

**ANALISIS GEOTECNICO DE ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD
(TERCIARIO DEL NORTE DE EUROPA)-ENSAYOS DE LABORATORIO**

***GEOTECHNICAL ANALYSIS OF HIGH PLASTICITY CLAYS
(NORTHERN EUROPE TERTIARY)-LABORATORY TEST***

Juan Alfonso Carcolé Galea¹

Palabras clave:

Plasticidad

Edómetro

Triaxial

Onda transversal

Resumen

En este artículo se recogen los ensayos geotécnicos de laboratorio realizados para caracterizar geotécnicamente arcillas Terciarias de alta plasticidad del Norte de Europa.

Keywords:

Plasticity

Edometer test

Triaxial test

Transversal wave

Abstract:

The paper reports the laboratory testing results, carried out on Tertiary High Plasticity Clays from North Europe.

¹ Corresponding author: igps@igps.cat. IGPS, s.l, Sant Sadurní d'Anoia, Barcelona, España.

1 INTRODUCCION

El presente análisis se centra en la caracterización de una zona de las arcillas Neógenas depositadas en los antiguos fondos marinos que inundaban el Norte de Europa durante el Terciario. La zona analizada está ubicada en el sur de Polonia, muy próxima a la frontera con la República Checa (**figura n°1**). El Mioceno tardío y el Plioceno de esta zona tienen algunas decenas de metros usualmente sobre las evaporitas Triásicas y se acuñan hacia los Cárpatos perimetrales.

Pese a ser materiales de deposición marina sencilla, la geología de este tipo de depósitos es en realidad muy compleja ya que sobre ellos avanzaron y retrocedieron varios episodios glaciares durante el Pleistoceno (al menos 2 importantes), lo que pudo significar en Polonia hasta 1000 m de columna de hielo. El avance de estas masas no solamente significa una preconsolidación del material esperable muy alta, además significa efectos de reptación que produjeron un glacio-tectonismo muy importante, llegándose a generar cabalgamientos múltiples de incluso hay zonas en las que surgen paquetes Cuaternarios fluvio-glaciares y lacustres de períodos interglaciares entre las arcillas pliocenas (**figura n°2**).

Los cambios que puede haber sufrido la arcilla en la zona desde su deposición van más allá de la sobreconsolidación y tectónica descritos e incluye periodos de emersión que para arcillas de este tipo significan fenómenos de desecación e hinchamiento, cambios de temperatura, de quimismo de las aguas, intercambios iónicos, authigenesis, recristalizaciones y generación de gases ligados a la materia orgánica que tiene el material, además en los ensayos químicos se obtiene entre el 13 y 14% de CaCO_3 . Por lo que su naturaleza actual puede ser marcadamente diferente a la inicial y condiciona,

como se verá en el presente artículo, algunos de los resultados geotécnicos obtenidos en los ensayos realizados.

El aspecto del material es de arcillas grises laminadas con un poco de arena y materia orgánica (**figuras 3**). La tonalidad gris oscura a gris clara cambia aleatoriamente en los sondeos según sus tramos, así como su consistencia que es en general firme, pero en zonas es posible llegar a marcar ligeramente los dedos en el testigo (ocurre en pocas zonas).



Figura. 1. Ubicación zona estudiada.

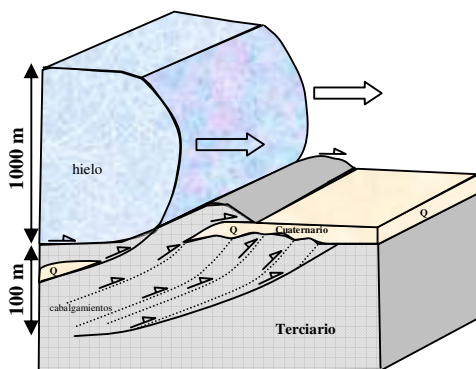


Figura. 2. Glacio tectonismo.



Figura. 3. Aspectos de la arcilla ensayada.

2 CARACTERIZACIÓN- ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN

Los ensayos se han realizado principalmente en el laboratorio de la Universidad de Agricultura de Varsovia, departamento de Geotecnia (Warsaw Agricultural University, Poland, RGGW) y se han hecho ensayos de contraste en el laboratorio de DRAGADOS SA.

- Determinación de los Límites de Atterberg

Para obtener los límites de Atterberg y a la vez para comprobar su sensibilidad a la forma de hacerlos en este tipo de materiales, se procedió a realizarlos de diferentes maneras. La primera fue ensayarlos de manera “directa” es decir, al ser la humedad natural muy cercana al Límite Plástico, se pudieron ensayar directamente sin ningún tipo de secado previo a medida que se extraían las muestras de los tubos shelby. Así mismo se comprobó que sucedía si las muestras se secaban previamente en el horno a distintas temperaturas (60°C y 110°C). La **figura n°4** muestra la diferencia obtenida entre secar a 110°C la muestra (lo que usualmente está fuera de la mayoría de las Normativas, como la Norma UNE, pero que en algunos laboratorios polacos se hace) y los resultados obtenidos sin secar.

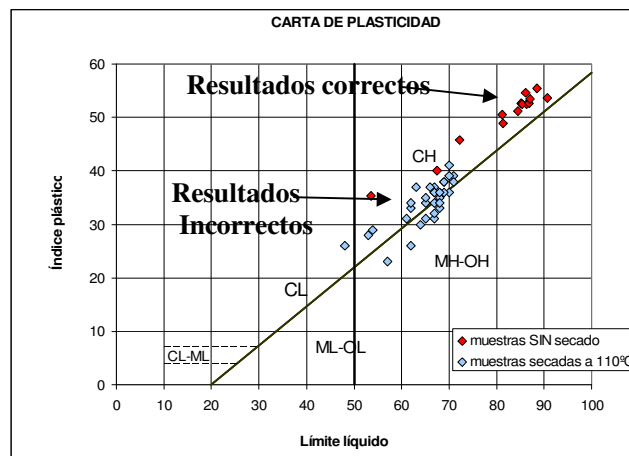


Figura. 4. Contraste entre muestras ensayadas sin secar previamente y muestras secadas previamente a 110°C en horno.

- **Características generales del material**

La **figura n°5** muestra el resumen de los resultados de los ensayos realizados para caracterizar el terreno analizado. Los “finos” se han establecido en la fracción inferior a 0,05 mm, acorde a las Normativas de los países del Este de Europa.

