

ANALISIS DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS  
PARA LA CORRECTA INTERPRETACION DE  
ENSAYOS DE CARGA ESTÁTICA  
EN PILOTES

**Palabras clave:**

pilote

ensayo de carga

Carga última

Carga de plastificación

Arcilla terciaria

**Resumen**

En este artículo se recogen ensayos reales de carga estática

realizados en pilotes de diferentes geometrías. Se analizan

las diferentes fases de ensayo y sus interpretaciones.

Finalmente se analizan los Factores de Seguridad a utilizar.

**Keywords:**

Pile

Load test

Ultimate Load

Yield load

Tertiary Clay

**Abstract:**

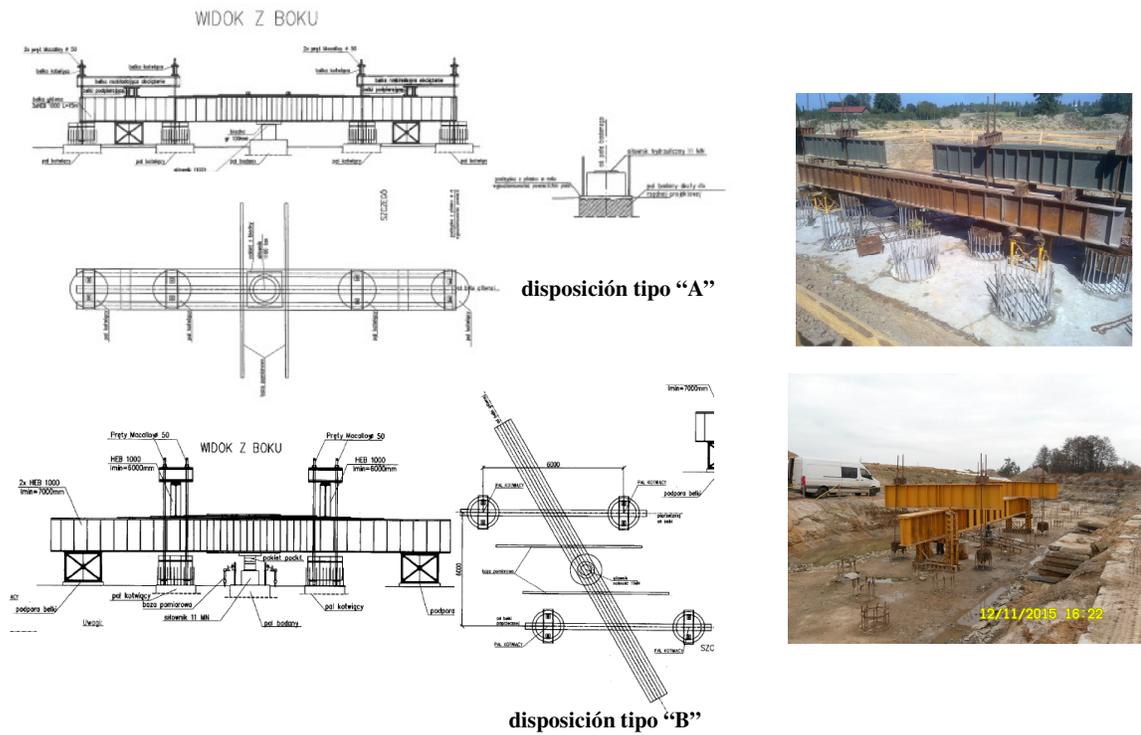
Review of several load test in piles of different geometry.

We do the analysis of the test steps and the interpretation of

it. Moreover, discussion about the Safety Factors to use.

# 1. INTRODUCCION

La realización de ensayos de carga en pilotes es realmente sencilla e incluso son muchos los países que lo incluyen como obligatorio en sus normativas. Los ensayos de carga estática se pueden realizar con lastre o sencillamente soldando a las armaduras de otros pilotes vigas de reparto que permitan traccionar 4 pilotes mientras se comprime el central sometido a ensayo. La **figura nº1** muestra dos disposiciones “tipo”.



*Figura. 1. Croquis ensayo de cargas estáticas sobre pilotes.*

El diseño de estos ensayos es sencillo y consiste en aplicar la carga de forma gradual y esperar a que cada escalón esté totalmente estabilizado (deformación terminada) antes de aplicar el siguiente escalón. Es importante para la correcta interpretación del ensayo no hacer pocos escalones de carga, así como también lo es no realizar los procesos de descarga-recarga intermedios demasiado rápidos ya que esto puede afectar a los resultados del ensayo (en todo caso infravalorando la capacidad portante del pilote). El primer resultado es una gráfica carga-asiento del pilote pero que debe ir acompañada de la gráfica asiento-tiempo para ver como se han estabilizado los escalones de carga. La **figura n°2** muestra dos ensayos “tipo” seleccionados en una obra de DRAGADOS-Polonia en la que se trabajó con tipología de pilotes No entubados (CPI-8//CFA). El primero de ellos es un ensayo llevado a hundimiento (pilote 107). En él se ha aplicado la carga en escalones estabilizados hasta aplicar el escalón de 2477 KN en el que la carga es retirada para evitar su completo hundimiento, por lo que la deformación en este escalón de carga se detuvo teniendo que ser “tendiente a  $\infty$ ”. El segundo ensayo (pilote 49) es otro ejemplo real pero de un ensayo que se ha quedado suficientemente apartado del hundimiento.

