

USO DEL PRESIÓMETRO EN LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MARGAS DE LA FORMACIÓN MADINGO

Use of pressuremeter test in the *Madingo* formation marls characterisation

Xavier Martí Armengol^a, Norma Pérez García^a, Marcelo Devincenzi^a

^a Igeotest, España

RESUMEN –En el presente artículo se describe la formación *Madingo*, de edad cretácica y principalmente compuesta por margas multicolores con intercalaciones de arenas. Estas margas constituyen parte del sustrato resistente que se encuentra en la zona oeste de Pointe Noire (Congo). Para el estudio geotécnico in situ de estas margas es muy habitual el uso del presiómetro tipo Ménard, aunque en ocasiones la presión límite queda fuera del rango de actuación de dicho presiómetro y por tanto no se puede determinar. En este trabajo se utiliza la base de datos obtenida a lo largo de 5 años de realización de presiómetros en Pointe Noire, para determinar la relación existente entre la presión límite neta y la presión de fluencia neta. Finalmente se usa el Pressiorama® definido por Baud and Gambin (2013) para clasificar las margas de *Madingo*.

ABSTRACT – The *Madingo* formation, of Cretaceous age and mainly composed by multicolored marls with sand intercalations, is described in this paper. These marls constitute part of the resistant substrate founded in the Pointe Noire west area (Congo). Ménard pressuremeter tests are usually used for the geotechnical investigation in this area, although sometimes the limit net pressure is outside of the Menard pressuremeter range and therefore it cannot be determined. A data base, obtained along the last 5 years of pressuremeter works in Pointe Noire, is used to determine the ratio between the net limit pressure and the net creep pressure. Finally, the Pressiorama® defined by Baud and Gambin (2013) is used to classify *Madingo* marls.

Palabras Clave – Relación entre presión límite neta y presión de fluencia neta, presiómetro Ménard, Formación *Madingo*, Pressiorama ®.

Keywords – Net limit and net creep pressures relation, Ménard pressuremeter, *Madingo* formation, Pressiorama ®.

1 – INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de las distintas obras que se vienen realizando desde hace años en la costa de Pointe Noire (República del Congo), se dispone de información referente a campañas de investigación geotécnica realizadas para estos proyectos. La geología general se puede resumir como niveles de depósitos cuaternarios y margas cretácicas (*Fm. Madingo*) con intercalaciones de arenas en su interior y distintos grados de carbonatación.

La caracterización de las margas, desde el punto de vista geotécnico, no es sencilla, ya que se encuentra en el límite de lo que se podría denominar suelo duro-roca blanda y por tanto las técnicas de caracterización a aplicar en cada caso dependerán del estado en que se encuentren estas margas.

E-mails: xavierm@igeotest.com (X. Armengol), norma@igeotest.com (N. García), marcelo@igeotest.com (M. Devincenzi)

Uno de los ensayos *in situ* habitualmente utilizados es el ensayo presiométrico tipo Ménard, que permite la obtención de módulos deformacionales y establecer relaciones de tensión-deformación.

El presiómetro es un ensayo adecuado para el estudio de las margas, ya que se realiza *in situ*, lo que reduce la inevitable alteración de la muestra que se produce con otro tipo de ensayos, y además es aplicable a un amplio rango de resistencias.

En este artículo se describen, desde un punto de vista geológico, los materiales de la formación *Madingo* así como su caracterización geotécnica basada en ensayos de caracterización realizados en muestras obtenidas en sondeos, ensayos presiométricos realizados y la clasificación de estos en el Pressiorama®. Además se propone una relación entre la presión límite neta y la presión de fluencia neta para esta formación.

2 – LA FORMACIÓN MADINGO EN EL CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

La formación *Madingo*, geológicamente, pertenece a la cuenca sedimentaria costera del Congo, la cual presenta más de 150km de largo y 60km de ancho. Se trata de una de las cuencas asociadas al *rift* que produjo la separación entre los continentes africano y americano (Figura 1). Como todas las cuencas asociadas a este *rift* la dirección de la cuenca es norte-sur y está delimitada por un sistema de fallas de dirección este-oeste.



