

Penetraciones estáticas en materiales glaciares polacos. Propuesta de correlaciones a utilizar

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

RESUMEN En este documento se analiza el uso de ensayos de penetración estática tipo CPTU en la caracterización de terrenos sobreconsolidados no-permeables realizados para el asesoramiento geotécnico al 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 POLUDNIE SIN NUDO – NUDO LASK 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 use of static penetration tests, CPTU type, in the characterization of non-permeable overconsolidated soils. This CPTU was made for geotechnical support 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: "Glina", CPTU, Presión de preconsolidación aparente, O.C.R, Módulo edométrico, Resistencia al corte no drenada, Índices de fluidez, Nspt.

Keywords: "Glina", Apparent yield stress, O.C.R., Constrained modulus, Undrained shear strength, Fluidity index, Nspt.

1. INTRODUCCIÓN

Es práctica habitual en Polonia realizar los cálculos geotécnicos en la ingeniería civil, apoyados, a menudo de manera exclusiva, en ensayos tipo CPTU.

Dichos ensayos son ampliamente conocidos y utilizados en todo el mundo en materiales sobre todo, pero no exclusivamente, Normalmente Consolidados y especialmente en terrenos de resistencias al cono usualmente inferiores a 3 o 4 Mpa.

En la actualidad se están desarrollando en Polonia obras de gran envergadura que llevan a replantearse qué correlaciones serán las que se adapten mejor a los terrenos del país.

El presente artículo se centrará en el análisis de las "glinas" (arenas arcillosas, limos y arcillas glaciares) de diferentes edades que se suelen ver afectadas por estas nuevas obras.

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 obra implica un movimiento de tierras de 5.5 millones de m³ de terraplén, alcanzando altura máxima de 14,2 m. En cuanto a estructuras, se requieren más de 150.000 m³ de hormigón estructural, así como 65.000 ml de pilotes de hasta 1.800 mm de diámetro. El firme rígido se compone de una capa de 20 cm de hormigón magro, sobre la que se extienden los 659.000 m² de pavimento de hormigón con 29 cm de espesor, divididos en dos capas de 24 y 5 cm. La superestructura se caracteriza por los más de 190.000 m² de pantallas acústicas, cimentadas sobre 39.000 ml de pilotes de diámetro 800 mm. Por último el terreno tiene tratamientos de mejora realizados con jet grouting y con más de 200.000 m.l. de columnas de grava-cemento.

(*) Ingeniero geólogo. por la Universidad de Barcelona y Universidad Politécnica de Cataluña. Empresa de geotecnia IGPS SL. Asesor geotécnico S-8 POLAQUA-DRAGADOS Polonia. E-mail: igps@igps.cat

(**) 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 POLAQUA-DRAGADOS. Polonia. E-mail: aina.igps@igps.cat

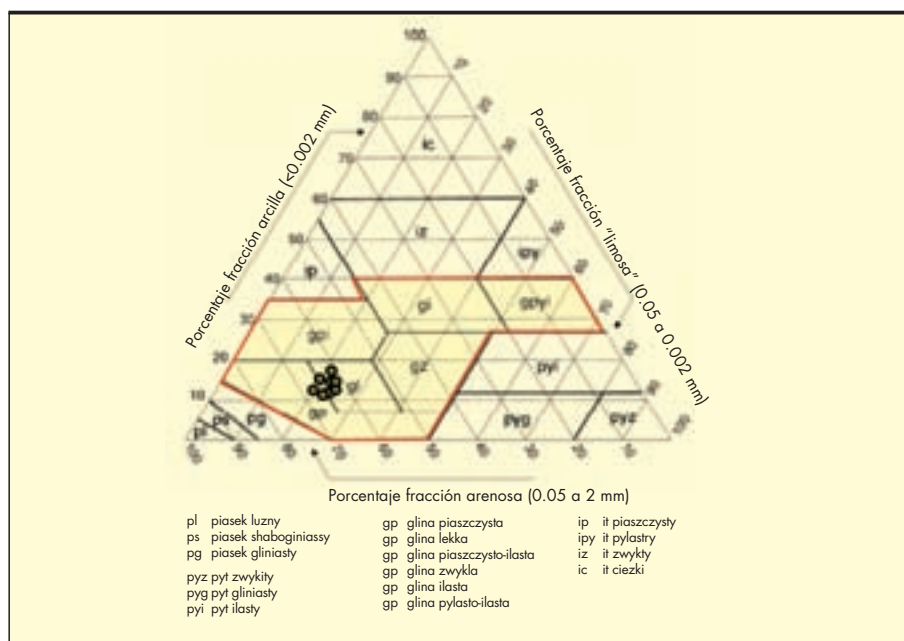


FIGURA 1. Diagrama de las clasificaciones de suelos polacos PTG 2008.

En esta obra se ha realizado más de 2.000 m.l. de ensayos de penetración estática de cono eléctrico tipo CPTU. Junto a 56 de estas prospecciones, se han realizado sondeos de rotación con recuperación continua de testigo de 30 m. de longitud cada uno. Los sondeos se han entubado siempre y se han tomado muestras inalteradas. Parte de estas muestras se han tomado con tubo tomamuestras convencional de pared gruesa y parte de ellas con shelby de pared delgada introducida a presión.

2. NATURALEZA DEL MATERIAL CARACTERIZADO

Se entiende por "**glinas**" en Polonia, los materiales provenientes del deshielo de los glaciares. En general materiales de media a baja permeabilidad, entre **SM, SC, ML-CL y CL** según varía la cola de finos y el índice plástico. La Figura 1 muestra la carta de clasificación de suelos polaca con los materiales analizados.

La Figura 2 muestra las granulometrías y los límites de Atterberg realizados; un grupo, con la fracción granulométrica que pasa por el tamiz 0,4 mm acorde a las Normativas anglosajonas (U.S. standard) y otro grupo realizado con la que pasa por 2 mm, acorde a la Normativa polaca.

La Figura 3 muestra el aspecto de las "glinas" que ya sean en realidad arenas o no, se identifican claramente como un material no drenado por la cantidad de finos que tienen.

Además de muestras con toma muestra convencional de pared gruesa se tomaron también con shelby de pared delgada, de 70 mm inyectada en toma muestras de pistón.

Más allá de la más estricta geología, **Geotécnicamente**, es decir bajo el punto de vista puramente ingenieril, se pueden distinguir en el presente artículo, tres pisos de "**glinas superficiales**" (entre 0 y 35 m de profundidad). El primer piso son "**glinas superiores**" de resistencias de punta usualmente comprendidas entre 1 y 3,5 Mpa. Con valor casi medio y más frecuente de **qt=2,25 Mpa** formado por SC, ML y CL.

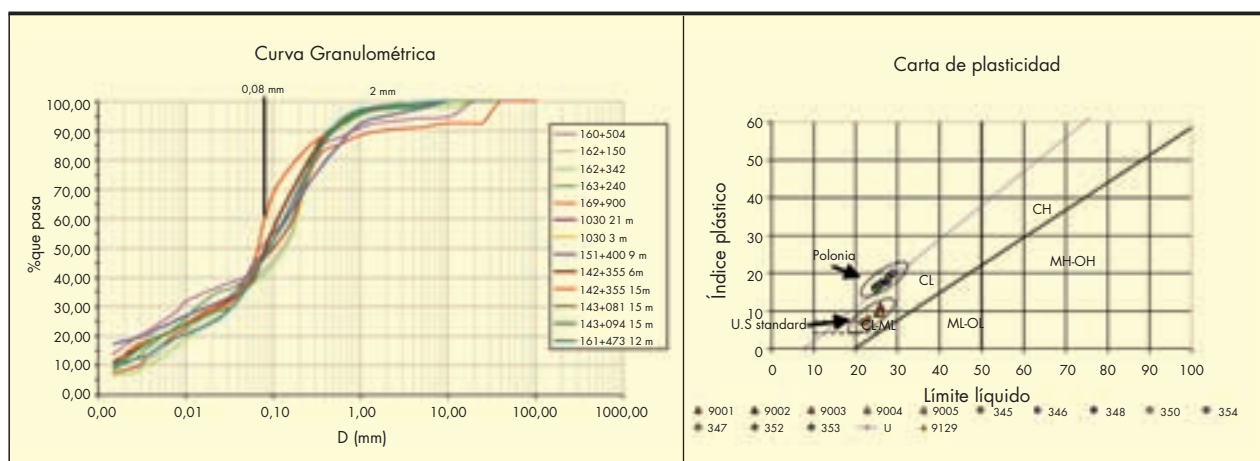


FIGURA 2. Granulometrías y carta de plasticidades de Casagrande.



FIGURA 3. Aspecto de las “glinas” en sondeos helicoidales y en los sondeos de rotación.

El segundo piso, “*glinas medias*”, se observa siempre por debajo del anterior. El valor de la punta del CPTU suele estar entre 4 y 6 Mpa, con un valor medio y usual de $qt \approx 5$ Mpa.

Y el tercer paquete, “*glinas inferiores*” tiene resistencia de punta de entre 7 y 12 Mpa, con valor usual entorno a $qt \approx 10$ Mpa. No está claro que la separación entre pisos inferiores sea geológicamente correcta pero, como se verá, tiene su explicación geotécnica.

La Tabla 1 (Página siguiente) muestra los ensayos realizados.

La Figura 4 muestra el CPTU típico realizado en “glinas”. Se observa entre 3 y 14,5 m el que se ha denominado “piso superior” ($qt \approx 2,25$ Mpa). En él se podrían realizar sub-pisos (3 a 5 m; 5 a 10 m y 10 a 14,5 m), que corresponderían a ligeros cambios en el contenido de finos. Por debajo de 14,5 m el “piso medio” ($qt \approx 5$ Mpa).

3. CARTAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA PENETRÓMETROS ESTÁTICOS

La Figura 5 muestra algunos resultados de los CPTU proyectados en la carta de clasificación de Robertson 1990.

