

CALCULO Y COMPROBACION DE PILOTES MV CON HINCA E INYECCION SIMULTANEAS

Por MIGUEL FORCAT

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Presenta el autor una completa información sobre el tipo de pilote reseñado en el epígrafe, dando normas para su cálculo y presupuesto y expresando finalmente las ventajas que a su juicio presenta en muchos casos.

1. Características de los pilotes MV.

A continuación se resumen las cualidades de estos pilotes para aquellos lectores que no hayan tenido conocimiento de este sistema:

1.1. Se trata de un pilote metálico (fig. 1.^a) que consta de un fuste formado generalmente de 2 U soldadas en cajón, unido a una zapata de chapa provista de un borde cortante que al hincarse en el terreno por percusión, desplaza una sección de éste superior a la sección del fuste. El volumen así creado se rellena paulatinamente con una inyección de lechada de cemento, mortero u hormigón fino, que va aumentando su presión conforme se hince el pilote, llegando en casos normales hasta unas seis atmósferas. También se emplean como fustes tubos de acero y tablestacas o perfiles laminados con tubo de inyección acoplado que puede recuperarse o no.

También se pueden proyectar estos pilotes de hormigón pretensado.

1.2. Como durante la hince sólo hay que vencer la resistencia de la zapata y, además, pueden suplementarse los fustes mediante soldadura durante aquélla cuando se hinque a grandes profundidades sin más que añadir un retardador a la masa de inyección, tanto las mazas como la maquinaria de hince son muy simples, sobre todo comparadas con las que requieren los pilotajes prefabricados o *in situ*.

1.3. La capacidad portante de estos pilotes es mucho más elevada que la de cualquier otro sistema, como consecuencia de la inyección a presión que crea una íntima unión y, según los terrenos, hasta una cierta consolidación de los suelos vecinos. Esto permite usar unas resistencias al rozamiento lateral que, en muchos casos, son del orden de tres veces las que pueden tenerse en cuenta con los otros sistemas.

1.4. Como consecuencia de lo anterior, no sólo la cimentación es más segura en orden a los asientos, tan temidos de los constructores, que suelen presentarse a lo largo de los meses y años de la terminación de los trabajos, sino que en muchas ocasiones corrientes en que no parece posible competir en precio con los sistemas habituales dado el elevado coste por metro lineal de los pilotes MV, al hacer los cálculos ocurre lo contrario, si se comparan los costes de los diferentes tipos

de pilotaje por tonelada de carga práctica, dado el menor número de metros totales de hınca que se necesita con los pilotes MV.

1.5. En pilotajes bajo el agua se garantiza la estanqueidad del hueco exterior del fuste mediante la colocación de un obturador o tapón que puede ser de varias formas. En la figura 2.ª se esquematiza este proceso de dos maneras diferentes.

1.6. La gama de fabricación del sistema MV es prácticamente variadísima. Puede atravesar toda clase de terrenos salvo rocas compactas. Existen zapatas más aguzadas para terrenos duros, y con bordes cortantes extraduros para ciertas rocas de

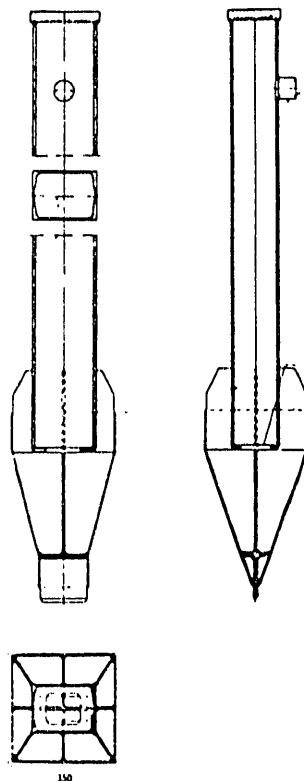


Figura 1.ª

compuestas. Se pueden hincar pilotes desde 15 cm. hasta 50 cm. de lado o diámetro y se ha llegado a cargas límites de más de 300 toneladas/pilote y como pilotes de tracción o anclaje de tablestacados, postes de energía eléctrica, soleras con subpresiones, etc., no tienen rival. Es decir, que puede estudiarse para cada caso las dimensiones, forma y carga más conveniente al problema planteado.

También se pueden fabricar estos pilotes de hormigón pretensado.