Fig. 1 – Situación de la Cuenca costera del Congo (Brownfield y Charpentier, 2006)

La historia geológica de la cuenca, que empieza en el cretácico inferior con un régimen continental y termina en el terciario en un régimen marino, se desarrolla en tres episodios:

Un episodio pre-salino dominado por tectónica tipo *horst* y *graben* de orientación NO-SE y sedimentación lacustre-pantanosa que da origen a depósitos de hidrocarburos. Estos hidrocarburos originan, después de su migración, las areniscas bituminosas de la formación *Mayombe*. Los materiales pertenecientes a este episodio son *sin-rift*, con la única excepción de la formación Chela, que es *post-rift*.

Un episodio salino compuesto por varios ciclos donde se alternan sales de potasio y de sodio (formación *Loembe*). Estas sales son el origen de los depósitos de potasa explotados en la zona. Este episodio fue producido por una transgresión marina restringida que se produjo después del *rift*.

Un episodio post-salino caracterizado por la subsidencia y la deposición marina abierta con intercalaciones continentales, dando principalmente facies de plataforma somera con areniscas y limolitas. La formación *Madingo*, de edad senoniense-eoceno, se ubica dentro de este episodio (Figura 2).

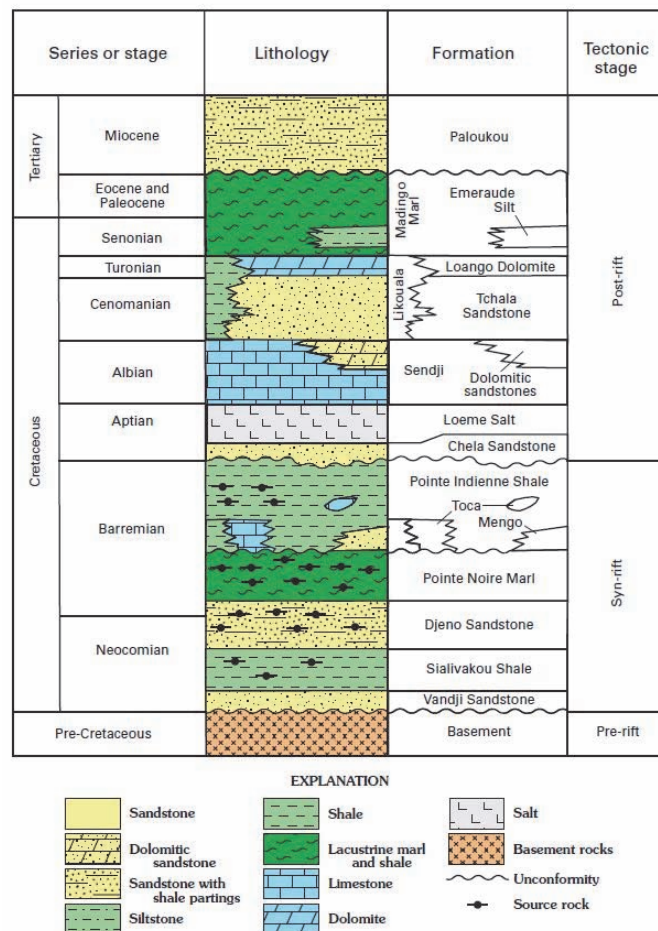


Fig. 2 – Columna estratigráfica general de la cuenca costera del Congo (Brownfield y Charpentier, 2006)

Este episodio post-salino está caracterizado tanto por la dinámica de las transgresiones y regresiones marinas como por los tres episodios de subsidencia del margen continental.

La transgresión marina, favorecida por el primer episodio de subsidencia del margen, dio origen a limolitas, dolomías y areniscas (*Fm. Sendji*). A continuación, el episodio de regresión dio lugar a depósitos de areniscas y limos más o menos carbonatados (*Fm. Tchala* y *Fm. Likouala*).

La segunda transgresión, también ligada a la subsidencia del margen continental, conlleva la deposición de dolomitas y limolitas (*Fm. Loango*) y margas (*Fm. Madingo*) (Figura 3).

El último episodio de subsidencia continental se produce en el Oligoceno-Mioceno, dando fin a los sedimentos marinos de la cuenca con la deposición de arcillas y limos fosilíferos de la formación *Paloukou*.

