

CONSIDERACIONES SOBRE LOS MUROS PANTALLA DISCONTINUOS Y MIXTOS. SISTEMAS DE RECALCE MECANICO. SUJECION DE LOS EMPUJES HORIZONTALES CON ANCLAJES O FORJADOS

Por JESUS L. PRESA SANTOS

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director Técnico de KRONSA-AGROMAN

ADOLFO ERASO ROMERO

Licenciado en Ciencias Químicas
Asesor Técnico de Dirección de KRONSA-AGROMAN

I. Introducción.

Son de todos conocidas las ventajas que presenta la ejecución de muros de contención de tierras con la solución denominada "muros pantalla".

Además de las de seguridad del personal obrero, pues se ejecutan por medios mecánicos desde la superficie del terreno, son mucho más ventajosas en cuanto a rapidez y, sobre todo, en posibilidad de ejecución cuando los terrenos son sueltos y con agua, característica esta última determinante, ya que si se trataran de hacer estos trabajos por procedimientos convencionales de excavación y agotamiento se producirían arrastres que sin duda afectarían a los edificios colindantes.

Debido, además, al proceso constructivo en el que se realiza el muro por bataches más o menos largos, según el estado en que se encuentren las casas colindantes, permite, en la mayoría de los casos, el que se realice la obra sin necesidad de recalzar aquellos edificios, práctica difícil y que requiere una gran experiencia si se quiere que no se produzcan asentamientos en las estructuras recalzadas cuando los esfuerzos entren en carga.

Una consideración técnica importante es la de que estos muros se calculan como empotrados, dándoseles para ello una longitud suplementaria a partir del fondo definitivo de la excavación. Esto hace que no sean necesarios grandes espesores para conseguir con ellos peso estabilizador, ya que trabajan a flexión. Asimismo, debido a que se cuenta con el arriostamiento horizontal de los forjados o de anclajes provisionales, se consiguen espesores de muros muy pequeños en comparación de los

necesarios, según los cálculos tradicionales de estabilidad.

Todas estas razones hacen que se adopten estas soluciones incluso en casos en los que las características del terreno sean suficientemente buenas como para hacer muros de contención sin necesidad de precauciones especiales.

Sin embargo, queremos indicar que, a nuestro juicio, deben resolverse con "pantalla continua" los casos en los que el terreno posea mala calidad resistente o presencia de agua en abundancia que no permita el empleo de otros sistemas de "pantalla discontinua", que suelen ser más baratos, más rápidos y de garantía técnica suficiente.

Es principalmente a estos casos a los que va referido el presente artículo, pues los estudios sobre pantalla continua son los que más se han desarrollado, existiendo, sin embargo, para los discontinuos muy poca información.

II. Pantallas discontinuas.

Descripción.

La pantalla discontinua es, en esencia, una alineación de pilotes ejecutados por vaciado y hormigonados por el procedimiento *in situ*. Estos pilotes se colocan a una distancia variable entre ejes, mayor que el diámetro propio del pilote, y según las características del terreno. Esto se hace aprovechando la circunstancia que se produce en muchos casos en suelos en los que su cohesión y ángulo de rozamiento interno permiten que se forme, por efecto de arco, un auténtico muro continuo com-

puesto del mismo terreno y de los pilotes que actúan como un costillar de contrafuertes.

Existen numerosos procedimientos para ejecución de estos pilotes hormigonados *in situ*, pero, debido a que normalmente hay edificaciones colindantes que muchas veces se encuentran en no muy buen estado, creemos que los más recomendables son los que se realizan por vaciado con hélice o *hammergrab* y sin el empleo de trépanos o herramientas que se produzcan golpes, succiones o arrastres. Estas máquinas permiten la ejecución de los taladros en muchos casos en seco, por lo que se consigue un hormigonado posterior de más garantía, pues no existe posibilidad de lavado y, sobre todo, se realiza sin presencia de los residuos de la perforación que suelen quedar en el fondo con los procedimientos en los que se emplean lodos, y que suelen producir en algunos casos asientos iniciales a la puesta en carga.

Estos asientos iniciales es también importante tenerlos en cuenta en el caso de "muros pantalla" continuos, pues aunque suelen ser pequeños, unidos al acortamiento correspondiente a la retracción y al de deformación elástica producida por las cargas de la estructura, hacen que puedan verse afectadas las edificaciones colindantes, sobre todo si el muro se hace pegado a aquéllas.

Para evitar esto en parte, se recomienda que las estructuras nuevas se separen una pequeña distancia de las ya existentes, siendo mínimo esta distancia de unos 25 cm., lo que permite el comportamiento diferencial de aquéllas; esta separación es, además, necesaria para la ejecución de los muretes de guía que generalmente se realizan previamente a la pantalla.

Antes de seguir adelante, queremos hacer constar que las pantallas discontinuas han sido muy utilizadas, por ejemplo, en la ejecución de muelles en puertos, los cuales cuando se ejecutan con esta técnica se realizan colocando una pantalla frontal y unos elementos resistentes en el trasdós, generalmente compuestos de cajones o pilastrones separados, en los que se considera que se produce el efecto sombra con el que los empujes de tierras quedan absorbidos en todo o parte por estos elementos resistentes, los cuales defienden con ello a la pantalla frontal.

También es muy utilizado para la ejecución de sótanos en edificaciones, cuando el terreno

cumple las características que antes hemos indicado de no tener agua en abundancia y de una cohesión y rozamiento suficientes, cuyas características analizaremos a continuación.

Separación entre los elementos verticales resistentes.

Existen diversas normas para la determinación de la separación entre pilotes.

Según las instrucciones danesas, se admite que existe un efecto sombra total cuando la separación entre ejes de pilotes es menor de cuatro diámetros. Según los ensayos realizados en el Politécnico de Hannover, en 1937, a escala reducida y con arenas sueltas, la distancia efectiva para que se produzca el efecto sombra total entre ejes de pilotes contiguos es de dos diámetros.

Las normas del Ministerio de la Vivienda admiten como luz máxima la de tres diámetros de distancia entre ejes.

Esto nos indica que no existe una norma única y que para la definición del efecto sombra hay que tener en cuenta consideraciones en las que entran en función las características del terreno, principalmente la cohesión y el ángulo de rozamiento interno.

Si consideramos terrenos sin cohesión, evidentemente el efecto del ángulo de rozamiento sería insuficiente para retenerlos e impedir que pasaran por los vanos entre pilotes, sobre todo si se tratase de arenas de grano fino, con las que se produciría un vaciado del trasdós del muro a través de los huecos entre pilotes como si fuera un reloj de arena. Sin embargo, según los ensayos realizados en el Politécnico de Hannover antes indicados, se da como distancia admisible entre los ejes una mínima de dos diámetros; esto posiblemente es debido a que los terrenos difícilmente se encuentran exentos de matriz limosa o arcillosa y de humedad, la cual, cuando los granos son pequeños, produce por tensión superficial una cierta cohesión que impide que las arenas fluyan. No cabe duda que esta solución no es buena cuando hay salidas de agua que pueden producir arrastres. Muchas veces estas salidas de agua se suelen producir en estratos permeables de poca potencia y con caudales pequeños, por lo que pueden ser atajados cuando la excavación llegue a ellos por medio de entibaciones o tratamientos, tales como la inyección, con lo que el empleo de

este sistema de pantalla discontinua puede generalizarse incluso para estos terrenos de tipo arenoso.

En el caso de que el tamaño de los granos que forman los suelos sea grande, tal es el caso de gravas o bolos, la posibilidad de desprendimiento del terreno entre los pilotes es menor, pues se formarán más fácilmente taponamientos debido al efecto de arco, y los fenómenos de socavación debidos a arrastres actuarán más lentamente, lo que permitirá también un tratamiento más sencillo y rápido de las zonas con peligro de arrastres.

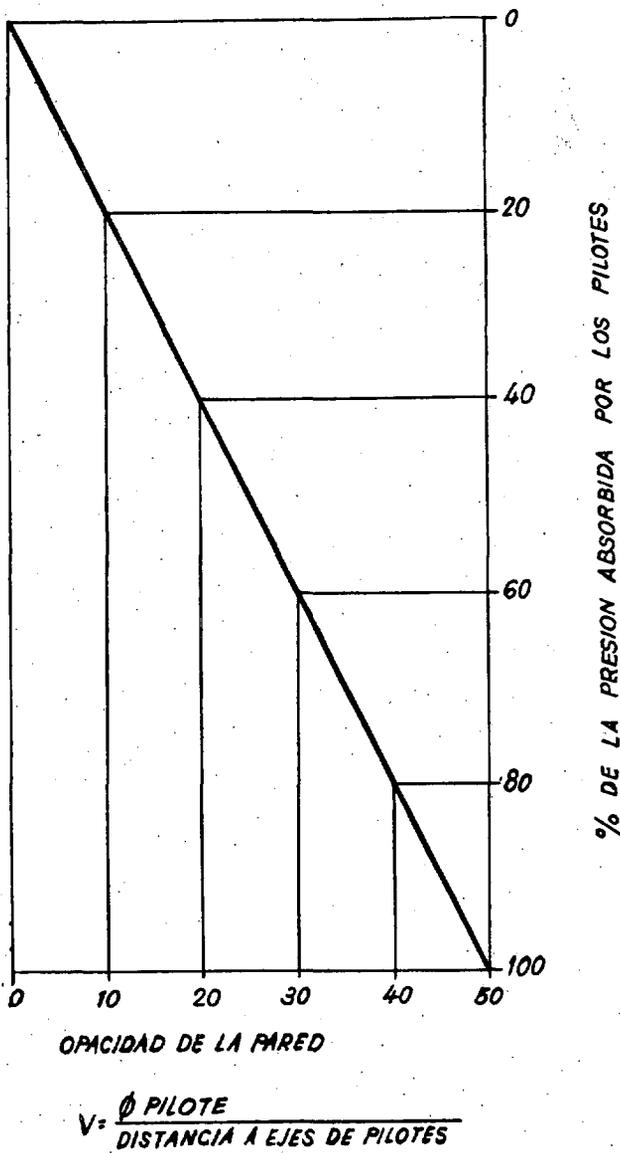


Figura 1.

