

Análisis de ensayos de carga en pilotes de gran diámetro en Polonia y propuesta de correlaciones a utilizar para el cálculo de capacidades portantes

JUAN-ALFONSO CARCOLÉ GALEA (*) y ANA MARÍA AGUILAR BAUZA (**)

RESUMEN En este documento se analiza los ensayos de carga estática en pilotes de gran diámetro ejecutados en materiales glaciares en Polonia. Los ensayos fueron realizados para el consorcio DRAGADOS, S.A. y POLAQUA, S.A. adjudicatario de la obra "CONSTRUCCIÓN DE LA AUTOVÍA S8 EN EL TRAMO NUDO WALICHNOWY NUDO WROCLAW (A1), TRAMO 5 (NUDO SIERADZ POŁUDNIE SIN NUDO – NUDO ŁASK SIN NUDO) DEL PK 140+552,05 AL PK 174+200,00". (POLONIA). El presupuesto de la obra asciende a 1.388.898.322,99 PLN (unos 347 millones €), destinados a la construcción de 34 Km de autovía.

ESTATIC PENETRATION IN POLSKA GLACIAR GROUNDS CORRELATIONS PORPOSED TO USE

ABSTRACT *In this document, we discuss the loading test used on piles drilled in glaciers grounds. This Tests was made for the consortium Dragados, SA and POLAQUA, S.A. awarded the construction "S8 HIGHWAY CONSTRUCTION IN STRETCH KNOT KNOT Walichnowy WROCLAW (A1), SECTION 5 (KNOT SIERADZ KNOTLESS poludnie - KNOTLESS Lask KNOT) OF THE PK PK 174 140 +552,05 +200,00" (POLAND). The cost of the project is 1,388,898,322.99 PLN. (approximately 347 million €), for the construction of 34 Km of motorway.*

Palabras clave: "Carga estática", Pilotes de gran diámetro, "Glinas".

Keywords: "Loading Test", Piles, "Glinas".

1. INTRODUCCIÓN

El uso de ensayos de carga estática y de integridad en pilotes está ampliamente extendido en Polonia.

En todas las estructuras que se ejecutan en el ámbito civil debe realizarse un mínimo de un ensayo por encepado.

Desafortunadamente todos los ensayos analizados en este artículo son de comprobación/aceptación/investigación y no de diseño, por lo que no llegan al hundimiento de los pilotes. Por ello se discutirá los diferentes métodos de análisis y se hará la comparación entre el análisis del "método polaco" y los habitualmente usados en otros países del ámbito anglosajón y en la literatura habitual de este tipo de ensayos.

Todos los datos utilizados en el presente estudio pertenecen a la construcción de la autovía S-8, adjudicada al consorcio DRAGADOS, S.A. - POLAQUA, S.A. Se trata de un tramo de 34 km de autovía con dos carriles por sentido y una mediana de 11 m., sobre un firme rígido de hormigón y con 33 estructuras, donde destacan los viaductos sobre los ríos Warta y Grabia, de 947 y 838 m. respectivamente. La superestructura se caracteriza por los más de 190.000 m² de pantallas acústicas. El terreno tiene tratamientos de mejora realizados con jet grouting y con más de 200.000 m.l. de columnas de grava-cemento.

Los pilotes aquí analizados se han ejecutado en las denominadas "glinas", que son **arenas arcillosas (SC) y limos arenosos (ML y ML-CL)** sobreconsolidados.

(*) Ingeniero geólogo por la Universidad de Barcelona y Universidad Politécnica de Cataluña. Empresa de geotecnia IGPS SL. Asesor geotécnico S-8 tramos 5.1, 5.2, 6 y 7 DRAGADOS -POLAQUA Polonia. E-mail: falta_email.

(**) Geóloga por la Universidad de Barcelona. Master en Ingeniería Geológica por la Universidad Complutense de Madrid. Empresa de geotecnia IGPS. S.L. Asesor geotécnico S-8 tramos 5.1, 5.2, 6 y 7 DRAGADOS -POLAQUA Polonia. E-mail: aina.igps@igps.e.telefonica.net



FIGURA 1. Aspecto de las “glinas” en sondeos helicoidales y en los sondeos de rotación.

La Figura 1 muestra el aspecto de las “glinas” que ya sean en realidad arenas o no, se identifican claramente como un material cohesivo por la cantidad de finos que tienen.

En la zona central de Polonia existe un nivel superior de “glinas” de la Glaciación “Warty”, relativamente joven, en la

que los CPTU ofrecen valores de punta entre 1,5 y 3 Mpa. Este depósito es somero y la práctica generalizada demuestra que pilotes de 18 m suelen tener la totalidad de la zona a la que afecta la punta en el nivel de glinas inferior (más antiguo) que ofrece resistencias de punta entre 3,5 y 10 Mpa.



FIGURA 2. Fotografías del proceso de ejecución y ensayo de los pilotes.

Todos los pilotes son de tipo entubado con recuperación y las características de los “pilotes iguales” aquí analizados son:

- Tipo pilotes = Camisa recuperable e inyección en punta^(*).
- Longitud = 18 m
- Diámetro = 1,5 m.
- Número de ensayos analizados en el presente artículo = 33. (más 2 en pilotes de geometría diferente ejecutados en el mismo terreno).

La Figura 2 muestra diferentes detalles de los pilotes.

1. Detalle de la armadura y del tubo de inyección en la punta de los pilotes, con el llamado “protector de base”

(*) Los pilotes llevan un tubo en “U” de 50 mm atado a la armadura, con tres agujeros de 8mm instalados en la punta. Pasados 15 días de su ejecución, se realiza la inyección a través de éste. La inyección se hace en escalones de 5 minutos y se mantiene el último 10 minutos. Solo se detienen las inyecciones si la cabeza del pilote sube 5 mm. Se considera aceptado el pilote cuando, además la posterior prueba de integridad (sísmica) es satisfactoria.

de la armadura, para que la inyección “busque” la base del pilote.

2. Momento del hormigonado y retirado progresivo de la camisa.
3. Descabezado de los pilotes.
4. Montaje de las vigas para realizar el ensayo de carga estática.

La Figura 3 muestra las diferentes disposiciones de vigas sobre los pilotes. La disposición tipo “A” se corresponde con la fotografía n°4 de la Figura 2.

Los ensayos se realizan siguiendo la Normativa Polaca. La carga se aplica en incrementos de 1/8 la carga admisible prevista del pilote (N_t). Alcanzada esta, se descarga en escalones de 1/4 y se recarga de nuevo en escalones de 1/4. El ensayo prosigue en nuevos escalones de 1/4 hasta alcanzar $1,5 \cdot N_t$. Los escalones se ejecutan tras estabilizar el anterior según criterio de $<0,05 \text{ mm}/10 \text{ min}$. En la presente obra los 33 pilotes ensayados tienen $4927 \text{ KN} < N_t < 6179 \text{ KN}$, alcanzando una carga máxima de 9270 KN.

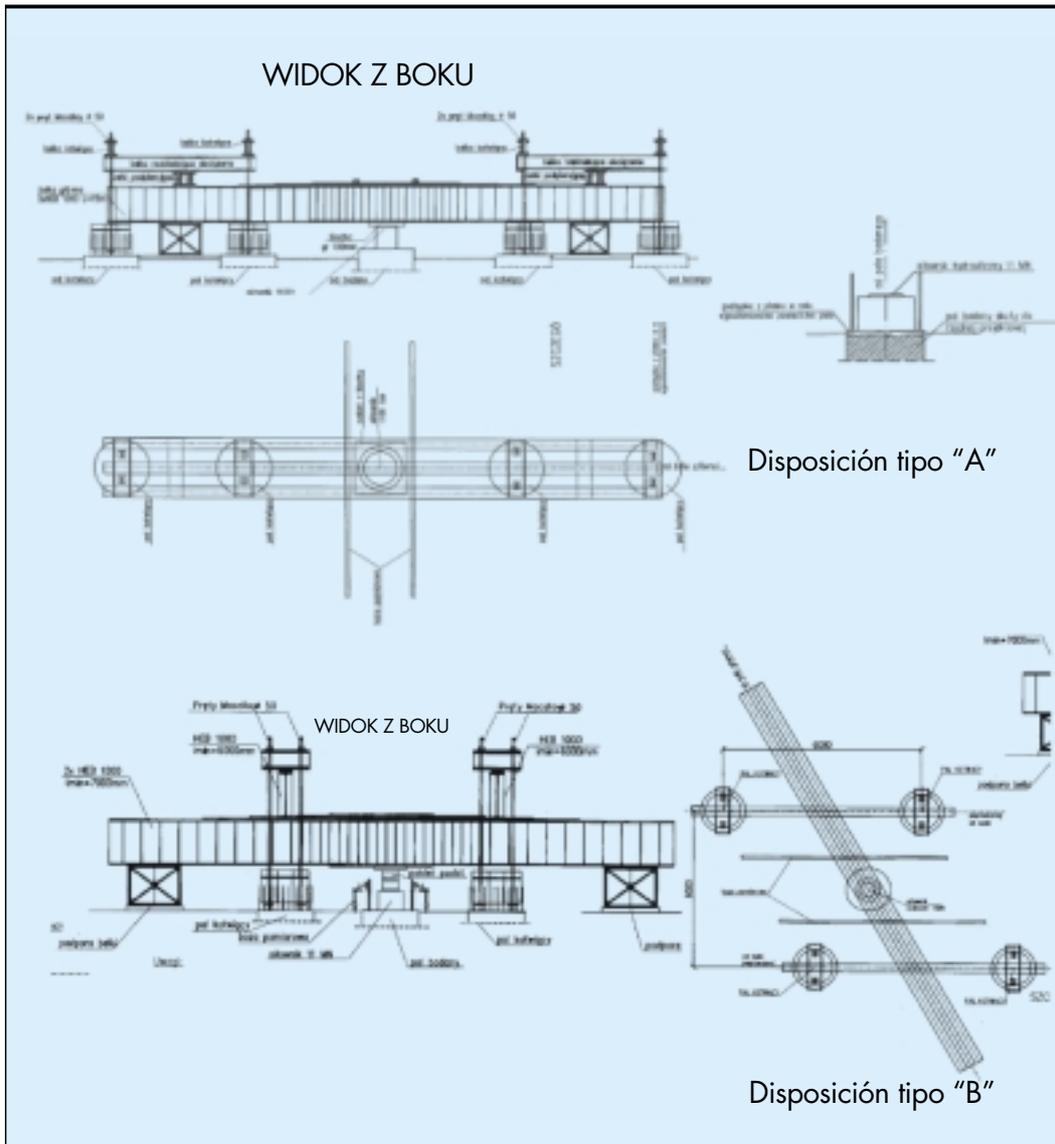


FIGURA 3. Croquis ensayo de cargas estáticas sobre los pilotes.