Sobre la serie descrita se depositaron los materiales Pliocenos de la formación “de los circos”, formada por arenas con arcillas e intercalaciones endurecidas, niveles lateríticos y presencia de madera silicificada. Estos materiales, de origen aluvial, afloran a lo largo de la costa congoleña.

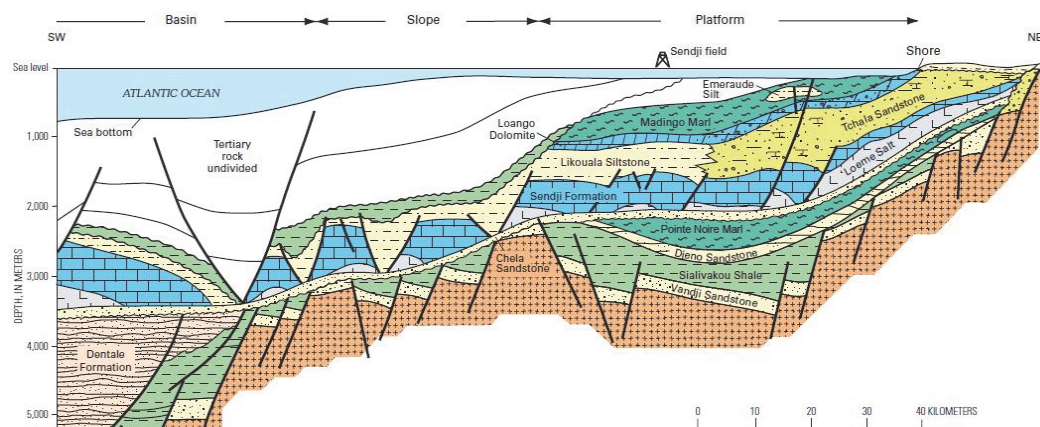


Fig. 3 – Corte esquemático de la parte norte de la Cuenca costera del Congo donde se muestran las formaciones pre-salinas y post-salinas (incluyendo la formación *Madingo*) (Brownfield y Charpentier, 2006)

3 – DESCRIPCIÓN DE LA FORMACIÓN MADINGO

La formación *Madingo* está formada por margas limosas y/o arenosas con abundante materia orgánica y localmente con intercalaciones limosas y dolomíticas (“Notice explicative de la Carte géologique de la République du Congo”).

A partir de las descripciones y ensayos realizados en muestras extraídas en sondeos realizados en la costa de Pointe Noire, esta formación se describe como margas de coloraciones grises, verdosas, ocre y marrones, con intercalaciones de limos/arcillas y arenas. Las intercalaciones dolomíticas no han sido detectadas en los sondeos estudiados, que han alcanzado profundidades máximas del orden de 35 m.

A partir de los ensayos de laboratorio llevados a cabo en las margas de la formación *Madingo* se obtiene una composición media de 81% de materiales finos (limos y arcillas), 17% de arenas y 2% de gravas; mientras que las intercalaciones arenosas presentan una composición media del 25% de materiales finos, 62% de arenas y 12% de gravas.

El límite líquido varía entre el 28 y el 52% con un índice de plasticidad entre el 9 y el 29%, lo que clasifica el nivel como de plasticidad media-alta. Según la clasificación de Casagrande estos materiales se clasifican como CL, ML (arcillas y limos de baja plasticidad) y en menor cantidad como CH (arcillas de alta plasticidad). Los valores de densidad aparente varían entre 17 y 21 kN/m³.

El contenido en carbonatos, como ocurre habitualmente en las margas, es muy variable, con valores comprendidos entre 1% (correspondiente a las intercalaciones arenoso-limosas) y 66%.

Los valores de resistencia al corte no drenado, calculados según Harivony (2002) a partir de la presión límite neta obtenida en los presiómetros, presentan valores comprendidos entre 0.73 y 3.25 MPa.

Tabla 1 – Estadísticos generales de los datos de laboratorio

	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad	Carbonatos (%)
Número	26	26	26	25	25	22	18
Media	2.2	17.1	80.7	28.6	18.2	13	25.9
Desviación estándar	5.75	11.64	13.20	12.15	7.24	6.19	20.59

4 – DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO PRESÓMETRICO

El ensayo presiométrico Ménard es uno de los ensayos más adecuados para la determinación de los valores de tensión/deformación y de deformabilidad en suelos duros y rocas blandas como las pertenecientes a la *Fm. Madingo*.