Da la sensación de ser siempre un material del grupo 4, con dispersión a grupos 5 y 3 para el “piso superior”, que es el más joven y menos consolidado. En cuanto a los pisos “medio” e “inferior”, básicamente se centra en grupo 4, llegando al 9, con el aumento de la qt (y lógicamente de Q_t), que significa evidentemente también su aumento de OCR.

Bajo un punto de vista estrictamente geotécnico el aumento de qt y f_s se atribuye directamente a un aumento de la presión de preconsolidación, ya sea “apparent yeild stress” o sobrecarga estricta que haya existido (bajo un punto de vista geológico esta diferencia sí tendría una importancia que no es objeto de este artículo).

Estos resultados están sacados de siete CPTU representativos de la obra, por lo que con la totalidad, la dispersión crece, pero el peso de las gráficas de la Figura 5 se ha observado siempre totalmente válido.

Para materiales sobreconsolidados como son en general las “glinas”, resulta muy útil la carta de Eslami-Fellinius (1997). Esta se basa solamente en 5 zonas. En la Figura 6 se mantienen los puntos graficados en la Figura 5.

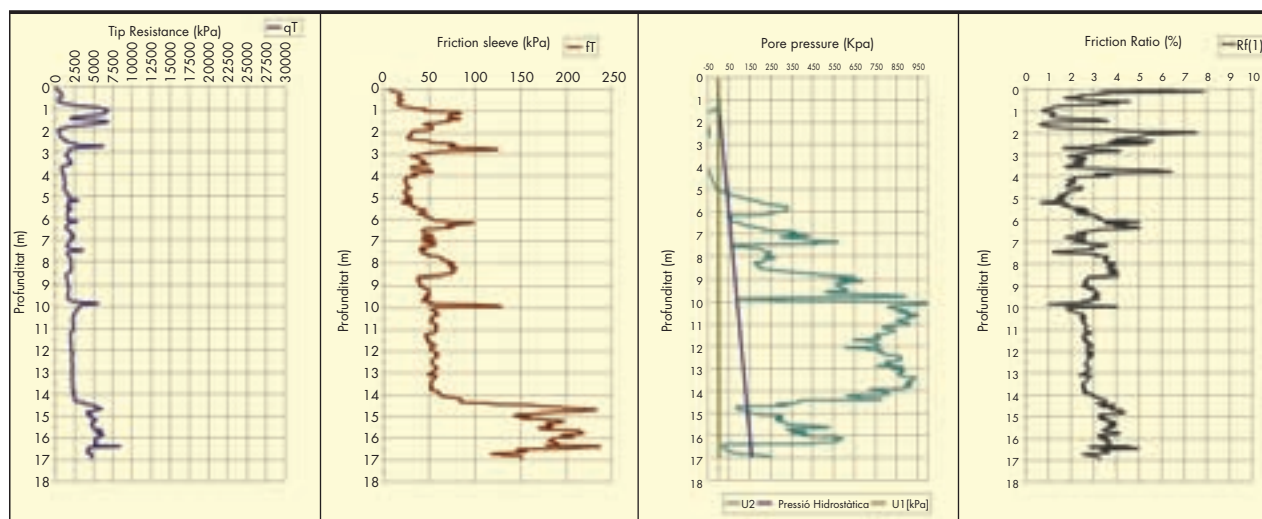


FIGURA 4. Aspecto de las “glinas” en los ensayos CPTU. Ejemplo del ensayo WS-5-1 de la obra.

PARÁMETROS EDMETRO													
piso	colores	MUESTRA	PK	PROFUNDIDAD	Cc	e0	Cs	Cc/(1+e0)	qt Mpa	N.FREATICO	GOUPEO spt	spt	σv' bar
P sup		9001	160+504	9,30	0,12	0,448	0,0223	0,083	1,75	1,4	6/12/17/21	29	1,07
		9002	162+150	15,30	0,06	0,304	0,0157	0,048	5	6,2	7/12/19/26	31	2,15
		9003	162+342	6,30	0,05	0,29	0,0111	0,042	5	0,3	6/12/18/25	30	0,66
		9004	163+240	9,30	0,05	0,273	0,0174	0,042	4,7	3,24	12/17/19/23	36	1,254
		9005	169+900	18,30	0,06	0,293	0,0195	0,049	5,4	4,8	12/22/26/30	48	2,31
		345	82/12/G/345	15,3	0,081	0,319	0,0163	0,061	2,75	1,4	6/7/11/15	18	1,67
		346	82/12/G/346	6,3	0,0894	0,339	0,0183	0,067	1,75	1,4	5/7/10/14	17	0,77
		348	82/12/G/348	15,3	0,0962	0,369	0,02	0,070	2	1,3	5/6/11/17	17	1,66
		350	82/12/G/350	15,3	0,0783	0,342	0,016	0,058	3,5	1,3	8/11/13/16	24	1,66
		354	82/12/G/354	9,3	0,111	0,569	0,0207	0,071	2,4	2,8	7/9/13/15	22	1,21
		347	82/12/G/347	12,3	0,1187	0,424	0,0154	0,083	2,3	1,48	5/7/10/14	17	1,378
P med/inf?		352	82/12/G/352	3,3	0,0766	0,513	0,011	0,051	6,5	0	6/10/14/21	33	0,33
P inf		353	82/12/G/353	21,3	0,0672	0,538	0,01	0,044	9	0	8/14/19/27	24	2,13
P sup		9129	162+420	5,25	0,088	0,383	0,0162	0,064	2,15	0,3			0,56

PARÁMETROS EDMETRO													
qt Mpa	qt - sv Mpa	(qt-sv)/ sv' Mpa	qt/SV	Lw	Lp	IP	2 mic	e0	W0	%0,08 mm	Cc	Cs	Cc/(1+e0)
160+504	1,75	1,564	16,36	25,90	14,70	11,20	16,70	0,448	16,98	49,50	0,12	0,0223	0,08
162+150	5	4,694	23,26	22,93	14,93	8,00	7,90	0,304	10,70	40,70	0,06	0,0157	0,05
162+342	5	4,874	39,626	21,90	14,60	7,30	6,70	0,29	10,90	39,30	0,05	0,0111	0,04
163+240	4,7	4,514	37,48	25,20	15,70	9,50	10,30	0,273	10,00	45,30	0,05	0,0174	0,04
169+900	5	5,034	23,38	25,93	16,33	9,60	8,30	0,293	10,50	44,50	0,06	0,0195	0,05
142+355	82/12/G/345	2,75	14,635	16,47	26,00	8,60	17,40	0,319	11,40	55,37	0,081	0,0163	0,06
142+355	82/12/G/346	1,75	21,091	22,73	25,80	8,80	17,00	0,339	11,90	47,58	0,0894	0,0183	0,07
143+081	82/12/G/348	2	10,205	12,05	27,30	9,60	17,70	0,369	14,00	48,63	0,0962	0,02	0,07
143+094	82/12/G/350	3,5	19,241	21,08	24,80	8,50	16,30	0,342	11,50	46,21	0,0783	0,016	0,06
151+400	82/12/G/354	2,4	18,298	19,83	28,80	8,70	20,10	0,569	12,80	47,79	0,111	0,0207	0,07
160+473	82/12/G/347	2,3	14,906	16,69	25,00	8,70	16,30	0,424	14,20	47,63	0,1187	0,0154	0,08
1030,00	82/12/G/352	6,5	149,628	151,16	27,70	8,90	18,80	0,513	10,50	32,89	0,0766	0,011	0,05
1030,00	82/12/G/353	9	38,448	40,36	24,70	9,10	15,60	0,538	10,60	46,21	0,0672	0,01	0,04
162+420	9129	2,15	36,85	38,74	22,80	14,90	7,80	0,38	13,80	49,30	0,09	0,02	0,06

PARÁMETROS EDMETRO													
qt Mpa	qt - sv Mpa	(qt-sv)/ sv' Mpa	qt/SV	Lw	Lp	IP	2 micras	e0	W0	%0,08 mm	Cc	Cs	Cc/(1+e0)
P Superior	2,33	2,10	18,73	20,49	10,31	15,48	14,66	0,40	13,32	49,00	0,10	0,02	0,07
P. Medio	4,93	4,78	29,81	31,19	15,39	8,60	8,30	0,29	10,53	42,45	0,06	0,02	0,05
P inferior	7,75	7,50	94,04	95,76	26,20	9,00	11,60	0,53	10,55	39,55	0,07	0,01	0,05

TABLA 1. Tabla de los ensayos CPTU y edómetros analizados.

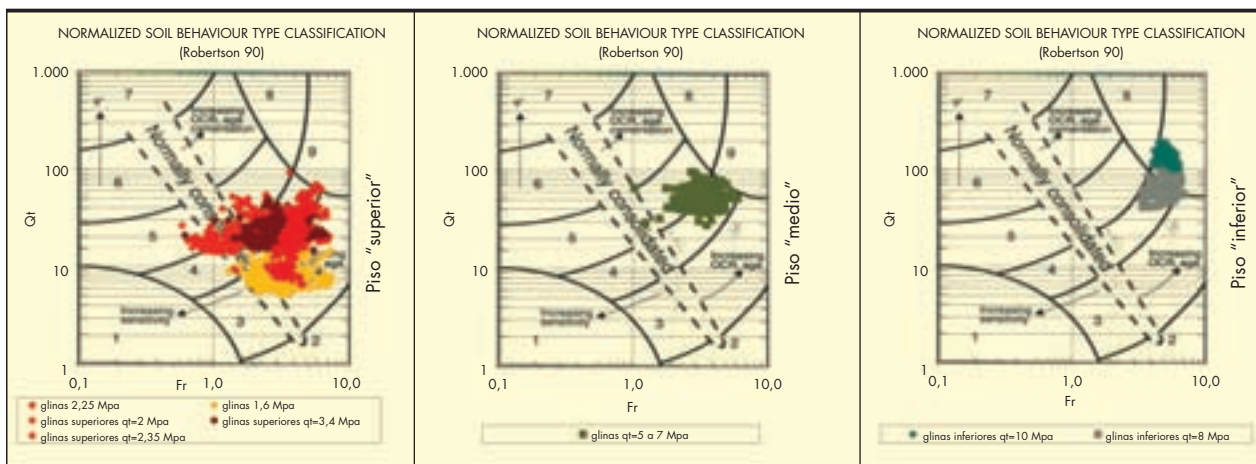


FIGURA 5. Clasificación de Robertson 1990, para los tres pisos geotécnicos definidos.

