



Madrid, 24 de Junio de 2008,  
Jornada Técnica

El ensayo presiométrico en el proyecto geotécnico

# Evolución del método presiométrico para el cálculo de las cimentaciones profundas

Michel Bustamante & Luigi Gianceselli

## 1. INTRODUCCIÓN y CONVENCIONES

El método fue utilizado desde el final de los años 60 y ha sido objeto de artículos (Ménard, 1963) (Bustamante & Gianceselli, 1981, 1982) y de obras de referencia (Baguelin, Jézéquel, Shields, 1978) (Briaud, 1992), (Frank, 1999).

Por razones prácticas y por convención se ha definido la carga límite  $Q_l$  como la carga correspondiente a un asiento en cabeza :

$$ST \geq \varnothing/10 + \Delta e,$$

$\varnothing$  - el diámetro del pilote,  
 $\Delta e$  - el acortamiento elastico

Para calcular  $Q_l$ , se recurre a la bien conocida expresión :

$$Ql = A Kp pl^* + P \int_0^h qs(z) dz$$

**A** - área de la sección en punta

**kp** - factor de carga de la punta

**ple\*** - la presión límite neta equivalente bajo la punta

**P** - el perímetro de la sección recta del pilote

**qs(z)** - el rozamiento lateral unitario límite a la cota z

**h** - la altura del fuste a lo largo de la cual se ejerce el rozamiento

Los parámetros **kp** y **qs** son esenciales para calcular **Ql**.

La peculiaridad del método reside en que los valores de estos parámetros resultan de medidas en pilotes reales con instrumentación que han alcanzado su carga límite convencional.

3



Figura 1 – Colocación de un extensómetro removible en un pilote perforado entubado

4

Pointe des Grives - 2006



Vasco de Gamma - 1999



Grand Littoral- Marseille - 2004



Polder d'Erstein - 2000



5

Guinée- Bissau - 2007



Viaque de Battice - 2003



6

## 2. EL SOPORTE EXPERIMENTAL DEL MÉTODO

### ○ El ajuste geotécnico

Los datos objeto de síntesis han sido recopilados en un total de **215** emplazamientos de terreno, donde se ha hecho el mayor posible de ensayos de reconocimiento.

En su mayor parte fueron ensayos presiométricos PMT (sonda Ménard) y ensayos penetrométricos estáticos CPT, y a veces también ensayos SPT.

Cuando los suelos examinados lo permitían se realizaron ensayos de laboratorio, corrientes o específicos (por ejemplo, el contenido en calcita).

7

Tabla 1 - Viabilidad de los ensayos in situ y de laboratorio

Tipo de ensayo	realización			
	total (1)	parcial(2)	posible	irrealizable
CPT ( $q_c$ )	60 (29,4%)	79 (38,7%)	23 (11,3%)	42 <b>(20,6%)</b>
PMT (pl)	155 (76%)	3 (1,5%)	46 (22,5%)	0 <b>(0%)</b>
S.P.T (N)	26 (12,7%)	54 (26,5%)	72 (35,3%)	52 <b>(25,5%)</b>
laboratorio (C et $\phi$ )	21 (10,3%)	67 (32,8%)	69 (33,8%)	47 <b>(23,1%)</b>

En la practica, debido al encuentro frecuente de suelos endurecidos o claramente pulverulentos, de rocas alteradas y fragmentadas, el presiómetro Ménard resulta ser la técnica de reconocimiento más universal, lo cual justifica la elección de este ensayo como referencia geotécnica

8

## LAS GRANDES CATEGORÍAS DE SUELOS EXAMINADOS :

- arcillas y limos,
- arenas y gravas,
- cretas,
- margas y margas calcáreas,
- roca alterada y fragmentada

Se ensayaron también pilotes en suelos especiales : coralinos, volcánicos, susceptibles, expansivos, etc..., pero los resultados obtenidos en estos casos son aún demasiado fragmentarios como para extraer de ellos conclusiones más generales que permitan un estudio diferenciado.