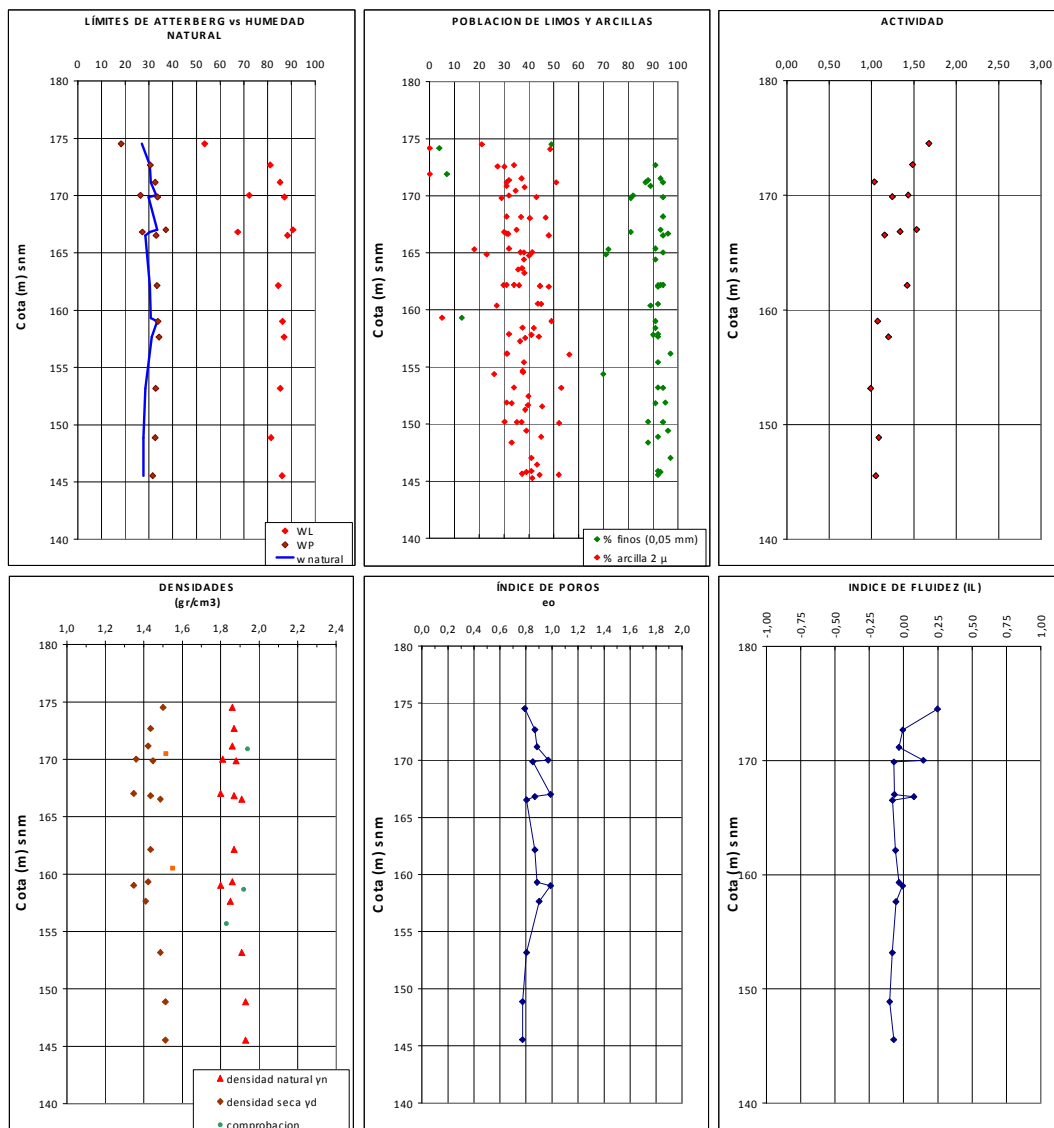


Figura. 5. Resultado ensayos de caracterización de las Arcillas Terciarias.

Resulta evidente que el comportamiento de estas arcillas ha de ser firme por tener humedades ligeramente inferiores al límite plástico (con todo y ser materiales saturados) combinadas con valores de Índice de Plasticidad ($I_p\%$) muy elevados.

La actividad de la arcilla se ha identificado entre 1 y 1,5 lo que hace pensar inicialmente en arcillas Montmorilloníticas. No obstante este concepto puede ser complejo en materiales con materia orgánica (4-6%). Además, la determinación de la cantidad de arcillas también se presta a error debido al tipo y tiempo de aplicación del dispersante,. Así como en Polonia los ensayos hechos con amoníaco como dispersante han arrojado los valores vistos entre el 30% y 50% de población 2μ , en los ensayos del laboratorio central de DRAGADOS Madrid se obtuvo en dos muestras dispersadas con hexametafosfato sódico 52,3 % y 54,7 % de fracción 2μ .

La densidad de las partículas sólidas ha mostrado cierta dispersión (2,68-2,75 gr/cm^3). La saturación natural de las muestras se ha observado entre el 95 y el 100%, lo que no quiere decir que no sea realmente un terreno saturado ya que debido a fenómenos de hinchamiento de la muestra y de succión elevada que tienen arcillas con índices de fluidez negativos (fenómenos de dilatación durante el muestreo, pero también durante la extracción de los tomamuestras), pueden observarse en el laboratorio valores que finalmente no sean de $SR=1$ estrictamente.

- **Difracción de Rayos X (XRD)**

Se realizó ensayo de difracción de R-X para identificar los minerales de la arcilla contenidos en las muestras. La **figura n°6** muestra el resultado de la difracción.

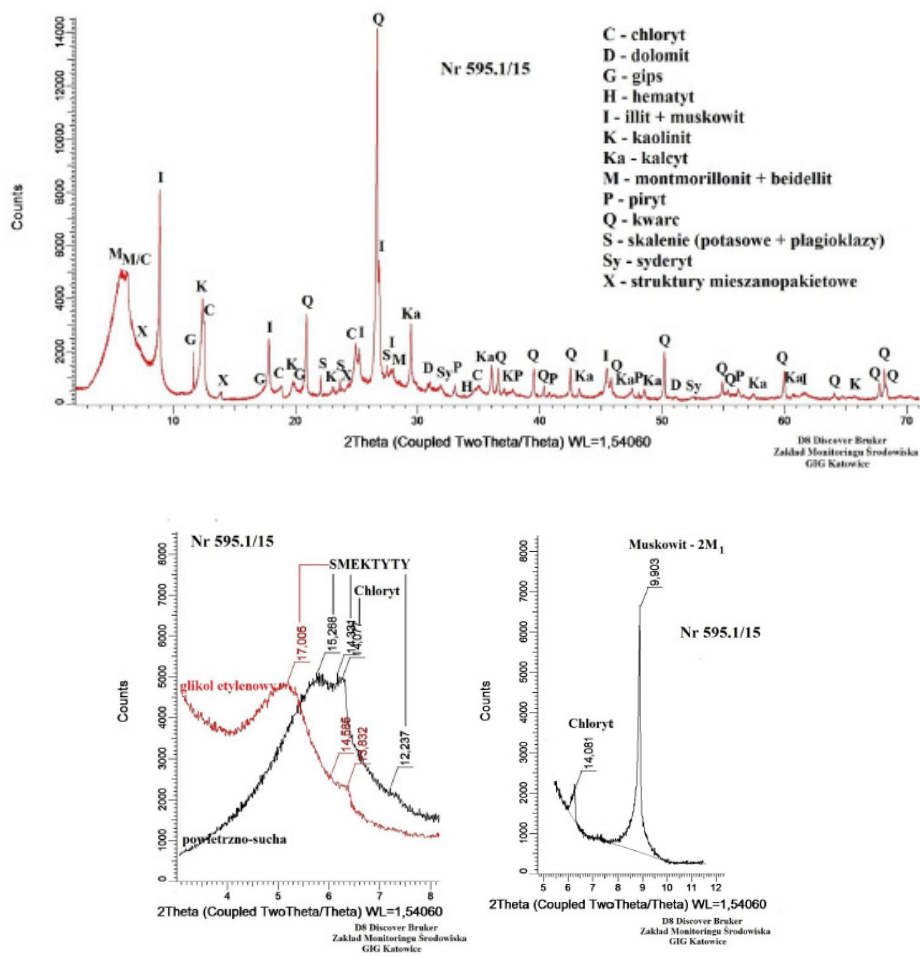


Figura. 6. Resultado ensayo XRD.

La presencia y estimaciones cuantitativas de montmorillonita se basaron en pruebas comparativas de muestras de arcilla secadas al aire y arcilla saturada en etilenglicol.

También se separó la moscovita de la clorita como se ve en la **figura n°6**.

El **cuadro n°1** recoge los valores en porcentajes de los minerales identificados, los sombreados en azul son los minerales de la arcilla.

%	identificación
36	esmectita (montmorillonita+beidellita)
17	illita moscovita
9,5	cuarzo
7	clorita
5	caolinita
4	mezcla esmectita-illita
3	Skalenie (plagiclasas de albita y anortosita// y potasicas)
2,5	calcita
1	yeso
0,5	dolomit
12,5	amorfos
2	otros (siderita, hamatita, pirita).

Cuadro 1. Resumen datos del material ensayado en laboratorio.

Destacan dos hechos en el ensayo. El primero es que la cantidad de minerales de la arcilla es del 69%. Hay que aclarar que las estimaciones de los ensayos de sedimentación en los que se establece como arcilla solamente las partículas de menos de 2μ , es una estimación diferente a la que se realiza por R-X en las que especialmente caolinitas y las micas pueden tener diámetros ampliamente mayores, por lo que en realidad se debe entender que las arcillas de 2μ estarán entre el 40% que suman las esmectitas y el 69% del total.

El segundo hecho que se debe destacar es la cantidad de esmectita (montmorillonita +beidellita) que es la que implica las actividades altas observadas.

- **Cuadro resumen de valores característicos de la identificación**

El **cuadro n°2** muestra los valores que se han establecido finalmente como los representativos del material analizado, en base a la media directa de los ensayos hechos.

Lw %	Lp %	lp %	>0,05 mm	0,05>f>2μ	2 μ (*)	w nat	IL %	Ac
85	32	53	8	39	53	28	-0,075	1,00
eo	n	γs	γn	γd	Sr	Mo		
0,85	45	2,7	1,9	1,5	>0,95-1	5%		

(*) En base a los ensayos de contraste hechos con hexametáfosfato.

Cuadro 2. Resumen de los parámetros identificativos de las arcillas Terciarias analizadas.

3 ENSAYOS EDOMETRICOS

Como se observa en la fotografía de la **figura n°3** el material está compuesto en realidad por una serie de niveles milimétricos que actúan al efecto de “sándwich” (arcillas laminadas) de niveles algo más blandos y otros algo más duros. Por ese motivo no es lo mismo hacer el ensayo aplicando la carga paralela a las capas, obteniendo la deformación de los niveles más blandos libremente, que aplicarla de manera perpendicular, ya que los niveles más duros quitan deformación a los más blandos, por lo menos en las tensiones iniciales del ensayo.