2. Cálculo general de los pilotes MV.

Dada la enorme variedad de formas y tamaños de estos pilotes, no se puede pretender en un artículo abarcar el uso y cálculo de todos ellos. En lo que sigue nos referiremos exclusivamente a los pilotes MV normalizados corrientes — Ser

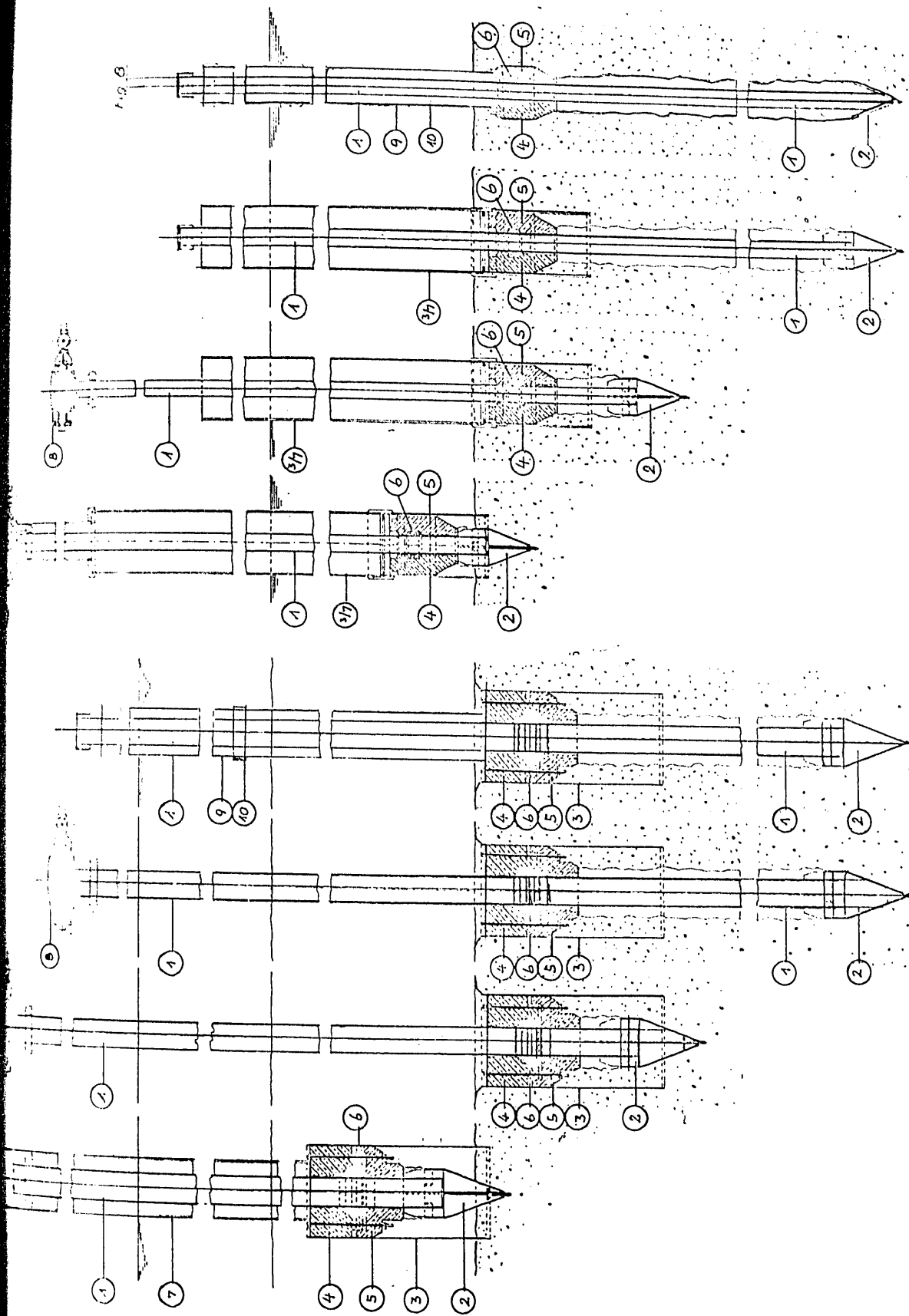


Figura 2.

MV-NS con fustes en doble U — con los cuales los proyectistas podrán hacer siempre un proyecto y valoraciones con gran aproximación en casi todos los casos, aunque algunas veces un estudio posterior de ejecución puede aconsejar acudir a alguna variante más adecuada al caso, generalmente, sin alteración en las cifras presupuestadas.