El ensayo presiométrico de Ménard consiste en la expansión radial de una sonda cilíndrica tricelular insertada en una cavidad previa, midiendo y registrando las variaciones de volumen que se producen en el interior de la célula central tras la aplicación de distintas presiones. Esto permite determinar la relación entre la presión aplicada y la expansión de la sonda.

Uno de los factores más importantes que afectan a los resultados de los ensayos presiométricos es el método de perforación y la colocación de la sonda dentro de la cavidad, ya que una alteración o sobredimensionamiento de esta puede dar lugar a resultados erróneos (Baguelin *et al.*, 1978).

La norma ISO 22476-4 incluye una recomendación de los distintos métodos de perforación a utilizar en función del terreno a ensayar (Tabla 2).

Para el caso de margas se recomienda la perforación con rotación mediante el uso de barrena helicoidal, herramientas de corte con inyección de fluido o mediante testigo continuo. Los dos últimos métodos han sido los utilizados para la perforación de la cavidad del ensayo en la *Fm. Madingo*.

El ensayo Presiométrico se analiza a partir de la teoría elastoplástica de la expansión de una cavidad cilíndrica en un medio indefinido, permitiendo determinar los parámetros siguientes:

1- Presión límite Menard (p_l) se define como la presión alcanzada cuando se dobla el volumen inicial de la cavidad:

$$V_l = V_s + 2 V_1 \quad (1)$$

donde V_l es el volumen límite, V_s es el volumen inicial convencional de la celda central de medida y V_1 es el volumen inyectado a la celda central de medida (después de las debidas correcciones), correspondiente al inicio del rango del presiómetro.

La presión límite puede ser determinada de forma directa (cuando el volumen inyectado es mayor que $V_s + 2V_1$) o mediante métodos de extrapolación recogidos en la propia norma ISO 22476-4.

A pesar que la presión límite no es una propiedad característica del terreno, es un parámetro de aplicación directa en el diseño de cimentaciones.

2- Presión de fluencia (p_f) se obtiene de la evaluación gráfica del diagrama ($p, \Delta V^{60/30}$). $\Delta V^{60/30}$ es la variación del volumen de líquido inyectado a la celda central de medida entre los tiempos $t=30s$ y $t=60s$ después del inicio del escalón de presión p (ver Figura 4)

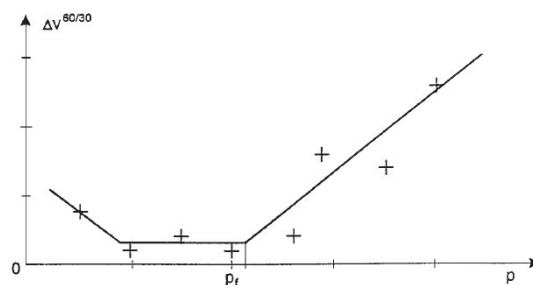


Fig. 4 – Curva de fluencia presiométrica.

Tabla 2 – Métodos de perforación a usar según la norma ISO 22476-4

Tipo de terreno	Sondeo previo			
	Rotación*			
	OHD *	HA/HAM *	CFA	CD
Fangos y arcillas blandas	●●°	●●●°	--	--■
Arcillas medianamente compactas	●●●°	°●●●	●●■	●●■
Arcillas compactas, margas rígidas	●●●°	●●■°	●●●	●●●°
Limos: -encima nivel freático -debajo nivel freático	●●°	●●●°	●●	●●■°
	●■°	●●■°	--	●■°
Arenas flojas: -encima nivel freático -debajo nivel freático	●●°	●●●■°	●●	●
	●■°	●●°	--	--■
Arenas medianamente compactas y compactas	●●●°	●●●°	●●●	●°
Suelos gruesos	●●°	--■	--■	--■
Suelos cohesivos no homogéneos	●●°	●°	●	●●■°
Suelos flojos no homogéneos, otros suelos no especificados arriba (algunos depósitos aluviales, rellenos, tills)	●●°	●°	●	●°
Rocas alteradas Rocas blandas	●●●°	●●°	●●	●●■°
<p>●●●: Recomendado ●●: Adecuado ●: Aceptable --: No adecuado *: Velocidad de rotación no debe exceder 1s⁻¹ y el diámetro de la herramienta de perforación igual o inferior a 1.15 d_c. °: Circulación de lodos: la presión no debe exceder los 500kPa y el caudal no debe exceder 15 l/min. El caudal de lodo se puede interrumpir temporalmente si es necesario. ■: En función de las condiciones locales y de la evaluación del operario. HA: Barrena manual HAM: Barrena con inyección de lodos CFA: Barrena helicoidal OHD: Herramientas de corte CD: Testigo continuo</p>				