- Edómetros verticales

La **figura n°7** muestra en la gráfica izquierda la evolución de deformación de las muestras según escalones de carga (como puede verse las muestras hinchan antes de iniciar los ensayos), y en la gráfica derecha se muestra la evolución del módulo edométrico (M). Acorde al criterio de Janbu-63 se define el módulo correspondiente al normalmente consolidado “Mn” (que se ha obtenido entre 7 y 15 MPa), pero debido a que no se identifica bien en los escalones bajos de carga el valor sobreconsolidado “Mi” se ha definido el correspondiente a la presión de sobreconsolidación máxima estimada en este tipo de terreno “M(Po)” (que se ha obtenido entre 18 y 24,5 MPa).

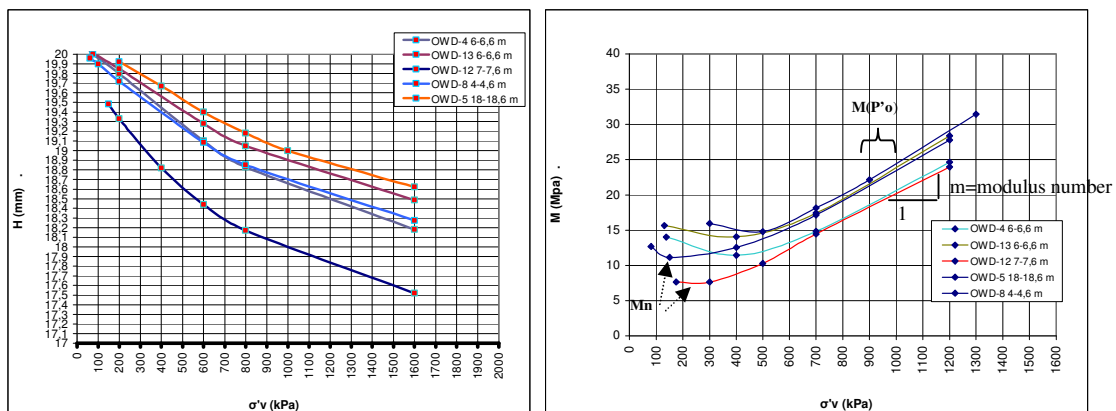


Figura. 7. Resultado de los ensayos edométricos e interpretación del Valor Mn definido por Janbu 63.

Se ha analizado el valor de la presión de preconsolidación $P'o$ por diferentes metodologías. Primeramente con el método de “Janbu 63-70” basado en la tangente a las gráficas M vs $\sigma'v$. El segundo método utilizado ha sido el de “Strain-energy-log Stress” de Senol y Saglamer 97 basado en la propuesta de Tavenas 79, que define una zona límite en la cual se produce una discontinuidad de la energía de deformación. El tercer método utilizado es el del sumatorio de módulos edométricos ΣM que se vuelven proporcionales a partir de la presión $P'o$, idea que se desprende fácilmente de la

interpretación de Janbu; y finalmente se añade la interpretación que ha hecho el laboratorio RGGW de Varsovia basada en el criterio de Casagrande.

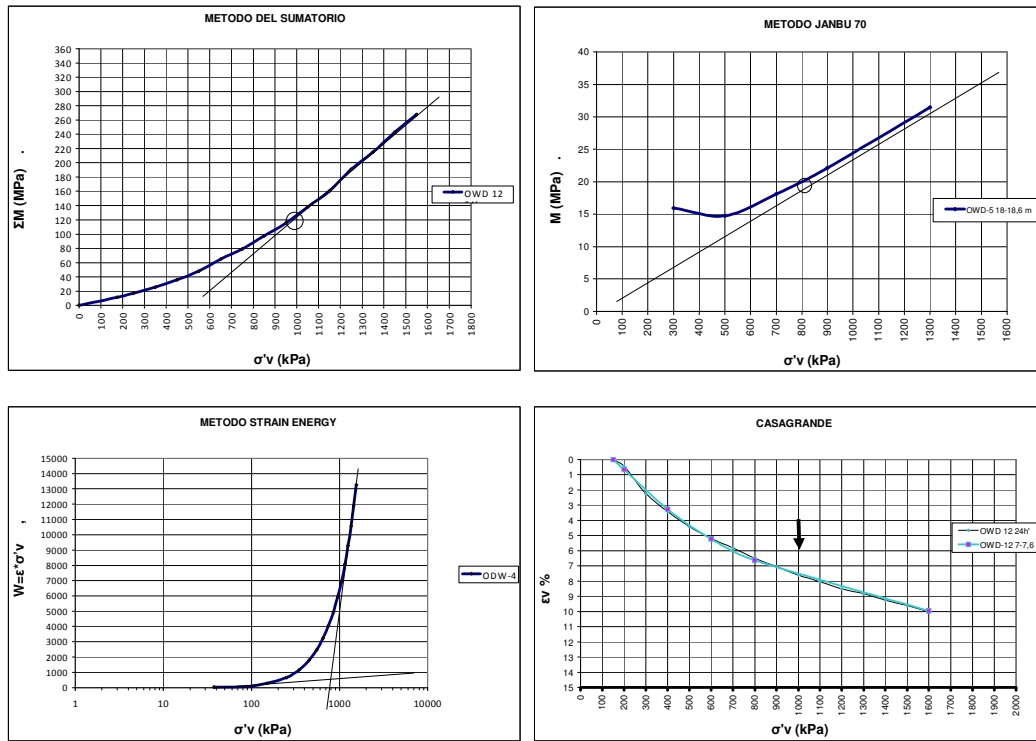


Figura. 8. Métodos utilizados para determinar la $P'0$.

El cuadro n°3 muestra los parámetros obtenidos de los ensayos edométrico, indicando la referencia de la muestra y la profundidad desde boca de sondeo de la misma.

muestra y profundidad (m)	Wl	Wp	lp
ODW-4 (6,0-6,6 m)	85,2	32,57	52,63
ODW-5 (18,0-18,6 m)	86,9	34,18	52,72
ODW-8 (4,5-5,1 m)	81,08	30,58	50,5
ODW-12 (7,0-7,6 m)	72,2	26,4	45,8
ODW-13 (6,0-6,6 m)	87,1	33,64	53,46

EDÓMETROS-correctos	consolidación primaria						
	eo	Cs	Cc	Cc/Cs	Cc/1+e0	Cv (m2/s)	k m/seg
ODW-4 (6,0-6,6 m)	0,87	0,05	0,199	4,0	0,101	1,01E-07	8,4E-11
ODW-5 (18,0-18,6 m)	0,90	0,0232	0,178	7,7	0,089	2,23E-07	1,4E-10
ODW-8 (4,5-5,1 m)	0,87	0,0266	0,179	6,7	0,093	1,37E-07	1,1E-10
ODW-12 (7,0-7,6 m)	0,97	0,0335	0,218	6,5	0,116	7,23E-08	9,5E-11
ODW-13 (6,0-6,6 m)	0,85	0,035	0,174	5,0	0,094	1,94E-07	1,3E-10
madrid (10,6 m)	0,82	0,029	0,172	6,0	0,094		

Cuadro 3. Resumen de los resultados de los ensayos edométricos para la consolidación primaria de las arcillas Terciarias analizadas.

El **cuadro n°4** muestra los resultados de presiones de Preconsolidación de los métodos de Janbu y del método de Casagrande, así como los módulos edométricos correspondientes a las presiones $P'o$.

muestra	Mo	P'o (kPa) Janbu	M (P'o) Janbu	m (modulus number)	P'o (kPa) casagrande	M (P'o) 1000-900 kPa	OCR Janbu	OCR casagrande
ODW-4 (6,0-6,6 m)	11	625	15	20,4	900	18	8,6	11,1
ODW-5 (18,0-18,6 m)	14,8	750	22,1	23,5	1000	24,5	3,9	4,3
ODW-8 (4,5-5,1 m)	11	650	17,1	21,4	1000	23	11,0	15,8
ODW-12 (7,0-7,6 m)	7,5	500	12,5	19	1000	20	6,0	10,1
ODW-13 (6,0-6,6 m)	14	625	17,4	22	900	22	7,4	9,6
madrid (10,6 m)	12	870	21	20	1000	21	7,1	7,5

Cuadro 4. Interpretación de Módulos Edométricos y presiones de preconsolidación.

La **Figura n°9** muestra las gráficas de los valores de preconsolidación según cota del terreno y el gráfico del Edómetro hecho en el laboratorio de contraste que sí permitió definir la “Mi” y resulta coincidente con la M ($P'o$).