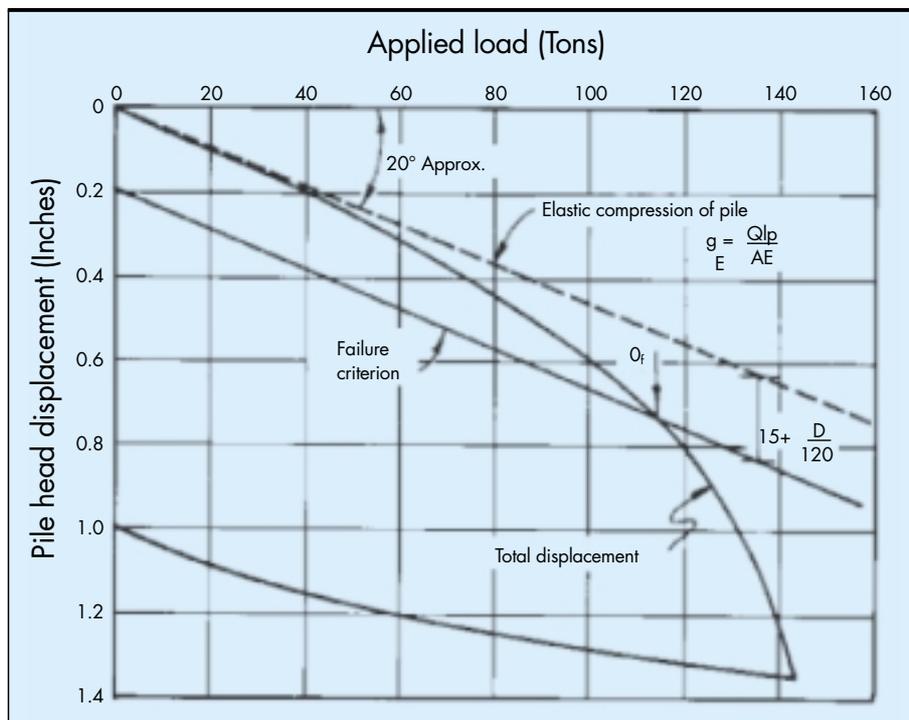


FIGURA 4. Construcción del valor Offset de Davisson. Figura del Illinois Institute of Technology, 1973.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE LOS ENSAYOS

Hay que recordar los diferentes criterios a utilizar:

Criterio Terzaghi: El pilote se considera “hundido” cuando se alcanza una deformación igual al 10% de su diámetro.

Davison Offset limit (1972): Marca la carga correspondiente al asiento del pilote que excede a la compresión elástica del elemento en 3,81 mm. Se obtiene trazando la línea paralela al comportamiento elástico del elemento más 3,81 mm+D/120 (mm), este caso 16,3 mm, por lo que los asientos finales en este caso están en el entorno de 20 mm. Este criterio es el utilizado en varias Normativas.

En nuestro caso muchos ensayos no llegan a este valor y se ha extrapolado con la “curva ideal” de Chin-Kondner, lo que puede inducir cierto error. No obstante y en comparación con los que si llegan al valor, los resultados son coherentes.

Chin-Kondner Extrapolation (1970): Conocido como (Chin 1970), pero que se basa en los trabajos de Kondner (1963), consiste en extrapolar una recta desde la gráfica δ/Q cuando esta ya define una recta constante, por lo que el ensayo debe alcanzar este valor.

$$Q_{ULT} = \frac{1}{C_1} \quad Q_{IDEAL} = \frac{\delta}{C_1\delta + C_2}$$

C_1 =pendiente de la gráfica.

Hansen 1963: La capacidad del pilote es la carga que obtiene a 4 veces el movimiento de la cabeza de la pila que se había obtenido para el 80% de la carga.

$$Q_{ULT} = \frac{1}{2 * \sqrt{C_1 * C_2}}; \quad \delta_u = \frac{C_1}{C_2} \quad Q_{IDEAL} = \frac{\sqrt{\delta}}{C_1\delta + C_2}$$

C_1 =pendiente de la gráfica.

C_2 =intersección de la recta interpretada con el eje.

En este caso se constata que el recorrido del ensayo debe ser mayor para poder aplicar este método que para el método de Chin-Kondner. Además es sabido que es más sensible a la calidad de la toma de medidas. En el presente trabajo se ha rechazado el 36% de las interpretaciones hechas con este método.

Decourt extrapolation (1999): Similar a los dos anteriores, con las gráficas Excel actuales resulta el método más simple, la carga última será aquella que corta la línea de las cargas si se grafica Q/δ .

$$Q_{ULT} = \frac{C_2}{C_1}$$

$$Q_{IDEAL} = \frac{C_2\delta}{C_1\delta + 1}$$

En este caso se constata que el resultado es idéntico al de Chin-Kondner.

PN-83/B-02482 Normativa Polaca. Se basa en la determinación del tipo de curva A o B a aplicar en la valoración. En esencia es parecido a un “load at Maximum Curvature metode”. En el caso de Curva “A” que es la usual en este tipo de pilotes en “glinas”, el método queda un poco condicionado por el diseño del escalón de carga del ensayo, sin afectar demasiado al “orden de magnitud” del valor. Pero cuando el ensayo no es muy claro, queda condicionado también por la interpretación del técnico.

$$n_3 = \frac{dQ_B - dN_c^1}{Q_B - N_c^1} \quad n_4 = dN_c^1 - n_3 N_c^1 \quad N_g^1 = -\frac{n_4}{n_3}$$

$$\frac{N_c^1}{N_g^1} > 0,4 \Rightarrow N_c^0 = N_c^1 \text{ curva tipo "A"}$$

$$\frac{N_c^1}{N_g^1} < 0,4 \Rightarrow N_c^0 = Q_{MAX} \text{ curva tipo "B"}$$

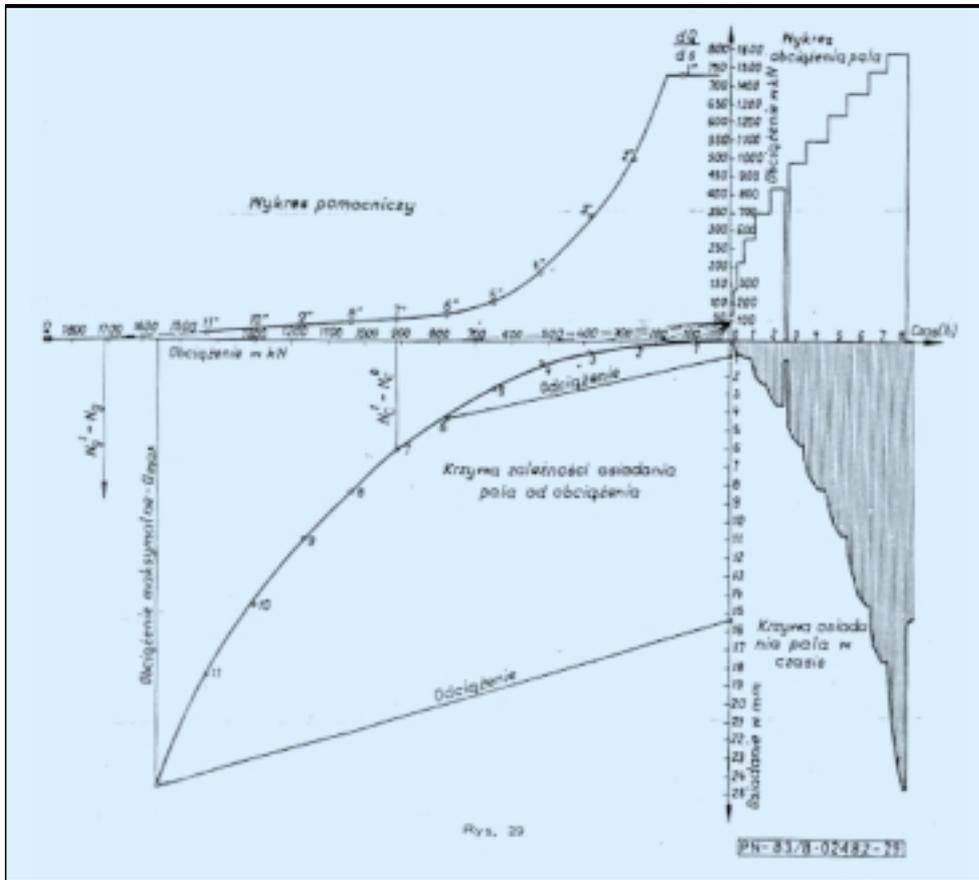


FIGURA 5. Estimación del valor N_c de la Normativa Polaca PN-83, B-02482.

El método permitiría también definir la que se define como “carga límite del pilote” N_g^1 . Como se verá a menudo la valoración coincide con la de Chin Kondner, pero está muy condicionada por el recorrido del ensayo y por la calidad de las lecturas y del propio ensayo, con lo que ofrece mucho error.

Vesic (1963): Definió que la fluencia se puede considerar aproximadamente en el escalón que ofrezca un máximo en la gráfica del incremento de asiento entre el incremento de carga. Resulta sumamente fácil de construir y no se presta a error de interpretación. Se hará una interpretación sencilla de este criterio y se comparará con la Normativa Polaca “PN”, ya que responden al mismo principio.

Por último hay que hacer mención al criterio de **H. Felli-nius** de tomar como contorno inferior de la estimación de capacidad de carga a aquella en la que las curvas ideales aquí definidas se superponen a la real del ensayo. En la presente obra hemos observado como ese valor (también ligado a cierta subjetividad) coincide con los criterios de la “PN” y al de Vesic; y obtiene los mismos valores.

En resumen se compararán métodos que responden a criterios muy diferentes. Los métodos de Decourt y de Chin-Kondner, pretenden establecer una extrapolación a la carga del hundimiento teórico del pilote, que es un valor aproximado al que produce deformación “infinita” para carga constante. El método de Hansen establecerá la carga antes de este momento. Los criterios de la Norma Polaca, de Vesic y de Felli-nius vienen a establecer la carga a partir de la cual la deformación crecería muy rápidamente, y por último el criterio de Davisson da una carga de asentamientos acotados en relación a la deformación elástica del elemento.

3. EJEMPLO DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS

3.1. CARACTERÍSTICAS APOYO “A” DE LA ESTRUCTURA 5.29. TOMADO A MODO DE EJEMPLO

Se presenta como ejemplo de los análisis hechos en los 33 pilotes, el correspondiente al primer apoyo (podpora “A”) de la Estructura 5-29 (viaducto sobre el río Konska).

La Figura 6 muestra la planta de los encepados con los pilotes ensayados y con las prospecciones hechas en cada apoyo para la caracterización del terreno. Por Normativa Polaca, el Consorcio debe realizar en cada encepado un mínimo de tres ensayos de tipo CPTU. A estos se ha añadido por parte del Consorcio sondeos de rotación para asegurar que se alcanzan las profundidades necesarias en las prospecciones que podrían dar rechazo antes de llegar a la profundidad de la punta de los pilotes y para tomar muestras inalteradas del terreno; así como se aprovechó para realizar algunos ensayos presiométricos.