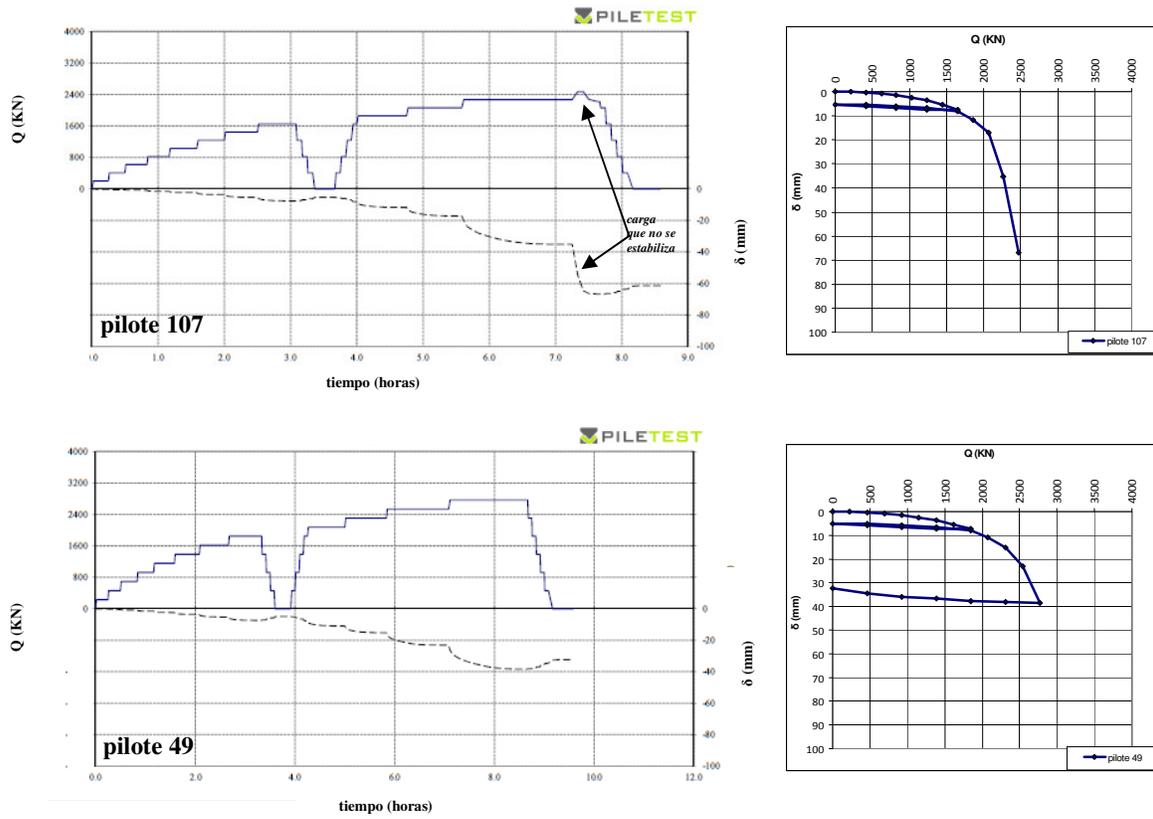


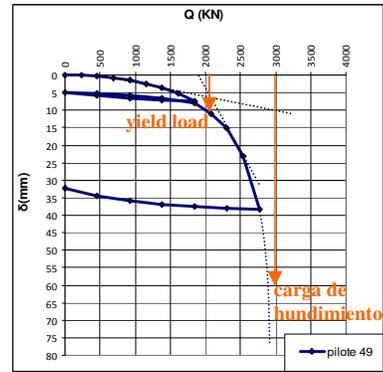
Figura. 2. Ensayos reales sobre pilotes. Obra “Autovía S-5, Prusice” DRAGADOS Polonia.

## **2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL ENSAYO DE CARGA PARA EL DISEÑO DE PILOTES**

En los ensayos de carga hay fundamentalmente, dos hechos a comprobar. El primero de ellos es la “**carga última**” o carga a la que se considera hundido el pilote. Este concepto responderá al criterio teórico de carga constante a la que la deformación se hace infinita. El segundo hecho a analizar en este tipo de ensayos es aquella carga a partir de la cual las deformaciones plásticas se han convertido en las dominantes en el gráfico carga-deformación (Q vs  $\Delta$ ). Es la llamada “**carga de plastificación**” o de inicio de esta (en la literatura internacional “**yield load**”). En cargas superiores a esta, la curvatura de la gráfica carga-deformación se incrementa exponencialmente. Mientras que por debajo de la carga “yield load” la curva se vuelve más bien una recta hasta el origen. Por lo tanto esta “yield load” o carga de plastificación está próxima al punto de máxima curvatura de la gráfica carga-deformación. La localización de este punto puede ser compleja y suele estar condicionada por la subjetividad del técnico que interpreta el ensayo.

Establecer que la carga a aplicar en un pilote no exceda el valor de la “yield load” es en realidad el objetivo de la práctica totalidad de Normativas, ya sea estableciendo la “carga última” y dividiéndola por un valor que suele dejar por debajo de este valor la carga de trabajo (usualmente se establece en el entono de 2) o bien sea intentando establecer el verdadero valor de “yield load” y utilizarlo como la carga admitida de trabajo para los pilotes. Asimismo se podrían establecer cargas más bajas debido a otros tipos de condicionantes como los asientos acotados a un cierto valor, aunque al valor al que se suelen dar los valores de “yield load” esto será poco usual. La **figura n°3** muestra los parámetros descritos en el ensayo real (pilote 49).

**Figura. 3.** Ensayo en el “pilote 49”,  
en el que se muestra la “carga de hundimiento”  
y la “carga de dominio de las deformaciones plásticas”



## 2.1. VALORACION DE LA CARGA DE HUNDIMIENTO

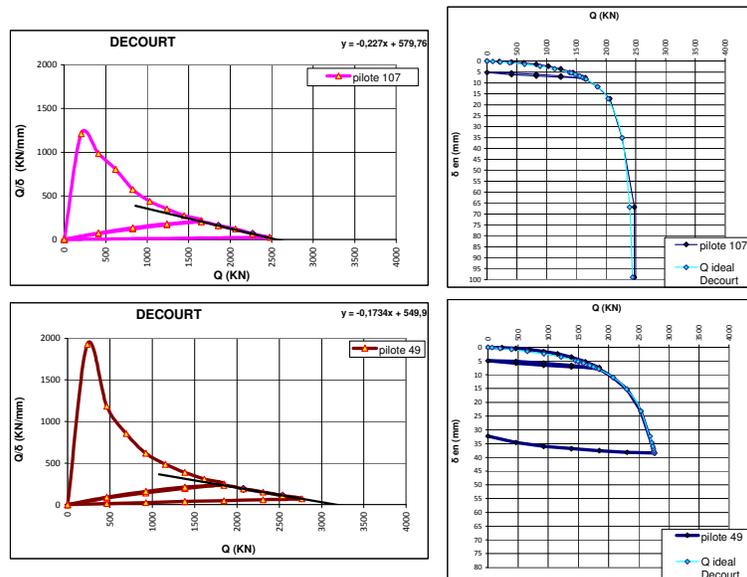
Más allá de los ensayos llevados a hundimiento, son varios los métodos de “extrapolación” para intentar establecer este valor. Los dos más famosos son:

**Decourt extrapolation (1999):** Como se verá es un método muy similar al de Chin-Kondner 70. La carga última será aquella que corta la línea de las cargas si se grafica  $Q/\delta$  respecto a la carga “Q”. El último punto del test “pilote 107” responde a 99 mm de asiento para evitar el “rebote” que significa en la gráfica cortar el ensayo.

$C_1$ =pendiente de la gráfica.  $C_2$ = punto intersección en el eje  $Q/\delta$ .

$$Q_{ULT} = \frac{C_2}{C_1} \text{ (o la intersección con el eje) (1)} \quad Q_{IDEAL} = \frac{C_2 \delta}{C_1 \delta + 1} \text{ (2)}$$

La **figura nº4** muestra a la izquierda la representación de Decourt de los ensayos reales “pilotes 49 y 107” con la que se establecen los valores de  $C_1=0,1734$  y  $C_2=0,227$ . Y a la derecha se muestra en color azul la gráfica real de los ensayos “pilotes 49 y 107” y sobrepuesto en color cian la curva  $Q_{IDEAL}$  obtenida con la ecuación (2).