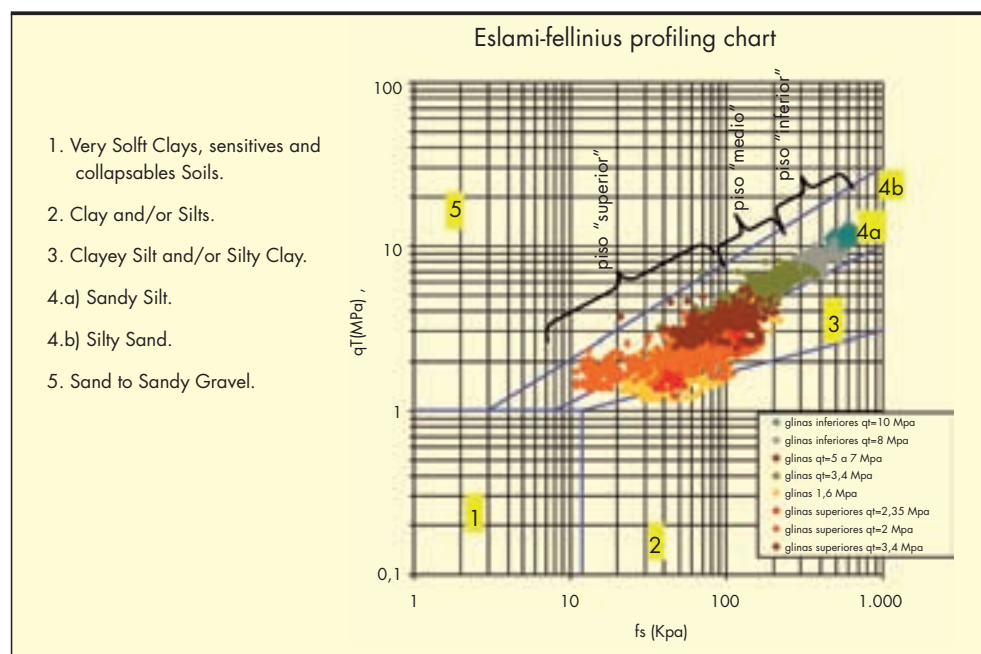


FIGURA 6. Clasificación de Esmali-Fellinius 1997, para los tres pisos geotécnicos definidos.

4. CORRELACIÓN CON LOS PARÁMETROS OBTENIDOS EN LOS EDÓMETROS

4.1. DATOS GENERALES

Los ensayos analizados pertenecen todos a "glinas" en mayor o menor medida sobreconsolidadas. Por lo que establecer las P'_0 en dichos ensayos es de por sí complejo. Además la toma de muestras no permite, a veces, especímenes de buena calidad. Por lo que los resultados pueden tener cierta dispersión propia de la interpretación y no de la realidad. En el presente trabajo se ha hecho la reconstrucción de Schmertman (1953) para establecer la determinación de las P'_0 en materiales sobreconsolidados.

4.2. VALORACIÓN DE LA PRESIÓN APARENTE MÁXIMA (P'_0) Y DEL O.C.R.

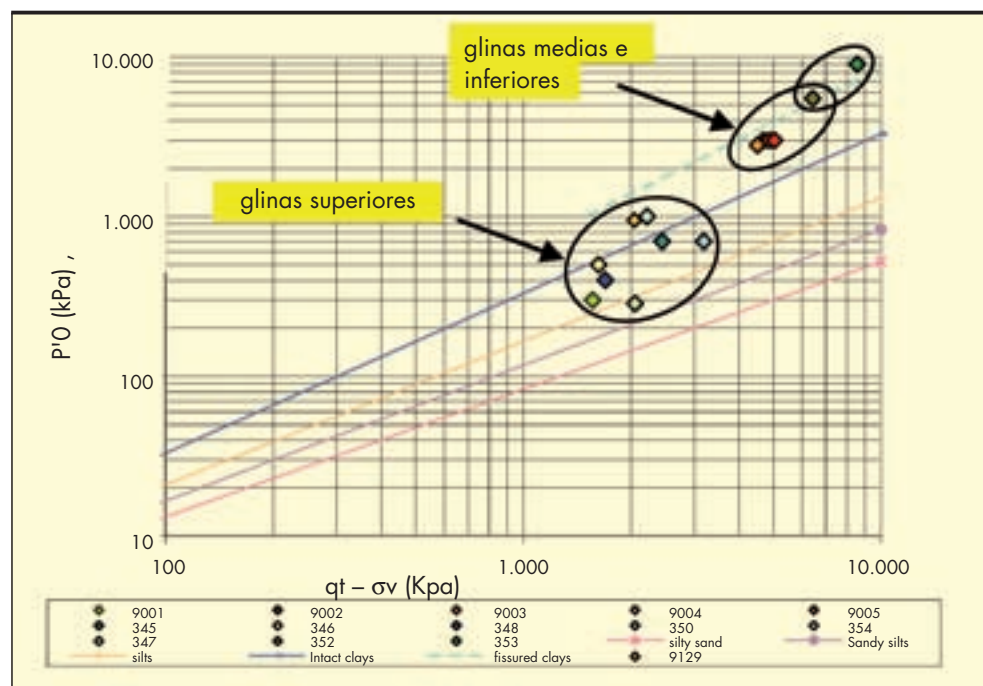
Para establecer una correlación útil para determinar la presión de sobreconsolidación P'_0 , se analiza primeramente la

proyección de los resultados en la gráfica (P'_0 vs ($qt-\sigma_{v0}$)). Hay que apuntar que en la bibliografía habitual los valores de $qt-\sigma_{v0}$ suelen ser inferiores a 1.000 Kpa, que es justo donde empiezan las "glinas" analizadas. Las relaciones halladas en la literatura general son del tipo (en realidad para arcillas que normalmente se identifican como materiales tipo CL).

$$P'_0 = \alpha * (qt - \sigma_{v0}) \quad \text{con } \alpha \approx 0,2 \text{ a } 0,4$$

Para encontrar gráficas más amplias hace falta analizar trabajos como los de Kulhawy and Mayne (1990) y observar graficados valores normalizados ($(qt-\sigma_{v0})/Pa$) de hasta 100, donde sí se encontrarán resistencias de punta similares. Las "glinas" se ubican en valores aproximados entre 1.000 y 10.000 Kpa. En las "glinas" el término σ_{v0} pierde peso ya que se analizan profundidades poco importantes (0 a 20 m) y los valores de qt de partida son muy elevados comparados con los

FIGURA 7. Resultado de ensayos en las "glinas" polacas y correlaciones propuestas por Mayne según las diferentes naturalezas de los materiales.
Fuente: 17th ICSMGE 2009 Alexandria.



habituales de lodos marinos o de otros terrenos jóvenes NC. Con el tiempo la correlación de P'_0 fue generalizada, por ejemplo Mayne (2009), y se reescribe, fijando $\alpha \approx 0,33$ y entendiendo que se requiere de un exponente que esté ligado a la naturaleza del material ensayado. Esta es una idea que, como se verá, se utilizará en el resto de correlaciones del presente artículo.

$$P'_0 = 0,33 * (qt - \sigma_{v0})^m$$

Es evidente que, con todo y que el contenido de finos se puede considerar una ventana relativamente bien definida en las "glinas" de la obra, aproximadamente entre el 40 y el 60%, una expresión de este tipo permitirá ajustar mejor las "glinas" (predominantemente limo-arenosas o areno-limosas) a las presiones de preconsolidación a considerar.

La Figura 7 muestra los puntos ensayados en el presente trabajo y las diferentes correlaciones (líneas de colores) que propone Mayne (2009) (17th ICSMGE 2009 Alexandria), más la de arcillas fisuradas que también propone en la misma carta.

En esta gráfica resulta lógico que las "glinas" al no ser materiales clasificables como puramente arcilla "CL" se desplazan a valores más propios de limos y limos arenosos.

Parecería que nuestras "glinas" jóvenes ("superiores") se mueven entre $m=0,85$ y $m=1,1$ típico de materiales como los nuestros (la dispersión de estos valores entra en total concordancia con la identificación de las Figuras 5 y 6, pero también con el método de determinación de P'_0 en los edómetros); y que las "glinas" más antiguas ("medias e inferiores") se ajustan a los valores de arcillas fisuradas, más cuanto mayor es la qt . Para este segundo hecho existen explicaciones que se discutirán en el presente artículo que van más allá de una verdadera prefisuración del material.

La Figura 8 muestra la correlación que se haría si no se estuviera influenciado por los trabajos de Mayne y otros. En la figura de la derecha se ha añadido también la expresión generalizada con $m=0,95$ que parece el valor medio en la Figura 9.