3.2. GEOLÓGIA-GEOTÉCNIA EN EL APOYO “A” DE LA ESTRUCTURA 5.29.

La Figura 7, en la figura de la izquierda, muestra el testigo del sondeo de rotación SR-169+049, con la profundidad a la que corresponde la punta de los pilotes. En esta zona, desde 18,8 m y hasta 19,9 m el testigo es de menor diámetro ya que corresponde a la realización de un ensayo presiométrico. En la figura de la derecha se observan los ensayos CPTU superpuestos, en los que a partir de 10 a 12 m el terreno es bastante homogéneo (como muestran también las fotografías de las cajas). Los CPTU exceden a la profundidad de la punta de

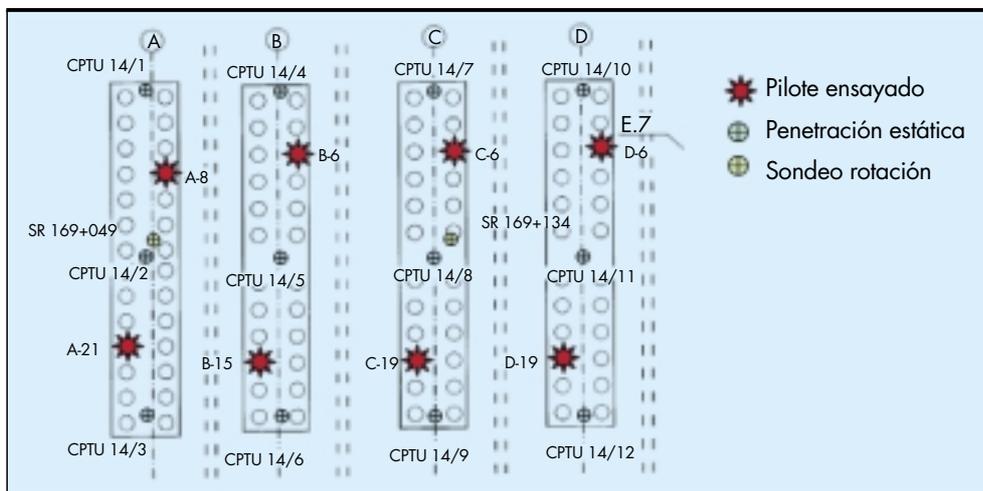


FIGURA 6. Planta de encepados, pilotes y prospecciones realizadas en la parte izquierda de la estructura 5.29.

los pilotes en 3,5 m y el Sondeo de rotación en 12 m. Las “glinas” son homogéneas hasta los 23 m de profundidad, es decir como mínimo $2,5D$ bajo la punta.

El terreno esta dividido de manera sencilla en dos niveles. El superior es el nivel Cuaternario de arenas y arcillas heterogéneas del río Konska. Su variabilidad afecta muy poco a los pilotes ya que, especialmente la zona de

afectación de la punta, está por debajo de este nivel. Respecto al fuste, como se ve en los CPTUs de la Figura 7, su variabilidad está bastante acotada y es pequeña. Por debajo de este paquete se encuentran las “glinas” de qc creciente entre los 10 y los 14 m y constante por debajo de esta profundidad (síntoma claro de sobreconsolidación importante).

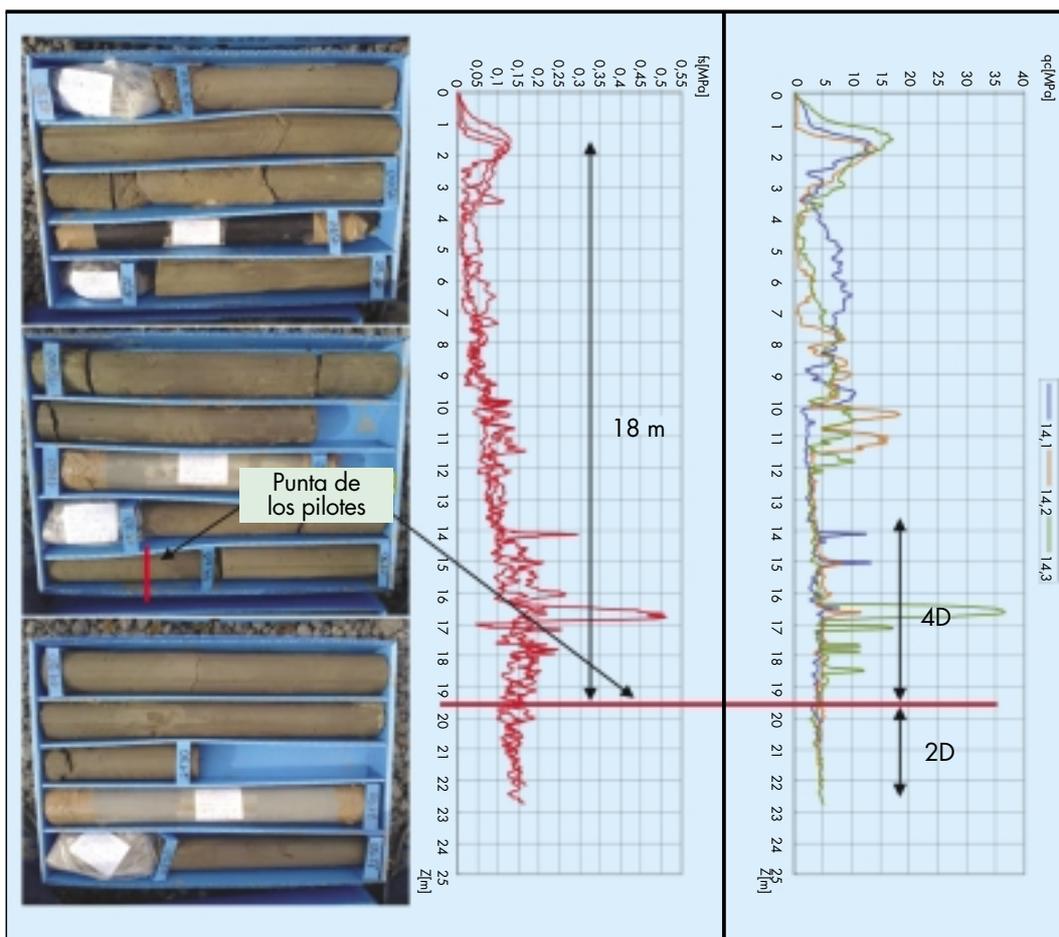


FIGURA 7. Ensayos de campo en la zona de los pilotes del apoyo “A”.

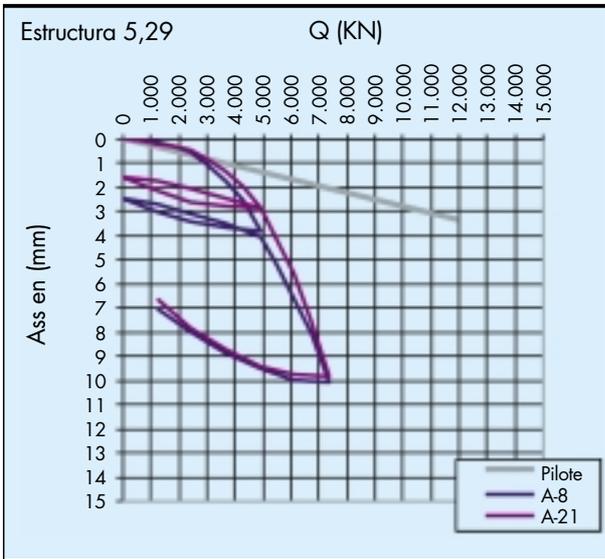


FIGURA 8. Asiento en cabeza de los pilotes ensayados vs Carga aplicada en esta.

3.3. RESULTADO DE LOS ENSAYOS "LOADING TEST" EN LOS PILOTES A-8 Y A-21 DE LA "POPDORA A", ESTRUCTURA 5-29

Se analizan los dos ensayos del apoyo "A" E-5.29, que se han comportado de manera muy similar, lo que permitirá un análisis

conjunto. La deformación elástica del pilote se interpreta según $E=3 \cdot 10^6 \text{ T/m}^2$.

Según las interpretaciones descritas en el apartado 2 se obtiene las gráficas de la Figura 9.

Se observa como los ensayos han arrojado valores iguales. Como es habitual la gráfica de Chin-Kondner ofrece los resultados más claros y a partir de los 8 mm de deformación la pendiente es la misma, lo mismo ocurre en la gráfica de Hansen y a partir de los 6000 KN en la de Decourt.

La Tabla 1 muestra el resultado de las interpretaciones que se graficaron en la Figura 9.

PN (*) → 6.651 KN

Davisson (offset) → 8.750 KN

Chin-Kondner → 11.162 KN

Si se toma la valoración de Chin-Kondner como la de valoración máxima, se podría definir una relación de los métodos de Davisson y el de la Normativa polaca frente a esta interpretación, de:

$$\text{Relación } \text{Chin/davisson} = 1,27$$

$$\text{PRelación } \text{Chin/PN} = 1,68$$

La Figura 10 muestra la superposición de las curvas ideales que se hace con los diferentes métodos explicados, sobre las curvas reales de los dos ensayos hechos en los pilotes.

(*) Normativa Polaca.