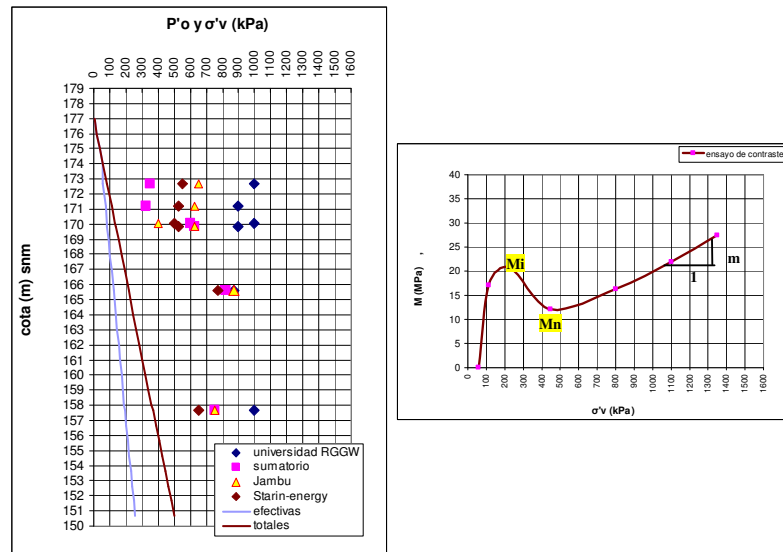


Figura. 9. Resultados de la determinación de $P'o$ según los diferentes métodos.

El **cuadro n°5** muestra el coeficiente de consolidación secundaria $C\alpha = \Delta\varepsilon / \Delta lgt$, y el índice de fluencia o “creep index” $C\alpha e = C\alpha * (1 + e_0)$ de los edómetros analizados.

muestra	consolidacion secundaria		
	$C\alpha$	$C\alpha e$	$C\alpha e / Cc$
ODW-4 (6,0-6,6)	0,00042	7,86E-04	0,0039
ODW-5 (18,0-18,6)	0,00031	5,91E-04	0,0033
ODW-8 (4,5-5,1)	0,00047	8,79E-04	0,0049
ODW-12 (7,0-7,6)	0,00048	9,45E-04	0,0043
ODW-13 (6,0-6,6)	0,00041	7,59E-04	0,0044

Cuadro 5. Resumen de los resultados de los ensayos edométricos para la consolidación secundaria de las arcillas Terciarias analizadas.

- **Edómetros horizontales**

Debido a la fuerte anisotropía que muestra este terreno se tomaron dos muestras aprovechando una segunda campaña, realizada a 1500m de la analizada con detalle en el presente estudio. Las muestras se partieron y se realizaron dos edómetros en cada una, el primero con muestra en vertical y el segundo en muestra girada 90°. La **figura n°10** muestra los resultados, resulta evidente el comportamiento errático de las muestras giradas, sin duda la naturaleza laminar hace que se produzcan roturas y encajamientos durante el ensayo que hace que su gráfica sea “rara”. En todo caso se puede observar una relación “Mn” entre muestras horizontales y verticales de 2 y como a medida que aumenta la carga parecen tender a resultados similares.

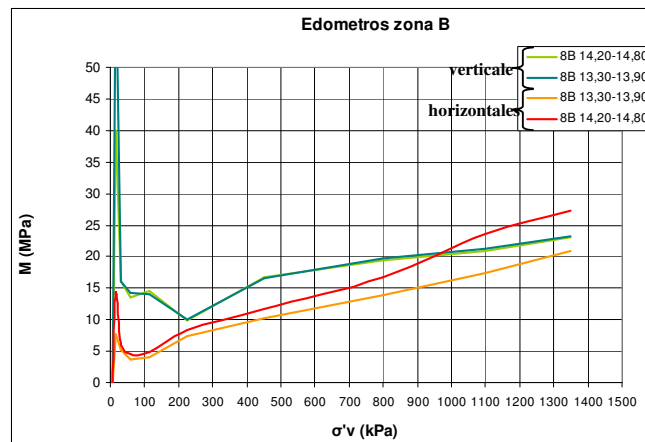


Figura. 10. Resultados de los ensayos edométricos en muestras horizontales y verticales.

4 ENSAYOS TRIAXIALES

Los ensayos triaxiales realizados han consistido en la aplicación primera de una presión de cámara en fase de consolidación isotrópica $\sigma'_c = \sigma'_1 = \sigma'_3$, y posteriormente la aplicación de un incremento progresivo de tensión axial, manteniendo constante la tensión horizontal, por lo que la Tensión Desviadora es $T.D = \sigma'_1 - \sigma'_3$. En el ensayo se definen valores de la relación TD- ϵ_1 (Módulos Secantes). Se definirán los Módulos correspondientes al 50% de la Tensión Desviadora de rotura ya que son los utilizados en programas de Elementos finitos de uso habitual en la geotecnia como PLAXIS. Del mismo modo se definirá los ángulos de rozamiento correspondientes a la TD_{maxima} (valores de pico) y a la $TD_{\text{última}}$ (valores “large Strain”). La **figura n°11** define los valores característicos del ensayo utilizados en el presente artículo.

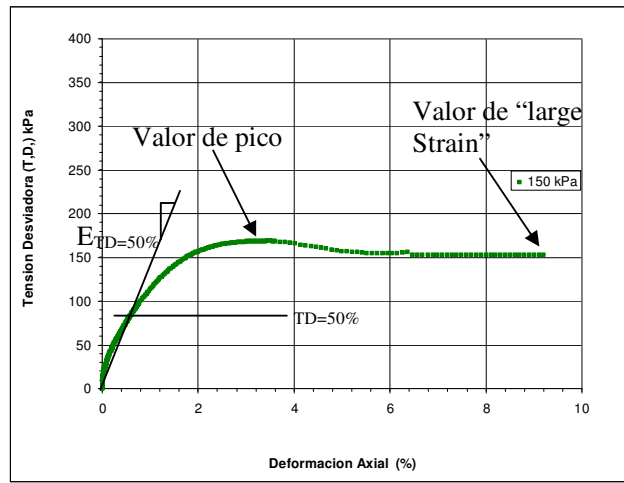


Figura. 11. Resultado ensayo triaxial en la gráfica Tensión Desviadora respecto a la deformación Axial del ensayo.

Los análisis de Trayectorias de Tensiones se hacen según los criterios de Lambe con $q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ y $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$.

- ensayos triaxiales Consolidados sin drenaje (Tr CU)

Se han realizado tres ensayos en el laboratorio RGGW de Varsovia (muestras ODW 8-9 y 4) más uno en el Laboratorio ELE de Katowice en una muestra de aspecto más blando a las demás (muestra N3 IO2). Se realiza el análisis de los valores de pico así como el de valores “large strain” (aunque en algunos casos no se dan valores de pico muy claros).

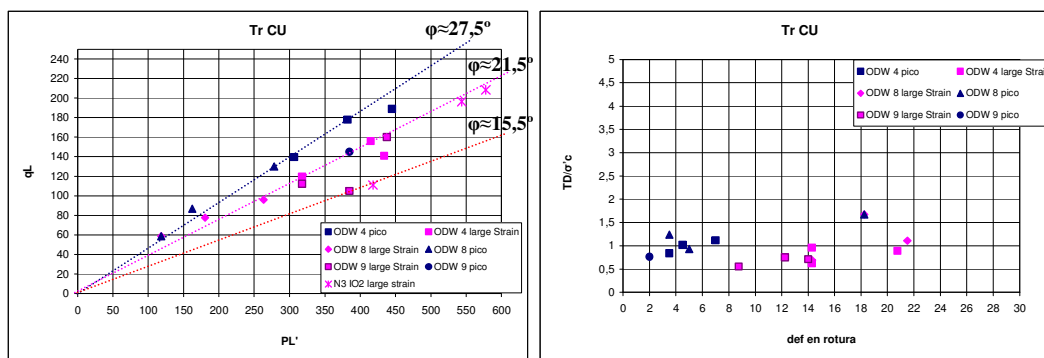


Figura. 12. Resultado ensayos triaxiales Consolidados No Drenados en tensiones efectivas en espacio de Lambe. Evaluación de valores de Pico y de valores "Large Strain".

En la **figura n°12** se puede observar, en el gráfico izquierdo, los valores de rotura que definen buenas correlaciones que pasan por el origen. El hecho de no tener cohesión en muestras tan arcillosas es muy habitual para muestras que han sufrido glacio-tectonismo multi episódico. Según Anantanasakul (2012) este tipo de fenómenos han destruido la estructura inicial de las arcillas Terciarias desencadenando, particularmente bajo grandes presiones de sobrecarga, un alto grado de alineación de las partículas a lo largo de la dirección de cizalladura. Este fenómeno es particularmente pronunciado en arcillas de muy alta plasticidad como las aquí analizadas, por lo que interpretamos, que obtener $C \approx 0$ es correcto.