Los pilotes serán de sección cuadrada de desplazamiento, porque los cilindricos son más caros en España, por el mayor precio y perfiles especiales de tubo de acero que se requieren.

2.1. Una vez conocido el resultado de los *sondeos* practicados en el lugar de la cimentación, cuyo número y distribución, así como las eventuales pruebas de penetración, no requieren consideraciones diferentes de las necesarias para otros temas de cimentación, se obtiene uno o varios terrenos tipos a los que aplicando la tabla de la figura 3.^a. Cuando una de las capas se refiere a un suelo compuesto de varias clasificaciones de la referida tabla, se toma un coeficiente promedio, en las proporciones más aproximadas en que se conozcan estén los referidos elementos. Se hacen varias hipótesis de pilotes dentro de las que la experiencia considera como más idóneas o económicas, pudiendo llevarse el cálculo simultáneamente.

COEFICIENTES DE ROZAMIENTO LATERAL PARA PILOTES MV	
Clase de terreno	Coefficientes Kg./cm. ²
Ciencos, lodos cenagosos	0,30
Fangos vegetales	0,35
Turbas	0,40
Limos (0,06 a 0,02 mm.)	0,55
Arena fina (0,2 a 0,06 mm.)	0,65
Loes, loes arcillosos	0,70
Barro arcilloso	0,75
Barro con cantos rodados	0,80
Arcillas	0,85
Arena media (0,2 a 0,6 mm.)	0,95
Margas	1,00
Margas con cantos rodados	1,15
Arenas (0,6 a 2 mm.)	1,20
Arenas gruesas (0,6 a 2 mm.)	1,30
Grava fina (2 a 6 mm.)	1,50
Grava media (6 a 20 mm.)	1,85
Grava y terrenos gravosos	2,10
Grava gruesa (20 a 63 mm.)	2,40
Piedras, rocas (más de 63 mm.)	2,50

Figura 3.^a

2.2. Se marcan las cargas prácticas de los pilotes, con las que se escogen los fustes correspondientes (casilla 3 de la figura 4.^a) y se juega también con las zapatas tanteando una o dos de ellas para cada carga y fuste escogido (cuadro de la figura 5.^a). Cuanto más duro sea el terreno o existan piedras, más pequeña deberá ser la diferencia entre la sección de desplazamiento de la zapata y la sección del fuste.

2.3. A pesar de que los pilotes MV trabajan esencialmente al rozamiento lateral, en oposición a los demás tipos de pilotes que trabajan casi exclusivamente por la punta, a veces la presencia de un firme tenaz a escasa profundidad de la superficie del terreno, aconseja fijar en el tanteo la longitud de los pilotes, con lo que

CARGAS DE COMPRESION Y TRACCION ADMISIBLES EN LOS FUSTES []			
Perfil fuste mm. (1)	Peso Kg./m. l. (2)	Compresión máxima admisible con acero laminado ENSIDESA normal (3)	Tracción máxima admisible en perfiles ENSIDESA (4)
80 × 90	17,8	36,80 Tm.	26,40 Tm.
100 × 100	21,8	46,56 »	32,40 »
120 × 110	27,4	59,36 »	40,80 »
140 × 120	32,8	72,38 »	48,96 »
160 × 130	38,6	86,40 »	57,60 »
180 × 140	45,0	101,92 »	67,20 »
200 × 150	52,0	118,43 »	77,28 »
220 × 160	60,0	137,98 »	89,76 »
240 × 170	68,0	157,24 »	101,52 »
260 × 180	78,0	179,80 »	115,92 »
280 × 190	86,0	200,28 »	127,92 »
300 × 200	96,0	222,52 »	141,12 »

Se toman como cargas prácticas del acero, las siguientes:
 — a tracción 1 200 Kg./cm.².
 — a compresión 1 400 Kg./cm.².
 En este último caso, se toma, además, la resistencia del hormigón en el núcleo del fuste a razón de 120 Kg./cm.².