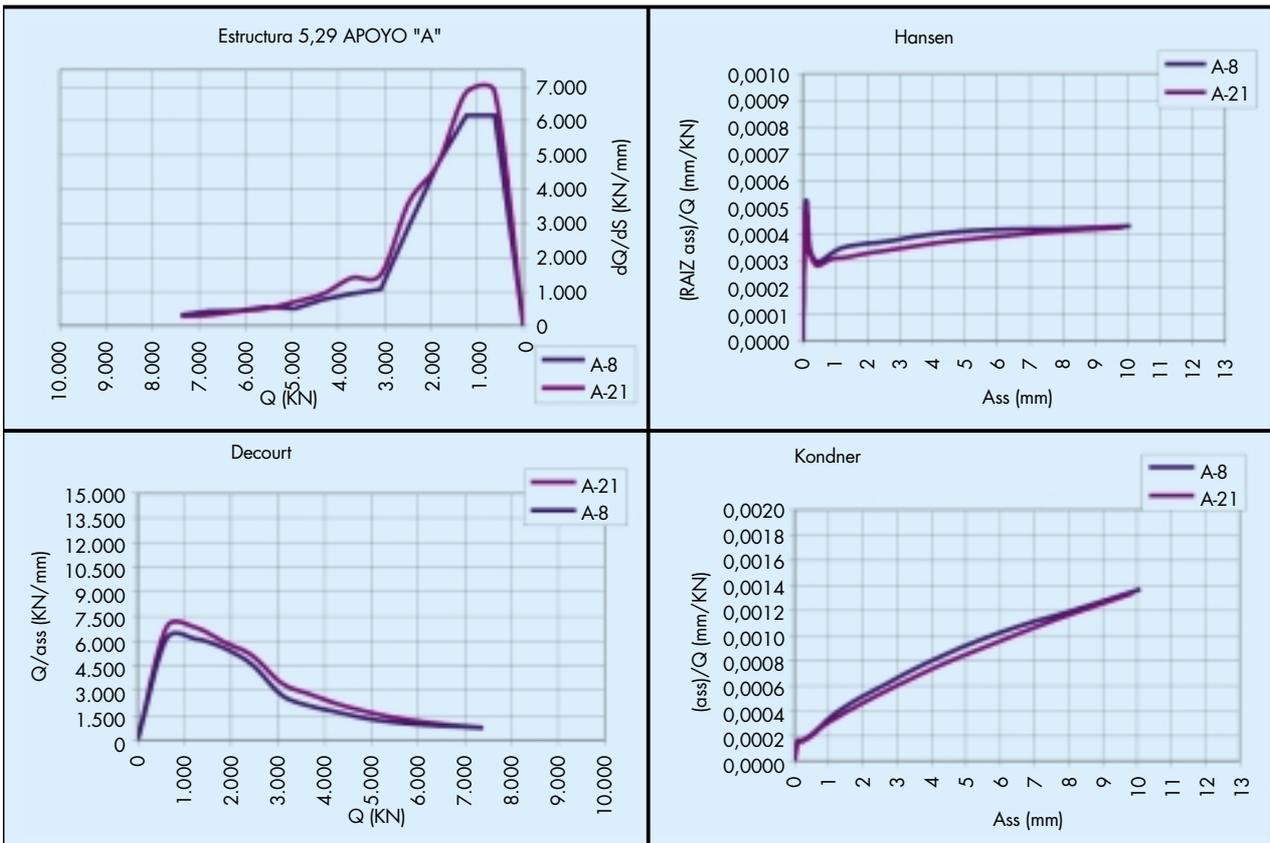


FIGURA 9. Diferentes gráficas derivadas de los dos ensayos.

pilote A-8	C1	C2	d ult (mm)	Qult
HanseN 1963	5,00E-06	0,00038	76	11470,8
Kondner	8,60E-05	0,0005		11627,9
decourt	0,1745	2016,8		11557,6
pilote A-21	C1	C2	d ult (mm)	Qult
HanseN 1963	8,40E-06	0,00034	40	9356,0
Kondner	9,35E-05	0,000405		10695,2
decourt	0,2221	2390		10760,9

TABLA 1. Interpretación de parámetros que definieron de la Figura 9.

pilote	davisson	N polaca	Hansen 63	Kondner 63	Decourt 99
A-8	8800	6651	11470,8	11627,9	11557,6
A-21	8700	6651	9356	10695,2	10760,9
MEDIA	8750	6651	10413	11162	11159

TABLA 2. Valor final de los cálculos según los diferentes métodos de análisis.

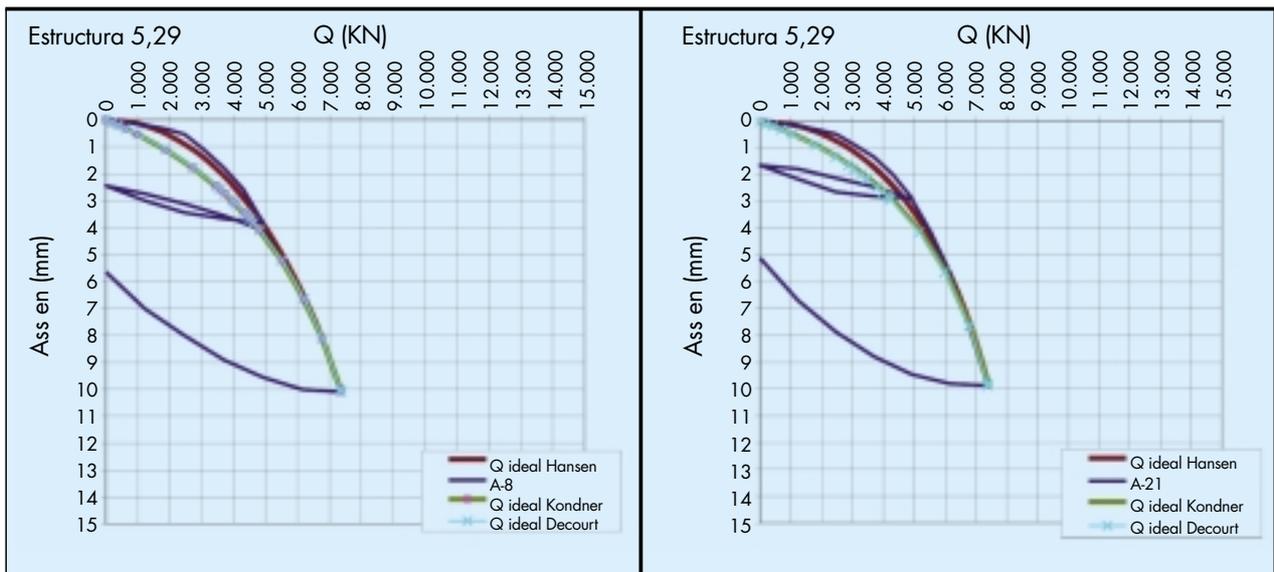


FIGURA 10. Superposición de las "curvas ideales" sobre las reales de ensayo.

En los 33 ensayos analizados a continuación se comprobó la correcta reconstrucción de las curvas de campo para aceptar las interpretaciones. En varios casos se rechazó la interpretación de Hansen por ser corto el ensayo (lo que implica error en la interpretación).

Es interesante observar que las "curvas ideales" se superponen sobre las de ensayo entre 5000 y 6775 KN, siendo según Fellinius este valor el aceptable en la carga de los futuros pilotes y coincidiendo con los criterios de Vesic y el de la Normativa Polaca.

Discernir en pilotes sin instrumentar la parte que se lleva la punta y la que se lleva el fuste es difícil. Si se aplicara el método de Weele 1957 se obtendría la Figura 11.

El valor obtenido sería de 4900 KN. Pero solamente hay dos ciclos de carga descarga. Por lo que el valor será solamente una aproximación muy grosera, aunque resultará coincidente con los métodos de preestimación que se presentarán.

Se ha de observar en este ejemplo como la interpretación del valor de la PN, hecho por el técnico de la empresa que realiza los ensayos de carga, es muy interpretativo, ya que la Figura 9 podría llevar a una interpretación de un valor situado entre los 5000 y 6000 KN. Si se plantea el criterio de Vesic directamente se puede obtener la Figura 12. Y observar como el valor a tomar podría ser claramente del orden descrito. $Q_f=5543$ KN (máximo de las gráficas).



FIGURA 11. Interpretación del rozamiento de Weele 1957.

En este caso existiría un 20% de variación en el valor respecto a lo considerado por el técnico polaco con la PN. Hay que precisar que es el máximo que se ha observado en los 33 análisis hechos. La Figura 13 muestra la diferencia entre establecer la Q de fluencia utilizando el método de Vesic y utilizando la interpretación del técnico polaco de la PN. La variación estuvo entre el 90% y el 120%. En 18 casos con la PN se sobreestima Qf (54,54 % de las medidas), en 5 se infraestima (15,15%) y en 10 casos se obtiene el mismo resultado (30,3%).

4. ANÁLISIS DE LOS 33 ENSAYOS TOMADOS COMO "TIPO" EN "GLINAS"

4.1. RESULTADO DE LOS ENSAYOS RESPECTO A LA CALIDAD DEL TERRENO

Del mismo modo que en el ejemplo del apartado nº3, se han realizado los restantes 31 pilotes que forman parte del pre-

sente análisis. En cada apoyo se ha hecho el correspondiente estudio geotécnico con 3 CPTU y sondeos de rotación. La Figura 14 muestra el resultado de los ensayos de carga con las interpretaciones de Chin-Kondner, Offset de Davisson, Vesic y según el análisis de la Normativa Polaca (PN), acorde a la descripción que se ha hecho de estos en el apartado 2.

La dispersión de los resultados está condicionada en gran parte por el nivel superior de "glinas" en unas zonas (formación Warty), y depósitos aún más jóvenes en otras, como era el caso del ejemplo "Popdora A" estructura E-5.29, en la que el nivel superior eran depósitos fluviales actuales. Estos niveles no afectan nunca a las puntas de los pilotes, pero si al fuste y se genera cierta dispersión. En otras ocasiones la superposición de los ensayos CPTU de investigación del terreno no es totalmente homogénea y obliga a escoger un valor promedio de qt, que puede originar también cierta dispersión.

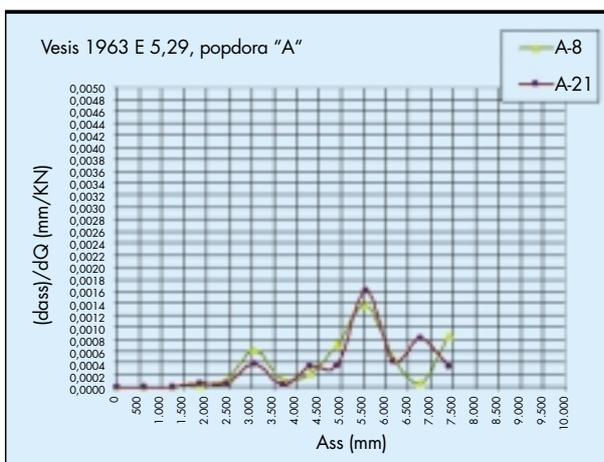


FIGURA 12. Graficación incrementos de asiento vs los de carga.

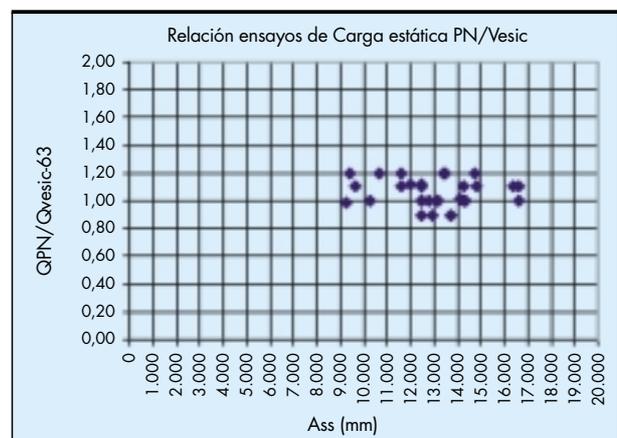


FIGURA 13. Variación en la estimación de la Qf utilizando la PN en relación directa al criterio de Vesic 63.