9

### Las técnicas de puesta en obra estudiadas

El método actualizado permite distinguir explícitamente 26 técnicas de pilotes, frente a las 17 del método anterior. La tabla II recopila las técnicas consideradas y aporta algunas características referentes a la gama de diámetros  $\varnothing$  nominales máximos y mínimos, la longitud de empotramiento **H** y el número de pilotes asociadas a cada una de las técnicas consideradas :

$$100 \leq \varnothing \leq 2000 \text{ mm} \quad 4 \leq H \leq 78 \text{ m}$$

De un total de 561 ensayos de carga estáticos, 276 de ellos, o sea el 49%, alcanzaron su carga límite convencional. En los restantes, la carga fue extrapolada hasta ese valor por alguno de los métodos analíticos (Borel, Bustamante, Gianceselli, 2004). El 13% de los pilotes fue sometido a ensayos de tracción.

10

En cuanto a la tabla II, cabe subrayar que las técnicas del mismo tipo fueron reagrupadas e identificadas por un mismo código. Esta subdivisión es útil a la hora de elegir los valores del factor de punta **kp** (ver el apartado 4.1, tabla III, más adelante).

*Luigi: démarre ici le début du Tableau II !!!!!!! En la limitant au code 3, le restant allant à la suite !*

Código	N°	nb.	Ø <sup>(1)</sup> (mm)	H <sup>(2)</sup> (m)	Técnica de construcción
<b>1</b>	1	8	500/2000	11.5/23	Perforado simple (pilote o barreta), <b>FS</b>
	2	64	270/1800	6/78	Perforado con lodo (pilote o barreta), <b>FB</b>
	3	2	270/1200	20/56	Perforado entubado (tubo perdido), <b>FTP</b>
	4	28	420/1100	5.5/29	Perforado entubado (tubo recuperado), <b>FTR</b>
	5	4	520/880	19/27	Perforado simple o con lodo, ranurado o pozo, <b>FSR, FBR, PU</b>
<b>2</b>	6	50	410/980	4.5/30	Perforado mecha continua simple o doble-rotación, <b>FTC, FTC</b>
<b>3</b>	7	48	310/710	5/19.5	Atornillado colado en sitio, <b>VM</b>
	8	1	650	13.5	Atornillado entubado, <b>VT</b>
<b>4</b>	9	30	280/520	6.5/72.5	Hincado hormigón prefabricado o precomprimido, <b>BPF, BPR</b>
	10	15	250/600	8.9/20	Hincado recubierto (hormigón - mortero - lechada), <b>BE</b>
	11	19	330/610	4/29.5	Hincado colado en sitio, <b>BM</b>
	12	27	170/810	4.5/45	Hincado tubo acero cerrado, <b>BAF</b>



Código	N°	nb.	$\varnothing$ <sup>(1)</sup> (mm)	H <sup>(2)</sup> (m)	Técnica de construcción
5	13	27	190/1220	8/70	Hincado tubo acero abierto, <b>BAO</b>
6	14	23	260/600	6/64	Hincado perfil H, <b>HB</b>
	15	4	260/430	9/15,5	Hincado perfil H inyectado, <b>HBi</b>
7	16	15	-	3,5/12,5	Tablestacas hincadas, <b>PP</b>
1	17		80/140	4/12	Micropilote tipo I, <b>M1</b>
	18	8	120/810	8,5/37,5	Micropilote tipo II, <b>M2</b>
8	19	23	100/1220	8,5/67	Pilote o micropilote inyectado IGU (tipo III), <b>PIGU, MIGU</b>
	20	20	130/660	7/39	Pilote o micropilote inyectado IRS (type IV), <b>PIRS, MIRS</b>

(1) Diámetro teórico  $\varnothing$  mínimo y máximo

(2) Longitud enterrada mínima y máxima

## LA ELECCIÓN DE **QS** Y **kp**

Los parámetros **kp** y **qs** son esenciales para calcular **Ql**. Sus valores vienen dados por las tablas III y IV, y por los ábacos de la figura 2. Estos valores se deben aplicar teniendo en cuenta los comentarios adjuntos

### El factor de resistencia por punta **kp**

Éste debe elegirse en función de la técnica de pilote utilizada. Una vez determinado el código correspondiente a esa técnica y en función de la categoría del suelo en el que está empotrada la punta del pilote, el valor de **kp** se toma de la tabla III.

Tabla III. Valores del factor de resistencia por punta  $k_p$ .