Es importante observar que, frente a las correlaciones conocidas, las "glinas jóvenes", con nuestra correlación, son coincidentes a la práctica con $P'_0 \text{ (Kpa)} = 0,33 * (qt - \sigma_{v0})^{0,9}$ a $0,95$. Pero las antiguas son muy diferentes ya que se van a la zona de "fissured clays" de Mayne. En conclusión se puede establecer:

$$P'_0 \text{ (Kpa)} = 0,33 * (qt - \sigma_{v0})^{0,95} \text{ válida para el rango } qt - \sigma_{v0} = 0 \text{ a } 3,5 \text{ Mpa}$$

$$P'_0 \text{ (Mpa)} = 0,13 * (qt - \sigma_{v0})^2 \text{ válida para el rango } qt - \sigma_{v0} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$$

No obstante cabe preguntarse el por qué de la pérdida de linealidad que se da al dejar las "glinas jóvenes" y pasar a otras más sobreconsolidadas (se trata de un primer piso de $P'_0 \approx 0,25$ a 1 Mpa frente a $P'_0 \approx 3$ Mpa y $P'_0 \approx 9$ Mpa). Este hecho es muy habitual en las gráficas típicas de Tavenas, Mayne, etc y se atribuye siempre a que las arcillas están fisuradas. En el presente trabajo se observaron las muestras con lupa y no se intuyeron fisuras en el material (si bien es cierto que la perforación y la toma de testigos pueden alterar las muestras). Si a este hecho se añade que las presiones intersticiales (u_2) en lugar de aumentar, usualmente disminuyen en estos materiales de qt mayor, hasta llegar a ser negativas en muchas ocasiones, sí se cree que puede atribuirse a fisuras, pero también éstas podrían producirse por la velocidad de avance demasiado rápida del CPTU frente a estos materiales tan rígidos. Se entiende que el fenómeno podría ser como el de propagación de fisura en una roca (o como un fenómeno de dilatancia), pero con la punta del CPTU abriendo las paredes y desplazándose por la fisura generada, produciéndose un fenómeno de succión intersticial en la punta del mismo y dándose una disminución de la qt que correspondería de manera lógica a dichos terrenos. Evidentemente estos fenómenos no ocurrirían en los ensayos edométricos, y por lo tanto los valores pierden la linealidad. La pregunta es si realmente guardan algún tipo de proporcionalidad como se ha inten-

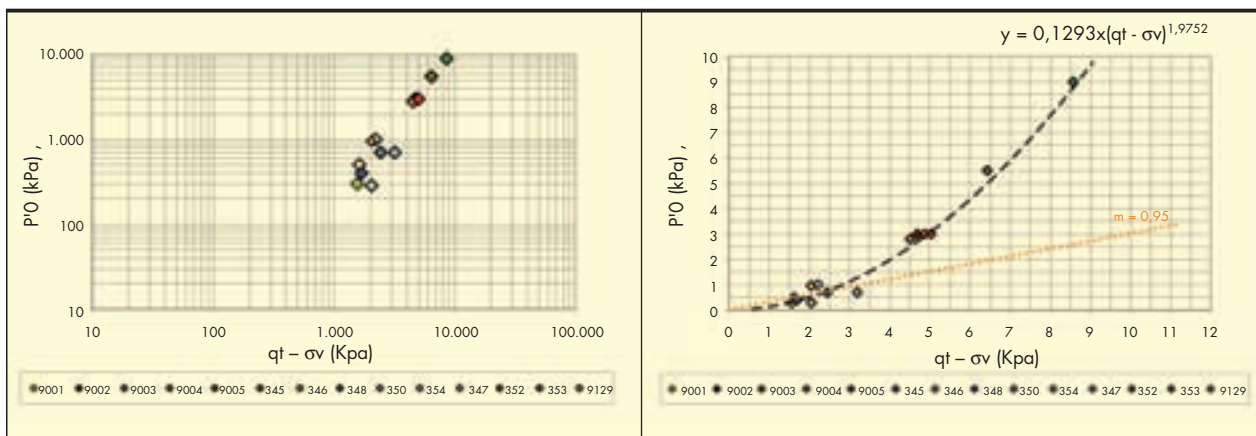


FIGURA 8. Resultado de ensayos en las glinas polacas y correlaciones propuestas C-A para la P'_0 .

tado hallar en la Figura 10 y en la correlación exponencial propuesta. Se observa en la Figura 9 de Mayne (2009), pero también se observa en otras de otros autores, como a partir de $qt - \sigma_{v0} \approx 3$ Mpa no existe población de puntos que justifique la linealidad de las correlaciones usualmente utilizadas. Y por lo tanto **cabe preguntarse si las correlaciones habituales del tipo $P'_0 = 0,33 \cdot (qt - \sigma_{v0})$ pueden ser no válidas por un tema de limitación del propio ensayo a partir de $qt > 3$ Mpa.**

Respecto al OCR es suficiente con considerar P'_0 / σ'_{v0} , luego se puede determinar:

$$OCR = 0,13 \cdot (qt - \sigma_{v0})^2 / \sigma'_{v0}$$

También es habitual en la bibliografía establecer la correlación entre el OCR y Qt . En este caso se obtiene la Figura 9.

Se podría establecer también la correlación:

$$OCR = 0,065 \cdot Qt^{1,67}$$

4.3. MÓDULO EDMÉTRICO

Existen multitud de publicaciones respecto al módulo edométrico que se puede correlacionar desde el parámetro de la resistencia de punta del cono, del tipo:

$$M = \alpha \cdot x \cdot q_n$$

Con usualmente $\alpha = 5$ a 10 en materiales sobreconsolidados. Para materiales NC Senneset 89 propone valores entre 4 y 8. Pero son muy conocidos los trabajos previos de Michel and Gardner 75 donde se establece $M = \alpha_m \cdot x \cdot qc$, con valores entre 1 y 3 para $qc < 2$ Mpa y de hasta 6 para valores $qc > 2$ Mpa. (sils of low plasticity).

En materiales OC, cabe destacar los trabajos de Kulhawy and Mayne 1990 donde proponen la expresión cuyo uso se ha extendido de manera notable $M = 8,25 \cdot x \cdot (qt - \sigma_{v0})$. Aunque en el presente artículo se prestará especial atención a los gráficos de TS Tan, KK Phoon, DW Hight and S Leroueil (2006) mostrados en "Characterisation and engineering properties of natural Soils Vol 3".

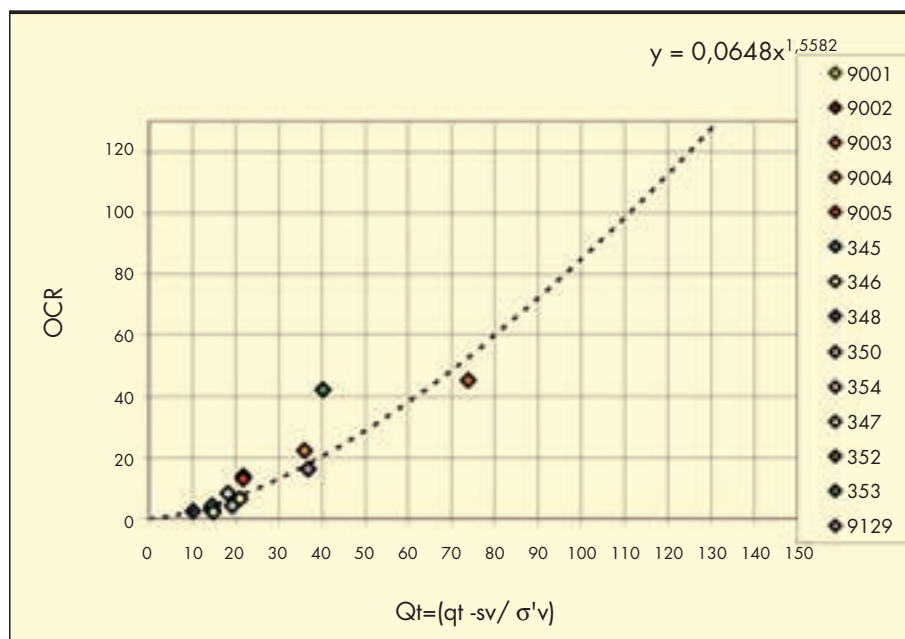


FIGURA 9. Resultado de ensayos en las "glinas" polacas y correlación propuesta para el OCR.

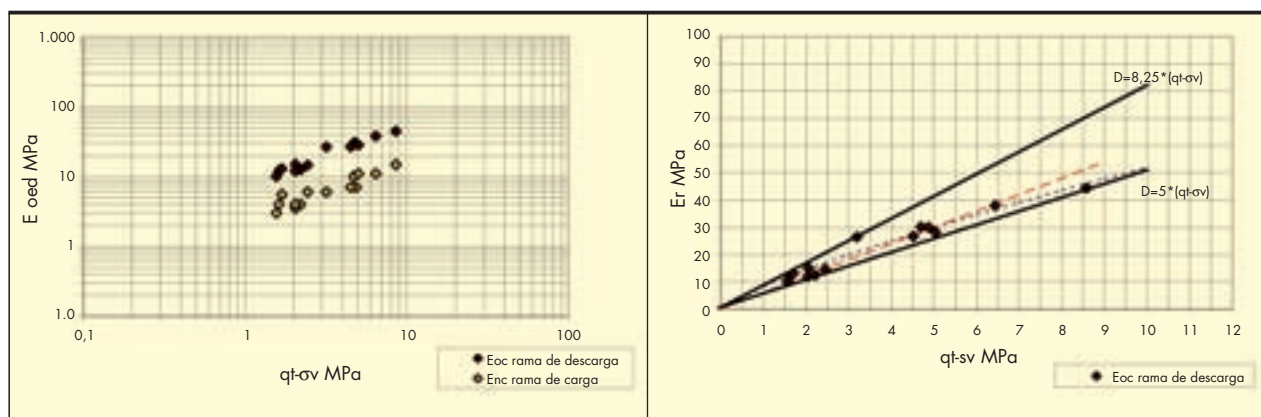


FIGURA 10. Resultado de ensayos en las “glinas” polacas y correlaciones propuestas para el Módulo edométrico O.C.