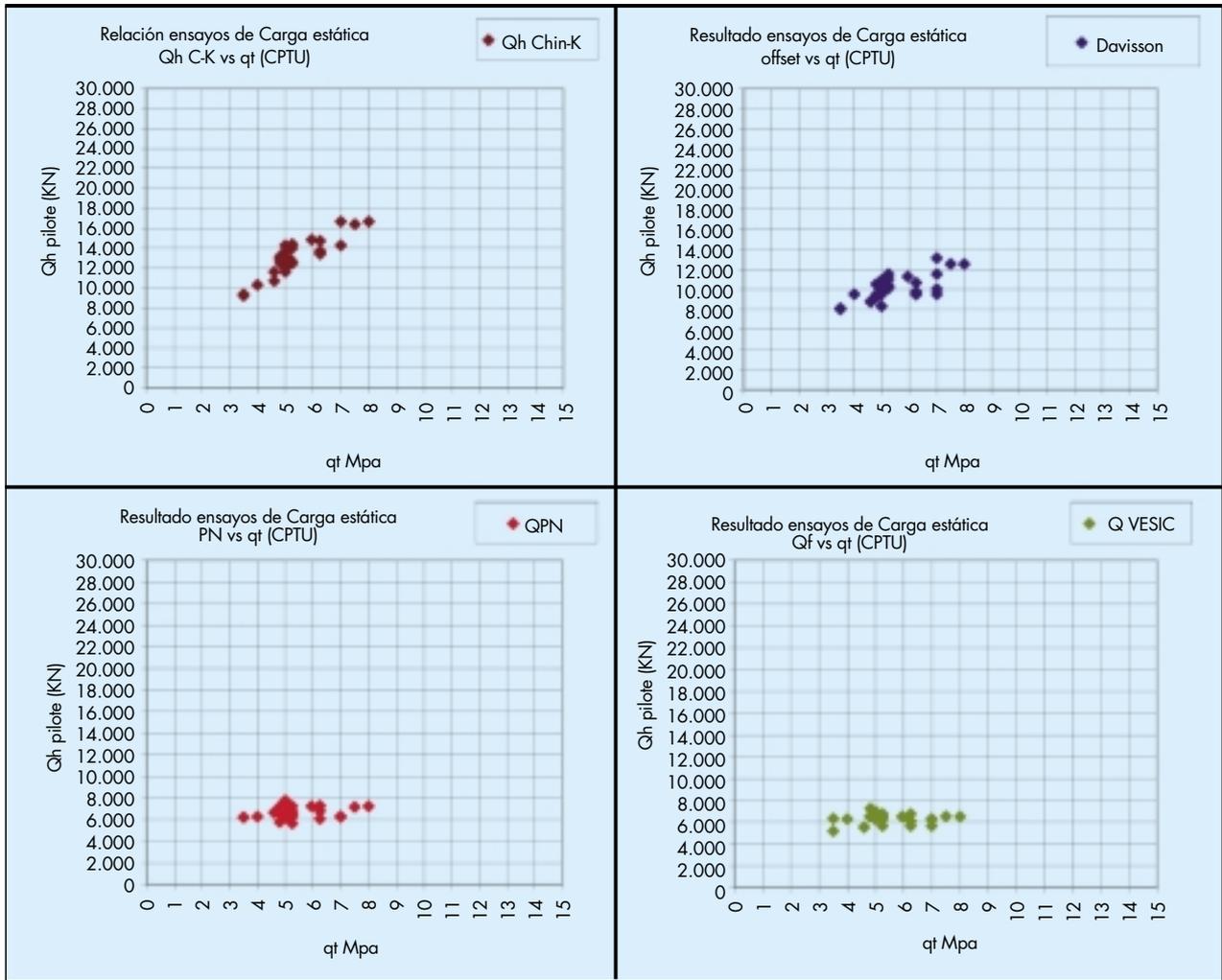


FIGURA 14. Resultado de la interpretación de los ensayos.

Resulta evidente que en la interpretación de la Normativa Polaca y la de Vesic-63 (como sucedería con la de Fellinius) el resultado es prácticamente siempre el mismo indistintamente de la qc del penetrómetro. De ahí que en esta zona de Polonia los pilotes se diseñen de manera muy similar ($L=18$ m y $D=1,5$ m) y se le exija un máximo de trabajo entorno a 5000 KN para no tener luego problemas con los ensayos de comprobación. De hecho los problemas se dan usualmente en los pilotes con puntas en arenas, ya que el pilote encamisado provoca en algunos casos el sifonamiento del terreno, y en zonas de resistencias de punta del cono de 20 y 30 Mpa se obtiene finalmente pilotes que solamente ofrecen de 2.000 a 3.000 KN (con Normativa Polaca).

La Figura 15a muestra el resultado de las interpretaciones de Hansen, sobrepuesta a la de Chin-Kondner. Destaca el hecho de que la interpretación de 21 ensayos es, a la práctica coincidente a la baja con Chin-Kondner y Decourt, hecho habitual; pero hay 12 (dos se salen del gráfico) que no coinciden y cuyo valor no se alinea de ninguna manera con el resto. Por lo que esta interpretación no parece del todo fiable en estos ensayos.

La Figura 15b muestra el resultado de las interpretaciones de N_{g1} (carga última según la Normativa Polaca

“PN”), sobrepuesta a la de Chin-Kondner. Al igual que sucedía con la valoración de Hansen los ensayos que no tienen un recorrido suficiente no se interpretan adecuadamente.

En todos los casos se observa como las extrapolaciones dan el valor en un momento de la gráfica en el que a carga constante la deformación se hace “infinita”.

4.2. PROPORCIONALIDAD ENTRE LAS DISTINTAS INTERPRETACIONES

La Figura 16 muestra la relación que existe entre el valor que interpreta Chin-Kondner y el valor obtenido por la Normativa Polaca, tal cual la interpreta el técnico polaco^(*).

La relación respecto a la interpretación de Chin-Kondner parte de 1,5 para los valores más bajos y llega hasta 2,66, lo que sin duda es un valor muy elevado. Como se verá más

(*) Varios autores han discutido que estas extrapolaciones se deban tomar como valores de carga de hundimiento real. Pero la ausencia de ensayos completos, nos lleva a hacer una interpretación respecto a estas. Pero hay que mencionar que se recomienda no exceder jamás en un diseño la carga máxima a la que llegó el propio ensayo.

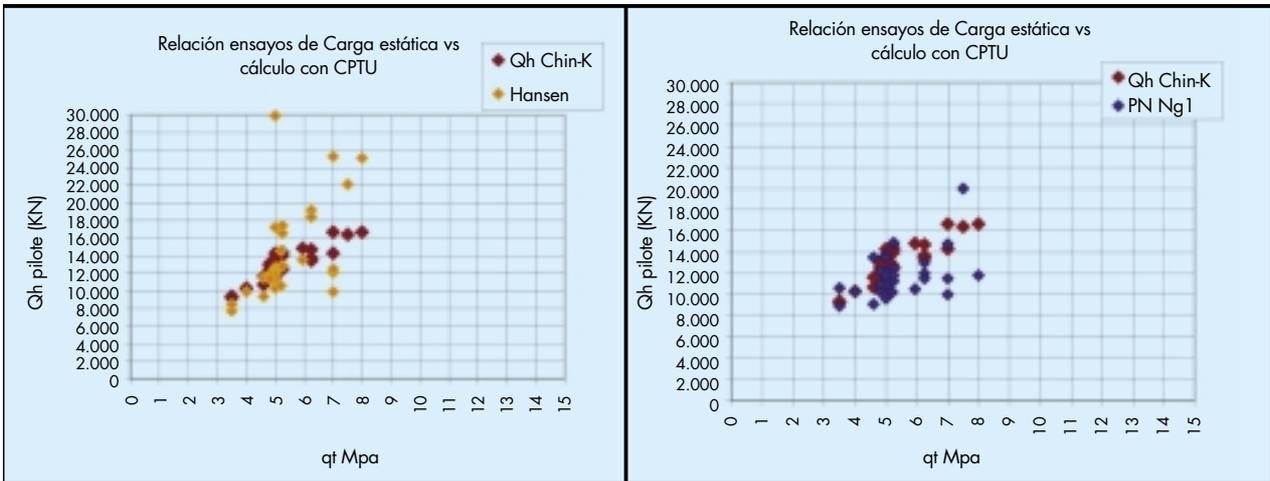


FIGURA 15. Resultado de la interpretación de los ensayos según Chin-Kondner y según Hansen.

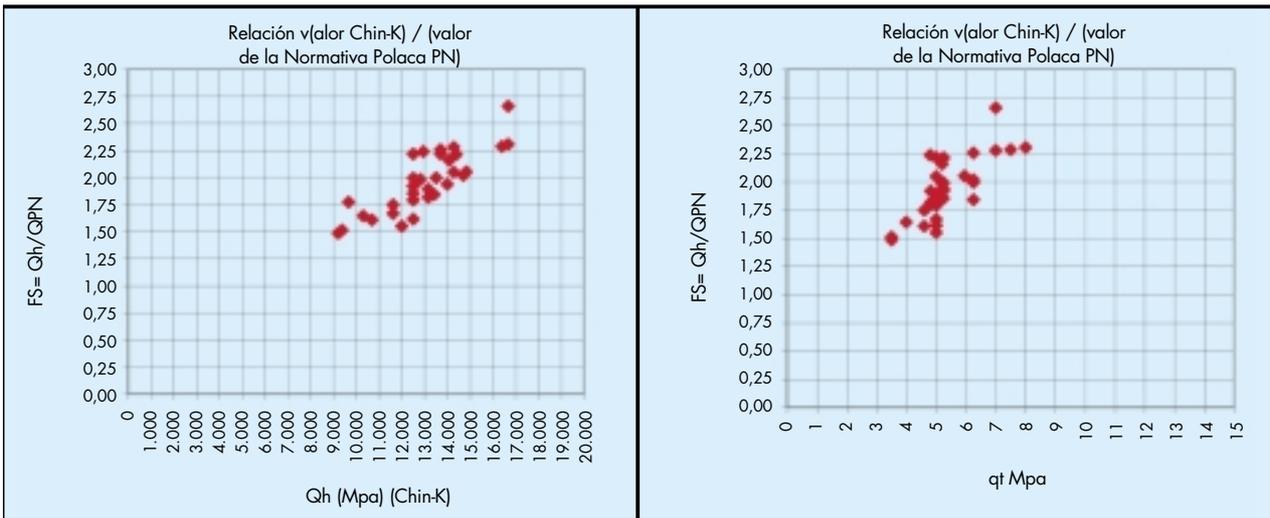


FIGURA 16. Relación entre valores interpretados por Chin-Kondner u los interpretados por la Normativa Polaca.

adelante con otras geometrías de pilotes los valores son similares.

$$1,5 < \text{Relación}_{\text{Chin/PN}} < 2,66$$

La Figura 17 muestra que lo mismo sucede con la interpretación de Vesic que ya obtenía valores similares a los de la "PN".

La Figura 18 muestra la relación (también respecto a Chin-Kondner) que arrojaría el método de Davisson en este caso.