3-Presión neta (p^*) es la presión calculada con respecto a la tensión total horizontal del suelo (σ_{hs}) a la profundidad de ensayo antes de la introducción de la sonda presiométrica. Se definen las siguientes presiones netas:

$$\text{Presión límite neta: } p_l^* = p_l - \sigma_{hs} \quad (2)$$

$$\text{Presión de fluencia neta: } p_f^* = p_f - \sigma_{hs} \quad (3)$$

4- **Módulo presiométrico Ménard (E_M)** se determina a partir de la pendiente del tramo lineal de la curva de presión corregida frente al volumen corregido. E_M viene dado por la siguiente ecuación:

$$E_M = 2(1 + \nu)(V_0 + V_m) \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (4)$$

Donde ν es el coeficiente de Poisson (se asume un valor de 0.33), ΔP y ΔV son los incrementos en presión y volumen respectivamente, entre dos puntos definidos a lo largo del tramo lineal de la curva presiométrica, V_m es el volumen medio de la cavidad medida en el punto medio del tramo lineal, y V_0 es el volumen inicial de la sonda.

5 – ENSAYOS PRESIOMÉTRICOS

Los ensayos presiométricos fueron realizados con un presiómetro automático tipo Ménard que puede alcanzar una presión máxima de trabajo de 100 bar. Se han utilizado sondas desnudas de diámetro 60 mm y *tube fendu* de 44 mm. Los ensayos presiométricos fueron procesados según la norma ISO 22476-4.

Cabe destacar que, siguiendo esta normativa, si en un ensayo no se alcanza la presión de fluencia o bien, las circunstancias del ensayo no permiten la obtención de la p_l , ésta se reporta como mayor que el valor máximo de presión aplicada a lo largo del ensayo ($p_l > p_{max}$).

Para este estudio se disponía de un total de 82 ensayos, de los que se han descartado 44 en los que no se alcanzó la presión de fluencia.

En la Figura 5 se muestran gráficamente los valores de p_l^* , p_f^* y E_M respecto la tensión vertical efectiva a nivel del ensayo para todos los ensayos en los que se ha podido obtener la Pl (21 ensayos en los que el valor de E_M es siempre inferior a 100 MPa). Se puede observar un aumento de los parámetros presiométricos con el aumento de la tensión efectiva vertical.

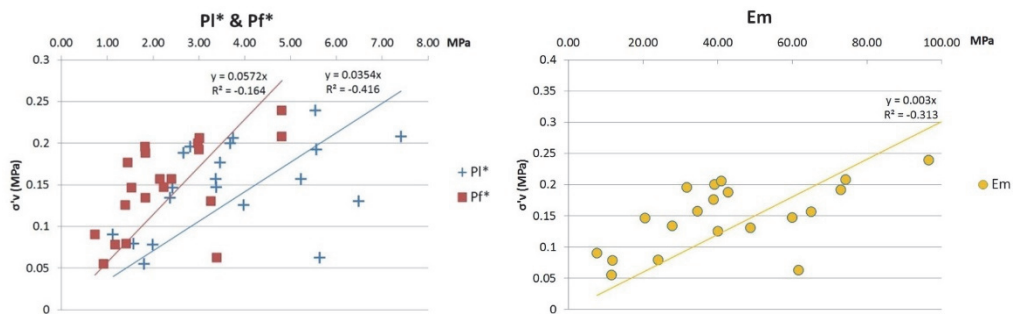


Fig. 5 – Valores de p_l^* , p_f^* y E_M respecto a la presión vertical efectiva a nivel del ensayo

En la práctica habitual, tal y como quedaba reflejado en la Norma Francesa del año 99, la relación entre p_l^* y p_f^* se sitúa en 1.7, no obstante se ha podido observar que esta relación depende de las condiciones locales y por tanto es variable. Establecer una relación local entre ambas, es de gran utilidad a la hora de interpretar aquellos ensayos en los que se alcanza una p_f pero la p_l no se puede determinar.