La Figura 10 muestra la graficación de los módulos obtenidos NC y OC. En la figura derecha se muestran los límites típicos de 8,25 y 5 (Mayne 2006). Parece evidente que los valores obtenidos se encuentran entremedio de los valores descritos. Si bien es cierto que las glinas de $qt-sv < 2$ Mpa podrían coincidir con 8,25, las de $qt-sv > 2$ Mpa parecen desviarse mucho de ese valor y se acercan más a 5.

Debido al comportamiento no claramente lineal de los materiales a qt altas, se propone un tratamiento exponencial de esta correlación:

$$D_{OC} = 8,25 * (qt-sv)^{n=0,8}$$

Donde se considera para las “glinas” polacas un valor de $n=0,8$

Respecto a los valores Normalmente Consolidados se puede definir la Figura 11. Los valores son relativamente bajos, pero están dentro del rango habitual.

Se propone adoptar:

$$D_{NC} = 2,5x(qt-sv)^{0,8}$$

$$D_{NC} = 1,83*(qt-sv)$$

o en relación directa a qt :

$$D_{NC} = 2,2x(qt)^{0,86}$$

$$D_{NC} = 1,74*(qt)$$

En este caso el comportamiento es marcadamente más lineal, por lo que cualquiera de las dos expresiones parecen correctas para todo el rango de $qt-sv$ evaluado.

5. CORRELACIÓN OBTENIDA CON LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA

5.1. ÁNGULO DE ROZAMIENTO Y COHESIÓN

Se han realizado una serie de ensayos de corte directo consolidados y drenados, así como ensayos triaxiales Consolidados No Drenados (CU, con medida de presiones intersticiales) y consolidado drenado (CD). La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

La Figura 12 muestra los resultados de los ensayos respecto al ángulo de rozamiento del terreno. En la figura izquierda se observa como No existe variación del ángulo de rozamiento con la variación del índice de poros. Sí se identifican claramente diferentes el “piso inferior” y el “medio”, este segundo al ser más arenoso y con qt mayor y con índice de poros inferior, obtiene, ángulos de rozamiento claramente más elevados.

La correlación de cohesión del terreno es siempre más discutible y desde un ensayo de CPTU no parece posible. Pero si existen correlaciones entre presión máxima de consolidación y cohesión. La Figura 13 muestra una co-

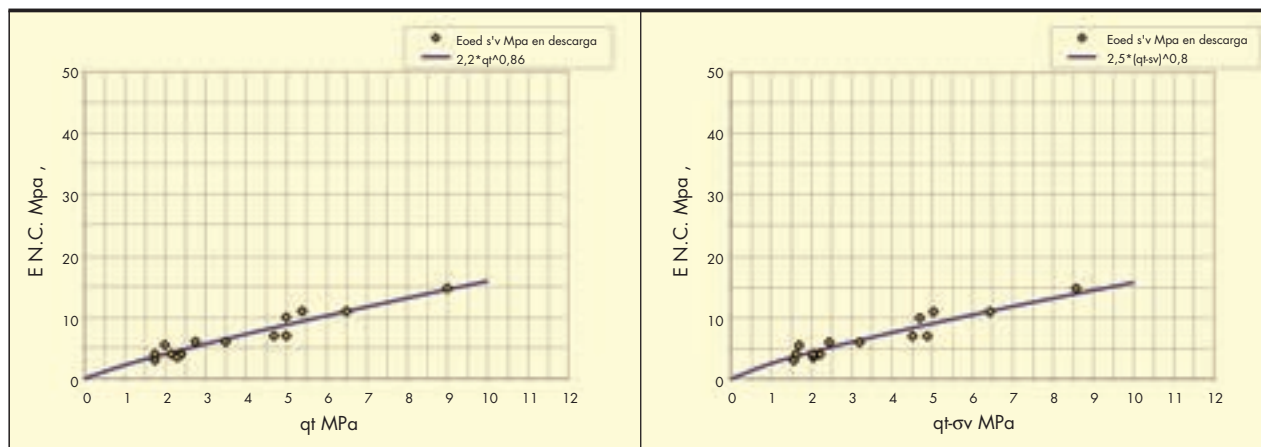


FIGURA 11. Resultado de ensayos en las “glinas” polacas y correlaciones propuestas para el modulo edométrico NC.

		Triaxial CU		Triaxial CD		Corte Directo	
		C' (Kpa)	ϕ	C' (Kpa)	ϕ	C' (Kpa)	ϕ
160+504	9001	14,23	20,66				
162+150	9002						
162+342	9003						
163+240	9004	6,78	35,10	60,84	32,43		
169+900	9005	6,78	35,10				
142+355	82/12/G/345					15,30	18,70
142+355	82/12/G/346					10,40	19,80
143+081	82/12/G/348					13,50	19,70
143+094	82/12/G/350					15,90	20,30
151+400	82/12/G/354					17,60	17,20
160+473	82/12/G/347					11,70	18,60
1030,00	82/12/G/352					35,80	21,80
1030,00	82/12/G/353					18,90	24,20

TABLA 2. Resultados de ensayos triaxiales y corte directo.

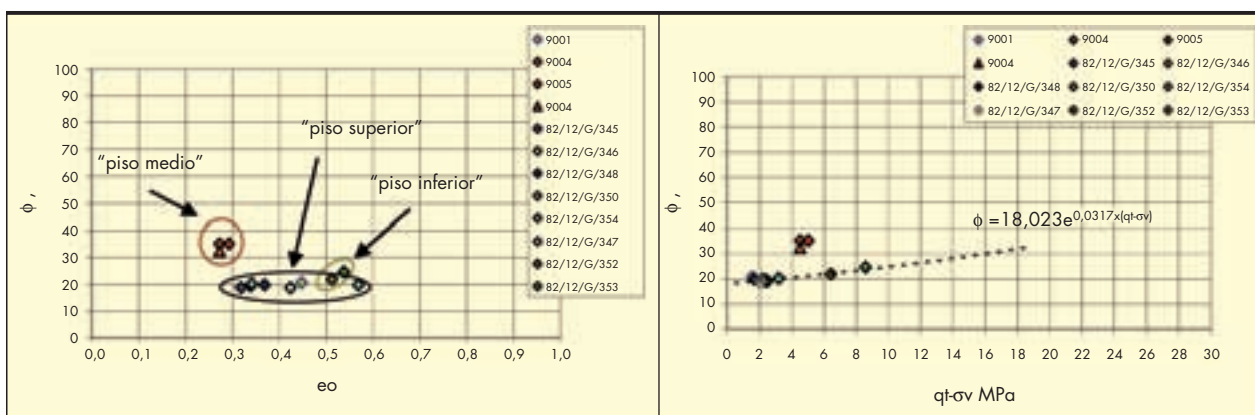


FIGURA 12. Resultado de ensayos de "resistencia Drenada" realizados en las "glinas" polacas.

relación ofrecida por Mesri and Abdel-Ghaffar (1993) y recogida por la FHWA en su report *FHWA-IF-02-034* del año 2002. Con los puntos de las muestras aquí analizadas sobrepuestos, en virtud a las P'_0 que se han obtenido en los edómetros y a las cohesiones de sus ensayos de resistencia.

Se acepta un comportamiento similar con el que propone la fórmula de Mesri and Abdel-Ghaffar (1993):

$$C' \approx 0,024 * P'_0$$

por lo que haciendo uso de la Figura 8 se define:

Pisos "superior e inferior"

$$\phi \approx 18 * e^{0,032 * (qt - \sigma)}$$

$$C' \text{ (Mpa)} = 0,00312 * (qt - \sigma)^2$$

Piso "Medio"

$$\phi \approx 32,5^\circ$$

$$C' \approx 7 \text{ Kpa}$$

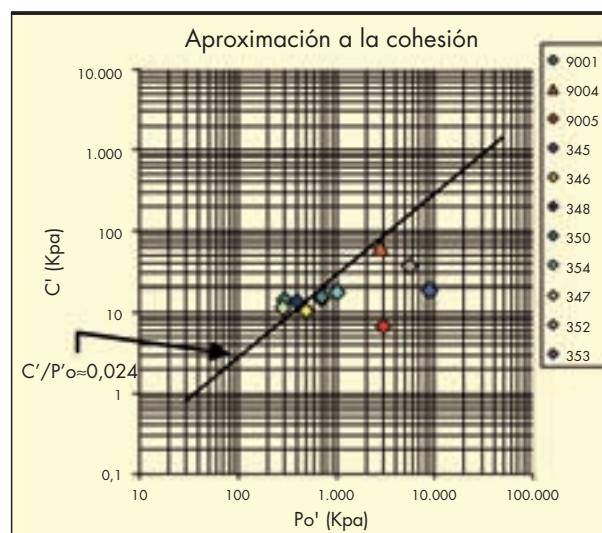


FIGURA 13. Relación entre Presión de preconsolidación aparente y cohesión del terreno.