Este método requiere de mayor recorrido de ensayo al que aquí se obtenía en muchos de los ensayos Loading Test, por lo que se ha aplicado muchas veces sobre la curva reconstruida de Chin-Kondner. De ahí que pueda existir una cierta falta de precisión. Se sabe también que esta interpretación se ve bastante afectada por otros condicionantes como la precisión y calidad del ensayo. No obstante parece lógico pensar que la proporcionalidad frente a la carga de Chin-Kondner está entorno a 1,2 o 1,25, pero la dispersión de los datos exige cierta prudencia en esta valoración.

$$\text{Relación}_{\text{Chin-K/Offset}} \approx 1,25$$

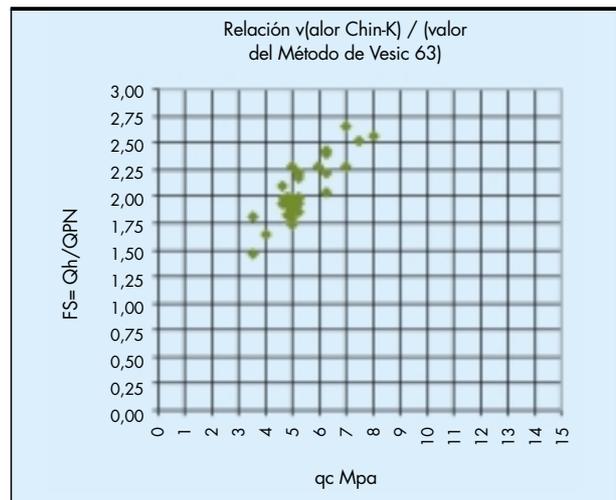


FIGURA 17. Relación entre el valor de la interpretación de Chin-Kondner y la de Vesic-63.

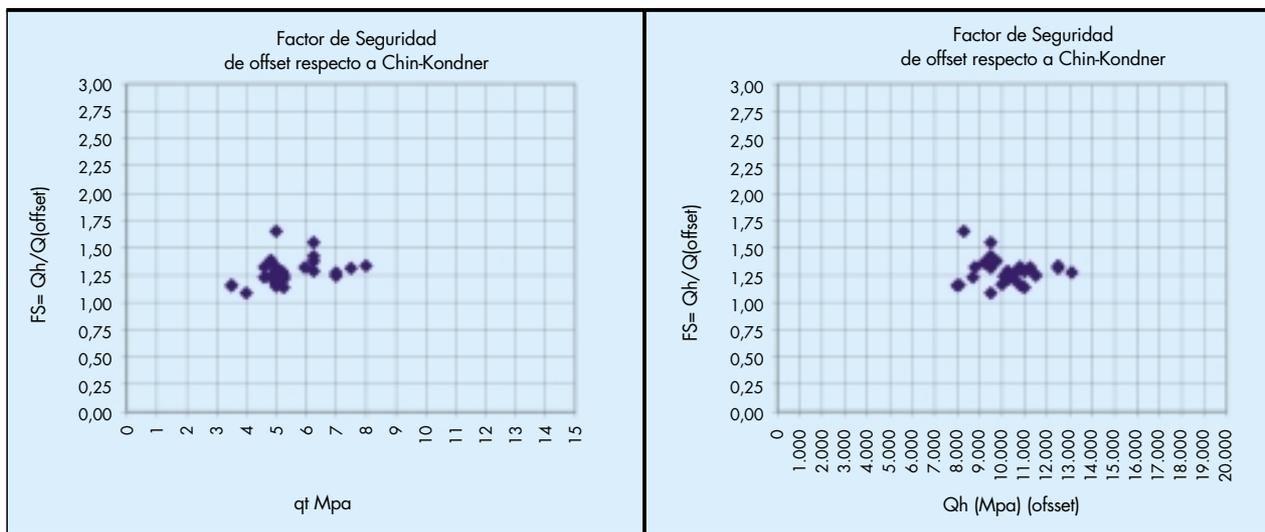


FIGURA 18. Relación entre el valor de la interpretación de Chin-Kondner respecto al método Offset.

4.3. ASIENTOS EN EL VALOR DE CARGA ACEPTADO POR LAS DISTINTAS INTERPRETACIONES

Resulta muy interesante observar los asentamientos que se determinan en las interpretaciones de los ensayos realizados. La Figura 19 muestra los ensayos en el valor de la “Q” que determina la Normativa Polaca; y los que se obtienen con el método del Offset de Davisson. También se muestran los valores con la interpretación de Vesic-63 que no queda sujeta a la subjetividad del técnico.

La Normativa Polaca produce una limitación de asentamientos de valores bajos, pero con una gran dispersión en estos, mientras que el valor de la carga es bastante homogéneo. La interpretación con método de Vesic homogeniza más ambos valores. Por su parte el método Offset de Davisson obtiene valores muy homogéneos de asentamientos que quedan por debajo de 20mm, pero tiene gran dispersión en la carga, eso si, tal y como mostraba la Figura 14 de manera proporcional a la calidad del terreno.

$$2,7 < \delta_{PN} < 10 \text{ mm}$$

$$17,5 < \delta_{\text{Offset}} < 20 \text{ mm}$$

Por otro lado se observa como la carga de fluencia de la “PN” (y la interpretación de Vésic 63) está en el orden de magnitud de otros métodos de mismo criterio (AASHO 6mm; Código de Boston 12 mm; Magnel 8 mm).

Por último se ha de mencionar que los asentamientos últimos de Hansen, en los ensayos aceptados se situaron entre 25 y 80 mm.

Estos asentamientos comparados con los que se obtendría por diferentes métodos de cálculo son aproximadamente del 20%. La Figura 20 muestra la relación asentamientos esperados vs los obtenidos a los valores de N_t de cargas admisibles consideradas en los pilotes entorno a 5500 KN.

Se consideran los asentamientos teóricos según:

$$\delta_{\text{teorico}} = N_t * \left[\frac{D}{40 * Qh} + \frac{L_c}{AE} \right]$$

lo que es válido en la GCOC española y ,uy similar a lo que se obtiene aplicando la “PN” polaca.

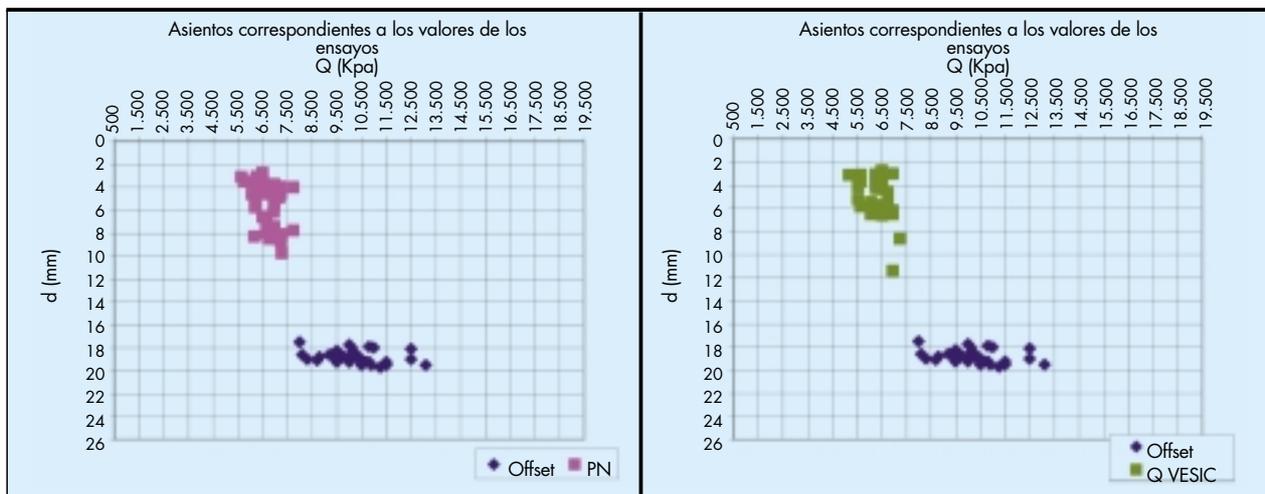


FIGURA 19. Asentamientos obtenidos en las cargas que definen la PN, Vesic y el método Offset.

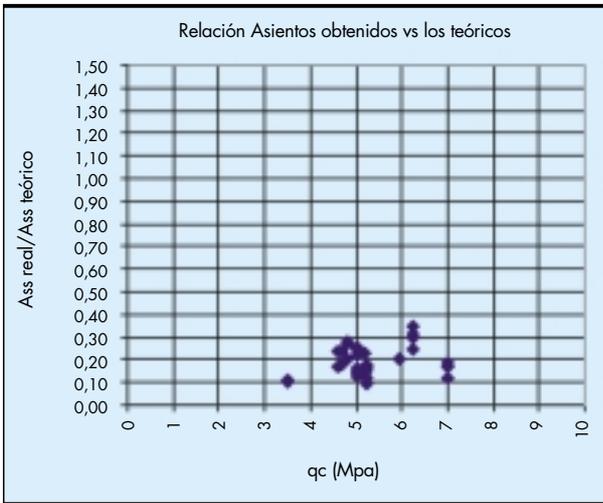


FIGURA 20. Relación de asientos obtenidos respecto a los esperados.

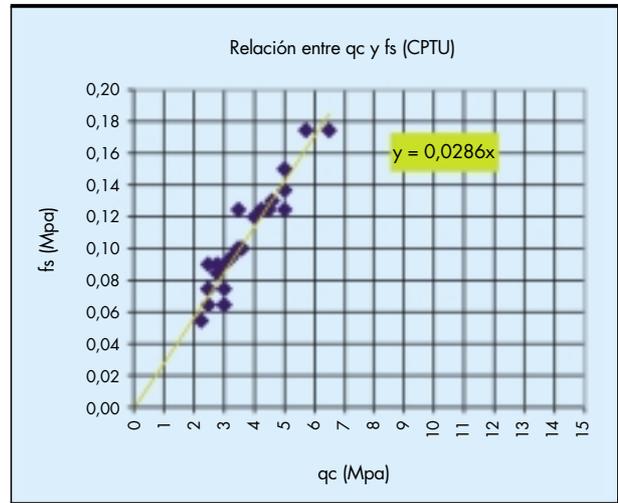


FIGURA 22. Relación entre qt y fs en los CPTU utilizados.

5. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD PORTANTE POR MÉTODOS ANALÍTICOS

5.1. DIFERENTES CORRELACIONES

- **Métodos basados en relación directa a la punta y el faldón del CPTU**

Se basa en la aplicación directa de las mediciones de la punta y los faldones del CPTU, corregidos, por el tipo de terreno, tipo de pilote, forma de la punta, (bearing capacity factor) y el fuste por el coeficiente de la adherencia (friction coefficient). Se puede expresar de forma generalizada como:

$$q_p = \beta \times q_c \text{ // } \tau_f = \alpha \times f_s$$

Lo que aquí se define como α y β tiene diferente simbología según la Normativa utilizada.

