

# Ensayos de carga estática en pilotes y precisión de las extrapolaciones

Juan Alfonso CARCOLÉ GALEA<sup>a,1</sup> y Juan MESTRE MORALES<sup>a</sup>  
<sup>a</sup>Ingeniero Geólogo

**Resumen** Interpretación del valor de carga de inicio de la fluencia, cargas de hundimiento y precisión de las extrapolaciones en 22 ensayos de carga estática en pilotes. Idoneidad de los Factores de Seguridad.

**Palabras Clave.** Pilote, carga de fluencia, límite, de hundimiento y carga de diseño.

## 1. Introducción

En los casos en los que no se llega al hundimiento en un ensayo de carga se suele utilizar extrapolaciones para definir este valor. En el presente artículo analizamos la precisión de las extrapolaciones aplicadas en 22 ensayos que sí llegaron a hundimiento, por lo que se puede observar la precisión de las mismas. Así mismo se definen varios conceptos del comportamiento del pilote útiles para el diseño, como es la carga de fluencia.

Todos los ensayos se han ejecutado en el mismo terreno (arcillas sobreconsolidadas de  $S_u=50$  a 135 kPa). Los pilotes se han perforado con barrena sin entubación (CFA) con diámetros 0,8 y 1 m y longitudes de 8 a 12,5 m, con relaciones de longitud/diámetro 9 a 15.



Figura 1. Ensayo de carga estática con gato instalado bajo vigas de lastre soldadas a 4 pilotes apartados.

<sup>1</sup> IGPS-Mexicana SC, Triunfo de la República 110, Jalatlaco, Oaxaca de Juárez 68080, México; E-mail igps@igps.com.mx.

## 2. Fases del ensayo

El ensayo consiste en aplicar una carga en la cabeza del pilote y esperar a que se establezca la deformación que esta produce. El proceso se repite hasta un valor que supere la carga de trabajo del pilote (como mínimo 1,5 veces) o bien hasta el hundimiento del pilote. El primer resultado del ensayo es una gráfica carga- asentamiento del pilote ( $Q-\delta$ ) basada en la comprobación de la gráfica asentamiento-tiempo de cada nivel de carga (Figura 2).

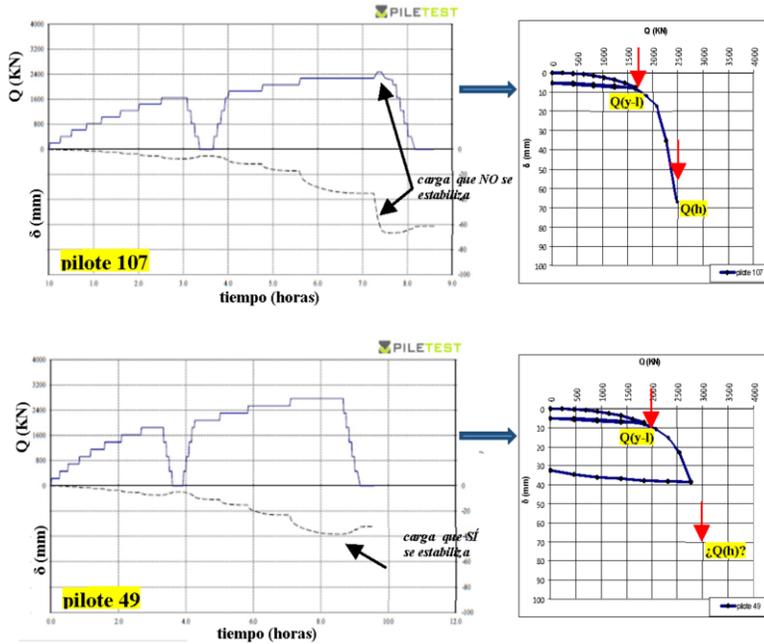


Figura 2. Ensayo de carga estática en dos pilotes.