**Figura. 4.** Aplicación de la extrapolación de Decourt en los “pilotes 49 y 107”.

Resulta evidente que el gráfico se sobrepone perfectamente al del ensayo real y se obtiene una carga última de:

ensayo	C2	C1	Qult
pilote 107	579,764	0,227	<b>2554,0</b>
pilote 49	549,9	0,1734	<b>3171,3</b>

*Cuadro 1. Resumen valores C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> y Qúltima.*

**Chin-Kondner Extrapolation (1970):** Conocido como (Chin 1970), pero que se basa en los trabajos de Kondner (1963), que consiste en extrapolar una recta desde la gráfica  $\delta/Q$  cuando esta ya define una recta constante, por lo que el ensayo debe alcanzar, como mínimo, este valor para poder ser correctamente interpretable.

$$Q_{ULT} = \frac{1}{C_1} \quad (3) \quad Q_{IDEAL} = \frac{\delta}{C_1\delta + C_2} \quad (4) \quad C_1 = \text{pendiente de la gráfica.}$$

$C_2 =$  punto intersección en el eje  $Q/\delta$ .

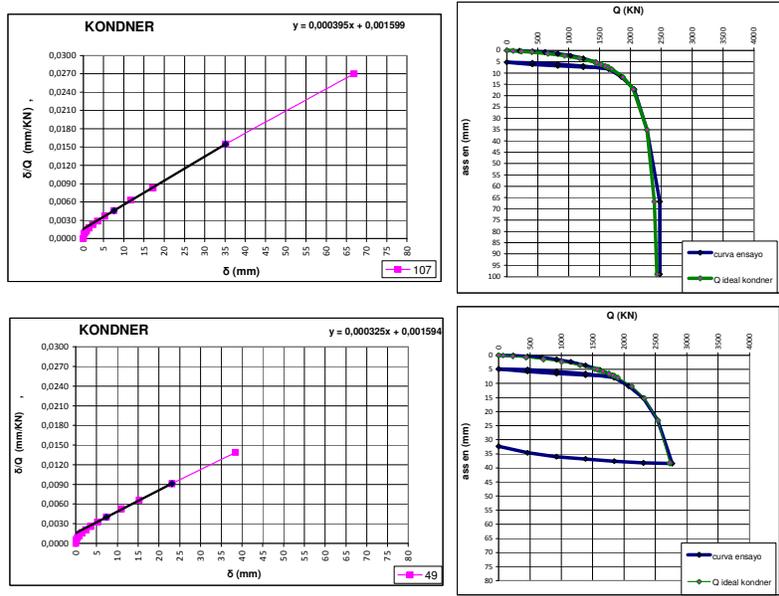


Figura. 5. Aplicación de la extrapolación de Chin-Kondner en los “pilotes 49 y 107”.

La figura nº5 muestra en color verde el resultado de la aplicación del criterio descrito en los ensayos tipo “pilote 49 y 107” (formula 4) sobre la curva real del ensayo (graficada en color azul). Resulta evidente como el gráfico, de nuevo, se sobrepone perfectamente al del ensayo real y se obtiene una carga última de:

ensayo	C2	C1	Qult
pilote 107	0,001599	3,95E-04	2531,6
pilote 49	0,001594	3,25E-04	3076,9

Cuadro 2. Resumen valores C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> y Q<sub>última</sub>.

La comparación entre los cuadros 2 y 3 muestran como las interpolaciones de Decourt99 y la de Chin-Kondner 70 obtienen prácticamente los mismos valores de “Carga última” en los dos “pilotes tipo” analizados.

## 2.2. VALORACION DE LA “CARGA EN EL PUNTO DE CURVATURA MÁXIMA” CONSIDERADA COMO UNA APROXIMACION DE LA “YIELD LOAD”

**Vesic 1963:** Definió que el inicio de la fluencia se podía establecer aproximadamente en el escalón que ofrezca un máximo en la gráfica del incremento de asiento entre el incremento de carga. Como resulta evidente este criterio establece una “yeild load” pero no la carga de hundimiento y a veces al graficarlo no resulta del todo evidente el valor a tomar ya que depende en exceso del número de escalones de carga y de la calidad del ensayo.

**Shen and Niu (1991):** Definieron para establecer el “valor de Carga en la máxima curvatura” que se podía reconstruir la curvatura de los ensayos matemáticamente y derivarla para encontrar el valor de curvatura máxima.

$$\text{La curvatura es } K \rightarrow K = \frac{\Delta\delta}{\Delta Q} = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{Q_i - Q_{i-1}} \quad (5)$$

$$\text{El cambio de la curvatura para el cambio de la carga es } \rightarrow \Delta K = \frac{\Delta K}{\Delta Q} = \frac{K_i - K_{i-1}}{Q_i - Q_{i-1}} \quad (6)$$

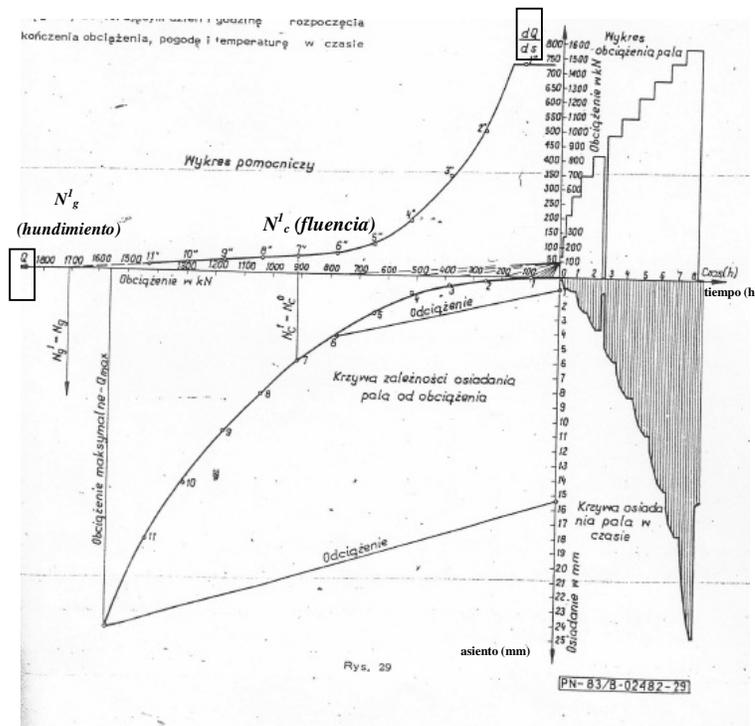
$$\Delta^2 K = \frac{\Delta^2 K}{\Delta Q^2} = \frac{\Delta K_{i+1} - \Delta K_i}{\Delta Q_{+i} - \Delta Q_{i-1}} \quad (7)$$

$$\Delta^3 K = \frac{\Delta^3 K}{\Delta Q^3} = \frac{\Delta^2 K_{i+1} - \Delta^2 K_i}{\Delta Q^2_{+i} - \Delta Q^2_{i-1}} \quad (8)$$

$$\text{Estrictamente la curvatura será: } \rho = \frac{\Delta^2 K}{(1 + K^2)^{3/2}} \quad (9)$$

Es evidente que el método es complicado, además cuando se grafica el resultado no es del todo claro y no servirá para determinar la carga última, solamente establece la carga en el punto de máxima curvatura. Pero se trata de un método que intenta rigurosamente establecer la “yield load” en los ensayos de carga estática de pilotes.