En general las Guías *usualmente* se observa un valor de beta que oscila entre:

$$0,4 \leq \beta \leq 1$$

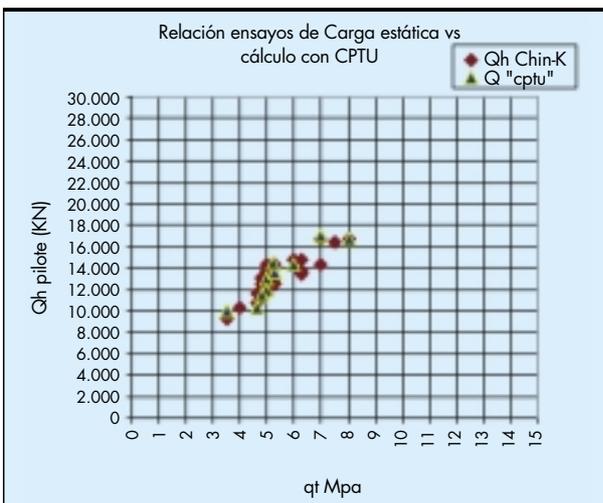


FIGURA 21. Superposición de valores obtenidos de los ensayos de carga estática según la interpretación de Chin-Kondner y de los valores establecidos desde el CPTU con $\beta=0,66$ y $\alpha=1$.

Según Schmertmann and Nottingham (78 y 75) $\beta \approx 0,5$ a 1 según el OCR. Una valoración baja de este parámetro lo encontramos en la guía española GCOC que designa $\beta \approx 0,4$ a 0,6 según la naturaleza del terreno, y las valoraciones altas, por ejemplo las considera la Canadiense FM-CGS $\beta \approx 1$.

Para el rozamiento pilote-terreno las Guías recomiendan un valor que oscila entre:

$$0,75 \leq \alpha \leq 1$$

Con limitaciones variables en el valor de fuste efectivo final, desde 60 Kpa hasta ninguna.

Se propone las estimaciones:

$$q_p = 0,66 \times q_c$$

$$\tau_f = f_s \leq 110 \text{ Kpa}$$

Esta limitación a 110 Kpa está en el orden de magnitud propuesto por Verbrugge con pilotes perforados de hormigón en terrenos limosos de $4,5 \text{ Mpa} < q_c < 6 \text{ Mpa}$ donde la limitación ha de estar entre 0,01 y 0,037 q_c . En nuestro caso esta limitación ha implicado un valor entre 0,017 y 0,024 q_t .

La Figura 21 muestra la superposición del cálculo de las cargas de hundimiento con estos valores sobre los resultados que se obtuvo en los ensayos de carga estática, para varias de las estructuras analizadas, en las que los CPTU excedían la profundidad de las puntas de los pilotes en un mínimo de 2,5D.

Si se desea establecer métodos basados únicamente en la punta del CPTU, se muestra la Figura 22 donde se realiza la correlación entre los valores de punta y de faldón obtenidos en los ensayos CPTU utilizados en este trabajo.

Puede considerarse en estas "glinas":

$$f_s = 0,0286 \times q_t$$

- **Métodos basados en los resultados de los ensayos presiométricos tipo OYO**

Son ensayos discontinuos y por lo tanto que implican menor certeza en la representatividad de los mismos frente a la naturaleza cambiante o no del terreno; no obstante puede suceder que los ensayos CPTU no alcancen las profundidades de influencia de las puntas de los pilotes. Por lo que se pueden convertir, en ocasiones, en una de las pocas herramientas habidas para definir capacidades portantes con ensayos "in situ".

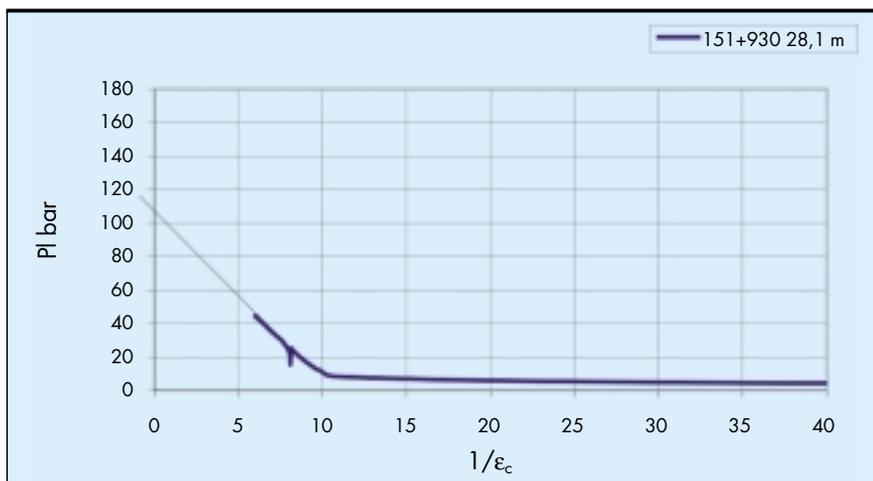


FIGURA 23. Ensayo 151+930 a 27,9 m de profundidad determinación de Pl (Bar).

Se basan en aplicar a la presión límite un factor corrector debido al tipo de terreno. Y se interpreta el rozamiento como una fracción proporcional a la tensión aplicada en la punta.

$$qp = K(pl - K_0 p_0)$$

$$\tau = \frac{qp}{\lambda}$$

En las normativas K suele oscilar entre 1,5 y 3,2 y λ entre 10 y 40. Hay que especificar que en varias de estas normativas, como en el Euro Código o en la Francesa, se define claramente que estas fórmulas se utilizan con presiometros tipo Menard y no son pocos los artículos que precisan que el tipo OYO aquí utilizado debería disponer de formulaciones propias.

Se establece la **Presión Límite** (Pl) OYO según la definición de Mair & Wood 1987 en el punto donde $1/\epsilon_c = 0$.

La Figura 24 muestra el resultado de la graficación del valor de f_s obtenido en el faldón del CPTU en cada estrato, respecto a la presión límite OYO propia de dicho estrato.

Se debe observar las diferentes unidades de la gráfica y se puede establecer:

$$\tau \approx P^*_1 / 22 \text{ o bien } \tau \approx qp / 24$$

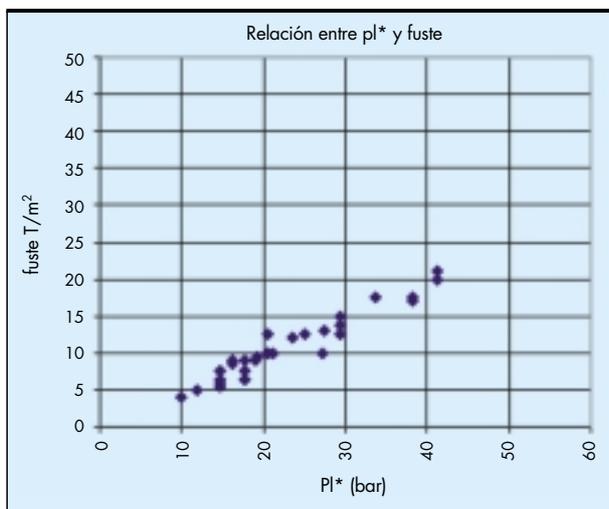


FIGURA 24. Relación entre el f_s obtenido con el CPTU y la presión límite neta del estrato en cuestión.

Respecto a la resistencia de punta se propone:

$$qp = 1,1 * P^*$$

Realizando el cálculo en las estructuras seleccionadas en las que la información presiométrica es suficiente, se obtiene el resultado que muestra la Figura 25.

Métodos basados en Ensayos de laboratorio

La toma de muestras en sondeos de rotación permitirá también alcanzar las profundidades necesarias para caracterizar el terreno que afectará a las puntas de los pilotes.

Lo habitual es obtener la "Su" con ensayos triaxiales No Drenados y definir por teorema de Cota:

$$qp = 9 * f_{Dc} * Su$$

$$\tau_f = \alpha * Su$$

Su = Resistencia al corte no drenada.

f_{Dc} = Factor de reducción por la forma del pilote (o solamente de su punta).

α = Coeficiente de reducción para el fuste.

Evidentemente no puede haber grandes diferencias entre las distintas Normativas. Las diferencias estarían en factores de

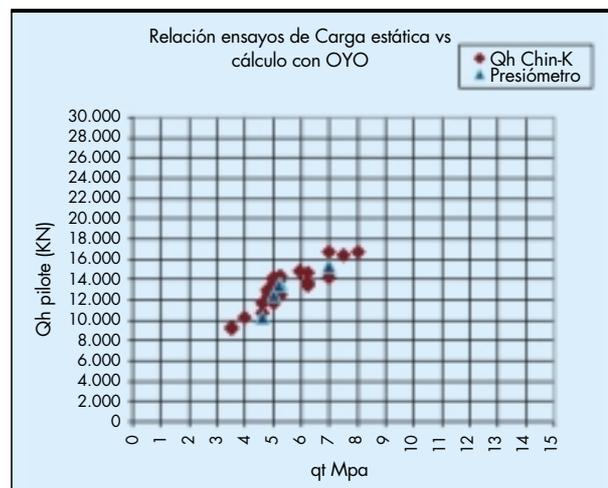


FIGURA 25. Superposición de valores obtenidos de los ensayos de carga estática según la interpretación de Chin-Kondner y de los valores establecidos desde el método presiométrico con $K=1,1$ y $\lambda=24$.

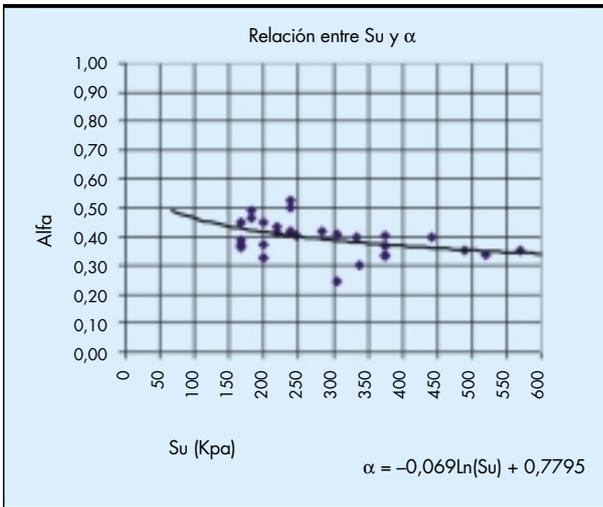


FIGURA 26. Relación entre α y S_u , partiendo del valor de f_s del CPTU.

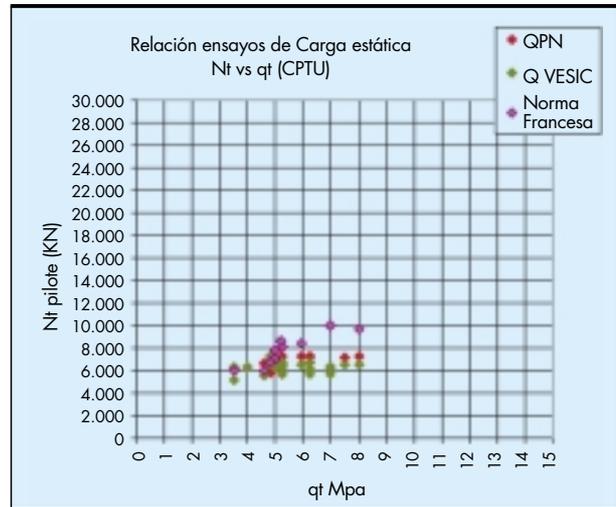


FIGURA 27. Relación entre α y S_u , partiendo del valor de f_s del CPTU.

forma de la capacidad por punta (f_p), y en la evaluación del rozamiento y su limitación ($\alpha \cdot S_u$). Respecto al factor de forma es importante recordar que para Skempton 1953 en toda cimentación existe un factor de forma que va de 6 a 9, pero se determinaría en función de L/D , no solamente de D . Siendo $q_p = (6 \text{ a } 9) \cdot S_u$. En pilotes de $L/D=12$ como los aquí analizados se definiría $9 \cdot S_u$.