Código	Arcillas Limos	Arenas Gravas	Creta	Margas-calcáreas	Roca alterada
1	1,25	1,2	1,6	1,6 *	1,6
2	1,3	1,65	2,0	2,0	2,0
3	1,7	3,9	2,6	2,3	2,3
4	1,4	3,1	2,4	2,4 *	2,4 *
5	1,1	2,0	1,1	1,1 *	1,1 *
6	1,4	3,1	2,4	1,4 *	1,4 *
7	1,1	1,1	1,1	1,1 *	1,1 *
8	1,4	1,6	1,8	1,8	1,5*

\* se recomienda efectuar un ensayo para adoptar valores más altos de  $k_p$ .

15

### El rozamiento lateral unitario límite $q_s$

La elección del ábaco  $Q_1, Q_2, \dots, Q_{10}$ , con arreglo a la técnica de ejecución y a la naturaleza de los suelos que atraviesa el pilote se hace según la tabla IV. Del ábaco elegido se obtiene el valor de  $q_s$  en la figura 2 para cada uno de los estratos que atraviesa el pilote a partir del valor de su compacidad media, evaluada a partir del presiómetro.

Técnica de realización	Arcilla Limos	Arenas Gravas	Creta	Marga calcárea	Roca alterada
Perforado simple	Q2	Q2*	Q5	Q4	Q6**
Perforado con lodo	Q2	Q2	Q5	Q4	Q6**
Perforado entubado (tubo perdido)	Q1	Q1	Q1	Q2	Q1**
Perforado entubado (tubo recuperado)	Q1	Q2	Q4	Q4	Q4**
Perforado simple o con lodo, ranurado o pozo	Q3	Q3*	Q5	Q4	Q6
Perforado mecha continua simple o doble-rotación	Q2	Q4	Q3	Q5	Q5**

16



Técnica de realización	Arcilla Limos	Arenas Gravas	Creta	Marga calcárea	Roca alterada
Atornillado colado en sitio	Q3	Q5	Q4	Q4	Q4**
Atornillado entubado	Q1	Q2	Q2	Q2	Q2**
Hincado hormigón prefabricado o precomprimido	Q3	Q3**	Q2	Q2**	****
Hincado recubierto (hormigon - mortero - lechada)	Q6	Q8	Q7	Q7	****
Hincado colado en sitio	Q2	Q3	Q6**	Q5**	****
Hincado tubo acero cerrado	Q2	Q2**	Q1	Q2**	****
Hincado tubo acero abierto	Q2	Q1	Q1	Q2	****
Hincado perfil H	Q2	Q2	Q1	Q2**	****
Hincado perfil H injectado IGU ou IRS	Q6	Q8	Q7	Q7	****
Tablestacas hincadas	Q2	Q2	Q1	Q2**	****
Micropilote tipo I	Q1	Q1	Q1	Q2	Q6**
Micropilote tipo II	Q1	Q1	Q1	Q2	Q6**
Pilote o micropilote injectado IGU (tipo III)***	Q6	Q8	Q7	Q7	Q9**
Pilote o micropilote injectado IRS (type IV)***	Q9	Q9	Q9	Q9	Q10**

Tabla IV. Valores del rozamiento unitario límite qs.

17

- \* si la resistencia del suelo lo permite  
 \*\* realizar ensayo de carga para justificar valores superiores  
 \*\*\* para el cálculo del perímetro, ver el apartado 5.1  
 \*\*\*\* en los casos en los que la alteración permita el empotramiento, tomar los valores propuestos para la marga calcárea o superiores si se justifican con un ensayo de carga u otra referencia.

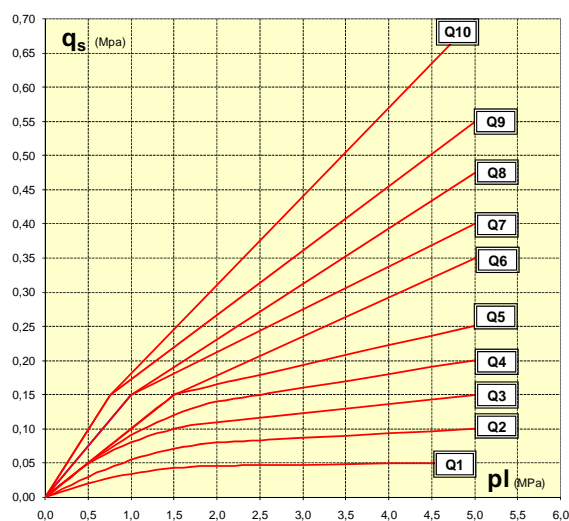


Figura 2. Ábacos para el cálculo de qs.