**Normativa Polaca NP-83, B-02482:** Otro método conocido está recogido en las normativas de los países del Este. La **figura nº6** muestra la representación gráfica que describe 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 ( $dQ/ds$ ) respecto a la carga total ( $Q$ ), se vuelve recta a partir de la “yield load”. Del mismo modo, esta recta ahora definida cortará el eje en el valor de “carga de hundimiento o Carga última” con lo que permitirá *establecer ambos valores con una sola gráfica*.



**Figura. 6.** Estimación del valor  $N_c$  de la Normativa Polaca PN-83, B-02482.

La práctica demuestra que este método es bueno, aunque a menudo los puntos no se sitúan con claridad y acaba dependiendo de la interpretación subjetiva del técnico que interpreta el ensayo, por lo que ese es el verdadero elemento a mejorar. No obstante es una interpretación muy utilizada en un país en el que, por normativa nacional, todos los apoyos de todas las estructuras deben ser ensayados.

**3. OTROS MÉTODOS PROPUESTOS PARA ESTABLECER SIMULTÁNEAMENTE LA “CARGA ULTIMA O DE HUNDIMIENTO” Y “LA CARGA EN LA QUE LAS DEFORMACIONES PLASTICAS SON LAS DOMINANTES (“YIELD LOAD”).**

En ensayos edométricos existe una “zona límite” para el comportamiento tenso deformacional y existe un indicador de esa conducta que es la energía de deformación ( $W = \varepsilon \cdot \sigma'_{\nu}$ ). Si trasladamos esa idea a los ensayos de carga de pilotes, esa energía podría ser tomada como  $W = Q \cdot \delta$ . La graficación de estos valores ya da una interpretación correcta, no obstante plotearemos la gráfica del sumatorio de estos valores  $\Sigma W$  ya que parece ofrecer gráficos más claros. En estos gráficos consideramos la ubicación de la “yield load” en el último punto en el que la gráfica mantiene la linealidad.

Del mismo modo realizaremos una gráfica muy sencilla inspirada en los criterios de Decourt ( $Q/\delta$ ) y en la Normativa polaca ( $dQ/d\delta$ ) y que consistirá simplemente en  $1/\delta$ . Como se verá será útil para establecer simultáneamente la “yield load” en el primer punto que defina la recta y la “carga última” en la intersección con el eje.

Aplicando estos criterios a los dos ejemplos “tipo” analizados en el presente artículo se obtiene los valores recogidos en el **cuadro n°3**.

pilote 107					
lecturas ensayo		decourt	strain energy		
Q (KN)	$\bar{\delta}$ (mm)	Q/ $\bar{\delta}$	1/ $\bar{\delta}$ (mm)	Q* $\bar{\delta}$	$\Sigma$ Q* $\bar{\delta}$
0	0	0	0	0	0
206	0,17	1211,765	5,882352941	35,02	35,02
413	0,42	983,3333	2,380952381	173,46	208,48
619	0,77	803,8961	1,298701299	476,63	685,11
826	1,44	573,6111	0,694444444	1189,44	1874,55
1032	2,36	437,2881	0,423728814	2435,52	4310,07
1238	3,53	350,7082	0,283286119	4370,14	8680,21
1445	5,29	273,1569	0,189035917	7644,05	16324,26
1651	7,59	217,5231	0,131752306	12531,09	28855,35
descarga (quitada para aportar claridad)					
1651	8,25	200,1212	0,131752306	12531,09	28855,35
1857	11,73	158,312	0,085251492	21782,61	50637,96
2064	17,19	120,0698	0,058173357	35480,16	86118,12
2270	35,15	64,58037	0,028449502	79790,5	165908,62
2477	66,89	25,00156	0,010092854	165686,53	331595,15

pilote 49					
lecturas ensayo		decourt	strain energy		
Q (KN)	$\bar{\delta}$ (mm)	Q/ $\bar{\delta}$	1/ $\bar{\delta}$ (mm)	Q* $\bar{\delta}$	$\Sigma$ Q* $\bar{\delta}$
0	0	0	0	0	0
231	0,12	1925	8,333333333	27,72	27,72
462	0,39	1184,6154	2,564102564	180,18	207,9
692	0,81	854,32099	1,234567901	560,52	768,42
923	1,49	619,46309	0,67114094	1375,27	2143,69
1154	2,38	484,87395	0,420168067	2746,52	4890,21
1385	3,58	386,87151	0,279329609	4958,3	9848,51
1615	5,24	308,20611	0,190839695	8462,6	18311,11
1846	7,36	250,81522	0,135869565	13586,56	31897,67
descarga (quitada para aportar claridad)					
1846	7,94	232,4937	0,125944584	14657,24	31897,67
2077	10,95	189,68037	0,091324201	22743,15	54640,82
2308	15,24	151,44357	0,065616798	35173,92	89814,74
2538	23,13	109,72763	0,043233895	58703,94	148518,68
2769	38,42	72,071838	0,02602811	106384,98	254903,66

**Cuadro 3.** Excel para la resolución de la gráfica “Energía-Carga” aplicado a los ensayos reales de los “pilotes 49 y 107”.

La **figura n°7** muestra la nueva interpretación gráfica de los ensayos “49 y 107” recogida en el **cuadro n°3**. La carga en el momento que la gráfica deja de ser recta (gráfica  $\Sigma Q*\bar{\delta}$ ) y en la que pasa a serlo (gráfica  $1/\bar{\delta}$ ) corresponderán a la de máxima curvatura en la gráfica Carga-asientos de la lectura directa del ensayo. Y la extrapolación en la segunda gráfica hasta cortar el eje corresponde a la “carga última” que ha de ser similar a la de Decourt y también corresponde a C1/C2.

$C_1$ =pendiente de la gráfica.  $C_2$ =punto intersección.

$$Q_{ULT} = \frac{C_2}{C_1} \text{ (o la intersección con el eje Q) (10)} \quad Q_{yield\_load} = inicio\_de\_la\_recta$$