En la gráfica del ensayo es posible establecer los diferentes valores:

- Carga de fluencia ( $Q_y-l$ ) “yield load”: aquella a partir de la cual las deformaciones plásticas son las predominantes. Suele ser un punto de curvatura en la gráfica  $Q-\delta$  (difícil de establecer y objeto de algunas Normativas) a partir del cual las deformaciones crecen de manera muy rápida. Usualmente se intenta que las posteriores *cargas de trabajo* del pilote no excedan este valor.
- Carga de hundimiento ( $Q_h$ ): Aquella en la que las deformaciones no se pueden estabilizar durante el ensayo real de carga. Al aplicarse la carga por etapas no se sabe si en un valor inferior, intermedio entre el último que se estabilizó y éste, se habría hundido también el pilote.
- Carga de trabajo: Aquella a la que trabajará el pilote una vez construida la superestructura. Usualmente se escoge como tal la carga de fluencia ( $Q_y-l$ ).
- Carga límite ( $Q_{lim}$ ): Es la *valoración* (aproximación) de la carga de hundimiento que se hace en los pilotes que no alcanzan dicho valor, establecida por métodos de extrapolación.

### 3. Métodos de extrapolación

Existen muchos métodos para establecer una hipótesis del valor de hundimiento que se habría obtenido en los ensayos que no llegan hasta dicho valor. Se basan en “reconstruir” la curva de ensayo y “extenderla” hasta establecer la que denominamos Carga límite (Qlim). Definimos algunos de los métodos más conocidos (Figura 3).

#### 3.1. Métodos que establecen por extrapolación la Qlim.

- **Decourt extrapolation (1999):** La carga límite de Decourt [1], será aquella que corta la línea de las cargas si se grafica “Q/δ” respecto a la carga “Q”. Es decir, se establece Qlim como el valor de carga a la que le corresponderá una deformación infinita (Q/δ=0).

$$Q_{lim} = \frac{C_2}{C_1} \quad (\text{o la sección con el eje}) \tag{1}$$

donde C<sub>1</sub>=pendiente de la gráfica; C<sub>2</sub>= punto intersección en el eje Q/δ.

$$Q_{ideal} = \frac{C_2 \delta}{C_1 \delta + 1} \tag{2}$$

- **Chin-Kondner Extrapolation (1970):** Conocido como Chin 1970 [2], pero que se basa en los trabajos de Kondner 1963 [3], consiste en extrapolar un recta desde la gráfica δ/Q vs δ hasta cortar el eje vertical y con los parámetros de esa recta definir la carga límite (Qlim). En esencia viene a ser la “inversa” del método anterior, por lo que responde también a la carga que implica la deformación infinita y su resultado debe ser muy similar al método de Decourt.

$$Q_{lim} = \frac{1}{C_1} \tag{3}$$

$$Q_{ideal} = \frac{\delta}{C_1 \delta + C_2} \tag{4}$$

donde C<sub>1</sub>=pendiente de la gráfica; C<sub>2</sub>= punto intersección en el eje δ/Q.

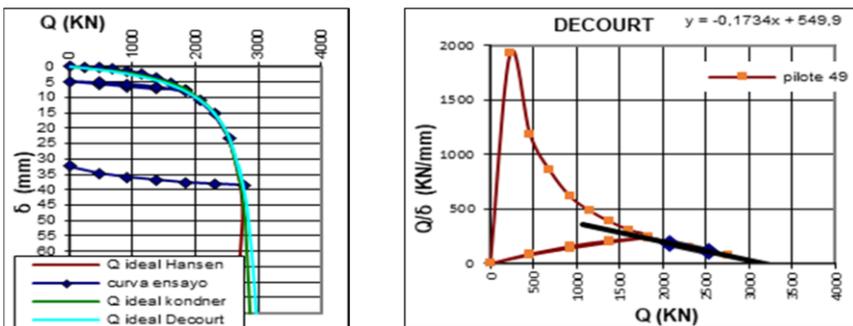


Figura 3. Interpretación del ensayo del pilote 49 con los tres Métodos de extrapolación descritos.