En el parámetro del rozamiento (α) existe mucha dispersión y su valor suele estar entre 0,2 y 1. Son conocidos los gráficos de Kérisel, Peck, Tomlinson, Woodward, recogidos por Jimenez Salas, así como los de Dennis&Olson 1983 y Stesand&Kulhawy 1984. Golder and Leonard consideraron para pilotes excavados en arcillas de Londres valores de $\alpha \approx 0,25$ a 0,7. En estas mismas arcillas Tomlinson (1957) y Skempton (1959) definieron $\alpha \approx 0,45$. Realmente (α) está condicionada por el propio valor de la “ S_u ”, lo que lleva al hecho de intentar establecerla de manera variable en función a esta.

La Figura 26 muestra la gráfica del valor de α que sería necesario multiplicar a “ S_u ” para obtener el valor de f_s obtenido en el faldón del CPTU en cada estrato.

La gráfica resultante está en el orden de magnitud de las que suelen encontrarse en la bibliografía de este tipo de estudios. Definimos:

$$\alpha \approx 0,78 - 0,069 \cdot \ln(S_u \text{ (Kpa)})$$

Para la punta se acepta el valor $f_d = 1$. $\rightarrow q_p = 9 \cdot S_u$

6. ESTIMACIÓN DE VALOR DE CARGA DE LA INTERPRETACIÓN POLACA

Podemos establecer dos formas de evaluar la Carga de fluencia que sea equivalente a la de la Normativa Polaca y a Vesic-63. El primer método es similar al adoptado para cargas últimas y ajustar solamente α y β . Se obtendría:

$$q_p = 0,1 \cdot q_t$$

$$t = f_s (< 80 \text{ Kpa})$$

No obstante un análisis de estos resultados muestra que el valor de la punta es casi residual frente al del fuste en estos pilotes, siendo el valor final el deseado pero el proceso puede ser poco realista.

También se observa como la recomendación de la Norma Francesa de considerar:

$$N_t = Q_p/2 + Q_f/1,5$$

La Figura 27 muestra como esta interpretación ofrece resultados satisfactorios aplicándola al método Polaco y al criterio de Vesic, en los ensayos realizados en pilotes ejecutados en “glinas” de resistencia de punta entre 3 y 5 Mpa, pero se debe descartar claramente para los ejecutados en terrenos más competentes.

Aplicando correlaciones que se han hallado en esta obra para el CPTU, se puede proponer:

$$q_p \text{ (Kpa)} = 1095 + 500 \ln(q_t \text{ (Mpa)})$$

$$\tau \text{ (Kpa)} \approx 29,7 + 11,25 \ln(q_t \text{ (Mpa)})$$

7. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha intentado de una manera muy sencilla establecer formulaciones de preestimación de los valores que obtendrán los ensayos de carga estática en pilotes emplazados en materiales glaciales polacos (limos y arenas arcillosas), con el uso de ensayos CPTU, Presiómetros OYO y con ensayos de laboratorio.

También se ha realizado la comparativa entre los valores que interpreta la Normativa Polaca en los ensayos de carga y otros como Chin-Kondner, Decourt, Hansen, el Offset de Davinson y la carga de fluencia de Vesic-63.

Los resultados que ofrece el método de la Normativa Polaca (PN), el método de Fellinius y el de Vesic-63 son totalmente similares, con la salvedad de que este último no depende de la subjetividad del técnico que los analiza. Todos ellos son métodos que establecen cargas aproximadamente de inicio de fluencia y que significan asientos inferiores a los 10 mm. La mejora de la calidad del terreno tiene poca incidencia en el resultado de la interpretación del ensayo.

Las interpretaciones de Chin-Kondner y Decourt son extrapolaciones que intentan hallar cargas últimas o de hundimiento, pero por su propia naturaleza de extrapolación se deben tratar con cautela. Han dado valores que se alinean muy bien con la calidad del terreno. Usualmente se recomienda no aceptar valores superiores a los alcanzados por el propio ensayo, con todo y que siendo aquí el valor máximo de ensayo $1,5 \cdot N_t$, puede ser una recomendación en exceso conservadora.

La interpretación de Hansen es en la mitad de los casos poco creíble debido al corto recorrido de los ensayos, a la precisión de la toma de datos, etc. Los valores aceptados, han

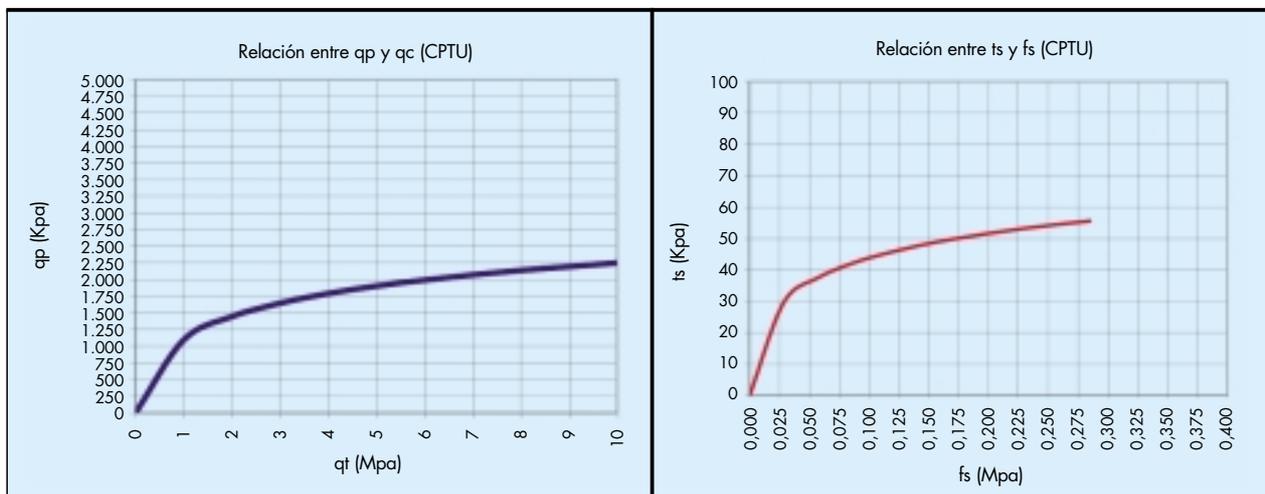


FIGURA 28. Gráficas cálculo carga Nt para aplicar la Normativa Polaca a ensayos de carga estática de pilotes.

sido, como es habitual, algo más bajos que los de Chin-Kondner y Decourt. Los asientos en el valor de la interpretación han variado mucho entre 25 mm y 430 mm.

El método de la Normativa polaca para establecer la carga última N_g^1 tiene el mismo problema que el de Hansen con la calidad de la toma de datos, recorrido de ensayo, etc. Y no siempre ofrece valores aceptables. Cuando estos parecen serlo el resultado es similar a la valoración de Chin-Kondner.

El método de Davisson permite un equilibrio entre los dos grupos de interpretaciones descritas. Por un lado muestra mejora de los valores cuando el terreno es más competente, y por otro lado mantiene los asientos siempre acotados a menos de 20 mm.

Las preestimaciones de los valores que han de arrojar los ensayos de carga estática en pilotes de gran diámetro como los tratados se podrán hacer según:

• **Carga última (Chin-Kondner)**

– Método CPTU directo

$$q_p = 0,66 * q_c$$

$$t_f = f_s (\leq 110 \text{ Kpa})$$

$$f_s = 0,0286 * q_t$$

– Método Presiométrico tipo OYO

$$q_p = 1,1 * P_{10}^{* OYO}$$

$$\tau_f = \frac{q_p}{24} < 110 \text{ Kpa}$$

$$(\tau_f = 0,045 P_{10}^{*})$$

– Métodos de "cota". (L/D > 5)

$$q_p = 9 * S_u$$

$$\tau_f = S_u * \alpha$$

$$\alpha = 0,78 - 0,069 \text{LN}(S_u) \text{ (Kpa)}$$

• **Carga fluencia (Normativa polaca y Vesic-63)**

– Método CPTU directo

$$q_p \text{ (Kpa)} = 1095 + 500 \text{LN}(q_t) \text{ (Mpa)}$$

$$\tau \text{ (Kpa)} \approx 29,7 + 11,25 \text{LN}(q_t) \text{ (Mpa)}$$

– Método Presiométrico tipo OYO

$$q_p \text{ (Kpa)} = 1095 + 500 \text{LN}(1,7 * P_{10}^{*}) \text{ (Mpa)}$$

$$\tau \text{ (Kpa)} \approx 29,7 + 11,25 \text{LN}(1,7 * P_{10}^{*}) \text{ (Mpa)}$$

8. BIBLIOGRAFÍA

Wael N. Abd Elsamee. Faculty of Engineering, Sinai University, El Arish, Egypt 2012. "EVALUATION OF THE ULTIMATE CAPACITY OF FRICTION PILES".

Fellinius, Bengt H. 2009-march. "BASICS OF FOUNDATION DESIGN". Electronic Edition.

G.E. Abdelrahman, E.M. Shaarawi, and K.S. Abouzaid. "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.

Test Method Nev.T600B, Effective August 12,1996. State of Nevada Department of Transportation Materials Division. "METHOD OF TEST FOR THE DETERMINATION OF STATIC AXIAL LOAD CARRYING CAPACITY OF FOUNDATION PILES".

Chin, F.K. (1970). "ESTIMATION OF ULTIMATE LOAD OF PILES NOT CARRIED TO FAILURE", Proc. 2nd Southeast Asian Conference On Soil Eng. Singapore, 81-90.

Sámano A. A., ICA Fluor Daniel, Paniagua W. I., Pilotec, Ibarra E., in Geum ingeniería. "PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICAS Y DINÁMICAS EN PILAS Y PILOTES PARA UNA REFINERÍA EN MINATITLÁN, VERACRUZ: COMPARACIONES DE DISEÑO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES".

Dasley Soto Luis. Estudiante 5to año Ingeniería Civil. "DISEÑO DE CIMENTACIONES SOBRE PILOTES. ESTADO DEL ARTE".

Msc. Ing. Gustavo A. Coimbra G. c.PhD. "PRUEBAS DE CARGA EN PILOTES Y SU ANÁLISIS REAL EN CIMENTACIONES PILOTEADAS".

9. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a DRAGADOS SA. La oportunidad que nos ha dado para analizar todos estos ensayos. Especialmente a Juan Manuel Ruiz, Germán Martínez y Albert Pérez.