de la gráfica  $1/\bar{\delta}$  vs Q

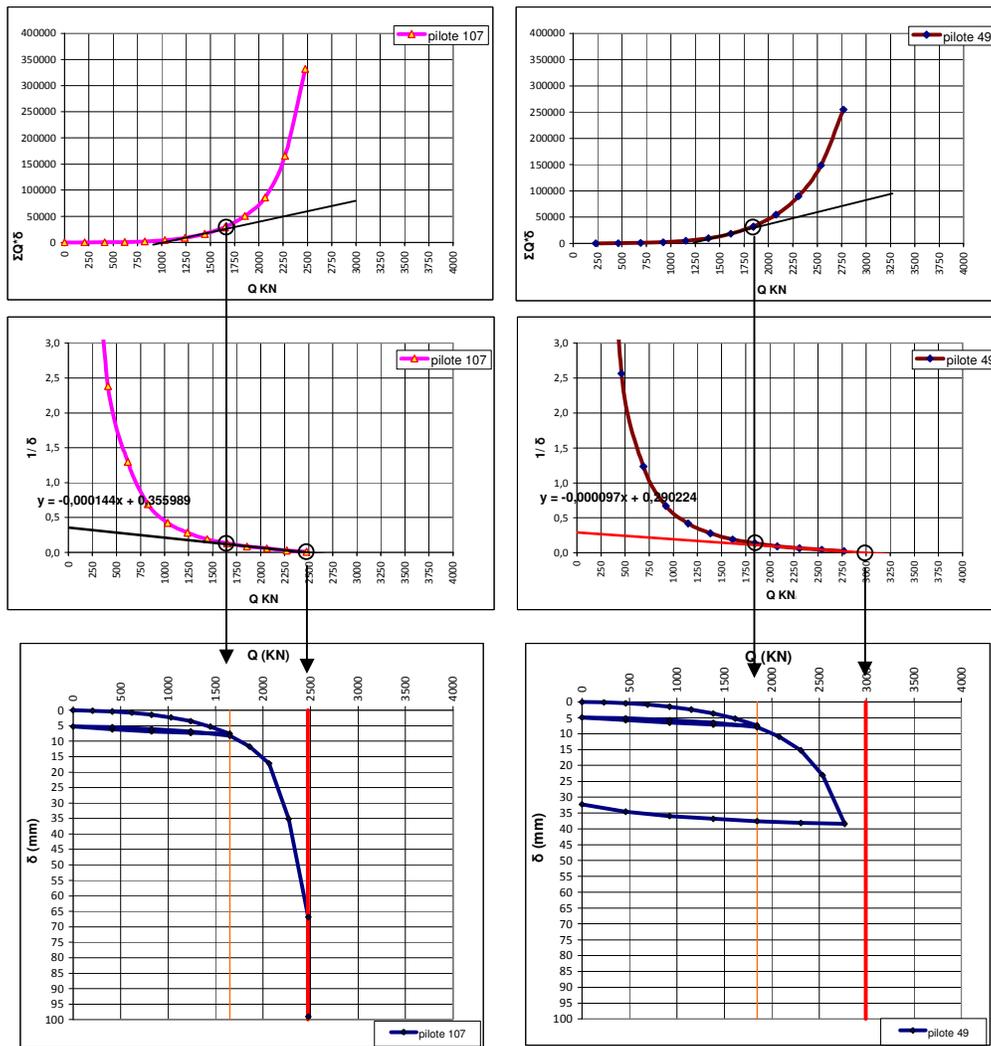


Figura. 7. Estimación del valor de  $Q_{\text{yield load}}$  y  $Q_{\text{última}}$ .

El cuadro n°4 muestra los valores obtenidos en los ensayos “pilotes 49 y 107” de la figura n°7:

ensayo	C2	C1	Qult	Q "yield load"	$Q_{\text{ult}}/Q_{(y-l)}$
pilote 107	0,355989	0,000144	2472,1	1651	1,50
pilote 49	0,290224	0,000097	2992,0	1846	1,62

Cuadro 4. Resultado con el método de interpretación  $1/\delta$ .

#### 4. APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DECRITOS, EN 28 ENSAYOS DE CARGA

Por facilidad para la presente publicación, el análisis se ha pormenorizado solamente en dos ensayos, “pilotes 49 y 107”. Pero en la obra analizada se estudiaron 28 ensayos en total en pilotes de tipo No entubado (CPI-8//CFA). El **cuadro n°5** muestra los resultados obtenidos con la interpretación de los diferentes métodos (la interpretación  $dQ/d\delta$  es la de la Normativa polaca). Hay que comprender que el terreno no es totalmente homogéneo e isótropo, pero son pilas contiguas de solamente tres estructuras en la misma obra y en el mismo nivel geológico, por lo que sí existe una similitud lógica entre ensayos. Las longitudes y diámetros de los pilotes son diferentes, por lo que el estudio será relativamente simple y amplio.

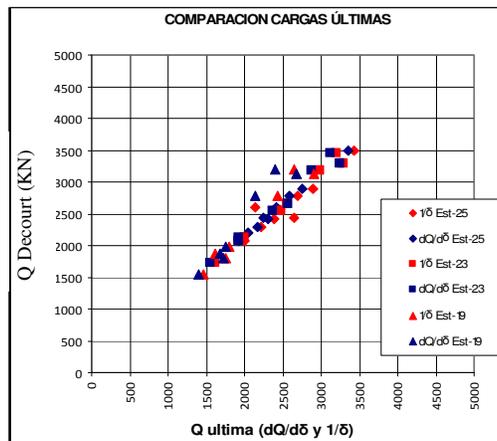
Estructura 19					Decourt	1/δ					dQ/dδ				ΣQ*δ			
pilote	L (m)	D (m)	L/D	hundido	Qult	Qult	Q yield	Qult/Qyield	δ (yield)	Qult	Q yield	Qult/Qyield	δ (yield)	Qult	Q yield	Qult/Qyield	δ (yield)	
11	8,93	0,8	11,16	si	1799	1759	1192	1,48	9,32	1720	1192	1,44	9,32		1192	1,51	9,32	
38	7,89	0,8	9,863	si	1324	1235	1022	1,21	6,3	1192	1022	1,17	6,3		1022	1,30	6,3	
55	12	0,8	15	si	3198	2643	1491	1,77	5,07	2400	1278	1,88	3,87		1491	2,14	5,07	
69	10,72	0,8	13,4	si	1987	1805	1100	1,64	3,5	1750	1065	1,64	2,64		1278	1,55	4,1	
84	12,1	0,8	15,13	si	2779	2435	1293	1,88	3,83	2140	1078	1,99	2,77		1293	2,15	3,83	
98	12,15	0,8	15,19	si	3126	2912	1509	1,93	4,72	2680	1940	1,38	7,71		1293	2,42	3,58	
119	9,34	0,8	11,68	si	1537	1458	854	1,71	4,28	1400	854	1,64	4,28		854	1,80	4,28	
145	8,09	0,8	10,11	si	1864	1620	1025	1,58	4,13	1670	1025	1,63	4,13		1025	1,82	4,13	

Estructura 23					Decourt	1/δ					dQ/dδ				ΣQ*δ			
pilote	L (m)	D (m)	L/D	hundido	Qult	Qult	Q yield	Qult/Qyield	δ (yield)	Qult	Q yield	Qult/Qyield	δ (yield)	Qult	Q yield	Qult/Qyield	δ (yield)	
10	10	0,8	12,5	no	2653	2555	1423	1,80	7,97	2570	1423	1,81	7,97		1220	2,17	4,91	
31	9	1	9	si	1736	1620	1136	1,43	2,73	1560	909	1,72	1,55		1136	1,53	2,73	
49	12	0,8	15	no	3173	2992	1846	1,62	7,36	2880	1615	1,78	5,24		1846	1,72	7,36	
62	11	0,8	13,75	si	2068	1930	1124	1,72	4,65	1930	1124	1,72	4,65		1124	1,84	4,65	
73	11,5	0,8	14,38	no	4166	3193	1559	2,05	5,24	2580	1337	1,93	3,79		1559	2,67	5,24	
86	10	0,8	12,5	si	2120	2006	1291	1,55	4,26	1930	1291	1,49	4,26		1291	1,64	4,26	
92	12	0,8	15	no	4016	3291	1763	1,87	5,94	3250	1371	2,37	3,63		1567	2,56	4,6	
107	9,5	0,8	11,88	si	2554	2472	1651	1,50	7,59	2370	1445	1,64	5,29		1651	1,55	5,29	