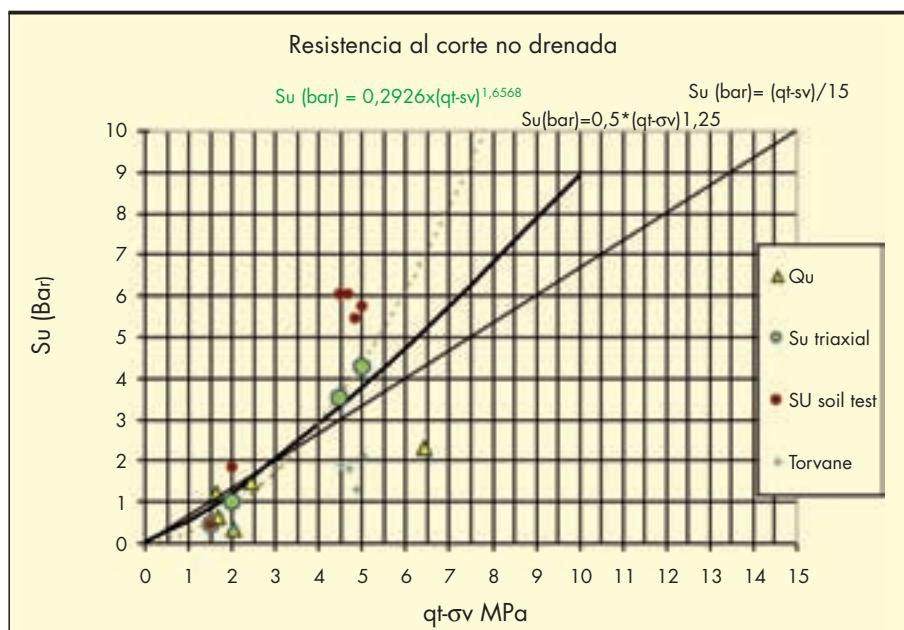


FIGURA 14. Resultado de ensayos de resistencia No Drenada realizados en las "glinas" polacas y correlación habitual $N_k=15$.

5.2. RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA "SU" E ÍNDICES DE FLUIDEZ "IF"

La Figura 14, muestra los ensayos de resistencia no drenada realizados. Se grafican tres ensayos triaxiales tipo CU (con "Su" interpretada en el valor correspondiente a la σ'_{vo} de la muestra), un ensayo triaxial UU, 5 ensayos de resistencia a la compresión simple (con $C_u=qu/2$) y cinco ensayos manuales realizados al abrir las muestras en el laboratorio tipos "Torvane" y "soil test". En resumen diferentes ensayos y por ello las "Su" no deben ser las mismas, con todo y que se sabe que entre estos ensayos los resultados más o menos se parecen.

En la gráfica se ha añadido la regresión típica de $(qt-sv)/15$ y la interpolación pura que darían los triaxiales. Por los ensayos de loading test realizados en los pilotes de la obra se acepta una interpretación intermedia como la que se grafica y que responde a:

$$Su = 0,5 * (qt-sv)^{1,25} \text{ (Mpa)}$$

Con todo y que en los rangos bajos parece igualmente válida:

$$qt-sv = 1,5 \text{ a } 3,5 \text{ Mpa} \rightarrow Su = (qt-sv)/15$$

También se evalúa la relación entre el índice de fluidez IF y el valor de resistencia del CPTU. Este parámetro es de gran trascendencia en Polonia ya que la Normativa de cálculo de cimentaciones profundas se basa en él. Además, es muy fácil y barato de comprobar con el propio detrito que se obtiene durante la excavación de pilotes y pantallas.

En este punto se vuelve de absoluta trascendencia la valoración de límites de Atterberg utilizada. Y de cara a las correlaciones utilizadas en Polonia será necesario hacer uso de la basada en límites obtenidos con la fracción que pasa por 2 mm, mientras que de cara a la usada en España se deberá realizar con la que pasa por 0,4 mm.

Fracción 2 mm (Normativa Polaca):

$$IF \% \approx 0,39 - 0,225 * \ln(qt-sv) \text{ (Mpa)}$$

Fracción 0,4 mm (Normativa SUCS):

$$IF \% \approx 0,25 - 0,5 * \ln(qt-sv) \text{ (Mpa)}$$

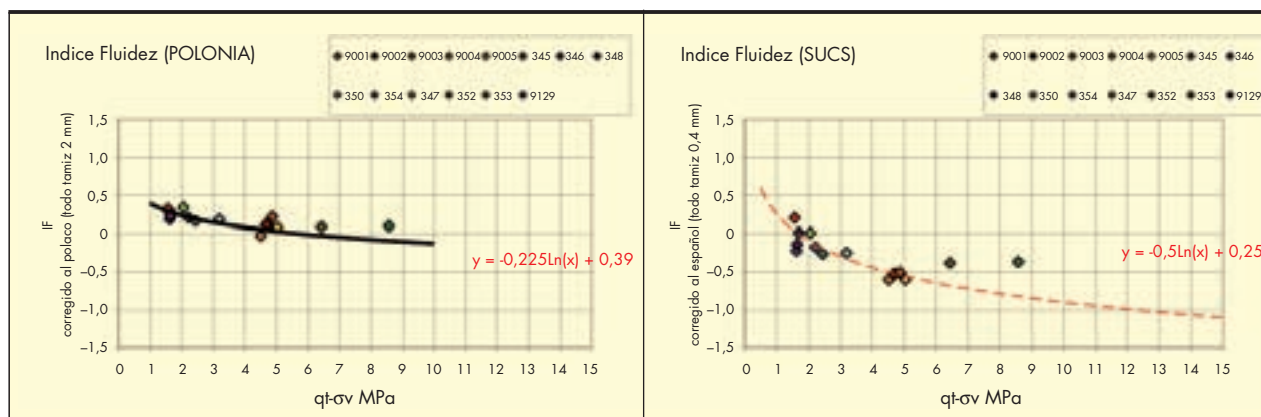


FIGURA 15. Relación entre el IF y el CPTU.

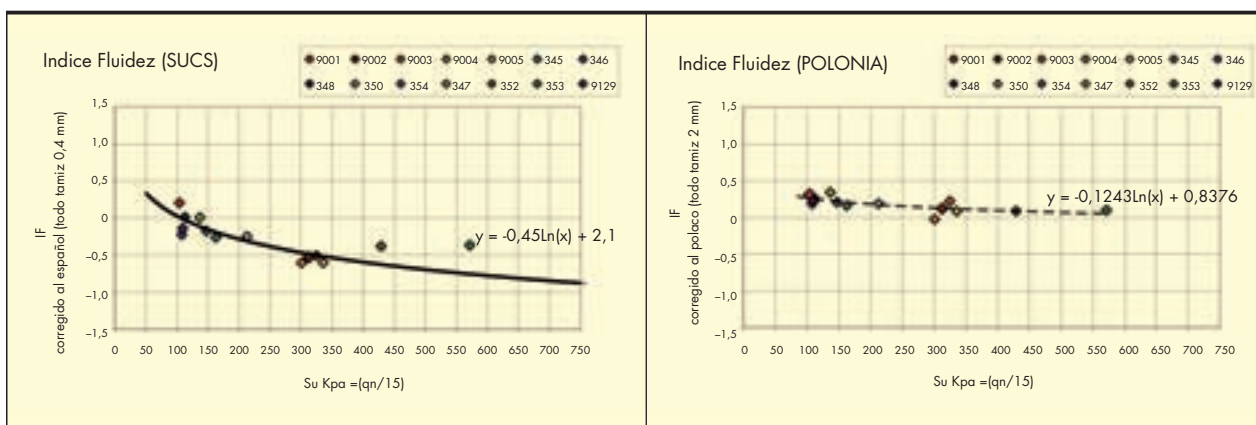


FIGURA 16. Relación entre el IF (USCS) y el valor de "Su" que se obtiene con el CPTU.

Se podrá obtener también la correlación con la resistencia al corte no drenada "Su", aceptando que $Su = (qt - \sigma_v) / 15$ (cosa que queda verificada para las "glinas" de esta zona, sobre todo las de $(qt - \sigma_v) < 4$ Mpa y que es conservador, como se ha visto, en las de $qn > 4$ Mpa). La Figura 16 muestra estas correlaciones.

La Figura 17 muestra la correlación a la resistencia al corte no drenada "Su" con la superposición del resultado obtenido en tres ensayos triaxiales tipo Consolidado y No Drenado hechos en las muestras, más el tipo UU.

$$SUCS \rightarrow IF \approx 2,1 - 0,45 \cdot \ln(Su) \quad // \quad Su (Kpa) = 106,34 \cdot e^{-2,23 \cdot IF}$$

$$Polonia \rightarrow IF \approx 0,84 - 0,124 \cdot \ln(Su) \quad // \quad Su (Kpa) = 375 \cdot e^{-6 \cdot IF}$$

6. CORRELACIÓN QT VS NSPT

Se dispone de muchos ensayos en la obra para establecer esta correlación con cierto grado de seguridad. En la Figura 18 se muestra la relación entre ambos ensayos con N_{spt} y con N corregido al 60% de energía.

En la Figura 18 izquierda se observa como existe cierta dispersión, condicionada fundamentalmente por el contenido de finos. En la media se define:

$$qc (Mpa) = 0,25 \cdot N_{spt}^{0,8}$$

Hay que hacer mención a que este valor es muy similar al que O. Kara y Z. Gündüz, Sakarya University, Departamento of Civil Engineering, Turkey, publicaron para limos turcos de la población de Adapazari.

En todo caso se observan dos límites, el superior de las "glinas" más arenosas que es de $0,85 \cdot N_{spt}^{0,8}$ y el inferior de las "glinas" más limosas y arcillosas es de $0,125 \cdot N_{spt}^{0,8}$.

Estableciendo en las cartas de clasificación la naturaleza más o menos arenosa de las "glinas", sería fácil ajustar el valor entre la media y el umbral ($0,55 \cdot N_{spt}^{0,8}$ para arenosas y $0,1875 \cdot N_{spt}^{0,8}$, para limosas).

En la Figura 18 derecha se observa también como las "glinas" más arenosas se sitúan por encima de la media y las más limosas por debajo de esta. Se puede definir:

$$qc/P_{atm} \approx 5,5 \cdot N_{60}^{0,5}$$

Al igual que en la Figura izquierda se puede definir que las "glinas" arenosas se ajustarán mejor a $10,25 \cdot N_{60}^{0,5}$ y las limosas arcillosas a $4,25 \cdot N_{60}^{0,5}$.