Los valores de pico definen ángulos de rozamiento $\varphi \approx 27,5^\circ$. Mientras que los valores de “large Strain” son mayoritariamente de $\varphi \approx 21,53^\circ$. Eso definiría una diferencia de 6° . Se observan solamente dos puntos que se separan arrojando un comportamiento de “large Strain” que significaría $\varphi \approx 15,5^\circ$ (en el ensayo de contraste hecho en el laboratorio de Dragados-Madrid se obtuvo 17°). Según un estudio de Jamiolkowski (2014) en arcillas pliocenas de una región próxima en Polonia (Zelazny Most) las muestras Pliocenas de mayor plasticidad son las que ofrecen los valores bajos de ángulo de rozamiento por lo tanto estas tres probetas podían ser de niveles más plásticos (cosa que no se observa con claridad en los límites de Atterberg hechos en estas muestras) o bien ser muestras de material más alterado de forma natural (zonas de cizalladura y muestras con mayor anisotropía). En todo caso estos valores entre $15,5$ y $21,5^\circ$ son totalmente concordantes con los de las gráficas del American Society of Civil Engineers (Stark y Hussain 2013) en función a la plasticidad.

Por último hay que apuntar, debido a que en este trabajo no se han realizado cortes anulares, que Chandler (1977) y Gibo et al (2002) obtuvieron en arcillas terciarias valores de ángulo residual en anillo de 8° .

La **figura n°13** muestra la relación q' de Lambe (τ_{ult}) y la presión isotrópica inicial de cámara. Se puede observar el comportamiento lógico decreciente de la relación τ/σ' a medida que aumenta la presión de cámara. Se grafica también el valor de la “ A_f ” de Skempton en rotura que se ubica entre 0,29 y 0,52. ($A_f = \Delta u / \Delta \sigma_1$).

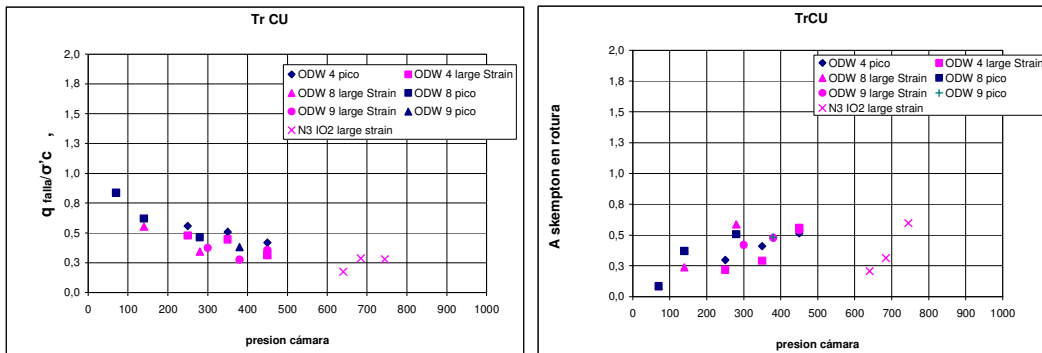


Figura. 13. Resultado ensayos triaxiales Consolidados No Drenados, relación $q_{rotura}/Presión$ de cámara respecto a la presión de cámara. Y evaluación del parámetro “ A_f ” de Skempton respecto de la presión de cámara.

- **Valoración del OCR**

Se plantea según el método “SHANSEP” de Ladd&Foott 1974, donde $Su/\sigma'v = S * (OCR)^m$. Jamiolkowski et al proponen $S=0,15$ a $0,3$, y la FHWA-IF-02-034 establece el valor de $S=0,23$. Para la “m” se acepta el valor de Wroth, 84, donde $m=1 - Cs/Cc$. Acorde al **cuadro n°3** se determina $m=0,83$. La relación $Su/\sigma'v$ se determina entre $0,3$ y $0,5$ (**figura n°13**, a partir de 100 kPa), en los materiales de aproximadamente $K \approx 1$ se definirá $Su/\sigma'v = 0,47$. (donde el valor es coincidente con el valor $Su/\sigma'v = 0,84 - 1.01 K_{oNC}$ que proponen Naeem o. et al 2012 y que con $K_{oN} = 1 - \sin\phi$ ($\phi \approx 21,5^\circ$))

Así pues se puede evaluar por ejemplo en zona de 20 m de profundidad:

$$Su / \sigma'_v = S * (OCR)^m \Rightarrow 0,47 = 0,23 * (OCR)^{0,83} \Rightarrow OCR = 2,3$$

Se puede observar que si se toma de manera aproximada una relación de descarga de $K = (1 - \sin\phi) * OCR^{\sin\phi}$, considerando los valores de ángulo de rozamiento obtenidos y los OCR de 2 hasta 10 del análisis de los edómetros (**cuadro n°4**) y de la valoración de $Su/\sigma'v$, se tendrán valores entre $K=0,9$ y $1,5$; Los valores altos se dan en la parte superficial del terreno y disminuyen a los bajos con la profundidad donde serán cercanos a 1 .

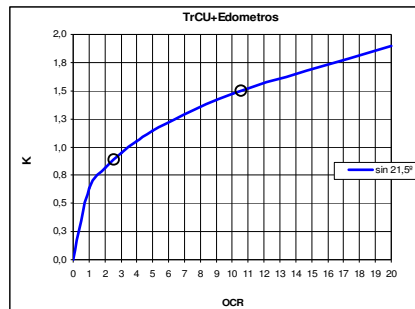


Figura. 14. Evolución de K con el grado de sobreconsolidación.

- **ensayos triaxiales Consolidados Con Drenaje (Tr CD)**

Todos los ensayos son de presión de cámara inicial isotrópica y aplicación de desviador de compresión con pipeta abierta.

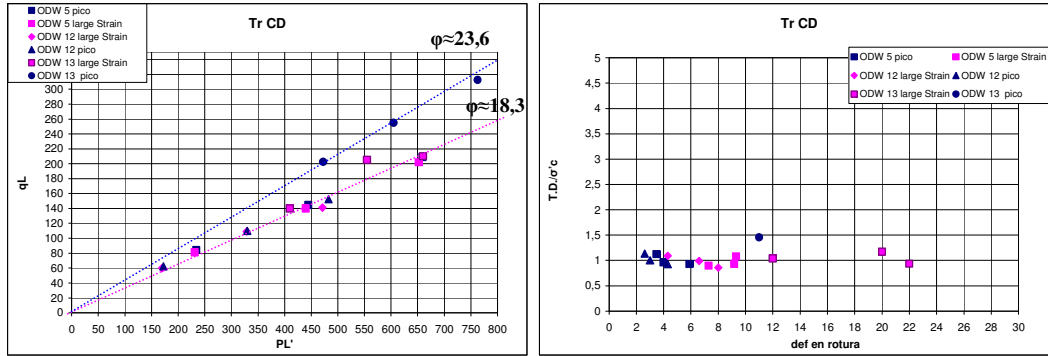


Figura. 15. Resultado ensayos triaxiales Consolidados Drenados en espacio de Lambe. Evaluación del valor de pico y del correspondiente a “large Strain”. Y relación de la Tensión Desviadora normalizada respecto a la deformación axial (%) en valores de pico y valores finales del ensayo (“large Strain”).

La **figura n°15** muestra como los valores más altos de ángulos de rozamiento ($\phi \approx 23,6^\circ$) se quedan claramente por debajo de los resultantes en los ensayos CU (**figura 12**). Así como los valores mínimos son aproximadamente de $\phi \approx 18,3^\circ$. La diferencia entre el valor de pico y el de “large Strain” es de $5,3^\circ$.

- Módulos triaxiales Consolidados Con y sin Drenaje

La **figura n°16** muestra los valores de los Módulos interpretados como los correspondientes al 50% de la Tensión Desviadora máxima (en azul) y de “large strain” (rosa) tanto en ensayos CD como en los CU.