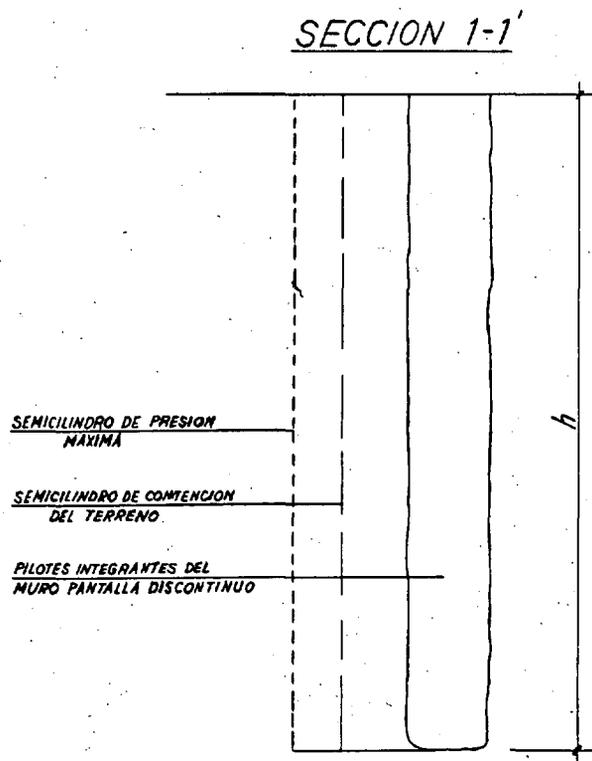
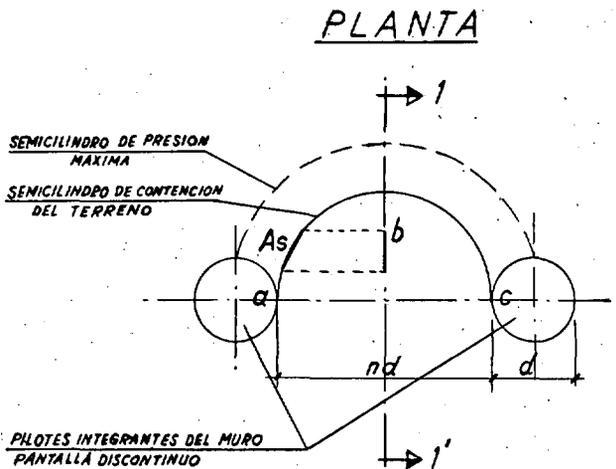


Figura 2.

Sin embargo, normalmente los suelos tienen componente arcillosa, lo cual les da cohesión, por lo que pueden separarse los pilotes que forman los muros discontinuos incluso más de dos diámetros entre ejes, como analizaremos a continuación. Para ello tendremos en cuenta, por un lado, el empuje de tierras filtrado a través de los pilotes y el peso del semicilindro de tierras limitado por el efecto arco y, por otro

lado, la resistencia debida a la cohesión. Volviendo a considerar los resultados obtenidos en el Politécnico de Hannóver, donde llegaron a determinar el empuje del terreno que no es retenido por los pilotes que forman la pantalla discontinua, cuyo resumen indicamos en la figura 1.

Según esto, el coeficiente que determina la presión filtrada es de:

$$K = 1 - 2V = 1 - \frac{2}{n + 1};$$

siendo V igual al diámetro del pilote dividido por la distancia entre ejes de pilotes, que es $n + 1$, expresada en diámetros de pilote.

Los empujes del terreno, así como el peso propio del mismo, vendrán considerados teniendo en cuenta el semicilindro de tierras comprendido entre pilotes, indicado en la figura 2, que debe ser sustentado por efecto de la cohesión del propio terreno, hipótesis conservadora, para el que, considerando una altura teórica de h metros y valdrá:

Peso del semicilindro de tierras:

$$P_1 = \frac{1}{2} \pi \left(\frac{nd}{2} \right)^2 \gamma; \quad h = \frac{1}{8} \pi n^2 d^2 \gamma h.$$

Presión que pasa a través de la pantalla discontinua, sin tener en cuenta la cohesión del terreno:

$$P_2 = \frac{1}{2} \gamma h^2 n d \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \frac{n-1}{n+1};$$

El efecto resistente de la cohesión equivale al producto de ésta por la proyección del semicírculo abc sobre la dirección perpendicular al muro, proyección que es igual a dos veces el radio de este semicírculo, es decir, la resistencia en una altura de h metros será:

$$R = 2 \cdot r \cdot c \cdot h = ndch,$$

siendo:

- c = la cohesión.
- d = diámetro del pilote.
- $n \cdot d$ = diámetro del semicírculo.

$$\text{FORMULA ORIGEN } c = \frac{\pi}{4} \cdot n \cdot d + \frac{n-1}{n+1} \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot h$$

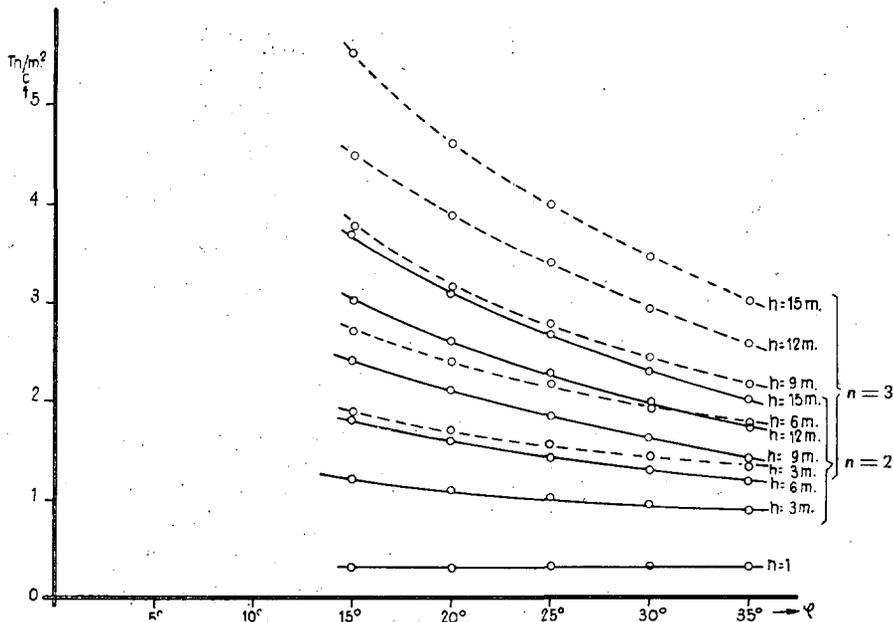


Fig. 3. — Para pilotes de ϕ 400 mm. Abaco para el estudio del efecto sombra. Separación admisible entre ejes de pilotes teniendo en cuenta las características del terreno.

Fig. 4. — Para pilotes de ϕ 600 milímetros. Abaco para el estudio del efecto sombra. Separación admisible entre ejes de pilotes teniendo en cuenta las características del terreno.

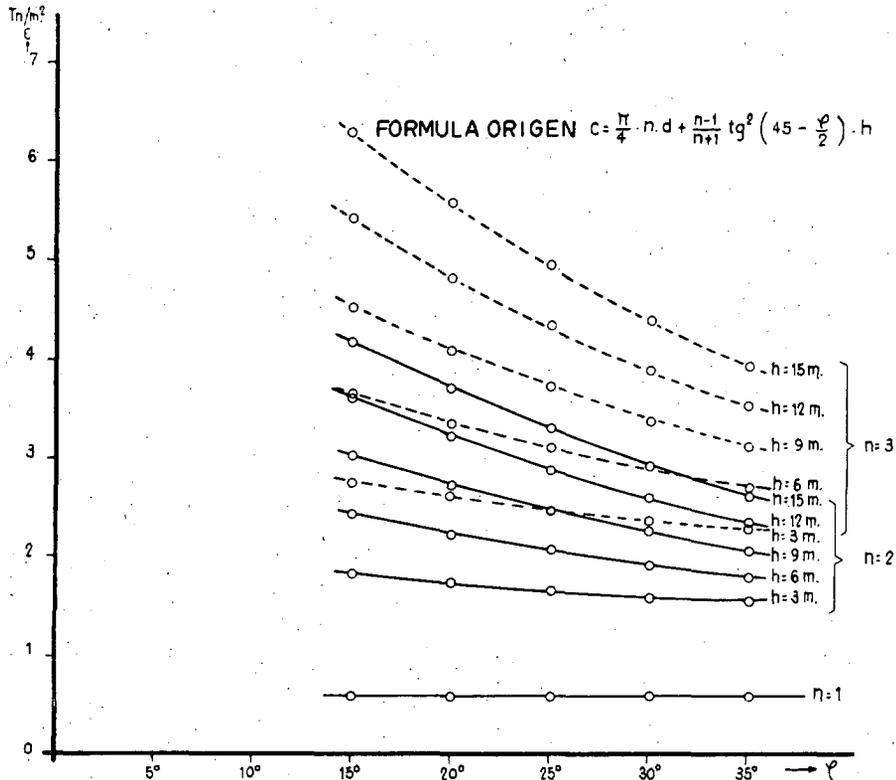
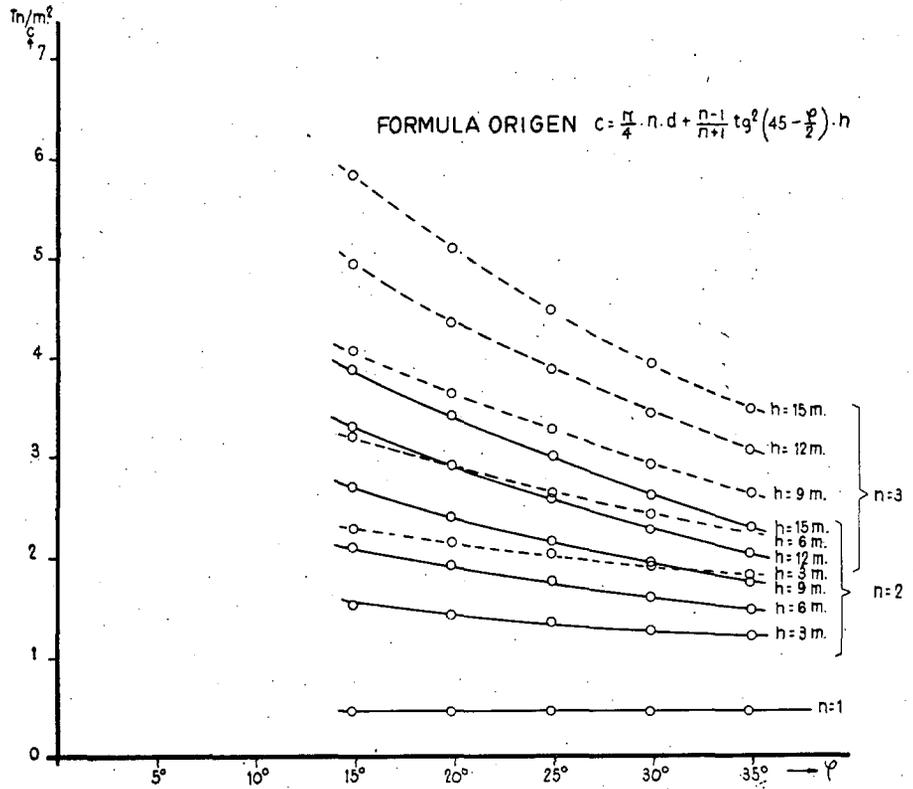