Figura 4.ª

DATOS ESENCIALES PARA EL PROYECTO Y CALCULO DE PILOTES MV DE LAS ZAPATAS DE SERIE NORMAL				
Tipo (1)	Sección máximo desplazamiento (2)	Altura total (3)	Longitud de inyección inactiva (4)	Peso total (5)
NS — 0	150 × 150 mm.	420 mm.	320 mm.	10,26 Kg.
» — 1	175 × 175 »	455 »	355 »	12,71 »
» — 2	200 × 200 »	490 »	390 »	17,54 »
» — 3	225 × 225 »	530 »	430 »	21,46 »
» — 4	250 × 250 »	560 »	460 »	25,51 »
» — 5	275 × 275 »	600 »	500 »	30,31 »
» — 6	300 × 300 »	695 »	550 »	44,56 »
» — 7	325 × 325 »	730 »	590 »	51,16 »
» — 8	350 × 350 »	760 »	620 »	57,64 »
» — 9	375 × 375 »	870 »	670 »	79,15 »
» — 10	400 × 400 »	900 »	700 »	86,89 »
» — 11	450 × 450 »	1 000 »	750 »	103,76 »
» — 12	500 × 500 »	1 100 »	850 »	125,26 »

Figura 5.ª

pueden quedar como variables o las secciones de desplazamiento de zapatas para pilotes con cargas prácticas dadas o, a la inversa, las cargas admisibles de los pilotes para secciones de zapatas previstas.

2.4. La comprobación de los pilotes se hace con las cargas límites, tomando un coeficiente de seguridad igual a 2.

El rozamiento lateral se aplica sobre la superficie teórica lateral del terreno, reducida por el desplazamiento del mismo con la hincada de la zapata, dejando sin considerar la capa superficial del suelo en un espesor de 1 a 2 m., según sean menos o más blandos; los rellenos no deben considerarse, a menos de estar bien compactados, como es el caso del ejemplo que se da posteriormente.

2.5. La capa del terreno donde se inserta la punta, provoca una resistencia a compresión del pilote análoga a las de cualquier otro tipo. Para esta resistencia en la punta se pueden tomar las cifras habituales que dan los libros de mecánica de suelos, las instrucciones de los diferentes países o, más rápidamente, se toma — como preconiza el Sr. Müller — 50 veces el coeficiente de rozamiento lateral dado en la tabla de la figura 3.^a para el tipo de terreno donde se empotra la punta (1). Naturalmente, que para aceptar esta carga hay que asegurarse por los sondeos que en un espesor prudencial por debajo de la punta no exista una capa de terreno notablemente más blanda, en su proximidad.

2.6. A continuación se da, para mayor claridad, un ejemplo real en el que hay que cimentar unos pies derechos con carga práctica total de 400 Tm. Se dispone de unos sondeos que, como casi siempre ocurre, están insuficientes de datos, sobre todo en relación con la profundidad real del firme de areniscas compactas en algunos puntos. Interesa para prevenirse contra los asentamientos, que los pilotes lleguen al firme relativamente próximo, con una absorción de cargas por rozamiento lateral de gran importancia, por lo que hay que forzar la sección de zapata. Como los terrenos son en parte duros, también hay que forzar la sección de fuste, por razones de hincada.

Después de varios tanteos con grupos de 3 y 4 pilotes por pie derecho, se hace el siguiente cálculo:

a) Terreno:

- 4,20 m. arcilla marrón (SPT = 18-33).
- 2 m. arcilla con arena o gravas o margas (SPT = 25-50).
- 2 m. margas o arcillas con gravas (SPT > 50).
- Debajo, margas muy duras o areniscas, en gran espesor.

b) Resistencias a rozamiento lateral (fig. 3.^a).

4,2 m. arcilla marrón	8,5 Tm./m. ² .
2 m. arcilla con arenas: $8,5 \times 0,7 + 9,5 \times 0,3$	8,8 >
2 m. margas, arcillas con grava	10,5 >

c) Resistencias en la punta (apart. 2.5).

En las margas con grava $10,5 \times 50$	525 Tm./m. ² .
En las margas duras o areniscas	750 >

(En las areniscas compactas, la resistencia que suele tomarse, llega al doble de la cifra últimamente indicada).

(1) Esta valoración empírica ha sido preconizada por las experiencias de varios geotécnicos de diferentes países y la experiencia ha demostrado su idoneidad para el cálculo de los pilotes MV.

d) Hipótesis de carga práctica		100 Tm.
e) Carga límite		200 Tm.
f) Fuste (superior al necesario por hincada dura) []	200 × 150 mm.	
g) Sección desplazamiento zapata	400 × 400 mm.	450 × 450 mm.
h) Carga límite punta (margas): $525 \times 0,40^2$...	84 Tm.	106,5 Tm.
i) Carga límite rozamiento lateral 200-84	116 »	93,5 »
j) Resistencia al rozamiento dos primeras capas $4 \times 0,4 (4,2 \times 8, 5 + 2 \times 8,8)$	85 »	96,0 »
k) Empotran. Tercera capa $\frac{116-85}{4 \times 0,4 \times 10,5}$	1,84 m.	- 0,15 m.
l) Longitud útil fuste: $4,2 + 2 + 1,84$	8,04 m.	6,05 m.
m) Longitud total pilote: $0,5 + 0,70 + 8,04$...	9,24 m.	7,35 m.