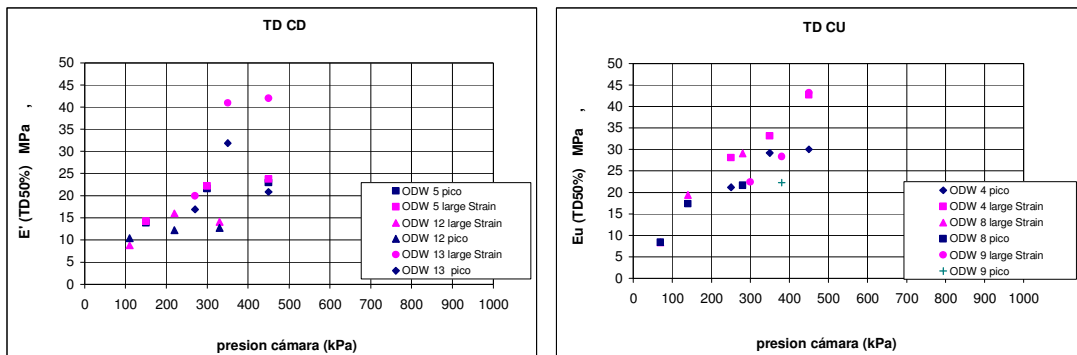


Figura. 16. Evolución de $E_{TD\ 50\%}$ con la presión isotrópica inicial de las muestras.

Se puede observar en ensayos CD y a presión de 100 kPa $E_{TD\ 50\%}^{pref=100\ kPa} \approx 9-10\ MPa$, mientras que en los ensayos No Drenados será de $\approx 10-15\ MPa$ ($E_u/E' \approx 1$ a 1,5).

La **figura n°17** muestra como las deformaciones a las que se obtienen los Módulos correspondientes al 50% de la Tensión Desviadora en los ensayos con drenaje están entre el 0,5 y el 1,25%, mientras que en los ensayos sin drenaje se sitúan en el entorno de 0,5%.

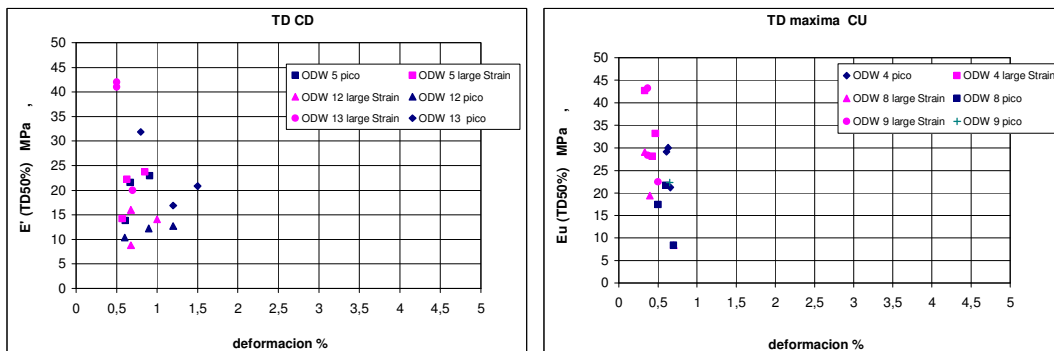


Figura. 17. Gráficas de $E_{TD\ 50\%}$ con la deformación a la que se obtiene.

La **figura n°18** muestra la relación entre el Módulo no drenado $Eu_{TD=50\%}$ y la resistencia al corte no drenada (interpretando $q_{falla} \approx Su$).

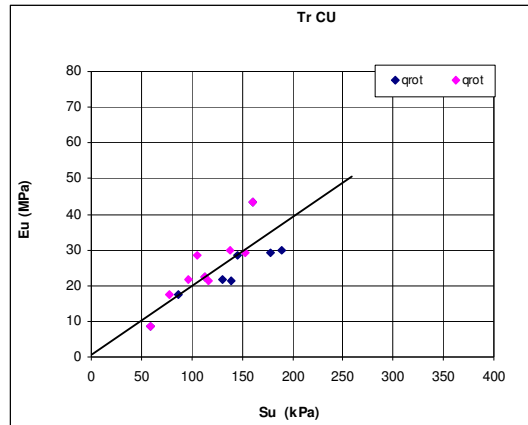


Figura. 18. Gráficas de relación $Eu_{TD=50\%}$ con “Su”.

Se obtiene una relación lineal de:

$$Eu_{TD50\%} \approx 200 * Su$$

5 PEQUEÑAS DEFORMACIONES

- Módulo de pequeñas deformaciones transversal G_0

El **cuadro n°6** muestra el resultado de los ensayos de medición de onda transversal hecho en las probetas de los ensayos triaxiales con “Bender Element”. El valor se establece según $G_0 = \rho \cdot (V_s)^2$, donde $\rho = \gamma/g$ y V_s es la velocidad de onda transversal.

Del mismo modo se muestra las interpretaciones del laboratorio RGGW de Varsovia de las tensiones en rotura y con estas se muestra también el parámetro $\gamma_r = \tau/G_0$, que es el umbral por debajo del que se interpreta pequeñas deformaciones (que queda establecido en 10^{-3}). La τ_{fu} es el valor correspondiente a la “q” de Lambe máxima obtenida en cada ensayo.

	SONDEO	PROFUNDIDAD MUESTRA	COTA	TRIAxIAL	presión de cámara (kPa)	τ_u kPa/(q)	V_s (m/s)	G_0 (MPa)	γ_r
triaxiales CU	ODW-4	24,0-24,6	153,17	CU	pr 1=250	130			
					pr 2=350	170			
					pr 3=450	190			
	ODW-8	4,5-5,1	172,68	CU	pr 1=70	60	143,1	40	1,5E-03
					pr 2=140	85	161,3	51	1,7E-03
					pr 3=280	130	193,9	73	1,8E-03
	ODW-9	30,0-30,6	145,55	CU	pr 1=300	120			
					pr 2=380	140			
					pr 3=450	160			
triaxiales CD	ODW-5	13,5-14,1	162,15	CD	pr 1=150	81,2	192,2	68	1,2E-03
					pr 2=300	139,9	238,5	105	1,3E-03
					pr 3=450	202	281,2	146	1,4E-03
	ODW-12	10,0-10,6	167,02	CD	pr 1=110	60	170	52	1,2E-03
					pr 2=220	109	196,6	70	1,6E-03
					pr 3=330	141	227,5	93	1,5E-03
	ODW-13	27,0-27,6	148,88	CD	pr 1=270	140	220,6	90	1,6E-03
					pr 2=350	205	249,7	115	1,8E-03
					pr 3=450	210	267,6	132	1,6E-03

Cuadro 6. Resumen de los resultados de los ensayos de velocidad de onda practicado en las probetas de los ensayos triaxiales.

La **figura n°19** muestra las velocidades medidas en las probetas según la presión de cámara aplicada (valores recogidos en el **cuadro n°6**). La velocidad se mide tras cada proceso de consolidación y previo a aplicar la tensión desviadora, es decir sin presiones intersticiales generadas.

Debajo de los gráficos se ha añadido la superposición de los ensayos SDMT (dilatometro plano con recepción de ondas transversales) que se han realizado en el terreno natural para comparar los resultados obtenidos. Resulta evidente una notable coincidencia, aún con los valores del laboratorio en el rango bajo de los SDMT, existen diferentes razones para tener esta ligera diferencia como es el hecho de que en la parte superior del terreno se tiene $K \approx 1,5$ y no se hace $K=1$ hasta unos 15m de profundidad, mientras que los triaxiales se han consolidado siempre en condiciones de $K=1$. Otro de los motivos para tener una ligera diferencia es que en este tipo de muestras tan sensibles, el más mínimo secado durante la preparación de las muestras puede inducir algo de microfisuración que baje después las velocidades de onda obtenidas en las muestras del laboratorio y esta influencia también puede ser mayor cuanto menor presión de cámara.

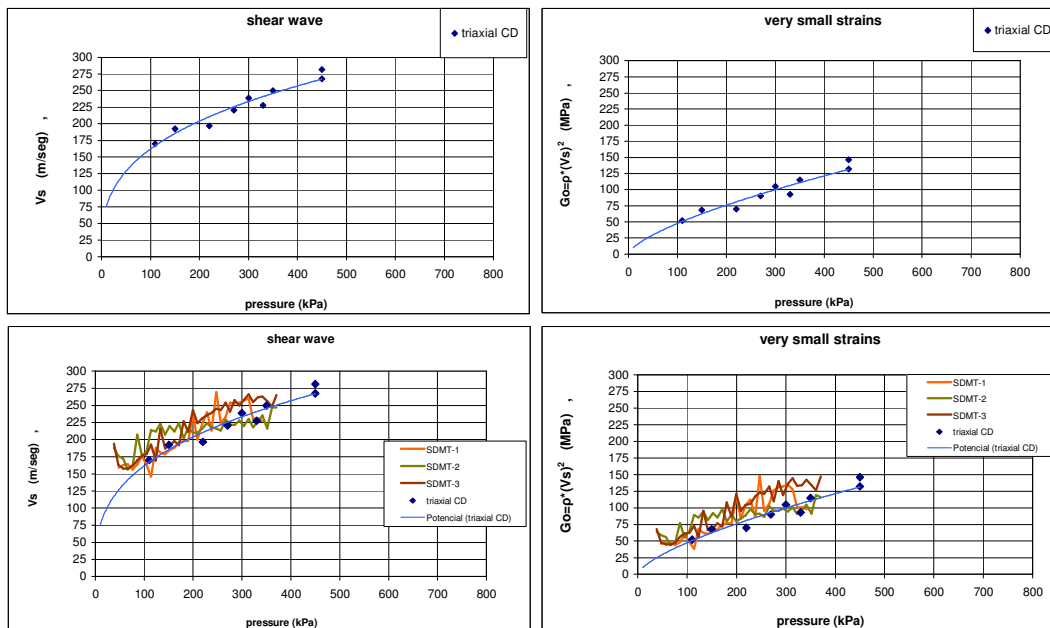


Figura. 19. Gráficas de velocidades de onda y Módulos de deformación transversal de pequeñas deformaciones.