Estructura 25					Decourt	1/δ					dQ/dδ				ΣQ*δ			
pilote	L (m)	D (m)	L/D	hundido	Qult	Qult	Q yield	Qult/Qyield	δ (yield)	Qult	Q yield	Qult/Qyield	δ (yield)	Qult	Q yield	Qult/Qyield	δ (yield)	
12	9	1	9	si	2569	2468	1734	1,42	8,61	2390	1734	1,38	8,61		1487	1,73	5,26	
82	9	1	9	si	2773	2697	1900	1,42	4,78	2580	1900	1,36	4,78		1900	1,46	4,78	
23	10	1	10	si	2299,4	2215	1478	1,50	9,33	2170	1478	1,47	4,17		1478	1,56	4,17	
93	9	1	9	si	2414	2384	1655	1,44	5,46	2310	1655	1,40	5,46		1655	1,46	5,46	
28	12,5	1	12,5	si	3483	3437	2119	1,62	3,68	3350	2119	1,58	3,68		2119	1,64	3,68	
98	12	1	12	si	2889	2886	2006	1,44	4,13	2760	2006	1,38	4,13		2006	1,44	4,13	
43	10	1	10	si	3421	3261	1661	1,96	11,93	3320	1993	1,67	21,04		1329	2,57	6,12	
113	9	1	9	si	2600	2144	1241	1,73	8,18	2410	1241	1,94	8,18		1241	2,10	8,18	
48	10	1	10	si	2437	2642	1511	1,75	3,09	2250	1511	1,49	3,09		1511	1,61	3,09	
118	10	1	10	NO	3436	3027	1411	2,15	4,87	3400	1411	2,41	3,13		1411	2,44	4,87	
59	9	1	9	si	2073	2006	1399	1,43	3,32	1920	1399	1,37	3,32		1399	1,48	3,32	
129	9	1	9	si	2194	2052	1331	1,54	3,61	2050	1331	1,54	3,61		1331	1,65	3,61	

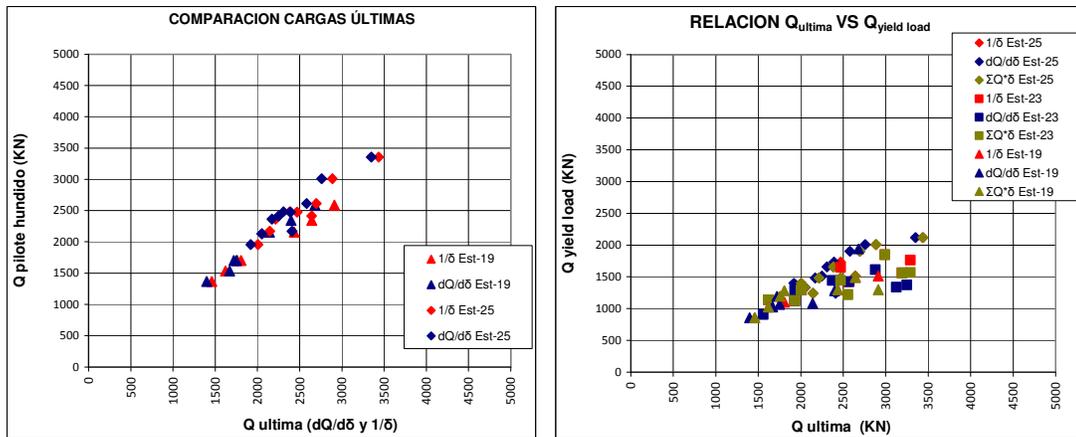
*Cuadro 5. Resultados con los diferentes métodos de interpretación de los 28 test realizados en la obra “Autovía S-5 Prusice” de Polonia.*

La **figura n°8** muestra la relación entre la carga última de Decourt ( $Q/\delta$ ) y los métodos  $1/\delta$  y  $dQ/d\delta$  en las tres estructuras (Est 19, Est-23 y Est-25). Queda claro como los dos valores se alinean perfectamente, pero Decourt da resultados de cargas últimas ligeramente mayores (un 7% mayores) a las valoraciones de las otras dos interpretaciones.



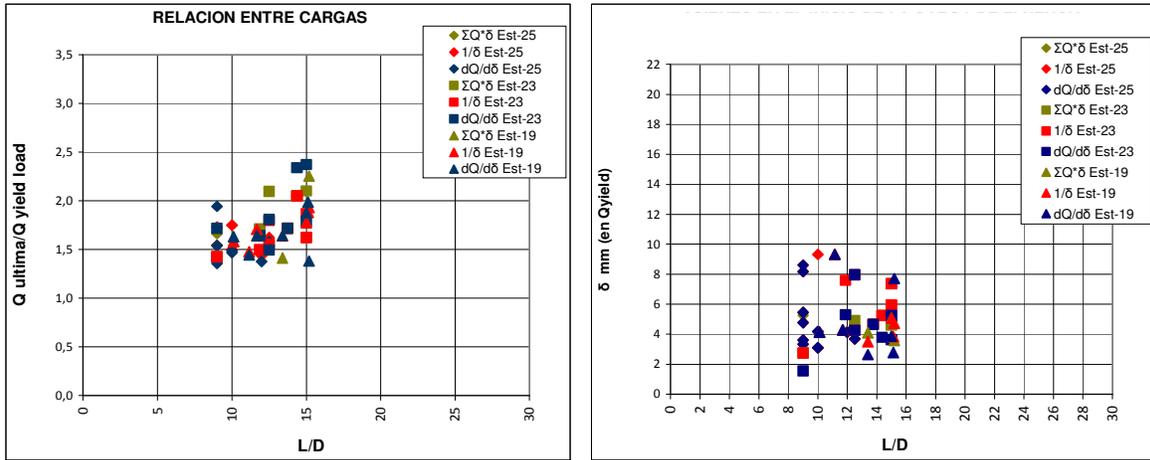
**Figura. 8.** Correspondencia entre los valores de "cargas de hundimiento" de Decourt y los de las interpretaciones  $dQ/d\delta$  y  $1/\delta$ .

La **figura n°9 izquierda** muestra los valores de hundimiento interpretados respecto a los reales en los ensayos que han llegado a rotura, al no ser extrapolaciones (más que del último escalón de carga) la correspondencia es 1:1. La **figura derecha** muestra la correlación, aproximadamente lineal, entre las cargas últimas (que como se ha visto son de gran fiabilidad) respecto a las cargas interpretadas como las correspondientes a las del "punto de curvatura máxima o yield load". Los pilotes tienen relaciones L/D entre 9 y 15 y el terreno no es totalmente homogéneo, por lo que la recta no es perfecta, pero sí que es muy satisfactoria.



**Figura. 9.** Correspondencia entre “Cargas últimas” de los ensayos reales, “Cargas últimas” de las interpretaciones y cargas “yield load”.

La **figura 10 izquierda** es la relación que se ha observado entre la “Carga Última” y la de “dominio de las deformaciones plásticas” (yield load). Esta relación se puede entender en realidad como el Factor de Seguridad mínimo a exigir en el diseño de pilotes. Resulta interesante observar que está mayoritariamente entre 1,4 y 2, pero que hay varios puntos que se sitúan entre 2 y 2,5. Por lo que establecer  $FS=2$  es en general satisfactorio, pero no lo es en el 100% de los casos analizados ya que establecería cargas de trabajo correspondientes a las zonas de los ensayos donde las deformaciones crecen muy rápidamente.