Fig. 5. — Para pilotes de ϕ 800 milímetros. Abaco para el estudio del efecto sombra. Separación admisible entre ejes de pilotes teniendo en cuenta las características del terreno.

Teniendo en cuenta que una condición de máximo debe ser:

$$P_1 + P_2 = R,$$

tendremos:

$$n \cdot d \cdot c \cdot h = \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot n^2 \cdot d^2 \cdot \gamma \cdot h + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot n \cdot d \cdot \text{tg}^2$$

$$\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \frac{n-1}{n+1};$$

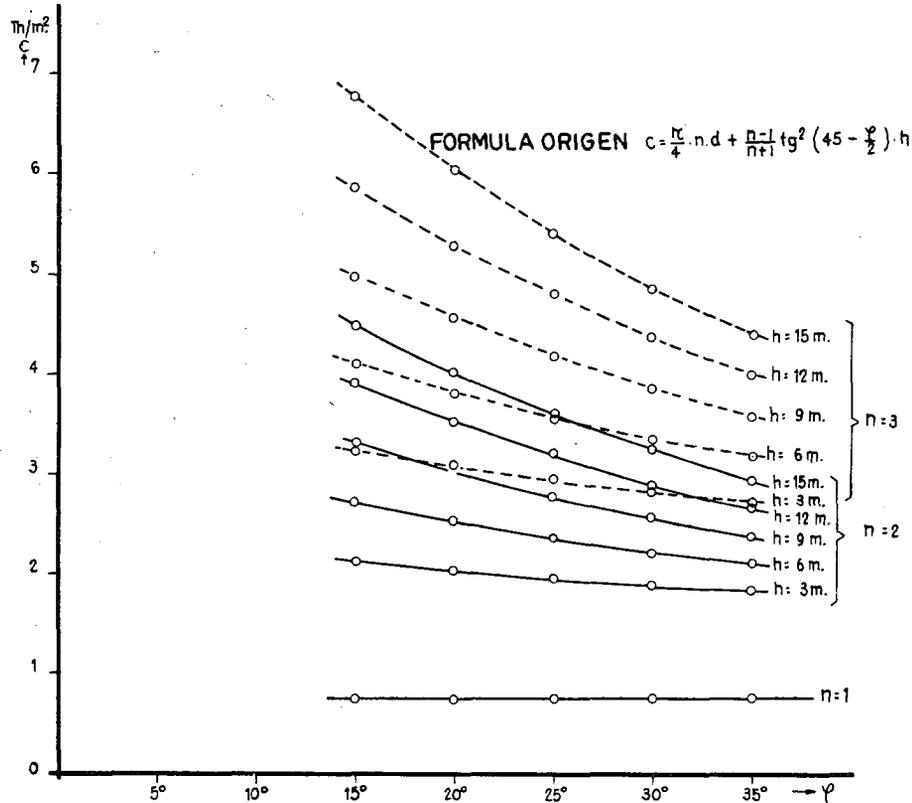


Fig. 6. — Para pilotes de ϕ 1.000 mm. Abaco para el estudio de efecto sombra. Separación admisible entre ejes de pilotes, teniendo en cuenta las características del terreno.

y tomando una densidad $\gamma = 2 \text{ Tn./m.}^3$, para simplificar sus fórmulas, quedará:

$$c = \frac{\pi n d}{4} + h \cdot \frac{n-1}{n+1} \text{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2}\right),$$

donde:

- c = cohesión del terreno (Tn./m.^2).
- $n + 1$ = separación entre ejes de pilotes expresada en diámetros de pilote.
- d = diámetro de los pilotes (m.).
- φ = ángulo de rozamiento interno del terreno.
- h = profundidad de la excavación a realizar en el entredós de los pilotes.

Para resolver la ecuación anterior recurriremos a ábacos (figs. 3, 4, 5 y 6).

En este estudio desarrollaremos los ábacos correspondientes a los cuatro diámetros más frecuentes de 0,40, 0,60, 0,80 y 1 m.

Dibujaremos las curvas correspondientes a distintas profundidades de terreno y para distintas características intrínsecas de ángulo φ y cohesión c del terreno.

Consideramos también los casos de separación entre ejes de pilotes de:

$$\left. \begin{array}{l} n + 1 = 2, \\ n + 1 = 3, \\ n + 1 = 4. \end{array} \right\},$$

como los más frecuentes.

De acuerdo con estos ábacos podemos deducir una limitación en la separación entre pilotes, la cual deberá ser comparada con la deducida teniendo en cuenta el aspecto resistente de los pilotes, así como el de las bovedillas que formarán el cierre entre los mismos y que estudiaremos en los apartados siguientes.

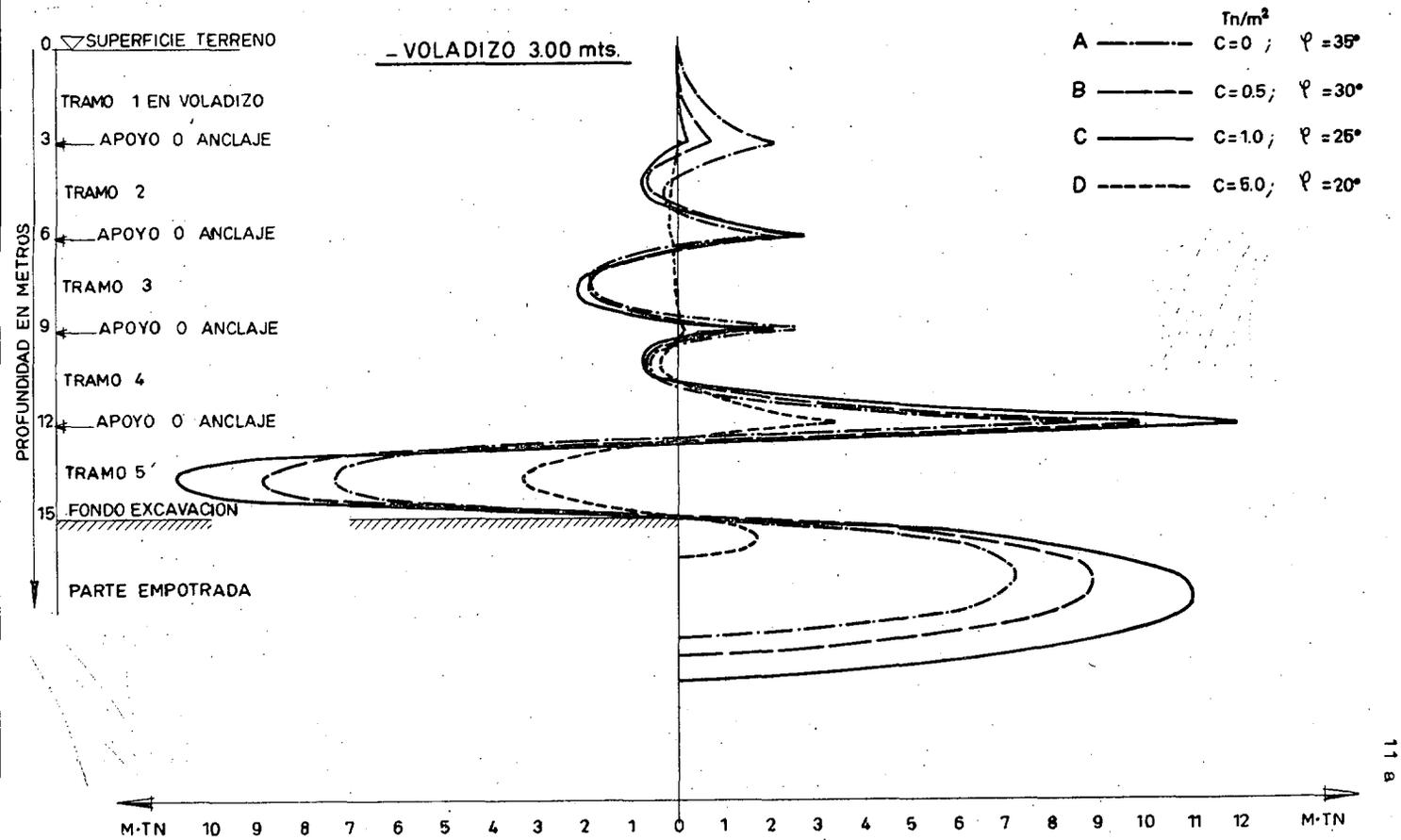


Fig. 7. — Leyes de momentos para una pantalla de cinco tramos en diferentes suelos.