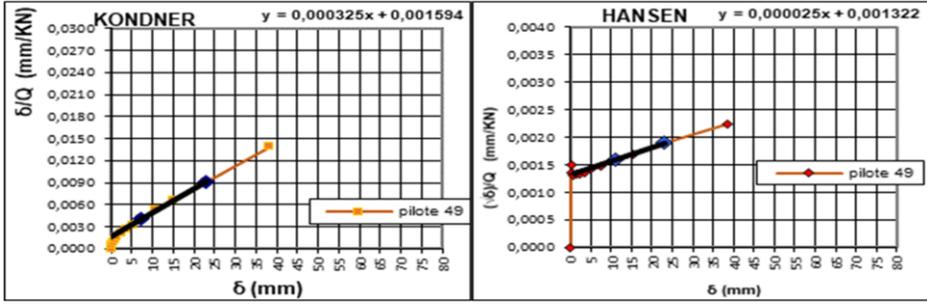


Figura 3. (continuación) Interpretación del ensayo del pilote 49 con los tres Métodos de extrapolación descritos.

3.2. Métodos que establecen a la vez la  $Q_{lim}$  por extrapolación y la  $Q_{y-l}$  en la gráfica.

Resulta muy interesante poder establecer en un mismo método la carga de inicio de la fluencia y la carga límite extrapolada, proponemos un método muy sencillo que denominamos  $1/\delta$  y un método algo más sofisticado que es el de la Normativa de Polonia.

- **Método  $1/\delta$ :** El valor en el que la gráfica se convierte en una recta es la Carga de inicio de fluencia ( $Q_{y-l}$ ) y el valor en el que corta el eje es la carga límite. Por lo que permitirá establecer ambos valores con una sola gráfica. (Figura 4).

$$Q_{lim} = \frac{c_2}{c_1} \text{ (o la sección con el eje } Q) \tag{5}$$

$$Q_{y-l} = \text{inicio de la morfología de recta} \tag{6}$$

- **Método  $dQ/d\delta$ .** Este método es el que recoge la Normativa Polaca NP-83, B-02482 (actualmente en vigor), en esta se define que la curva definida por la relación de cada carga incrementada, dividida por el asiento que genera dicha carga ( $dQ/d\delta$ ) respecto a la carga total ( $Q$ ) se vuelve recta a partir de la “yield load ( $Q_{y-l}$ )”. Del mismo modo, esta recta ahora definida cortará el eje en el valor de “carga límite” con lo que permitirá también establecer ambos valores con una sola gráfica (Figura 4). El método es algo más complicado ya que establece dos tipos de familias de curvas que responden a resoluciones distintas.

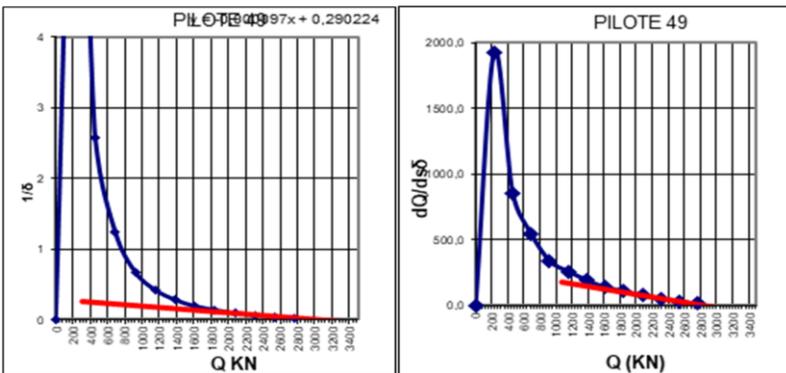


Figura 4. Ensayo del pilote 49. Métodos de extrapolación y determinación de inicio de la fluencia.