En la Figura 6 se correlaciona la p_l^* y la p_f^* obtenidas para la formación *Madingo* según la siguiente relación:

$$p_l^* = 1.57 p_f^* \quad (5)$$

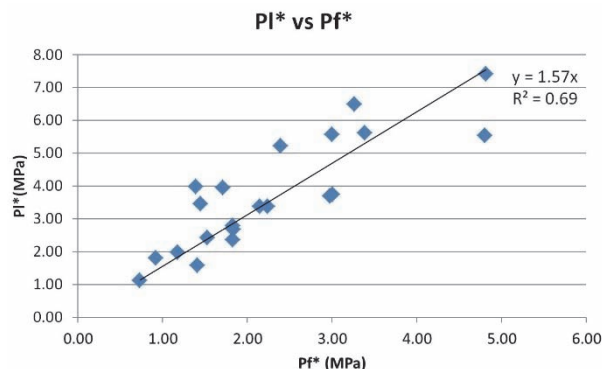


Fig. 6 – Relación entre p_l^* y p_f^*

La relación obtenida se encuentra en el límite inferior de las obtenidas por Bahar (1998) para arcillas del norte de Argelia, que presentaban valores de entre 1.57 y 1.8; y no dista mucho del valor 1.7 obtenido por otros autores en arcillas (Cassan, 1988). Esta variación se puede deber al hecho de que los materiales estudiados no corresponden estrictamente a arcillas sino a margas.

La ecuación obtenida se ha utilizado para determinar los valores de p_l^* en los ensayos presiométricos donde esta no pudo ser determinada. De todas formas es importante destacar que esta relación se ha obtenido para ensayos donde $E_M < 100$ MPa y por tanto debería ser corroborada mediante resultados obtenidos con presiómetros de alta presión para ensayos que presentan valores de $E_M > 100$ MPa.

Los datos presiométricos (incluyendo las p_l^* determinadas a partir de la ecuación 5) se muestran en la Figura 7, mientras que los estadísticos principales se muestran en la Tabla 3.

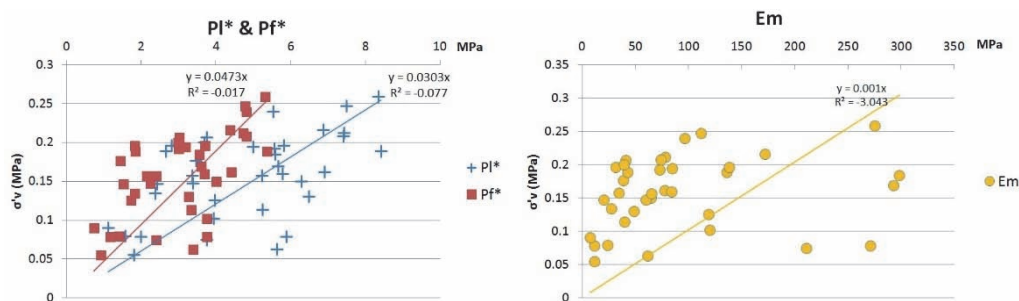


Fig. 7 – p_l^* (incluye valores calculados con la ecuación 5), p_f^* y E_M respecto a la presión vertical efectiva a nivel del ensayo

Tabla 3 – Estadísticos generales de los datos presiométricos

	p_l^* (MPa)	p_f^* (MPa)	E_M (MPa)	E_M/p_l^*
Número	38	38	38	38
Media	4.85	3.04	129.43	28.27
Desviación estándar	1.96	1.30	172.77	32.10

La formación *Madingo* presenta valores de p_l^* comprendidos entre 1.12 y 8.41 MPa, con un valor medio de 4.85 MPa y una desviación estándar de 1.96 MPa. Los valores de E_M se encuentran

comprendidos entre 7.62 y 849.7 MPa con un valor medio de 129.43 MPa y una desviación estándar de 172.77 MPa.