118

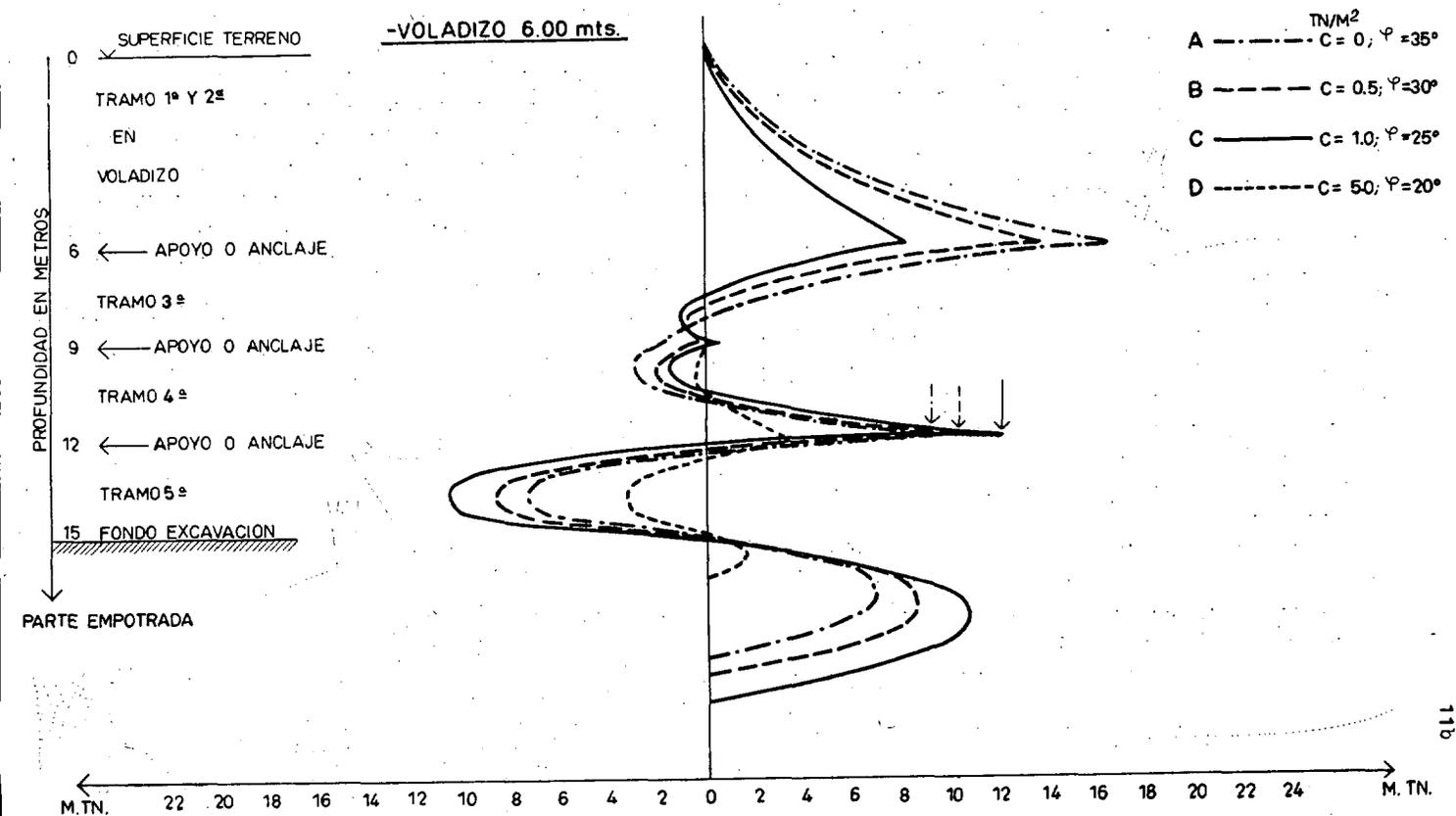


Fig. 8. — Leyes de momentos para una pantalla de cinco tramos en diferentes suelos.

119

Dimensionado de la pantalla.

Estudiadas las diferentes posibilidades de separación entre pilotes de pantallas discontinuas, vamos a analizar ahora el aspecto resistente de las mismas.

Para ello analizaremos el comportamiento de una serie de terrenos de diferentes características, que comprenden a los areno-arcillosos o arcillo-arenosos y arcillosos, que son los más frecuentes; emplearemos para los cálculos un ordenador electrónico. Consideraremos que deberá realizarse una excavación que comprenda un sótano de varios pisos o tramos.

Las fórmulas aplicadas son las correspondientes a la ley de empujes de Rankine, pues son las que admiten un cálculo matemático más sencillo, teniendo en cuenta las variables de cohesión y ángulo de rozamiento interno.

Las operaciones seguidas en el programa, correspondientes a un muro pantalla continua de un metro de ancho, son las siguientes:

- 1.º Cálculo de la ley de empujes de tierra.
- 2.º Cálculo de los momentos isostáticos en cada tramo, según la programación de la ley de empuje.
- 3.º Cálculo de las reacciones isostáticas de los apoyos.
- 4.º Cálculo de los términos de carga; momentos de partida en los suelos que permitan plantear las ecuaciones de la viga continua.
- 5.º Resolución del sistema de ecuaciones de la viga continua con el cálculo de momentos y reacciones.
- 6.º Deducción del empotramiento necesario de la base-muro por debajo de la excavación definitiva.

Con objeto de analizar diferentes soluciones y de tener varias referencias para futuros tanteos de este tipo de muros pantalla, hemos estudiado los casos prácticos consistentes en la ejecución de un muro pantalla vertical para la construcción de un sótano con una profundidad excavada de 15 m., correspondientes a cinco plantas de 3 m. de altura cada una que corresponde a una obra límite importante. Se ha considerado el terreno formado por un solo estrato y sin nivel freático y para cuatro clases de terreno de diferente φ y c .

No se han tenido en cuenta sobrecargas en los terrenos colindantes, los cuales se han supuesto horizontales, y se ha despreciado el rozamiento entre tierras y muro.

Las características geotécnicas que han servido de base para los cálculos han sido las siguientes:

Terreno	Cohesión a Tn./m. ²	Rozamiento interno	Densidad (Tn./m. ³)
A	0	35°	1,7
B	0,5	30°	1,7
C	1,0	25°	1,7
D	5,0	20°	1,7

Además de esta gama de terrenos, se han considerado dos hipótesis: la primera, con pantalla arriostrada o anclada en todos los tramos menos en el primero, excavado y en voladizo, y la segunda hipótesis, con los dos primeros tramos excavados y sin anclar y el resto como en el caso anterior.

Los resultados de las leyes de momentos y las longitudes de empotramiento de cada caso están resumidos en los gráficos de las figuras 7 y 8, que se adjuntan. Es evidente que, en el transcurso de los sucesivos tramos de excavación y hasta que se realicen los arriostramientos, se generan momentos transitorios de diferente distribución y magnitud, los cuales no coincidirán, pues serán generalmente mayores, con los indicados anteriormente. Estos momentos transitorios, así como las cotas de momento máximo, están indicados en la figura 9.

Una vez conocidas las leyes de momentos que corresponden a los empujes en una franja de 1 m. de ancho, podemos estudiar el dimensionado correspondiente a las pantallas discontinuas a las que nos referimos en el presente artículo.

Para ello, en primer lugar consideramos la sección rectangular equivalente de cada pilote, cuyo ancho será: $b = \frac{3}{4} D$; siendo D el diámetro del pilote; el canto total h_t será aquel que multiplicado por el ancho b nos de el mismo momento de inercia que el correspondiente al pilote de diámetro D considerado.

Una vez definidas estas características geométricas, los esfuerzos que se deben absorber por cada pilote serán los correspondientes a la franja de 1 m. de ancho antes calculados multiplicados por la distancia entre ejes de pilotes expresada en metros.

Debido a que en los pilotes es necesario colocar armaduras en toda su longitud, en el trasdós y el intradós que sirvan de reparto y de trabajo, ya que cambian los momentos pasando de la parte frontal de la dorsal a lo largo del pilote en los diferentes tramos, estimaremos que es necesario colocar siempre una armadura uniforme en las zonas de compresión mínima del 25 por

el tipo de terreno A, B o C, pues el D no produce apenas empuje, admite la solución de pantalla discontinua de cualquiera de los diámetros considerados, con separación de hasta 4 diámetros entre ejes de pilotes. En el segundo gráfico y con un voladizo de 6 m. existen una serie de casos que son los indicados en la letra SC en los que la armadura de compresión de los