18

#### 4. OBSERVACIONES SOBRE LA APLICACIÓN DE LOS

##### PARÁMETROS QS Y kP.

La aplicación de los parámetros  $q_s$  y  $k_p$  se hace en relación con las otras magnitudes  $A$ ,  $\emptyset$ ,  $p_{le}^*$  y  $h$  de la expresión general [1].

##### **Elección de A y P y otras condiciones particulares**

La elección de estos parámetros está sujeta a ciertas precisiones según la técnica de construcción utilizada:

- Pilote atornillado (vissé) moldeado (VM): se adoptará  $0.9\emptyset$  para el cálculo de la sección en la punta y  $\emptyset$  para el cálculo del rozamiento lateral. Sobre esta técnica y para un estudio más detallado, vease la publicación de los autores (Bustamante, Gianceselli, 2005).
- Pilote de hormigón prefabricado (BPF) o pretensado (BPR): para una longitud  $h$  de más de 30 m y en suelos cohesivos se reducirá el rozamiento en un 20%.

19

- Pilote hincado recubierto (enrobé) (BE): debe tomarse el área y el perímetro de la camisa perdida para el cálculo del término de punta y del rozamiento lateral.
- Pilote hincado de acero abierto (BAO), de perfil en H (HB) y tablestaca (PP): la sección  $A$  y el perímetro  $P$  a considerar se representan en la figura 3 (Bustamante, Gianceselli, 1991).
- En el caso de pilotes hincados por vibración, se aplicará una reducción del 50% para la punta y del 30% para el rozamiento en el fuste (Borel, Bustamante, Gianceselli, 2002 ; Borel, 2003).

20

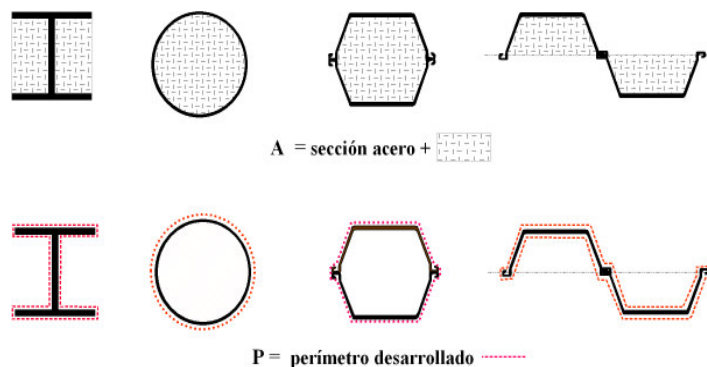


Figura 3 - Sección A y perímetro P a considerar para los pilotes hincados de perfil abierto.

21

- Pilotes hincados en creta: los valores de la tabla IV se refieren a pilotes hincados en creta bajo el nivel freático (Bustamante, Gianceselli, Weber, 1998). Valores superiores para la creta sobre el nivel freático deben ser justificados.
- Pilote en H inyectado (HBi) según la tecnología IGU : los valores de  $q_s$  se aplican a pilotes inyectados a partir de 4 tubos TAM. En el caso de 2 tubos aplicar el ábaco de rango Qi-2
- Pilotes inyectados (PIGU, PIRS) y micropilotes (MIGU, MIRS) inyectados según las tecnologías IGU e IRS: para más detalles sobre estas técnicas, consultar las publicaciones de los autores (Bustamante, Doix, 1985). Para las reglas propuestas en el presente caso, el perímetro del bulbo  $\phi_s$  se calcula mayorando el diámetro del fuste  $\phi_F$  por un coeficiente  $\alpha$  que se toma igual a:
  - $\alpha = 1.1$  para todos los suelos según la tecnología IGU
  - $\alpha = 1.4$  para todos los suelos según la tecnología IRS excepto roca

alterada para el que se tomará el valor de  $\alpha = 1.1$ .