En esta gráfica, una relación lineal que también sería satisfactoria sería:

$$qc/P_{atm} \approx N_{60}$$

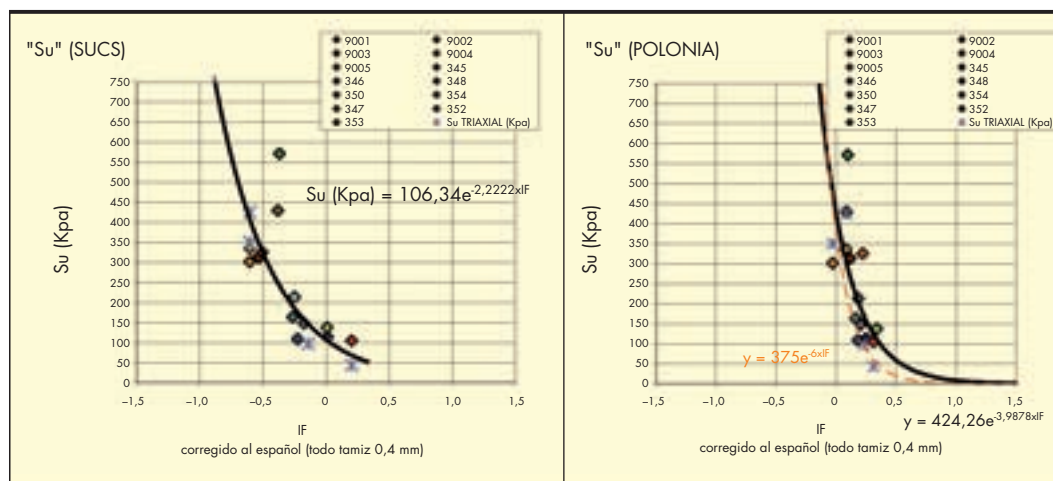


FIGURA 17. Relación entre el IF y el valor de "Su" que se obtiene con el CPTU y con los ensayos Triaxiales.

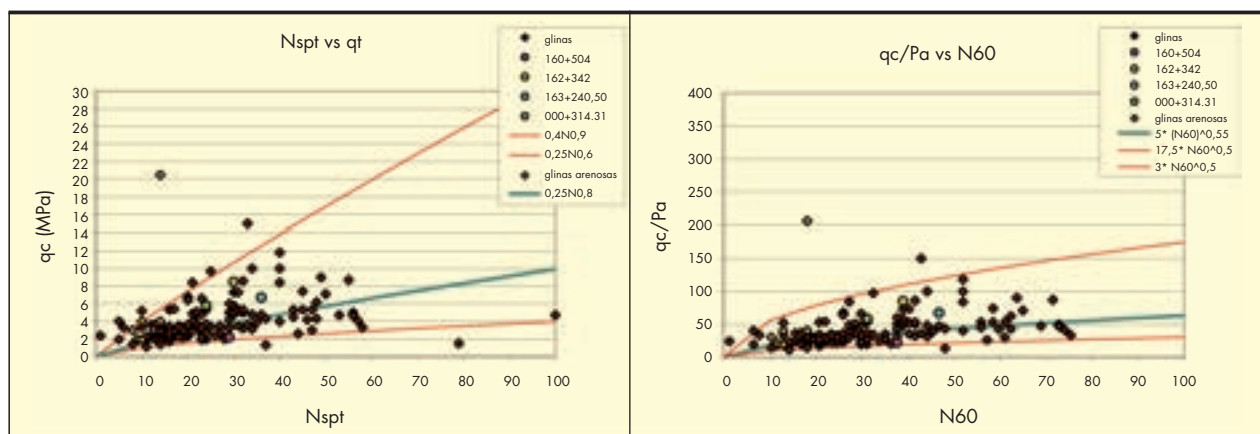


FIGURA 18. Resultado de ensayos en las "glinas" polacas y propuestas para la correlación con el Nspt.

7. CORRELACIÓN QUE SE ESTABLECE ENTRE EL MÓDULO EDMÉTRICO Y EL VALOR NSPT CON EL USO DEL CPTU

Haciendo uso de las correlaciones entre Nspt vs qt, a la vez que qt- σ_v vs Eoed se construye la gráfica de la Figura 19 que relacionará el módulo edométrico con el valor del ensayo Nspt.

Se acepta de otros estudios la correlación:

$$D_{OC} (Mpa) = 0,55 * N_{60}$$

Hay que hacer mención a que el estudio realizado en las "glinas" polacas es más extenso que el aquí presentado e incluye una serie de ensayos presiométricos, que permitían concluir una correlación igual a la aquí mostrada, pero desde correlaciones Pl vs Nspt y Pl vs Edómetros, por lo que, con todo y ser el ensayo SPT muy poco adecuado a este tipo de correlaciones, se puede aceptar la correlación propuesta como una aproximación primera al módulo en descarga.

8. COMPARATIVAS

Con las formulaciones descritas se puede analizar el CPTU "tipo" propuesto en la Figura 4. En las figuras se muestra, respecto a las consideraciones "clásicas", las nuevas fórmulas que se proponen y se han diferenciado como "C-A".

La Figura 20 muestra como la presión de sobreconsolidación considerada es claramente inferior a lo "habitual" en valores de qt < 3 Mpa, pero sería mayor para valores de qt > 4 Mpa.

En el módulo en descarga (OC) se propone un valor claramente inferior y que marca más la diferencia cuanto mayor es qt. En el módulo de carga (NC) el efecto es el mismo pero la diferencia entre valores es pequeña.

La Figura 21 muestra las estimaciones de ángulo de rozamiento, cohesión, índices de fluidez y especialmente interesante, la resistencia al corte no drenada (S_u). En ésta, se observa como en valores bajos no hay diferencias importantes

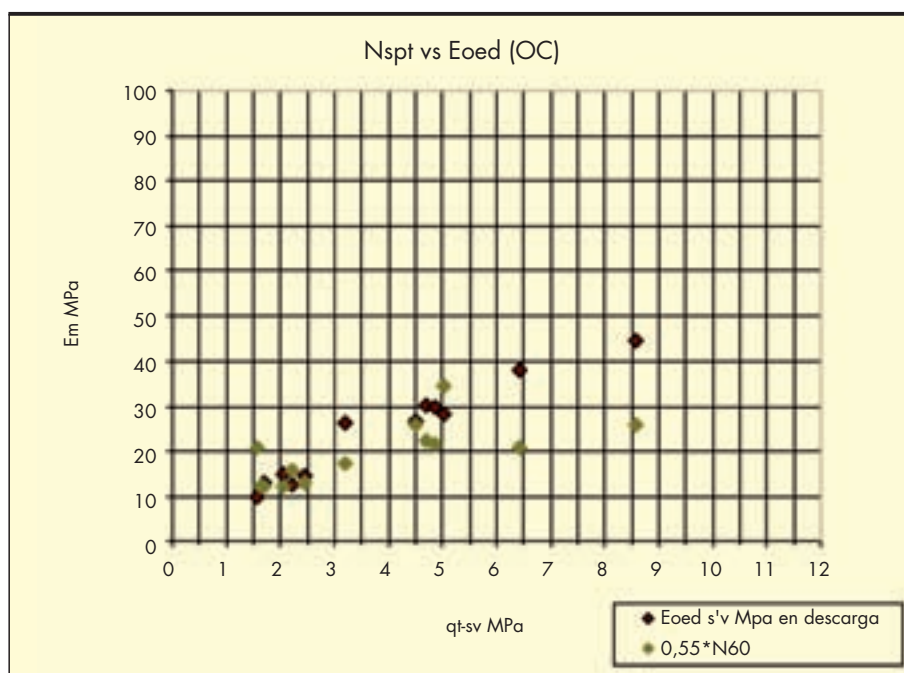


FIGURA 19. Correlación entre Nspt y módulo edométrico de descarga-recarga.

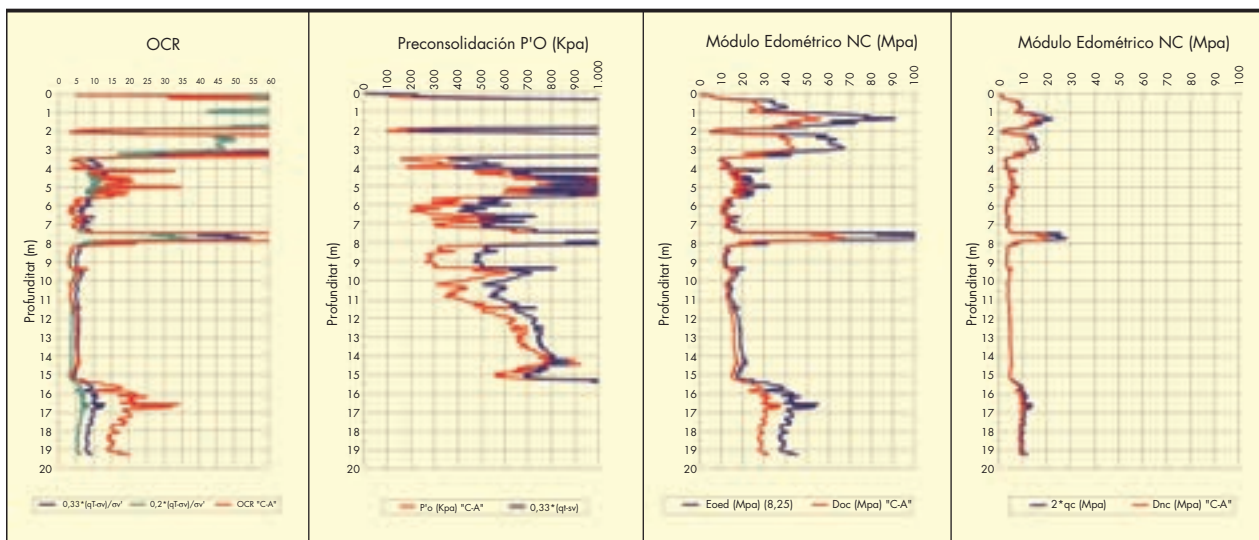


FIGURA 20. Correlaciones para el ensayo WS-5.1.

con $(q_t - \sigma_v)/15$, pero a partir de $q_t > 4$ Mpa, la diferencia ya es importante.