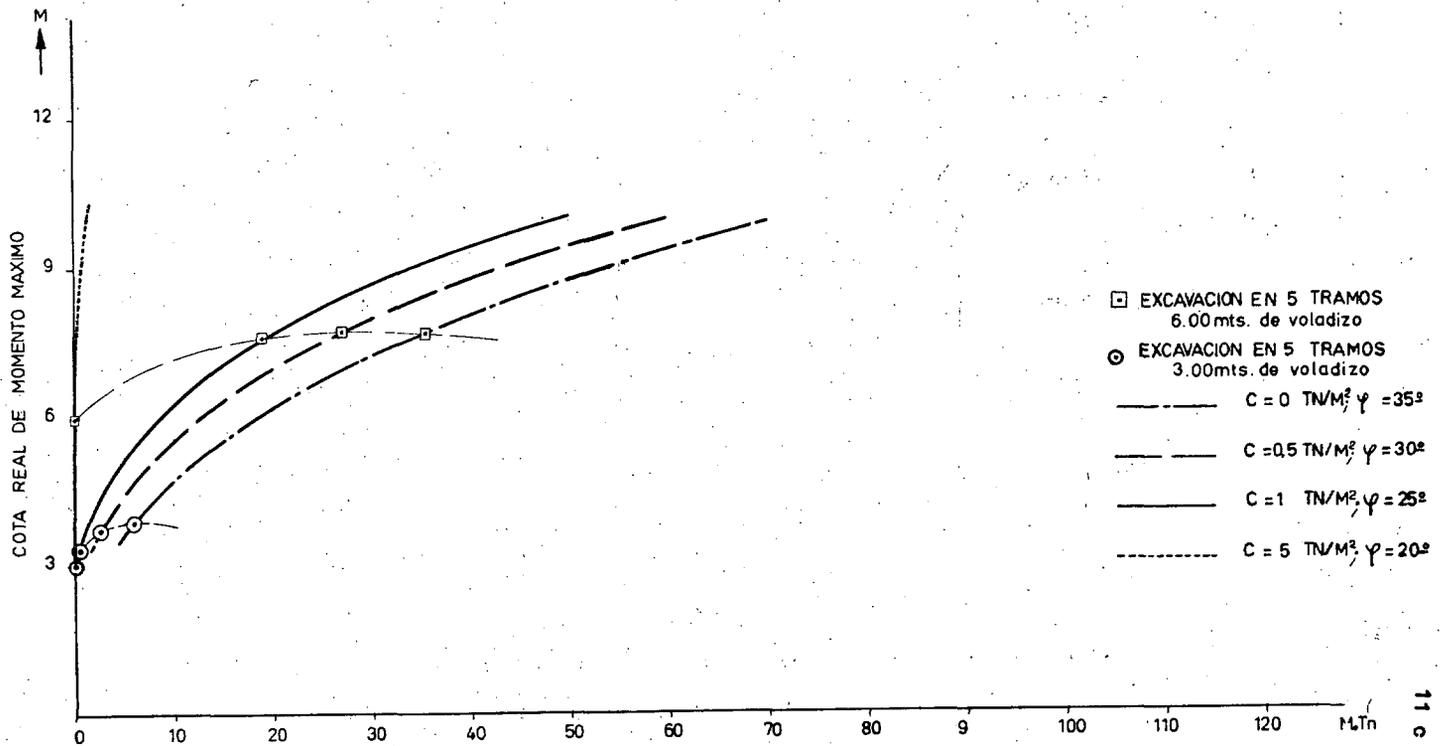


Fig. 9. — Momentos transitorios del voladizo de 3,00 y 6,00 metros.

100 de la armadura máxima correspondiente a las zonas de tracción. Esta armadura la consideraremos como armadura crítica en vez de la correspondiente a la armadura nula en la zona de compresión.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones y para una resistencia característica del hormigón de 130 Kg./cm.² y unos coeficientes de seguridad de la sollicitación y del hormigón respectivamente, de 1,65 y 1,6 (ábacos de H. A., del libro de Jiménez Montoya) llegamos a unos esfuerzos, cuya posibilidad de ser soportados la resumiremos en el cuadro adjunto (Tabla I).

Como puede verse en esta tabla, en el caso de voladizo de tres metros, cualquiera que sea

pilotes deberán superar al 25 por 100 de la armadura a tracción.

Todo ello nos indica que la pantalla discontinua es perfectamente admisible en muchos casos, incluso para terrenos de baja cohesión con excavaciones libres que puedan alcanzar los 3 m. sin necesidad de apuntalamiento, de forma que, una vez realizada ésta, se proceda al arriostamiento conveniente, por medio de anclajes o con los forjados definitivos de la estructura de los sótanos.

Engarce entre pilotes y forjados.

El sistema más corrientemente empleado,

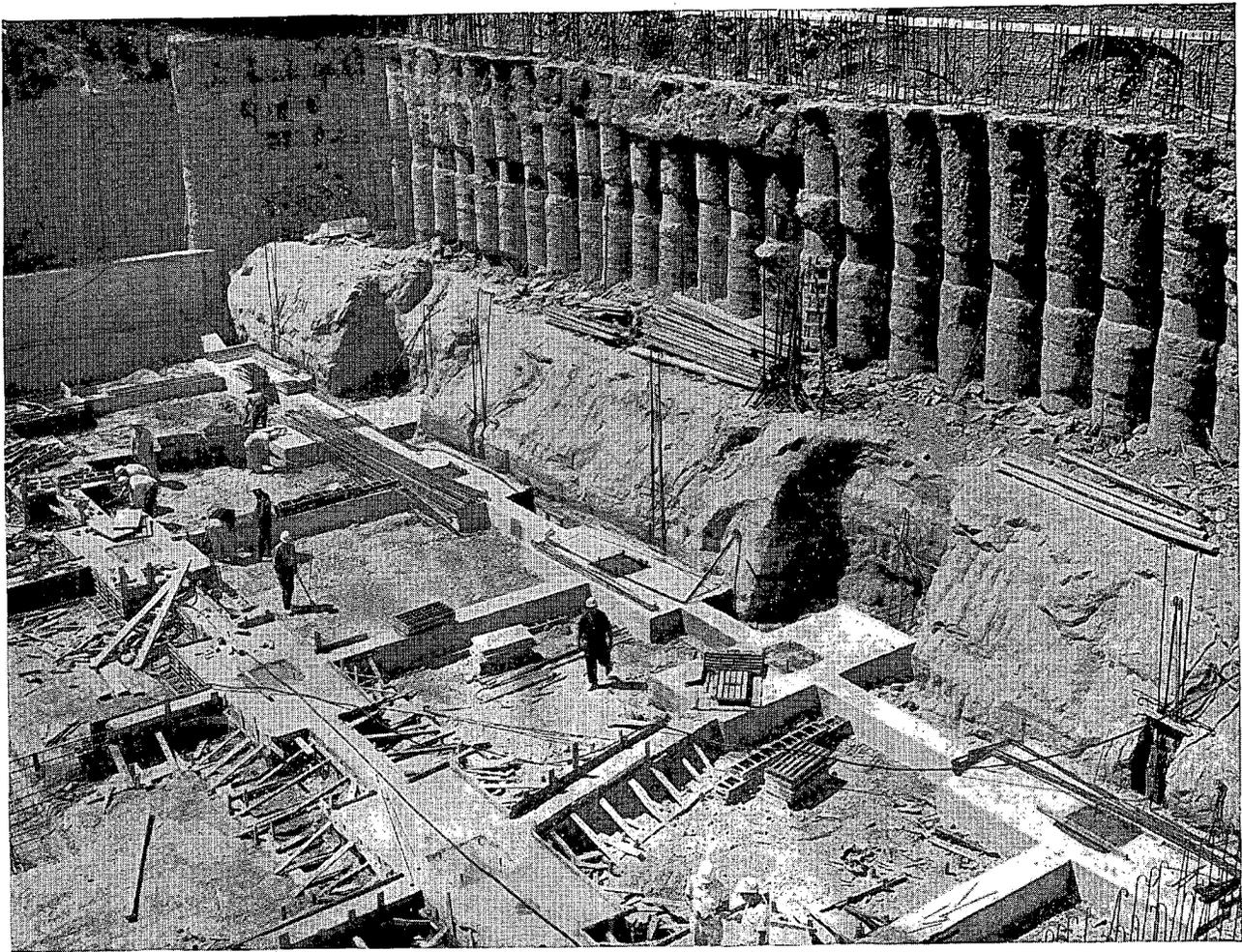
TABLA I

Tipo de esfuerzo a soportar por una pantalla discontinua de pilotes según el tipo de terreno y de la excavación

Tipo de excavación	Tipo de terreno	Luz entre pilotes a ejes	DIAMETRO DE LOS PILOTES			
			400 mm.	600 mm.	800 mm.	1.000 mm.
Excavación en cinco tramos con voladizo de 3 m. en cabeza	C = 0 Tn./m. ² φ = 35° Terreno A	2	IC	IC	IC	IC
		3	IC	IC	IC	IC
		4	SC	IC	IC	IC
	C = 0,5 Tn./m. ² φ = 30° Terreno B	2	IC	IC	IC	IC
		3	IC	IC	IC	IC
		4	IC	IC	IC	IC
	C = 1 Tn./m. ² φ = 25° Terreno C	2	IC	IC	IC	IC
		3	IC	IC	IC	IC
		4	IC	IC	IC	IC
Excavación en cinco tramos con voladizo de 6 m. en cabeza	C = 0 Tn./m. ² φ = 35° Terreno A	2	SC	SC	IC	IC
		3	SC	SC	SC	IC
		4	SC	SC	SC	IC
	C = 0,5 Tn./m. ² φ = 30° Terreno B	2	SC	IC	IC	IC
		3	SC	SC	IC	IC
		4	SC	SC	SC	IC
	C = 1 Tn./m. ² φ = 25° Terreno C	2	SC	IC	IC	IC
		3	SC	SC	IC	IC
		4	SC	SC	IC	IC

IC = Esfuerzo a flexión admisible con armadura crítica, más un 25 por 100.

SC = Esfuerzo a flexión admisible con armadura superior a la crítica, más un 25 por 100.



Fotografía 1. — Disposición de las virolas de chapa en los pilotes para engarce de los forjados (nuevo edificio Unión y El Fénix, Madrid).

consiste en la ejecución de un dispositivo de virolas que se colocan unidas a la armadura de los pilotes con sus anclajes correspondientes (ver foto núm. 1), de forma que una vez ejecutado el hormigonado del pilote y descubierto éste al realizar la excavación, quedan estos tubos en disposición de zunchos a los que se pueden soldar armaduras o un elemento metálico en forma de U o I en el que se empotrará el forjado definitivo.

Estos elementos pueden colocarse en todos los pilotes o en pilotes alternos según las cargas reales que transmitan los forjados (ver fotografía núm. 1 adjunta).

Recubrimiento de los vanos entre pilotes (fig. 10).