Se puede definir la G correspondiente a TD_{50%} por relación con E' y Eu, se observa:

Módulos No drenados $\mu \approx 0,5$.

$$G_u = \frac{Eu}{2 * (1 + \mu_u)} \rightarrow \frac{Eu}{3} \text{ si } E_{u_{TD=50\%}}^{Pr ef=100_kPa} \approx 15 \rightarrow G \approx 5_MPa$$

Módulos Drenados

$$G = G' = \frac{E'}{2 * (1 + \mu')} \text{ si } E'_{TD=50\%}^{Pr ef=100_kPa} \approx 10 \xrightarrow{\mu=0,35} G \approx 5_MPa$$

La Go según la **figura n°19** se sitúa para $p^{ref}=100$ kPa aproximada de 50-60 MPa.

$$\frac{G_0^{Pr ef=100_kPa}}{G_{TD=50\%}^{Pr ef=100_kPa}} = \frac{50-60_MPa}{5_MPa} = 10-12$$

Del mismo modo se ha establecido la correlación entre los valores Go y la Su interpretada como $q_{falla} \approx Su$:

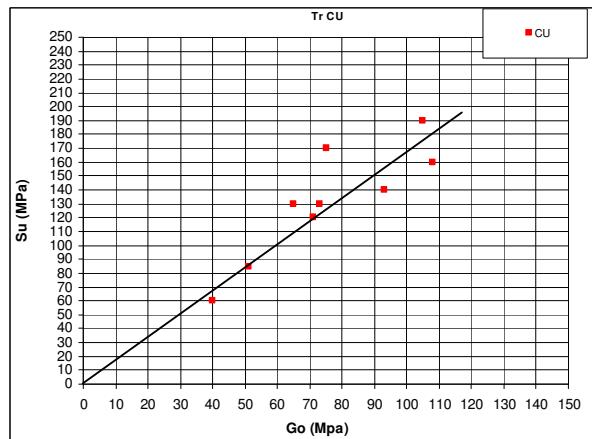


Figura. 20. Gráficas de la q de rotura y los Módulos de deformación transversal de pequeñas deformaciones.

$$G_0 \approx 600 * Su$$

$$G_0 \approx 3 \text{ a } 4 * E_{u_{TD=50\%}}$$

En conclusión se puede observar un material que responderá a las características que recoge el **cuadro n°7** para una presión de referencia de 100 kPa (donde $S_u \approx 85$ kPa):

I_p	2micras	ϕ	c	$E_{TD=50\%}^{Pr ef = 100 - kPa}$	$E_{TD=50\%}^{Pr ef = 100 - kPa}$	K	Vs (100 kPa)	Go (100 kPa)	$G_{(TD=50)} (100 kPa)$
53%	50%	21,5°	≈0	15 MPa	10 MPa	1 a 1,5	160-175 m/seg	50-60 MPa	5 MPa
				def=0,5%	def=0,5-1,25%				def=0,5%

Cuadro 7. Resumen de los resultados característicos del material analizado, a la presión de referencia de 100 kPa.

La **figura n°21** muestra donde se graficaría la arcilla analizada en el presente artículo sobre la gráfica de Termaat, Vermeer&Vergeer, 1985. Hay que observar que existe un intervalo entre $IP=40$ e $IP=70$ donde la correlación quedaría poco justificada con los datos de “oesterdam” y el nuestro.

$$\frac{G}{S_u} = \frac{5000}{I_p(\%)}$$

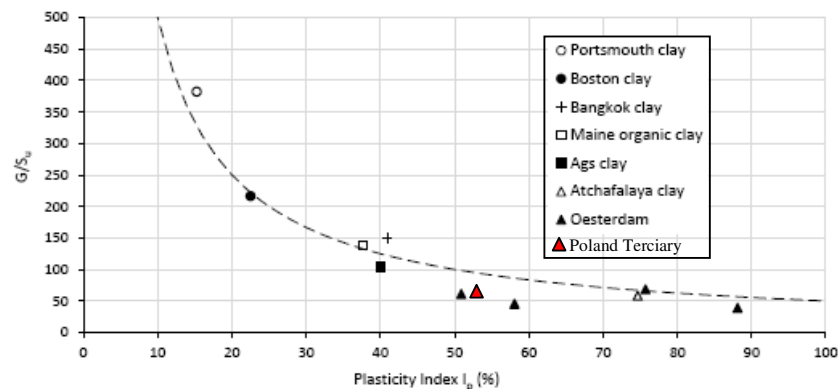


Figura. 21. Relación $G_{TD=50\%} / S_u$ respecto al IP según Termaat, Vermeer&Vergeer, 1985 con el punto añadido del presente artículo (en color rojo).

- **Evolución del Módulo de Young con la deformación**

La **figura n°22** muestra la evolución de los módulos Drenados según la presión de cámara inicial, para los porcentajes de deformación del 0,0001% (E_0); 0,1% y 0,5% ($\approx E_{50\%}$). Los módulos correspondientes a las pequeñas deformaciones se obtienen con medición de onda transversal utilizando “Bender Element” tras la consolidación de las muestras, antes de aplicar la tensión desviadora y los valores de 0,1% y 0,5% se obtienen directamente de los valores de los ensayos triaxiales.

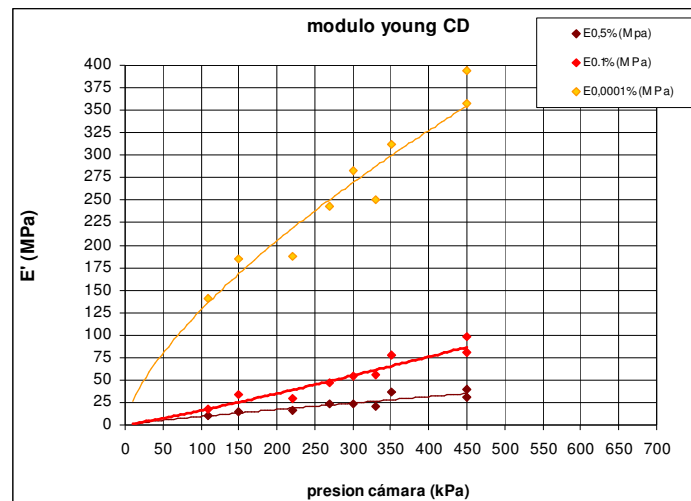


Figura. 22. Gráfica de Módulos de deformación respecto a la presión isotrópica de consolidación para diferentes deformaciones.

6 CONCLUSIONES

En el presente artículo se han parametrizado arcillas con una historia geológica muy importante que condiciona por completo su comportamiento geotécnico y que se podrían comparar con las “London Clay” o las “Boom Clay” tan presentes en la literatura geotécnica mundial.

Estas arcillas provenientes de los antiguos mares terciarios del norte de Europa han sufrido múltiples fenómenos geológicos (glaciotectonismo, emersiones, cambios químicos de las aguas, etc) que han generado materiales de ángulos de rozamiento bajos y resistencias al corte no drenadas altas.

El material analizado tiene plasticidades y actividades elevadas ($IP \approx 50\%$, $Actividad \approx 1$) pero humedad justo en el umbral del Límite plástico, con Índices de Fluidez negativos ($IL < 0$) y contenidos en $CaCO_3$ superiores al 13% que le dan, pese a un índice de poros entre 0,8 y 1, un comportamiento firme; y a observar por el comportamiento de los ensayos triaxiales, un cierto comportamiento dilatante. Todo ello hace que tanto el muestreo como el ensayo en laboratorio de estos materiales sea complicado, sobretudo por la pérdida de humedad y microfisuración que se produce con relativa rapidez.