(La longitud total del pilote se obtiene sumando a la longitud útil (l), la de la parte de la zapata que se da en la casilla 4 de la figura 5.^a y la del empotramiento de la parte alta en el encepado que habitualmente es 0,50 m.).

2.7. En pilotes que alcancen capas de terrenos sin cohesión o muy pequeña (arenas y gravas) situados en profundidades mayores de 5 m., se pueden incrementar los coeficientes de rozamiento lateral de la tabla de la figura 3.^a, en cantidades apreciables según los estudios y experimentos del Dr. Ing. Jelinek, Director del Laboratorio de Mecánica del Suelo de la Escuela Técnica Superior de Munich.

Estos incrementos uniformemente crecientes hasta los 10 m. de profundidad — a partir de los 10 m. permanecen prácticamente constantes —, son los siguientes:

Arenas finas	De 0,65 a 1,3 Kg./cm. ² .
Arenas medias	De 0,95 a 1,7 »
Arenas medias con gravas	De 1,1 a 1,9 »
Gravas finas y medias con arenas	De 1,50 a 2,1 »
Gravas medias con arenas gruesas	De 1,85 a 2,3 »
Gravas gruesas con arenas gruesas	De 2,2 a 2,7 »

Este llamado efecto de profundidad sólo se ha observado en terrenos poco cohesivos. En suelos intermedios o de compuesta composición se calculan valores en proporción análoga.

En terrenos predominantemente arcillosos es prácticamente constante en cualquier horizonte.

3. Cálculo mediante el uso de penetrómetros.

Cuando se llevan a cabo pruebas de penetración en el estudio de cimentación de una obra, cabe considerar los siguientes casos:

3.1. Se usa un penetrómetro dinámico con toma de muestras — el SPT o análogo

go —, o bien se hacen sondeos y pruebas de penetración separadamente con los aparatos correspondientes.

En este caso, se pueden fijar los coeficientes de rozamiento lateral de la tabla de la figura 3.^a con las muestras de terreno y la carga límite en la punta a cada profundidad con la prueba de penetración, según la técnica correspondiente al penetrómetro usado. Así, pues, no se hace uso, en este caso, de la carga en la punta obtenida con el coeficiente 50 aplicado a la resistencia al rozamiento, dado en el artículo 2 precedente.

3.2. Cuando se dispone de penetrómetros dinámicos o estáticos de cono que sólo determinan diagramas de resistencias en la punta, se podrá fijar únicamente la resistencia en la punta de un pilote de dimensiones dadas, se hará una hipótesis para la resistencia al rozamiento lateral análoga a la del procedimiento general expuesto en el apartado 2, dividiendo por 50 las diferentes resistencias en la punta obtenidas en el diagrama de penetración, o de sus promedios, o bien de acuerdo con los datos obtenidos de la clase de terreno de la localidad. Se podrá hacer después comprobación de las hipótesis hechas, clavando uno o varios pilotes de prueba y sometiénolos a unas pruebas de carga que nos darán sus capacidades portantes y, por tanto, el número de pilotes que hay que hincar.

3.3. Si se cuenta con penetrómetros de cono con manguito de fricción, se obtienen los correspondientes diagramas de penetración y del rozamiento lateral a lo largo del pilote cuyos valores sustituyen a los de la tabla de la figura 3.^a. De todas maneras cabe hacer comprobaciones y posibles correcciones de los valores así obtenidos para rozamiento lateral en las diferentes capas, acudiendo a las recientes experiencias expuestas por Begemann en el último Congreso Internacional de Mecánica del Suelo de Montreal, a los que probablemente nos referiremos en otro artículo sobre pilotajes en general.

4. Comprobación de los pilotes MV.

Pero sabido es que debe huirse con carácter general de las pruebas de carga que son caras para la Administración, molestas y que entorpecen la marcha de las obras retrasándolas. Además, sobre todo en el caso de los pilotes MV, las capacidades portantes límites que se encuentran suelen ser superiores a lo previsto en el cálculo con lo que el gasto, retraso y molestias no ha tenido más efectividad real que la de comprobación y no la de rectificación.