#### 4. Aplicación de los métodos a 22 ensayos que alcanzaron el hundimiento

En un ensayo real no se puede establecer deformación infinita bajo carga constante. Además la carga de hundimiento está limitada por la naturaleza del ensayo, realizado en base a etapas y se dará usualmente antes, pero podría darse la rara circunstancia de establecerse después si se considera, no la última etapa estabilizada, sino la primera no estabilizada. La verdadera carga de hundimiento estará siempre entre la última etapa estabilizada y la primera sin estabilizar. Aunque no se conoce exactamente su valor, el error es pequeño si se realizan suficientes etapas de carga (Figura 5).

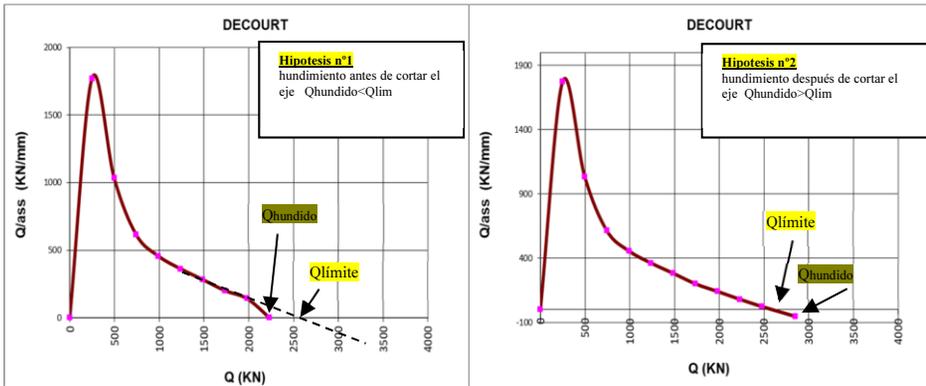


Figura 5. Posibles cargas interpretadas de hundimiento en un ensayo real.

Se han analizado 22 ensayos estableciendo en ellos la distancia entre la carga límite teórica establecida por las extrapolaciones y la real de hundimiento (tomada como la primera no estabilizada o la última antes de sobrepasar el eje Q), así como la distancia de estas dos cargas respecto a la de inicio de la fluencia.

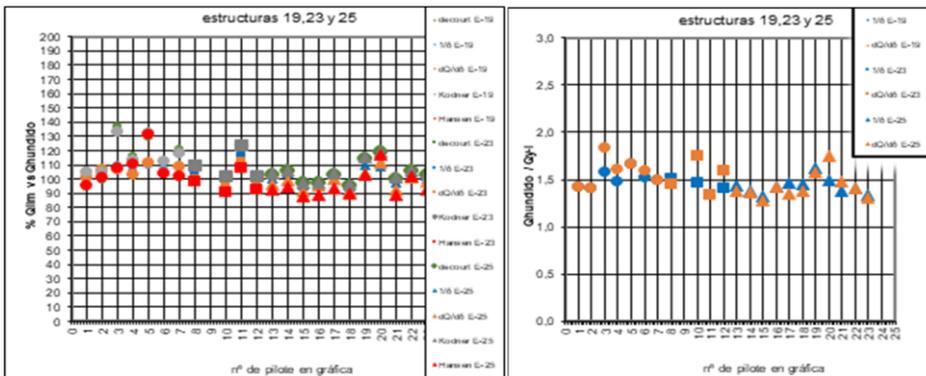


Figura 6. Relaciones entre la Qlim y Qhun; así como la Qhund y la Qy-l.

Se observa que las cargas límite tienen un error cercano al 9% respecto a la de hundimiento real (llegando a un 35% máximo), siendo los métodos  $1/\delta$  y  $dQ/d\delta$  los más precisos. La distancia entre los valores de inicio de la fluencia y la carga de hundimiento están en el entorno de 1,5, coincidiendo con los Factores de Seguridad usualmente usados.