La valoración de las presiones de preconsolidación con los edómetros son difíciles y el valor estimado varía mucho según el método que se emplee. Debido a la forma de los edómetros (con pocos escalones de carga al inicio y con cierto hinchamiento de las muestras no siempre bien reestablecido) se propone en los que no se pueda tomar el valor del pico de la “v” teórica, tomar los módulos sobreconsolidados como aquellos coincidentes con la P'_o en la rama de $m=cte$ en la representación de Janbu 63.

La relación entre módulos vertical y horizontal parece de $M_{\text{ocdV}}/M_{\text{ocdH}} \approx 2$.

Los ensayos triaxiales muestran ángulo de rozamiento bajos (en el entorno de $\varphi \approx 21,5^\circ$) y cohesiones nulas, acordes a las plasticidades e historia geológica del material. Además tienen picos muy marcados en las gráficas de Tensión Desviadora vs deformación en los ensayos CU.

Se propone utilizar en estas arcillas de **$I_p \approx 50\%$ y $OCR = 4$ a 11 .**

- **Valores generales**

$$e_o = 0,85$$

$$w_n = 28 \%$$

$$I_p = 53\%$$

$$2\mu \approx 50\%$$

$$\varphi \approx 21,5^\circ \quad C' \approx 0 \text{ Kpa}$$

$$S_u = 75-175 \text{ kPa}$$

$$V_o = 140-280 \text{ m/seg}$$

$$G_o = 40-140 \text{ MPa}$$

$$K = 1-1,5$$

$$P'_o = 600-950 \text{ kPa}$$

$$OCR = 4-11$$

$$M = 15-22 \text{ MPa}$$

$$C_c = 0,17-0,22$$

$$C_c/C_s = 4-7$$

$$C_c/(1+e_o) = 0,09-0,12$$

- **Valores a presión de referencia 100 kPa**

$$E_{TD\ 50\%}^{\text{pref}=100\ \text{kPa}} \approx 9-10\ \text{MPa}, \quad E_{u_{TD\ 50\%}}^{\text{pref}=100\ \text{kPa}} \approx 10-15\ \text{MPa},$$

$$S_u = 85\ \text{kPa}$$

$$V_o = 175\ \text{m/seg}$$

$$G_o = 50-60\ \text{MPa}$$

$$G_{50\%} = 5\ \text{MPa}$$

- **Correlaciones**

$$G_o = 600 * S_u$$

$$E_{u_{TD50\%}} = 200 * S_u$$

$$E'_{TD50\%} = 133 * S_u$$

$$G_o / G_{TD50\%} = 10-122$$

$$G_{TD50\%} = E_{u_{TD50\%}} / 3$$

$$G_{TD50\%} = 60 * S_u$$

$$\frac{G_{50\%}}{S_u} = \frac{5000}{IP} \quad (\text{Termaat et al 85})$$

$$E_{u_{50\%}} = \frac{15000}{IP} * S_u \quad (\text{foott\&Ladd})$$

BIBLIOGRAFIA

- Anantanasakul, P. Yamamuro, J. A. & Lade, P. V. (2012). *Threedimensional drained behaviour of normally consolidated anisotropic kaolin clay*. Soils Found. 52, No 1, pp. 146-159.
- Alonso, E. 2005. Parámetros de Resistencia en cálculos de estabilidad. VI *Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Valencia 21-24 junio*.
- Cendón Sevilla, D.I.1999. *Evolución geoquímica de cuencas evaporíticas terciarias: implicaciones en la composición isotópica disuelto en el océano durante el terciario* (Tesis Doctoral). Facultad de Geología. Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera” CSIC. Barcelona.
- Chandler, R. J. (1977). *Back analysis techniques for slope stabilization works: a case record*. Geotechnique 27, No. 4, pp. 479–495.
- Duncan J.M, Wright S., Brandon T., 2014 Second Edition. *Soil Strength and Slope Stability*. Hoboken , New Jersey. Published by John Wiley & Sons, Inc.
- Gibo, S., Egashira, K., Ohtsubo, M. & Nakamura, S. (2002). *Strength recovery from state in reactivated landslides*. Geotechnique 52, No. 9, pp. 683–686.
- Jamiolkowski, M. (2014). *Soil mechanics and the observational method: challenges at the Zelazny Most copper tailings disposal facility*. Geotechnique 64, No. 8, 590–619.
- Janbu, N. (1963) *Soil compressibility as determined by Oedometer and triaxial test*. European conference on soil mechanics and foundation engineering, vol 1, Pág 19-25, weisbaden, Alemania.

- Kaczyński, R. Long-term stability of Tertiary clay slopes in the Polish Carpathian Foredeep 2004. *en: Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference, pp 834-841, Thomas Telford, r. (Conference article).*
- Kaczyński R.R. Formation of engineering properties of soils during geological history. *Geologija*. Vilnius. 2008. Vol.50. Supplement. P. S4-S-10. ISSN 1392-110X.
- Kaczyński R.R. (2003) Overconsolidation and microstructures in Neogene clays from the Warsaw area. *Geol. Quart 47 (1):43-54. Warszawa*
- Ladd C.C.; Foodd, R. (1974) *New desing procedure for stability of soft clays”* . Journal of geotechnical engineering, 100 (GT7), pág. 763-786.
- Lee Kaufmann, K. (2010). *Strength and Deformation Properties of Tertiary Clay at Moesgarrd Museum and FE Investigations on the Interaction between a Pile and Swelling Clay*. Master’s Thesis. Faculties of Engineering, Science and Medicine, Aalborg University, Denmark.
- Long, M. Donohue, S.(2007). In situ shear wave velocity from masw surface waves at Norwegian soft clay sites. *Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXIX, No. 1–2.*
- Mendoza, R.C.(2004) *Determination of lateral Stresses in Boom Clay using a Lateral Stress Oedometer*. (Tesis de Master). International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands.
- Naeem O.; Abdulhadi, John T.; Germaine,; Andrew J. Whittle.; (2012) *Stress-dependent behavior of saturated clay*. Canadian. Geotech. J. 49: 907–916

- Ortuño, L. *Estudio de la compresión unidimensional en laboratorio. El edómetro. Disponible en:*
http://delegacion.camino.upm.es/apuntes/ICCP/4_cuarto/Geotecnia/EL%20EDOMETRO_sin%20soluciones.pdf
- Raj, R. (2007). *Evaluation of consolidation parameters of cohesive soils using PCPT method*. Thesis. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.
- Robertson, P.K, Cabal, K.L (6th. Edition, 2014). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering* .Gregg Drilling & Testing, Inc.California.
- Robertson, P.K *Soil behaviour type from the CPT: an update*. Gregg Drilling & Testing Inc., Signal Hill, California, USA
- Sabatini, P.J.; Bachus, R.C., Mayne P.W.; Schneider, J.A., Zettler T.E. **FHWA-IF-02-034**. Department of transportation office of bridge Technology Federal Highway Administration. 400 Seventh Street, SW, Washington DC, 20590. USA
- Senol, A.; Saglamer, A. *Determination of Pre-consolidation Pressure with a New “Strain Energy-Log Stress” method*. Civil Engineering Faculty, Geotechnical Engineering Department, Istanbul Technical University, Ayazaga, Istanbul, Turkey.
Disponible en:
<http://www.ejge.com/2000/Ppr0015/Abs0015.htm>
- Sobolewski, M. (2006).*The evaluation of Pliocene clays consistency state with using of flat dilatometer test*. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Disponible en <http://www.ejpau.media.pl/volume9/issue4/art-45.html>

- Stark T. D.; Hussain, M. (2013) *Empirical correlations: Drained shear strength for slope stability analyses*. Journal of Geotech. Geoenvironment engineering, n°139(6) pp. 853-862.
- Tavenas F.; Leroueil S. (1977) *Effects of stresses and time on yielding of clays*. 9th ICSMFE, Tokyo, Vol 1, pp. 319-326.
- Tavenas F.; Leroueil S.; La Rochelle P.; Roy M. (1978) *Creep behaviour of an undisturbed lightly overconsolidated clay*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15(3), pp. 402-423.
- Tavenas F.; Brucy M.; Magnan J.P.; La Rochelle P.; Roy M. (1979) *Analyse critique de la théorie de consolidation unidimensionnelle de Terzaghi*. Revue Française de Géotechnique n°7, pp. 29-43.
- Tavenas F.; Leroueil S. (1979) *clay behaviour and the selection of design parameters*. . 7th European Conf. on soil Mech. And foundations. Eng., Brighton, Vol 1, pp. 281-291.
- Termaat R.J.; Vermeer, P.A.; Verger, C.J.H. (1985) *Failure by large plastic deformations*. In Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 12-16 Aug.
- Wroth, C.P (1984). *The interpretation of in situ soil tests*, Geotechnique n°34(4): pp. 449-489.