22

- Pilote de barrena continua simple (FTC) o a doble rotación (FTCD): en los de barrena continua simple los valores de los parámetros  $q_s$  y  $k_p$  propuestos más arriba se aplicarán sin reducción para los condiciones de ejecución siguientes:
  - ✓ Equipados con un tubo de hormigonado extraíble durante la perforación, y que se sumerge al menos 1 m en el hormigón durante la operación;
  - ✓ En los que el tubo de hormigonado se controla visualmente desde la plataforma de trabajo ;
  - ✓ Dotados de un sistema de registro de los parámetros característicos de perforación y hormigonado con salida gráfica en tiempo real.
  - ✓ En todos los demás casos la reducción será del 30% en los valores de  $q_s$  y  $k_p$ .
  - ✓ Para los de doble rotación (FTCD) esta reducción sólo concierne a  $k_p$ .

23

### Elección de $pl_e^*$

Este parámetro, que caracteriza la compacidad del suelo en las proximidades de la punta, es la presión límite neta equivalente  $pl_e^*$ . De forma simplificada y para la práctica corriente se podrá calcular a partir de:

$$pl_e^* = \sqrt{pl_1^* \cdot pl_2^*}$$

donde:

$pl_1^*$  - presión límite neta al nivel de la cota de la punta del pilote

$pl_2^*$  - presión límite neta a 0.5 m bajo la punta si  $\varnothing < 1\text{m}$ , y  $\varnothing/2$  si  $\varnothing > 1\text{m}$

Es importante que los valores de cálculo de  $pl_e^*$  correspondan a los valores reales de la presión límite del suelo. En las formaciones muy endurecidas, se recomienda usar sondas a alta presión (Massonnet, 2005), para aproximarse lo más posible a la presión límite efectiva. Actualmente, la posibilidad de medir  $pl > 10\text{ MPa}$  presenta la ventaja de poder elegir, por extrapolación de los ábacos de la figura 2, los valores de  $q_s$  que correspondan.

24

## 5. CONSIDERACIONES GENERALES

La aplicación del método necesita ser relacionado con los demás aspectos del dimensionamiento:

1. La elección de los coeficientes de seguridad para el cálculo de las cargas derivadas de  $Q_l$ .
2. La aplicación a las cimentaciones semiprofundas.
3. El dimensionamiento a tracción.
4. La consideración de solicitaciones particulares.
5. El recurso al ensayo de carga a escala real.

### Los coeficientes de seguridad

Para el cálculo de las cargas derivadas de  $Q_l$ , a saber, la carga de fluencia  $Q_c$  y las diferentes combinaciones de estados límites últimos ELU y de servicio ELS, se aplicarán los coeficientes del Fascículo 62-V :

$$Q_{ELS} = Q_c/1.4$$

$$Q_{ELU} = Q_l/1.4$$

25

### El caso de las cimentaciones semiprofundas

Los valores de las tablas II, III y IV, y de la figura 2, son aplicables evidentemente a las cimentaciones llamadas semiprofundas, para las cuales no debe olvidarse tener en cuenta las reducciones en el caso de empotramientos llamados sub-críticos.

### El dimensionamiento a tracción

Las reglas actualizadas y completadas se pueden aplicar de igual manera a las cimentaciones sometidas a tracción, sin disminuciones particulares de  $q_s$ . En este caso, la expresión [1] se reduce tan sólo al término de rozamiento:

$$Q_l = P \int_0^h q_s(z) dz$$

26

### Solicitaciones de carácter particular

La validez de los parámetros propuestos en los apartados 4.1 y 4.2 no exige de considerar en los cálculos el conjunto de solicitaciones a los que esté sometida la cimentación profunda a lo largo de la vida de la obra : efecto de grupo, rozamiento negativo, pandeo, empujes parásitos laterales, seísmos, etc...

### Ensayo de carga a escala real

Es irremplazable cuando se desean optimizar los valores de  $q_s$  y  $k_p$  o asegurar su validez en contextos geotécnicos de carácter especial o recurrir a técnicas de pilotes innovadoras. La instrumentación de los pilotes ensayados da validez a los resultados obtenidas.