4.1. Por otra parte, existe un procedimiento de comprobación que, si bien es total en el caso de pilotes hincados prefabricados — con las naturales reservas de todos conocidos — dado que éstos prácticamente casi siempre sólo se considera resistencia por punta, resuelve satisfactoria aunque parcialmente la hincada de los pilotes MV. Se trata de utilizar una de las muchas fórmulas dinámicas existentes que relacionan los rechazos obtenidos con la capacidad portante del pilote en la punta. A estos efectos es aconsejable la utilización de la fórmula de Hiley — con coeficiente de seguridad de dos en la inmensa mayoría de los casos — que es más segura que las otras, como la tan utilizada fórmula holandesa, por ejemplo.

Esta comprobación de la carga límite en la punta se lleva a cabo estipulando, en cada caso, los rechazos admisibles — para cada longitud de hincada a partir de cierta profundidad mínima — con una maza determinada a fin de asegurar la longitud necesaria de pilote para absorber por rozamiento la parte de carga que le co-

responda. La diferencia de matiz con los pilotes prefabricados, debida al rozamiento lateral es, pues, clara y se debe, fundamentalmente, a la gran proporción de la carga portante que absorbe al rozamiento a causa de la inyección a presión, como antes se dijo.

4.2. La resistencia al rozamiento de los pilotes MV no tiene más comprobación directa que las pruebas de extracción. En estos 10 últimos años en que se han hincado estos pilotes, se han hecho innumerables pruebas en laboratorios, y, sobre todo, en obras. La experiencia en todos los casos ha sido tan brillante que paulatinamente han ido decreciendo aquéllas hasta cesar prácticamente del todo. En la actualidad, sólo se llevan a cabo en casos especialísimos y de gran responsabilidad. Indudablemente, el éxito de las experiencias y pruebas — de las que poseemos abundante información — ha sido lo que ha hecho que las Administraciones de los países hayan cedido en este aspecto, pero también hay que pensar lo que para un terreno puede representar inyectar normalmente a varias atmósferas de presión, con posibilidad de aplicar sobrepresión al terminar la hinca, cuando se trate de algún caso muy especial o peligroso, mediante la aplicación de un tapón alrededor del pilote en la superficie del terreno.

Pero también ha contribuido a lo anterior, la real importancia — muy superior a lo que parece a primera vista — que representa el conocimiento durante la hinca de las presiones de inyección y del consumo de lechada por unidad de volumen teórico a llenar — lo que se llama *factor de inyección*; esto es, el cociente entre el volumen inyectado y el teórico, correspondiente al desplazamiento originado por la zapata — que nos da dos elementos decisivos de la futura capacidad portante del pilote + de bastante más importancia que la correspondencia rechazos — cargas límites de las fórmulas dinámicas que tan alto grado de credibilidad absoluta han tenido entre los técnicos hasta hace relativamente pocos años.

5. Presupuesto.

5.1. Las soluciones tanteadas según lo expuesto en 2 o en 3, se valorarán calculando el peso de los pilotes resultantes con arreglo a las casillas 2 y 5 de los cuadros 4 y 5, y aplicando un precio similar por exceso al corriente en la actualidad en trabajos de calderería con soldaduras continuas. Así, se obtendrá un precio del metro lineal de pilote, teniendo en cuenta el empotramiento en encepados, zapatas, etc.

5.2. El precio de la hinca oscila, según la importancia del pilote (volumen de inyección), profundidad de línea (presión de inyección), importancia del martinete, etcétera, y se compone:

a) De la hinca propiamente dicha, con valores análogos a los admitidos para otros pilotes hincados a percusión, y

b) De la inyección, calculada con valores similares a las inyecciones normales de mortero de cemento con relación agua-cemento pequeña. Se toma un factor de inyección 1, 2 (ver apart. 4.2). Con ambos precios se suele componer uno solo en pesetas/metro lineal de hinca.

5.3. Para pilotes a tracción o a compresión: no verticales los precios de hinca deben calcularse en función del equipo que haya que utilizarse y de las dificultades previsibles de la misma.

5.4. Aunque los anteriores precios resultan aparentemente elevados, en muchos casos han resultado competitivos con cualquier otro sistema si se calcula el coste