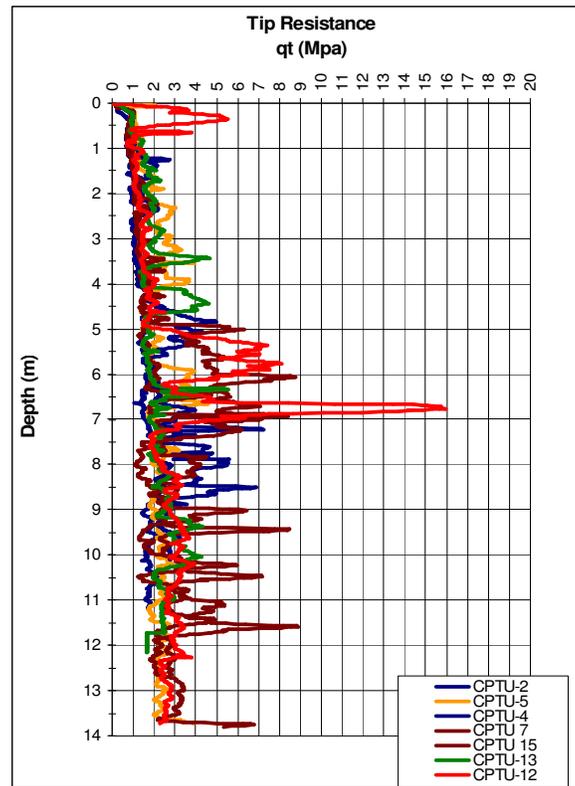


**Figura. 10.** Relación  $Q_{ult}/Q_{y-l}$  y deformaciones en cargas “yield load”.

La **figura nº10 derecha** muestra los asientos que se observan en la carga que se ha considerado como “yield load”. En general son valores entre 3 y 5,5 mm. Pero hay un grupo de ensayos que ofrecen valores mayores (entre 8 y 10 mm). Hay que recordar que estas deformaciones corresponden al pilote aislado y no al grupo.

## **5. NATURALEZA DEL TERRENO EN EL QUE SE REALIZARON LOS ENSAYOS DE CARGA ANALIZADOS EN EL PRESENTE ARTÍCULO**

Todos los ensayos analizados en el presente artículo se han realizado en los apoyos de tres estructuras de la Autovía S-5 construida por DRAGADOS SA en la localidad de Prusice (Polonia). En esta zona la geología regional son Arcillas Pliocenas sobreconsolidadas de alta plasticidad tipo CH. En todos los apoyos se dispone de ensayos CPTU que muestran que esta arcilla tiene resistencias de punta que empiezan aproximadamente en 1 MPa y suben hasta 2-3 MPa a 14 m de profundidad, con horizontes pequeños arenosos rítmicos y algún paquete arenoso desarrollado especialmente entre los 5 y 7 m de profundidad. Con todo y que se escapa al presente artículo la correlación a la resistencia al corte no drenado se hace con  $N_{kt}=18-20$ . Por lo que las resistencias al corte se sitúan entre 50 y 135 Kpa.



*Figura. 11. Ensayos de penetración estática realizados en la estructura 19.*

Haciendo uso de las siguientes ecuaciones se ha obtenido resultados de “carga última” similares a los de los ensayos de carga.

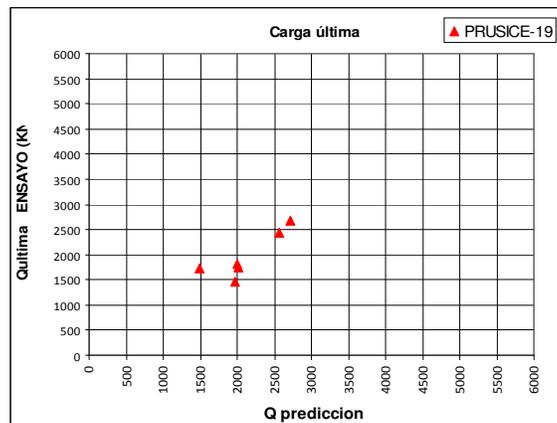
Resistencia la punta  $\rightarrow q_p = 9 \cdot S_u$  (sin correcciones de forma por ser  $L/D > 10$ )

Resistencia de fuste  $\rightarrow \tau \approx \alpha \cdot S_u$

$S_u$  = Resistencia al corte no drenada.

Debido a que el terreno es claramente sobreconsolidado ( $OCR_{promedio} \approx 8$  (5 a 20)) se toma la valoración de  $\alpha$  de Carcolé y Aguilar en este tipo de suelos, donde  $\alpha \approx 0,78 - 0,069(LN s_u)$ .

La **figura nº12** muestra la correlación 1:1 del cálculo analítico respecto a los valores obtenidos en los ensayos de carga. Se ha hecho solamente la verificación en los pilotes que tenían un CPTU a menos de 2 m de distancia.



*Figura. 12. Relación entre el cálculo analítico y los resultados reales de hundimiento de los ensayos de carga*

Del mismo modo cabe apuntar que la relación entre la carga que se lleva el fuste y la carga que se lleva la punta aplicando esta formulación es de 1,92 a 3,98.

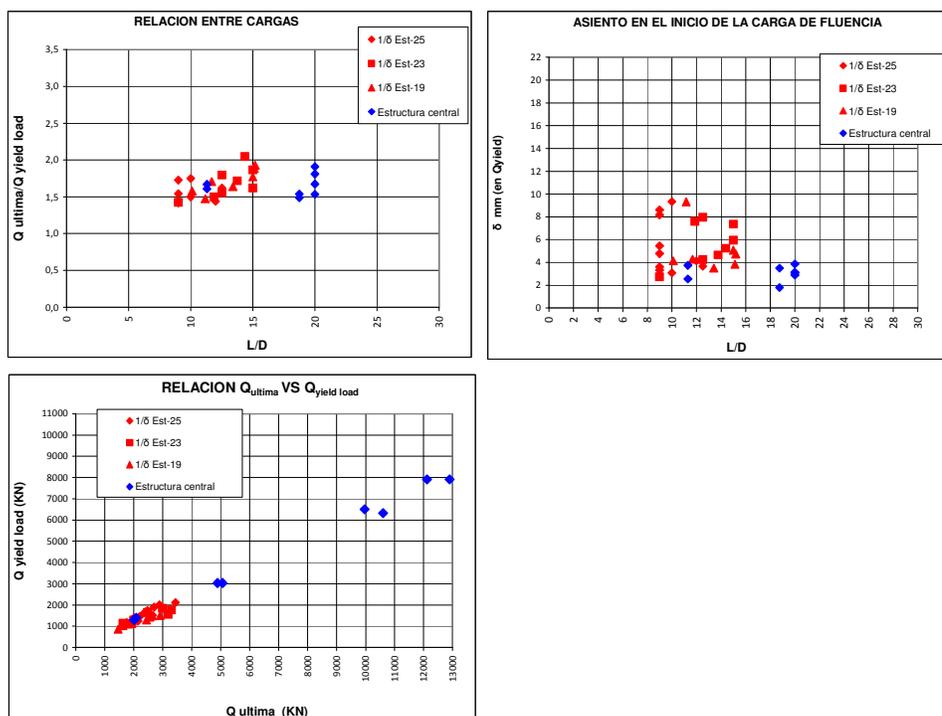
## 6. OTROS ENSAYOS EN ELMISMO TIPO DE TERRENO EN PILOTES ENTUBADOS

Se dispone de ocho ensayos de carga estática realizados en otra obra de DRAGADOS-Polonia en el mismo tipo de terreno pero en pilotes de tipo entubado recuperado sin inyección de punta (CPI-4). Estos pilotes tienen diámetros de hasta 1,5 m y longitudes de hasta 30 m, lo que permite generalizar más el análisis hecho en los apartados anteriores. El **cuadro n°6** muestra el resumen de los resultados obtenidos.

