeo, no es condicionante.

La vinculación con la estructura se puede realizar ya sea mediante un macizo de hormigón donde se ancla, o por soldadura a una placa metálica o a una estructura especial.

Muy utilizados en el refuerzo o recalce de fundaciones existentes o ejecutadas defectuosamente, tiene también campo en obras nuevas. Resultan interesantes cuando hay roca muy fracturada o bochones; por el método de perforación utilizado se pueden pasar fácilmente los elementos duros, y proveyendo un haz de micropilotes se puede obtener una fundación cuyo comportamiento se asemeje a una maciza.