**5. Precisión de las extrapolaciones en función al recorrido del ensayo**

La Figura 6 muestra la relación  $Q_{lim}/Q_{hundido}$  en ensayos de recorrido completo. La Figura 7 izquierda muestra los diferentes valores que se establecería por ejemplo con el método de Decourt a medida que se desarrollara el ensayo si no llegan al hundimiento. La parte derecha muestra que el recorrido del ensayo debe ser suficientemente cercano al hundimiento como para que las extrapolaciones den un resultado satisfactorio como el que se recoge en la Figura 5.

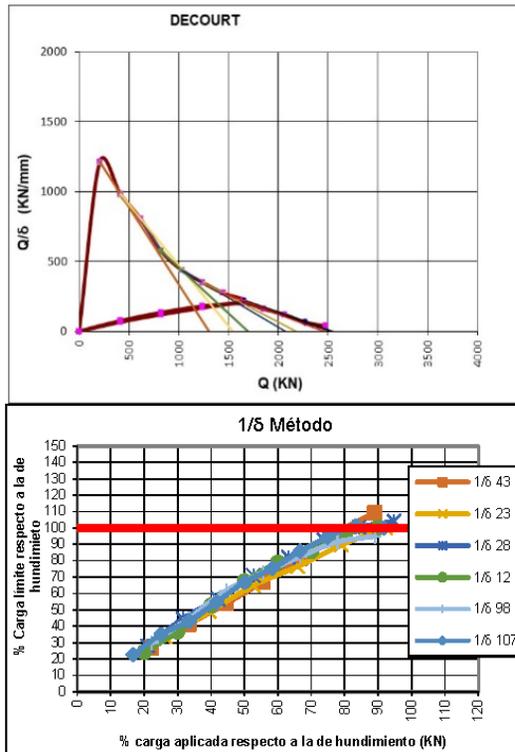


Figura 7. Posibles extrapolaciones en fase al recorrido del ensayo.

**6. Conclusiones**

La  $Q_{lim}$  de las extrapolaciones se puede asimilar en muchos métodos al principio teórico de aquella carga para la cual la deformación sería infinita.

La carga a la que realmente no se estabiliza la deformación ( $Q_h$ ) se debe dar antes del valor teórico ( $Q_{lim}$ ).

Debido a que el ensayo se realiza por etapas, la carga exacta de hundimiento quedaría entre la última estabilizada y la aquella a la que no se estabilizó. Por lo que estas etapas deben ser pequeñas.

La carga de inicio de las deformaciones plásticas, no reversibles,  $Q_{y-1}$  se da a una distancia de aproximadamente 1,5 respecto a la carga de hundimiento real del pilote  $Q_h$ .

A partir de la  $Q_y-1$  las deformaciones crecen rápidamente y las deformaciones plásticas dominan sobre las elásticas.

Existen dos grandes grupos de normativas, las que definen las cargas de trabajo en la  $Q_y-1$  y las que definen las cargas de hundimiento afectadas por un Factor de Seguridad de 1,5. Como puede verse ambos criterios son a la práctica concordantes, pero es recomendable igualmente en el segundo grupo verificar siempre que la carga no supere la  $Q_y-1$ .

Los métodos de extrapolación para establecer la  $Q_{lim}$  con la esperanza de que se asemeje a la  $Q_h$ , serán más precisos cuanto mayor recorrido tenga el ensayo de carga, siendo para recorridos superiores al 75%, razonablemente fiable.

## Referencias

- [1] Décourt L., *rotura de cimentaciones basada en el concepto de rigidez*, SEFE III, Sao Paulo, vol 1 pág. 215-224, 1996.
- [2] Chin F.K., *estimation of ultimate load of piles not carried to failure*. Proc. 2nd Southeast Asian Conference On Soil Eng. Singapore, 81-90, 1970.
- [3] Kondner R.L., *Hyperbolic Stress-strain response. Cohesive Soils*, Journal for Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, vol. 89, SM 1, pág. 115-143, 1963.
- [4] Hansen, J.B. *discussion Hyperbolic Stress-strain response. Cohesive Soils*, Journal for Soil Mechanics and Foundation Division, 89(4), 241-242, 1963.