9. CONCLUSIONES

1. En la denominación polaca de “**glinas**”, hay que valorar los materiales que la nomenclatura anglosajona define como parte de las **SM, SC y CL, ML-CL**. En la obra utilizada para el presente artículo se obtienen materiales producto de la mezcla aproximadamente proporcional de are-

nas y limos que suele estar caracterizado por $40\% < I_p < 60\%$ y $7 < I_p < 12$ (SUCS).

2. Se proponen las correlaciones en la Tabla 3 para este tipo de terrenos sobreconsolidados $OCR = 2,8$ a 45 .
3. Cabe preguntarse la validez del ensayo CPTU en terrenos que no sean puramente arenas, cuando las resistencias de punta superan los $3,5$ Mpa. La experiencia en esta obra invita a considerar el ensayo presiométrico como más fiable en este tipo de suelos relativamente rígidos.

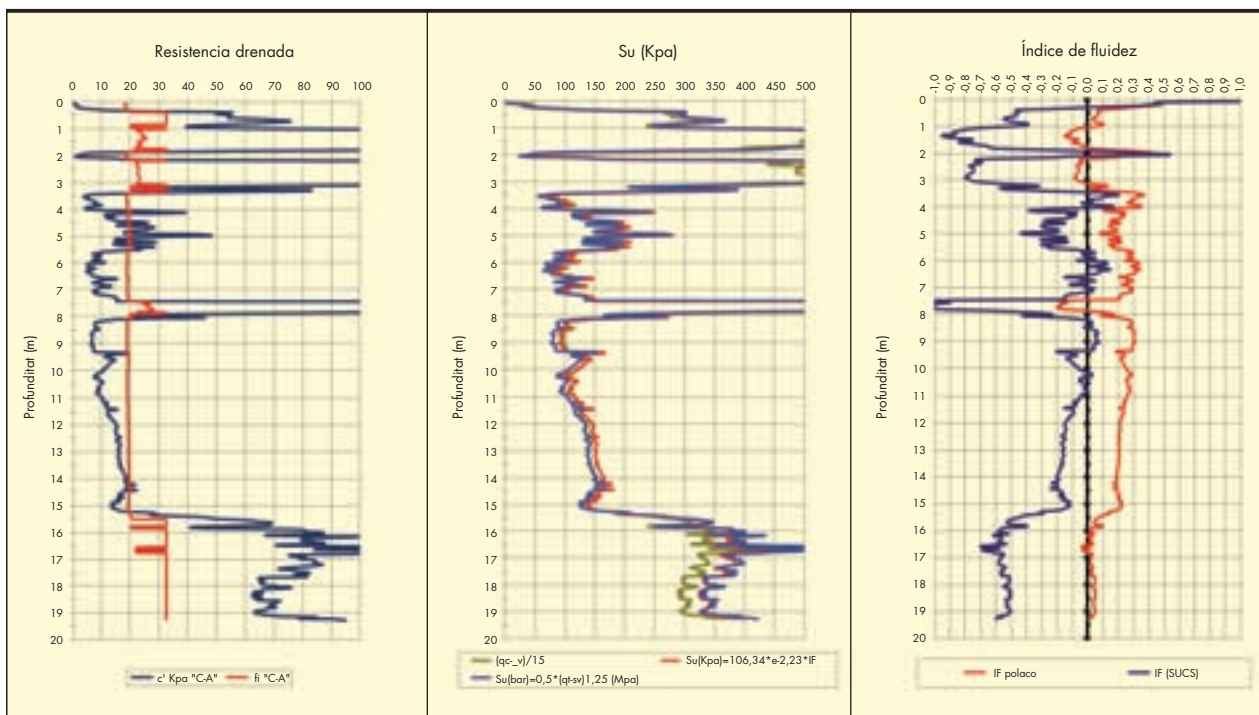


FIGURA 21. Correlaciones para el ensayo WS-5.1.

CORRELACIONES DE PARÁMETROS CON CPTU				
Parámetro correlacionado	Símbolo usado	Correlación	Rango aplicación	Autor
PRESIÓN SOBRE-CONSOLIDACIÓN APARENTE	P'_o	$P'_o \text{ (Kpa)} = 0,33 * (q_t - \sigma_{vo})^{0,95}$	$q_t - \sigma_{vo} = 0 \text{ a } 3,5 \text{ Mpa}$	Mayne 2009
		$P'_o \text{ (Mpa)} = 0,13 * (q_t - \sigma_{vo})^2$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
GRADO DE SOBRE-CONSOLIDACIÓN	OCR	$O.C.R. = 0,33 * (q_t - \sigma_{vo})^{0,90} / \sigma'_{vo}$	$q_t - \sigma_{vo} = 0 \text{ a } 3,5 \text{ Mpa}$	Mayne 2009
		$O.C.R. = 0,13 * (q_t - \sigma_{vo})^2 / \sigma'_{vo}$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
		$O.C.R. = 0,065 * Q_t^2$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
MODULO EDOMÉTRICO EN DESCARGA-RECARGA	$Doc // Er // Eoc$	$Doc \text{ (Mpa)} = 8,25 * (q_t - \sigma_{vo})^{0,80}$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
MODULO EDOMÉTRICO EN CARGA	D_{NC} / E_{NC}	$DNC \text{ NC (Mpa)} = 2,5 * (q_t - \sigma_{vo})^{0,80}$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
		$DNC \text{ NC (Mpa)} = 2,2 * (q_t)^{0,86}$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
ÁNGULO DE ROZAMIENTO	ϕ	$\phi = 18 * e^{0,032 * (q_t - \sigma_{vo})}$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
COHESIÓN	C'	$C' \text{ (Mpa)} = 0,00312 * (q_t - \sigma_{vo})^2$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA	S_u	$S_u \text{ (Mpa)} = (q_t - \sigma_{vo}) / 15 \text{ (Mpa)}$	$q_t - \sigma_{vo} = 0 \text{ a } 3,5 \text{ Mpa}$	Esopit 74-82
		$S_u \text{ (bar)} = 0,5 * (q_t - \sigma_{vo})^{1,25} \text{ (Mpa)}$	$q_t - \sigma_{vo} = 0 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
ÍNDICE DE FLUIDEZ (N. POLACA)	IF	$IF \% = 0,39 - 0,225 * \ln(q_t - \sigma_{vo}) \text{ (Mpa)}$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
ÍNDICE DE FLUIDEZ (S,U,C,S)	IF	$IF \% = 0,25 - 0,5 * \ln(q_t - \sigma_{vo}) \text{ (Mpa)}$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
N_{spt}	N_{spt}	$q_c \text{ (Mpa)} = 0,25 * N_{spt}^{0,8}$	$q_t - \sigma_{vo} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$	c-a
OTRAS CORRELACIONES OBTENIDAS DE MANERA INDIRECTA				
Parámetro correlacionado	Símbolo usado	Correlación	Autor	
S_u vs IF (N. POLACA)	S_u	$S_u \text{ (Kpa)} = 375 * e^{0,6 * IF}$	c-a	
S_u vs IF (S.U.C.S.)	S_u	$S_u \text{ (Kpa)} = 106,34 * e^{2,23 * IF}$	c-a	
E_{oc} vs N_{60}	Doc	$Doc = 0,55 * N_{60} (*)$	c-a	

TABLA 3. (*) Válido cuando $q_c = 0,25 N_{spt}^{0,8}$.

10. BIBLIOGRAFÍA

Chang, M.F. 1988. In-situ testing of residual soils in Singapore. *Proceedings 2nd International Conference Geomechanics in Tropical Soils*. V1 97-108, Singapore.

Fellinius, Bengt H. 2009-march. Basic of fundatiom Design. Electronic Edition.

FHWA: report *FHWA-IF-02-034* del año 2002.

Kulhawy, F.H, Mayne, P.W. August 1990. Manual on Estimating Soil Proprieties for Fundation Design. EL-6800. Research project 1493-6. Final Report. Cornell University, Geotechnical Engineering Group. Hollister Hall. Ithaca. New York 14853-3501.

Mayne, P.H. Characterisation and Engineering proprieties of natural Soils. Vol 3. editors Tan, TS., Phoon, K.K, Leroueil, S. 2008. 57 pp.

Mayne, P.H. 2008. Piezocone profiling of clays for maritime site investigations. Georgia Institute of Technology, Civil and Environmental Engineering Faculty, Atlanta, Georgia, USA. 11th Baltic Sea Geotechnical Conference-Geotechnics in marine Engineering. Gdansk, Poland.

Mayne, P.H. 2009. 17th ICSMGE Alexandria 2009.

Mesri, G. and M.E.M. Abdel-Ghaffar, 1993. Cohesion intercept in effective stress-stability analysis. *J. Geotech. Eng.*, 119(8): 1229-1249.

Mitchell, J. K. & Gardner, W. S. (1975). In situ measurement of volume change characteristics, *Proceedings, Conference on in situ measurement of soil properties*, ASCE speciality conference, state-of-the-art-paper, Raleigh, N.C., Vol. 2, pp. 279-345.

Powell, John J.M. 2005. use of CPTU data in clays/fine grained soils. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXVII, No. 3-4, Building Research Establishment, U.K. TOM LUNNE Norwegian Geotechnical Institute.

PTG 2008: Polskie Towarzystwo Gleboznawcze. Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych. 2008.

Robertson, P. K. *et all*. 1983. SPT-CPT Correlations. In *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 109, No.11:1449-1459, ISSN. 0733-9410. New York.

K.Senneset, R. Sandven and N. Janbu (1989): The evaluation of soil parameters from piezocone tests. Symposium on In situ testing of soil properties for transportation facilities. National Research Council, Washington D.C.

11. 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.