Una vez realizada la excavación quedará dispuesto el muro pantalla con los pilotes formando una auténtica reja y el terreno natural entre los mismos. Para rematar el muro pantalla es necesario cubrir estos vanos. Existen diferentes procedimientos para hacerlo; los más sencillos son los que, con elementos en forma de arco, bien sea de hormigón o ladrillo, se transmitirán los empujes de terreno a los pilotes. La magnitud de estos empujes la podemos suponer igual al empuje total del terreno por m.², pues podemos admitir que por determinadas cir-

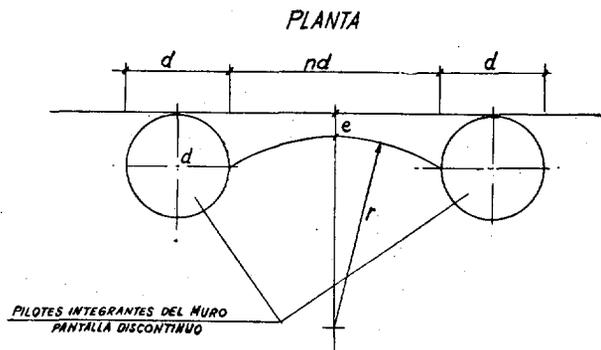


Fig. 10. — Disposición de las bovedillas de cierre entre pilotes.

cunstances de acomodación, se deshaga el efecto sombra al cabo del tiempo.

Con objeto de analizar las características de estos cerramientos, consideramos el caso general en el que se relaciona el diámetro del

pilote y la separación de $2d$, $3d$ y $4d$, entre ejes de pilotes. Trataremos de que el trasdós de aquéllos cerramientos no sobrepase el plano de tangencia exterior a los pilotes, condición que en general, debe cumplirse para no interferir terrenos ajenos al de la obra. Si las bovedillas se realizan, por ejemplo, de hormigón *in situ* y con un arco en el intradós de radio variable, consideraremos los esfuerzos de compresión por efecto de arco en la clave de bovedilla y el esfuerzo cortante en los arranques de la misma en la zona de unión con el pilote. Tendremos en cuenta una sección para soportar los esfuerzos cortantes de $0,5d$, es decir, de la mitad del diámetro del pilote en los arranques de las bovedillas, y una resistencia a esfuerzo cortante para el hormigón de 4 Kg./cm.^2 . Asimismo consideraremos unos espesores en la clave de la bovedilla de $3/8d$ para una separación entre ejes de pilotes de $2d$ y $1/4d$ para las separaciones entre

TABLA II

Características de las presiones de terreno admisible por las bovedillas de cierre entre pilotes para el caso de que sean fabricadas con hormigón o ladrillo cerámico

HORMIGÓN:			
Diámetro del pilote	d		
Separación a ejes de pilotes consecutivos	$2d$.	$3d$.	$4d$.
Radio intradós bovedillas	d .	$2d$.	$4d$.
Espesor clave bovedilla	$3/8d$.	$1/4d$.	$1/4d$.
Esfuerzo cortante de trabajo en el hormigón, en Kg./cm.^2	4	4	4
Presión de tierras máximas admisible, en T./m.^2	40	20	13,4
Esfuerzo máximo a compresión en el hormigón, en Kg./cm.^2	11	16	21,5
LADRILLO:			
Esfuerzo cortante de trabajo en ladrillo, en Kg./cm.^2	0,4	0,4	0,4
Presión de tierras máxima admisible, en T./m.^2	4,0	2,0	1,4
Esfuerzo máximo a compresión en el ladrillo, en Kg./cm.^2	1,1	1,6	2,15

ejes de pilotes de 3 d. y de 4 d.; espesores que consideramos mínimos de acuerdo con tanteos previos. Para que puedan encajarse con bastante aproximación bovedillas de estas características, los radios de su superficie cilíndrica interior deberán ser de 1 d., 2 d. y 4 d., respectivamente.

De esta forma la presión admisible P sobre la bovedilla será la que produzca un esfuerzo cortante en el hormigón máximo de 4 Kg./cm.² en sus arranques.

La compresión en la clave de la bovedilla la supondremos igual a:

$$c = P \cdot r_1.$$

Siendo:

P = empuje del terreno.

r_1 = 1 d., 2 d. y 4 d., respectivamente

consideraremos, pues, la presión del terreno como radial, admitiendo que dentro de la bovedilla se forma un efecto de arco resistente.

Con todo ello hemos llegado a confeccionar la anterior tabla II, en la que se indican las presiones de terreno admisible, según que las bovedillas sean de hormigón o ladrillo cerámico.

Con objeto de tener una idea de magnitud de esta capacidad resistente y de poder inter-

pretar en diferentes casos prácticos, incluimos a continuación los ábacos de la figura 11 que representan los empujes unitarios de los terrenos A, B, C y D antes considerados.

De ellos puede deducirse, entre otras consideraciones, que con muretes de ladrillo pueden conseguirse buenos resultados hasta profundidades del orden de 7 a 9 m. para terrenos incluso con poca cohesión y con pilotes separados 2 d. entre ejes.

Para profundidades mayores, y con separaciones entre pilotes de 3 a 4 d., debe recurrirse a bovedillas de hormigón en masa.

Muros pantalla mixtos de pilotes y batches.

Vamos a considerar en este capítulo dos tipos de muros pantalla que llamaremos mixtos.

El primero de ellos consiste en alternar la ejecución del muro pantalla con batches que puedan tener varios metros de amplitud, con pilotes cilíndricos.

La justificación de la creación de este tipo de pantalla obedece a los cuidados que se deben prodigar durante la ejecución de estos trabajos, sobre todo cuando las edificaciones anejas al muro a construir tienen cimientos de mala

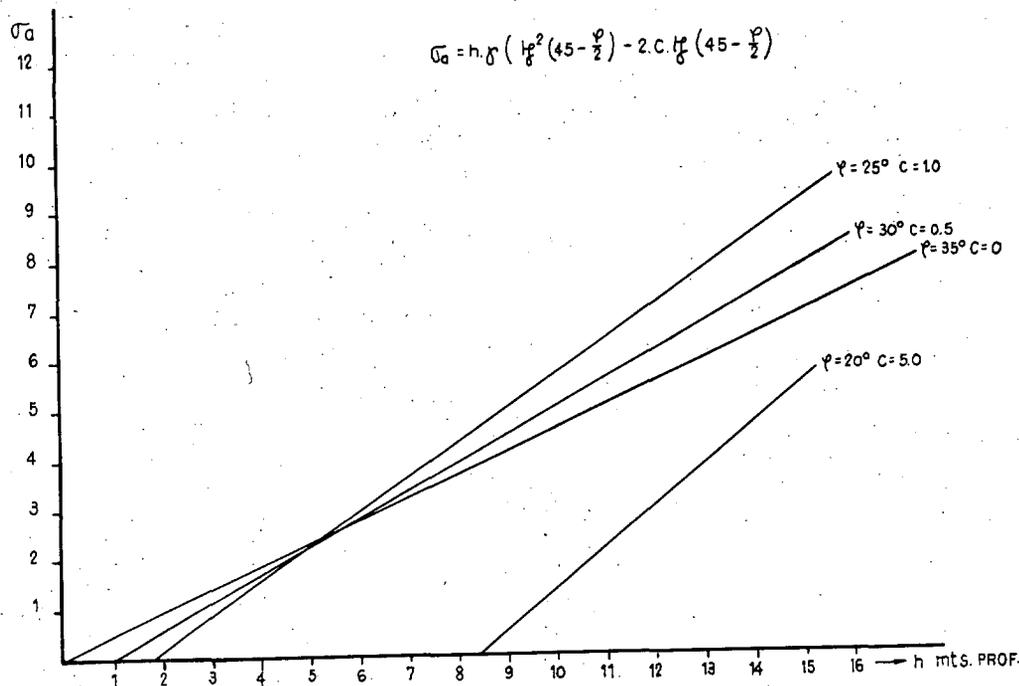


Fig. 11. — Abacos correspondientes al empuje activo. Deducidos según fórmula de empuje activo de Rankine para terrenos sin agua.

calidad, y de éstas las que además poseen cargas concentradas.

De todos son sabidas las buenas propiedades de los lodos que se emplean en estos trabajos, mantienen la zanja excavada y generalmente permiten la ejecución del muro pantalla sin necesidades de entibación. Pero no cabe duda de que si tenemos una carga concentrada, por ejemplo, a través de un pilar, el cual esté provisto de una zapata insuficiente, las propiedades de los lodos se verán impotentes para impedir el deslizamiento si el terreno no tiene propiedades de cohesión y rozamiento suficiente (ver fig. 12).

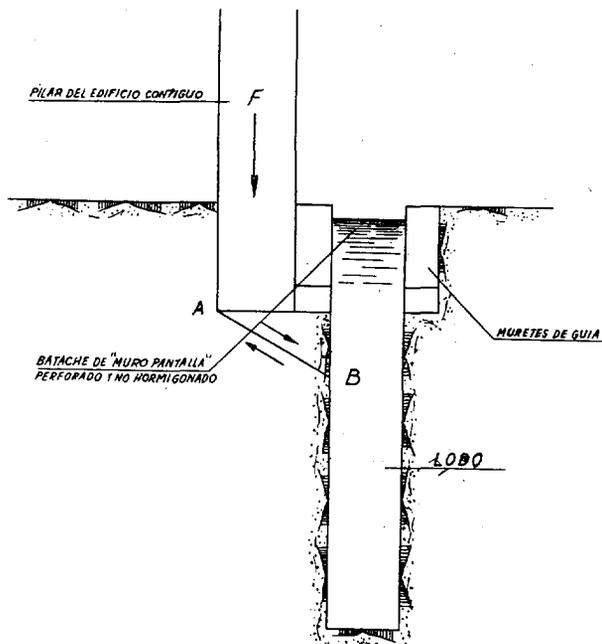


Fig. 12. — Posibilidad de deslizamiento del terreno ante cargas concentradas.