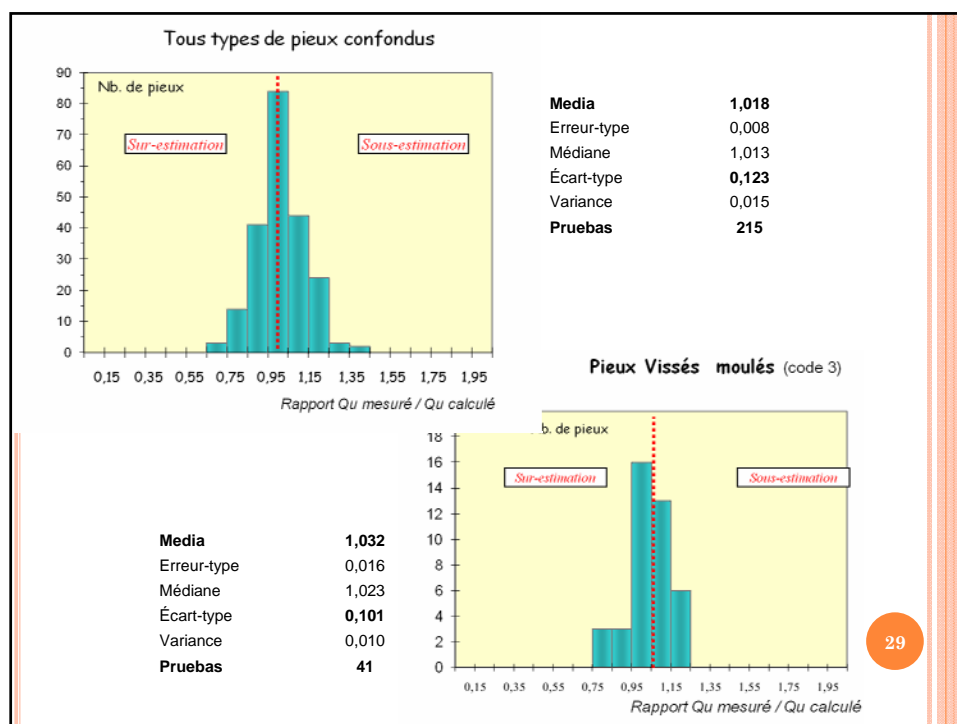
27

## 6. CONCLUSIONES

Las modificaciones a las que ha conducido la puesta al día del método presiométrico de cálculo de la carga límite convencional  $Q_l$ , incluyeron:

1. el reajuste de los parámetros de cálculo de  $q_s$  y  $k_p$  para un total de 26 técnicas de construcción de pilotes.
  2. la adopción de un valor único del factor de punta  $k_p$  para cada categoría de suelo y técnica de construcción.
  3. la adopción de 10 curvas  $q_s$  continuas para integrar las técnicas más recientes.
- Al aplicar los valores de los parámetros reajustados se ha hecho un estudio de la relación entre  $Q_l$  medido/ $Q_l$  calculado para diferentes casos. En la figura se representan 2 histogramas característicos.

28



Finalmente, si el cálculo de la resistencia se basa fundamentalmente en el ensayo presiométrico, la elaboración de correlaciones entre PMT, CPT y SPT permite utilizar los parámetros actualizados valiéndose de la escala de referencia  $p_l - q_c - N$  de la figura 5 (Bustamante, Gianceselli, 1993).

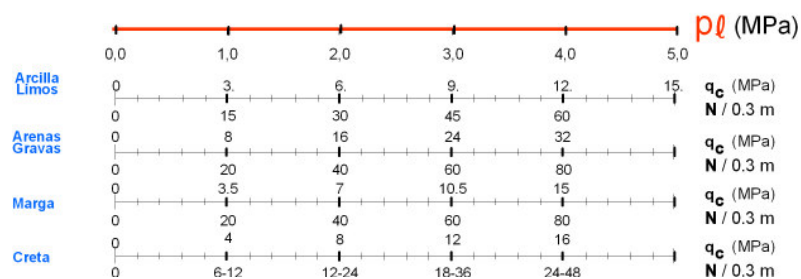


Figura 5 – Correlación de  $p_l$  con  $q_c$  y  $N$ .