Estructura central				decourt	1/δ				
pilote	L (m)	D (m)	L/D	Quit	Quit	Qyield	Quit/Qyield	δ (mm)	
9	30	1,5	20	10219	9965	6506	1,533	2,9	
54	30	1,5	20	11368	10598	6327	1,675	3,14	
7	30	1,5	20	16415	12120	7909	1,91	3,07	
52	30	1,5	20	12358	12899,8	7909	1,81	3,87	
5	15	0,8	18,75	2263	2082	1400	1,487	3,5	
13	15	0,8	18,75	2141	2010,6	1300	1,54	1,8	
30	17	1,5	11,3	4872	4886	3034	1,61	2,55	
43	17	1,5	11,3	5059	5061	3034	1,67	3,74	

*Cuadro 6. Resultados obtenidos en 8 ensayos realizados en pilotes de entubado recuperable realizados por DRAGADOS-Polonia.*

La **figura n° 13** muestra en la **interpretación 1/δ** como los resultados de los ensayos de entubado recuperable son totalmente concordantes con los anteriores y amplían las observaciones a rangos de L/D de hasta 20 y a Cargas de hundimiento de hasta 12.900 KN. Estos nuevos ensayos se sobrepone en color azul a los de las anteriores **figuras 9** y **10** que se muestran en color rojo.



**Figura. 13.** Sobreposición de los ensayos de pilotes ejecutados con entubado recuperables a los análisis hechos en los pilotes sin entubación.

## **7. CONCLUSIONES**

Los ensayos de carga estática en pilotes son baratos, sencillos, y rápidos frente a la información que aportan.

Las extrapolaciones de Chin-Kondner y de Decourt establecen con claridad y precisión cargas últimas (de hundimiento) de los pilotes, pero no establecen el valor de la carga en la máxima curvatura (que es muy similar a aquella en la que las deformaciones plásticas son las dominantes “yield load”), por lo que tomar esas cargas últimas y afectarlas por un Factor de Seguridad (usualmente en torno a 2) deja en la duda de saber si las tomadas para el diseño están en zona de deformaciones rápidas o no.

El método “edométrico” basado en “Strain Energy” ( $\Sigma Q/\delta$ ) sirve para determinar la Carga correspondiente al momento en el que las deformaciones plásticas se convierten en las dominantes, pero no se puede sacar de este gráfico el valor de “carga última” (en realidad es un valor asintótico difícil de definir pero no imposible) y en algunas geometrías de pilotes entubados no ha arrojado valores del todo satisfactorios.

La búsqueda de interpretaciones que sirvan para obtener ambos valores de forma conjunta puede llevar a las gráficas de  $1/\delta$  y  $dQ/d\delta$  (perteneciente a la Normativa Polaca). Ambas graficaciones parecen **plenamente satisfactorias** para definir ambos valores.

La distancia entre la “Carga Última” y la “yield load”, **ha sido usualmente de entre 1,4 y 2**. Aunque en las interpretaciones  $\Sigma Q/\delta$  y  $dQ/d\delta$  algunos valores alcanzaron hasta 2,4. Por lo que afectar las cargas últimas por Factores de Seguridad de 2 y entender estas como las de trabajo, puede ser en estos pocos casos, imprudente.

En estas arcillas sobreconsolidadas de alta plasticidad la preestimación de la carga de hundimiento puede hacerse según la ecuación analítica:

$$q_p = 9 \cdot S_u \quad (\text{sin correcciones de forma por ser } L/D > 10)$$

$$\tau \approx \alpha \cdot S_u \quad (\alpha \approx 0,78 - 0,069(LN_{su})).$$

### **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a DRAGADOS SA la oportunidad que nos ha dado de analizar estos ensayos. Especialmente a Germán Martínez, jefe de obra de Dragados S-5 Prusice.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Abdelrahman, G.E; Shaarawi, E.M. and Abouzaid. K.S. (2003). *interpretation of axial pile load test results for continuous flight auger piles*. Proc. Of the 9 Arab Structural Engineering Conf. Nov. 29-Dec. 1, 2003, Abu Dhabi, UAE.
- ASTM D 1143 *standard load test method for piles under static axial compressive load*. American Society for Testing and materials, Philadelphia, PA
- Carcolé J.A.; Aguilar, A. (2013). *Análisis de ensayos de carga en pilotes de gran diámetro en Polonia y propuesta de correlaciones a utilizar para el cálculo de capacidades portantes*. Revista de ingeniería Civil 172.
- Chin, F.K. 1970. *Estimation of the Ultimate Load of Piles not carried to Failure*. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Southeast Asian Conference on Soil Engineering, 81-90;
- Chin, F.K. 1971. *Discussion of Pile Test*. Arkansas River Project. Journal for Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, vol. 97, SM 6, 930-932;
- DÉCOURT, L. 1996. *A Ruptura de Fundações Avaliada com Base no Conceito de Rigidez*. SEFE III, São Paulo, vol. 1, 215 – 224.
- DÉCOURT, L. 2008. *Provas de Carga em Estacas Podem Dizer Muito Mais do Que Têm Dito*. SEFE VI, São Paulo, vol. 1, 221 – 245.
- Fellinius, Bengt H. (2009)-march. “BASICS OF FOUNDATION DESIGN”. Electronic Edition 342 p. [www.fellinius.net](http://www.fellinius.net).
- Kodner R.L. (1963). *hyperbolic stress-strain response of cohesive soils*. ASCE, J. SMFD, 89 (SM1) 115-143
- PN-83, B02482 Normativa Polaca (1983). *Foundations Bearing capacity of piles and pile foundations*.

- Shen, B; Niu, D (1991) *Theory and practice of piling and deep foundations in china*. fourth international conference, Beijing, china.
- Tavenas, F; Leroueil, S. (1979). *Clay behavior and selection of design parameters*, in: Proc. 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, , pp. 281–291
- Vesic, A.S. (1977) *desing of pile foundations*. National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Higway Practice, Transportation Research Board, Washinton, D.C.
- Wael N. Abd Elsamee. (2012). *evaluation of the ultimate capacity of friction piles*. Faculty of Engineering, Sinai University, El Arish, Egypt.