Ante este caso no cabe duda de que tendría que realizarse un apeo del pilar eliminando las cargas que sobre él se transmiten, o bien un recalce refiriendo las cargas a zonas del terreno más profundas en las que éste tuviera propiedades de rozamiento y cohesión suficientes para impedir el deslizamiento, ayudado posteriormente y durante la excavación del batache por el empuje hidrostático de la bentonita, siempre que el nivel freático estuviera suficientemente bajo, pues en caso contrario quedarían compensadas en gran parte las presiones.

De todos son conocidas las dificultades que

presenta la ejecución de los recalces; éstos se realizan a mano, generalmente, y deben hacerse con muchas precauciones, exigiendo además una técnica muy cuidada y especial a la hora de ponerlos en carga.

Todo esto lo podemos solucionar por medio de la ejecución de lo que llamaremos recalce-anclado o recalce-muleta, y que vamos a describir a continuación.

Consiste este recalce en la ejecución de un pilote, el cual puede hacerse por medios mecánicos extremadamente seguros. Se puede hacer el pilote a rotación con máquinas provistas de hélices y entubando simultáneamente, y si es necesario a presión, avanzando incluso delante de la excavación, con lo que resultará prácticamente imposible cualquier descalce.

Una vez realizado el pilote frente al punto que se desea recalzar, se procederá a la ejecución de un anclaje en dirección del edificio colindante, procediéndose a continuación con cuidado al recalce de la zapata o el pilar. Como se indica en la figura 13, este recalce se ejecuta colocando dos chapas metálicas, una unida a la zapata y la otra al pilote, de forma que, al ten-

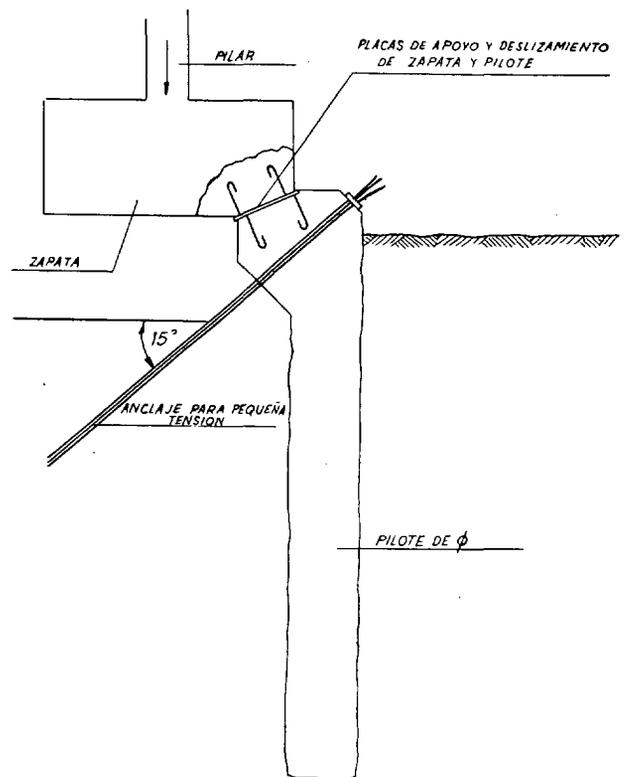


Fig. 13. — Esquema de disposición del recalce-muleta. Solución para terrenos muy deformables.

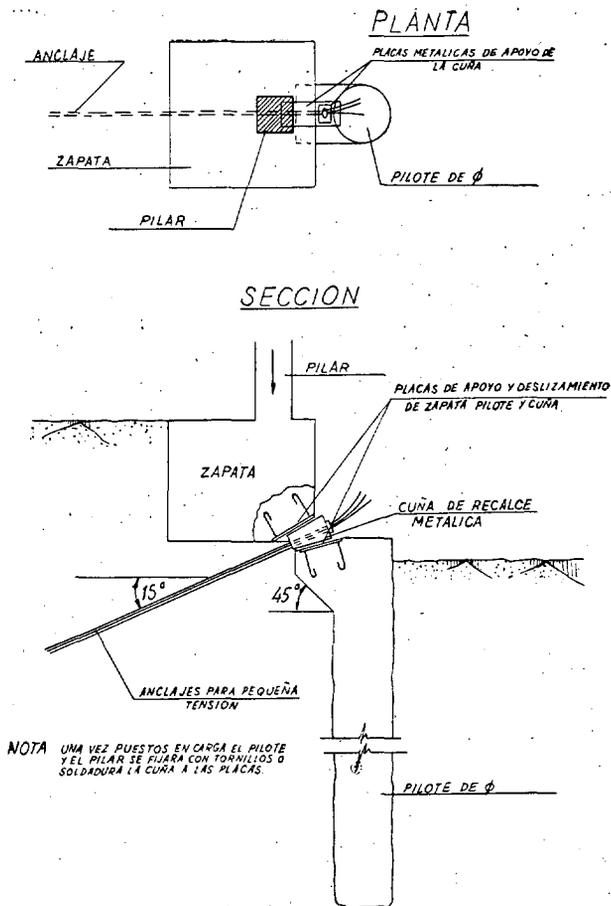


Fig. 13 bis. — Esquema de disposición del recalce-muleta. Solución para terrenos poco deformables.

sar ligeramente el anclaje, el pilote se ponga en carga recogiendo gran parte de los esfuerzos transmitidos por la estructura recalzada. De esta forma pueden apearse los principales puntos de las estructuras colindantes, pudiendo a continuación procederse a la ejecución del resto de los bataches en tamaño y disposición convenientes. En el caso de que el terreno sea medianamente resistente y sea difícil obtener la deformación necesaria del pilote para que ésta entre en carga, se podrá disponer una cuña intermedia que sea la que produzca el desplazamiento, procediendo después a su fijación por medio de soldadura.

Un segundo tipo de pantalla mixta de pilotes y bataches es el que puede emplearse en terrenos en los que existe un estrato superior de baja calidad, incluso con agua y otro profundo resistente, pero que, debido a las nece-

sidades de la obra, es preciso excavar. Este tipo de trabajos podría ejecutarse haciendo solamente el muro pantalla en la parte superior, excavando el terreno inferior sin precauciones y recalzando por puntos, si es necesario, el muro que, desde luego, deberá estar bien apeado; otra solución sería la de ejecución del muro pantalla continuo hasta el fondo de la excavación, lo cual resultará costoso en precio y en plazo, sobre todo si el terreno inferior es muy resistente. El procedimiento de la pantalla mixta que aquí describimos viene a resolver estos problemas económica y rápidamente.

Consiste en la ejecución del muro pantalla continuo en el estrato superior, convenientemente empotrado en el estrato resistente, pero dejando al hormigonar dentro de este muro encofrados formados por tubos de fibrocemento o de chapa, los cuales se dejarán sin hormigonar en la primera fase. En la segunda fase se procederá a la ejecución de pilotes a través de los encofrados tubulares anteriormente indicados, pasando el terreno de buena calidad que puede ser incluso roca, hasta llegar a la zona conveniente por debajo de la excavación total (ver fig. 14). Con ello queda asegurado el terreno inferior y podrá procederse a dicha excavación con las consiguientes precauciones

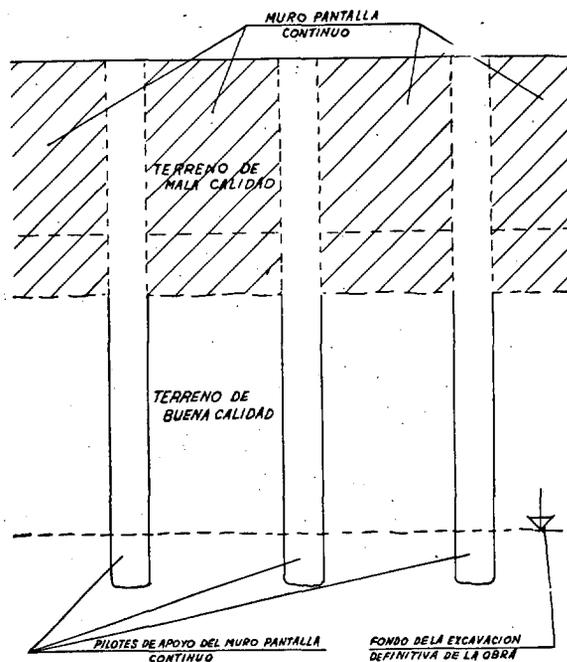


Fig. 14. — Esquema de la disposición del muro pantalla mixto cimentado sobre pilotes.

de arriostamiento y apeo de forjados o anclajes, pero con los bataches perfectamente cimentados y el terreno suficientemente mantenido. Una vez realizada la excavación podrá procederse, si es necesario, al relleno de la zona entre pilotes por medio de bovedillas de hormigón o ladrillo, de acuerdo con los empujes reales del terreno. Asimismo el distanciamiento entre pilotes y su armadura se podrán calcular teniendo en cuenta las indicaciones dadas en este artículo y los posibles esfuerzos horizontales transmitidos por el muro superior.

Sujeción del muro con anclajes o forjados.

Antes de terminar este artículo queremos indicar unas consideraciones sobre los distin-

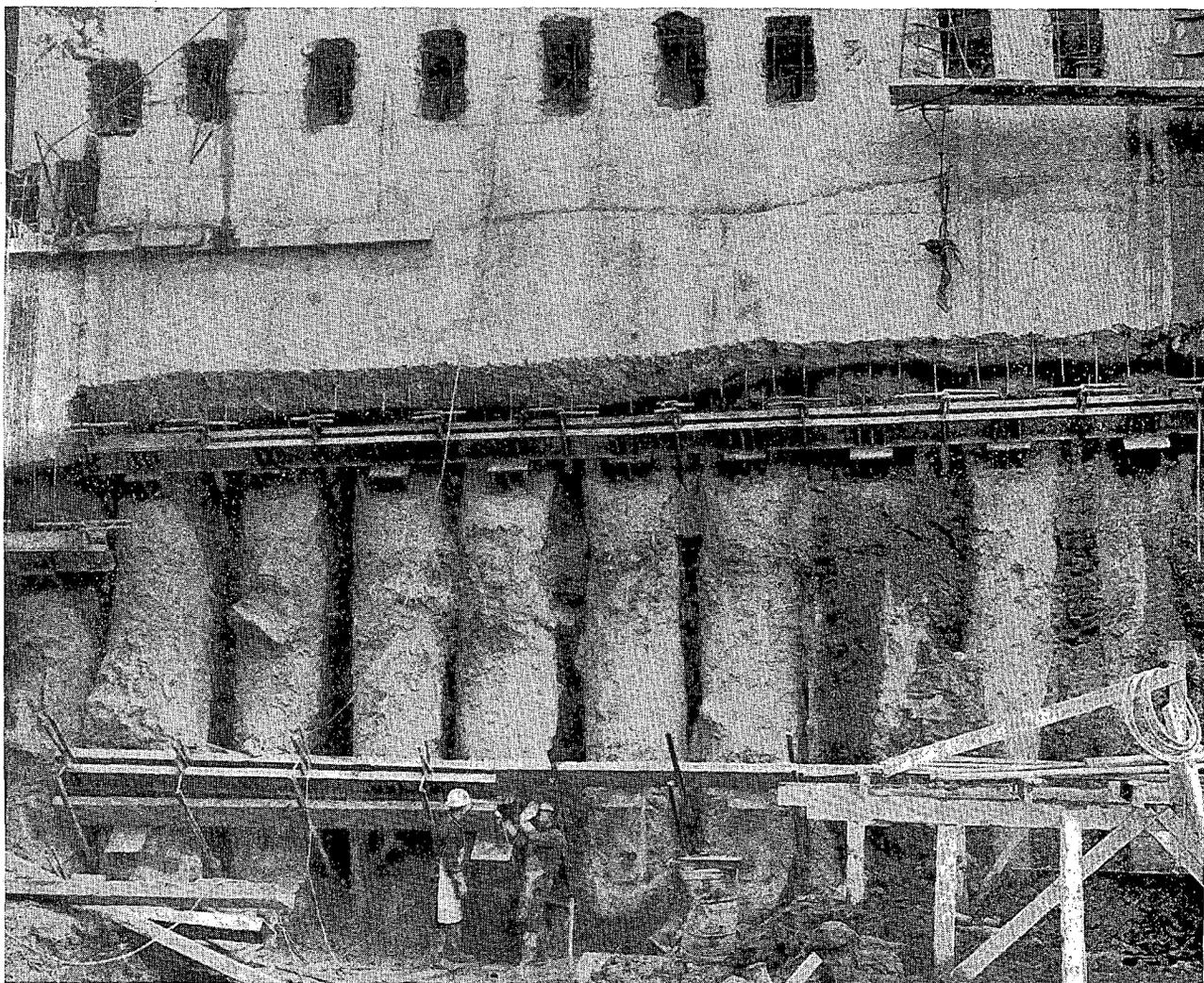
tos sistemas de apeo más comúnmente utilizados.

En principio, cualquiera de los dos sistemas de anclaje o forjado pueden ser utilizados para el caso de pantallas discontinuas.

Sistema de anclaje.

En el sistema de anclajes deberá estudiarse una viga de reparto que transmita el empuje de los pilotes a los anclajes (ver foto 2). Esta viga de reparto deberá sujetarse a la armadura de los pilotes o a elementos verticales, a poder ser metálicos, de forma que no deslice ésta cuando los anclajes entren en carga.

Si los anclajes no se tensan, se producirá una deformación en el muro hasta que aqué-



Fotografía 2. — Disposición de anclajes en el "muro pantalla" discontinuo realizado en la factoría Victorio Luzuriaga, de San Sebastián.

llos entren en carga soportando la cuña de empujes activos del terreno. Si, por el contrario, pretendemos que el muro no se deforme, tenemos los anclajes compensando con ellos los empujes activos de forma que no llegue a producirse el deslizamiento de la mencionada cuña de empujes.

Este sistema de anclajes tiene una serie de ventajas e inconvenientes, entre los que queremos destacar los siguientes:

Ventajas.

1.^a En terrenos en los que una vez realizada la excavación, debido a tener éste distintas cotas en el perímetro del solar, los esfuerzos transmitidos a uno de los lados no pudiera ser compensado por medio de los forjados al opuesto de menor cota.

2.^a Permiten hacer la excavación libremente dejando el hueco de sótanos exento.

3.^a Las operaciones de excavación pueden realizarse sin que esté aún definida la estructura interior, pudiendo ejecutar ésta por partes y a diferentes cotas, dejando para el final y con el destensado de anclajes la transmisión de esfuerzos en horizontal, lo cual resulta ventajoso, sobre todo en edificios muy amplios y de estructura muy compleja.

Inconvenientes.

1.^o Debido a necesitar una contrapresión del terreno sobre el mortero inyectado, con objeto de aumentar la adherencia $P \pi \varphi$, es necesario inyectar a la mayor presión posible. Esta presión no deberá superar el peso del terreno γh que tenemos sobre el taladro. Si este terreno está sin alterar no habrá inconvenientes, pero si se trata de terrenos con alcantarillas, conducciones viejas abandonadas, servicios generales, etc., pueden producirse comunicaciones con la inyección que impidan el conseguir una presión eficaz, que se pierda material de inyección en abundancia o que se produzcan roturas o colmataciones de galerías y servicios de uso general. Es, pues, una solución problemática y, por tanto, relativamente insegura.

2.^o Otro inconveniente importante puede ser el de que, si se alcanzan durante el tensado esfuerzos importantes, pueden llegar a produ-

cirse deformaciones (contracciones) en el terreno que afectarán a las estructuras, tales como servicios, edificaciones contiguas, etc., seriamente. En efecto, normalmente se ejecutan los anclajes en hileras y a distancias reducidas; las longitudes de los anclajes correspondientes a cada hilera suelen ser semejantes y el tensado se suele hacer uno a uno. Con todo ello vamos comprimiendo el terreno contra el muro, pues generalmente los terrenos suelen ser de módulo de elasticidad baja y el muro resulta menos deformable al hacer el tensado sucesivamente en cada anclaje. Con módulos de elasticidad entre 400 y 1.000 Kg./cm.², que es el caso de arcillas blandas o terrenos arcilloso-arenosos poco compactos, las deformaciones pueden ser del orden de varios centímetros; el hecho de tener todos los anclajes prácticamente la misma longitud, hace que se produzca un plano de rotura próximo al extremo de los anclajes, el cual podrá alcanzar la superficie formando una o varias grietas, de forma que si existen en esta zona estructuras, bien sean enterradas o sobre el terreno, quedarán afectadas irremisiblemente. Únicamente cuando no existan estas estructuras o encontremos un terreno resistente y poco deformable para la tensión a que se le somete, en el cual podemos anclar los tirantes, será cuando esta solución la podremos considerar como idónea.

Sistema de forjados.

En el caso de realizar el apeo con forjados, la ejecución de este sistema de trabajo se ejecuta, en general, de la forma siguiente:

1.^o Se procede a la ejecución del muro pantalla perimetral continuo o discontinuo.

2.^o A continuación se excava lo máximo que admita el muro perimetral sin necesidad de apeos.

3.^o Se ejecutan desde esta cota perforaciones en las que se colocan los pilares, generalmente metálicos, provisionales o definitivos, que van apoyados sobre una cimentación también ejecutada desde arriba, que a su vez podrá ser provisional (que soporte solamente el peso de los forjados de los sótanos) o definitiva si el terreno lo permite.

4.^o A continuación se procederá a la ejecución del forjado correspondiente a la planta de trabajo desde la que se han hecho los po-

zos y después, alternando sucesivas excavaciones con forjados, de arriba abajo se ejecutará la obra. Sobre este sistema hay variantes, pues en algunas edificaciones se pueden excavar a mayor profundidad en el centro, dejando contrafuertes de terreno mientras se realizan los forjados.

Ventajas.

1.^a Este sistema resulta ventajoso en lugares muy urbanizados, pues no afecta a las construcciones colindantes. Es la solución realmente más segura.

2.^a En solares reducidos y con plantas uniformes puede resultar más rápido, seguro y económico que el sistema de anclajes. Resultaría más económico, con seguridad, si pueden ejecutarse desde la primera cota de excavación los pilares con sus cimentaciones definitivas, pues el suplemento correspondiente a la excavación entre forjados no resultará generalmen-

te excesivo comparado con lo que resultaría el coste de los anclajes.

Inconvenientes.

1.^o Deberán conocerse las cargas definitivas transmitidas por la estructura.

2.^o En solares muy grandes y con distintos planos horizontales útiles para la transmisión de esfuerzos, deberá recurrirse a elementos de arriostramiento provisionales hasta la ejecución total de la estructura de sótanos.

3.^o La excavación se encarece a pesar de que puedan dejarse rampas y huecos en los forjados que la faciliten.

En resumen, deberán ser analizadas estas ventajas e inconvenientes de los dos sistemas, además de algunas otras particularidades en cada obra hasta conseguir la solución más idónea conjugando la seguridad, rapidez y economía, que, en definitiva, son las tres premisas determinantes de una solución constructiva.

BIBLIOGRAFIA

TSCHEBOTARIOFF, G.: *Mecánica del suelo. Cimientos y estructura de tierras*. Un vol., 642 págs. Aguilar. Madrid, 1967.

TERZAGHI, K.: *Erdbaumechanik*. Un vol., 397 págs. Leipzig, 1925.

TERZAGHI, K.: *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. Un vol., 678 págs. El Ateneo. Buenos Aires, 1963.

ENTRECANALES, J.: *Geotecnia, cimientos y puentes de fábrica (muros y taludes)*. Un vol., 286 págs. E. E. de I. C. C. P. Madrid, 1952.

JIMENEZ MONTOYA, P.: *Hormigón armado*. Dos vol., texto y ábacos. Madrid, 1966.

Normas MV-101/62, del Ministerio de la Vivienda. Madrid.