Las variaciones detectadas para estos valores pueden venir dadas por las variaciones tanto en el contenido de arcillas como en el grado de carbonatación de las margas, parámetros que, según Khamehchiyan et al. (1994), son los principales factores que influyen en el comportamiento geotécnico de las margas.

Grafizando los datos del cociente E_M/p_l^* referentes a la formación *Madingo*, se observa un cambio importante en función de si E_M es superior o inferior a 200 MPa (Figura 8). Se obtienen los siguientes valores para este cociente:

$$E_M/p_l^* = 11.54 \text{ para } E_M < 200 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$E_M/p_l^* = 30.72 \text{ para } E_M > 200 \text{ MPa} \quad (7)$$

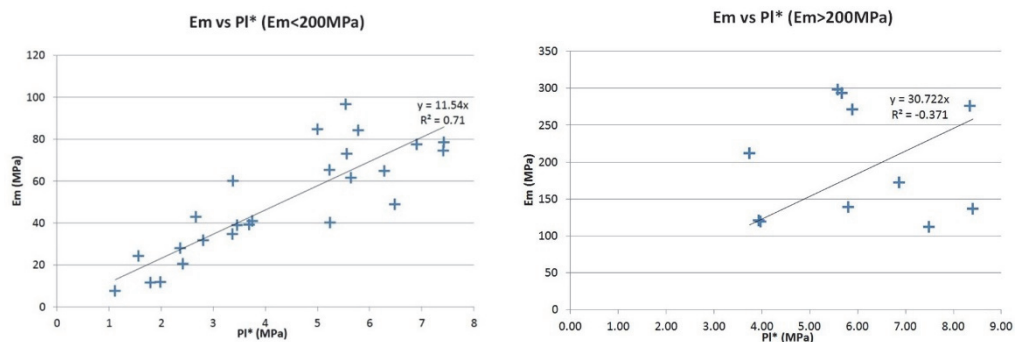


Fig. 8 –Cociente E_M/p_l^*

Los valores de E_M/p_l^* para $E_M > 200$ MPa presentan una mayor dispersión, probablemente debida a la heterogeneidad en el comportamiento del terreno. No obstante este punto puede ser ampliado con la ejecución de ensayos a mayores presiones.

Si bien no existe una relación funcional entre E_M y p_l (ambos parámetros cuantifican fenómenos de naturaleza diferente), Ménard notó que el cociente E_M/p_l^* guarda una estrecha relación con el grado de consolidación del suelo y se mantiene aproximadamente constante dentro de una misma formación geológica. Baguelin *et al.* (1978) establecen una clasificación de los suelos según este criterio (Tabla 4).

Según la Tabla 4 las margas con valores de $E_M < 200$ MPa se clasificarían como arcillas/limos normalmente consolidados, mientras que las margas con valores de $E_M > 200$ MPa se clasificarían como arcillas sobreconsolidadas. Estos resultados se explicarían por un mayor grado de carbonatación de las margas con $E_M > 200$ MPa. También es importante destacar de nuevo que en este caso el terreno no es puramente arcilloso, sino que son margas que presentan variaciones importantes en el contenido de arcilla.

Un desarrollo reciente en el análisis de los resultados MPM en diferentes formaciones geológicas es el Pressiorama® desarrollado por Baud y Gambin (2013). Este diagrama nos proporciona una clasificación entre suelos, rocas blandas y rocas duras, como se puede ver en la Figura 9.

Los resultados obtenidos para la formación *Madingo* indican una clasificación entre un suelo duro y una roca blanda, como cabe esperar en unas margas. También se observan los distintos grados

de cementación que presentan estas margas, concordando con la variabilidad en el porcentaje de carbonatos obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Tabla 4 – Clasificación de suelos según cociente E_M/p_l^* (Baguelin *et al.*, 1978)

Tipo de suelo	E_M/p_l^*				
	Turba	Arcilla	Limo	Arena	Arena y grava
Sobreconsolidado	--	>16	>14	>12	>10
Normalmente consolidado	--	9-16	8-14	7-12	6-10
Alterado y/o remoldeado	--	7-9	--	--	--

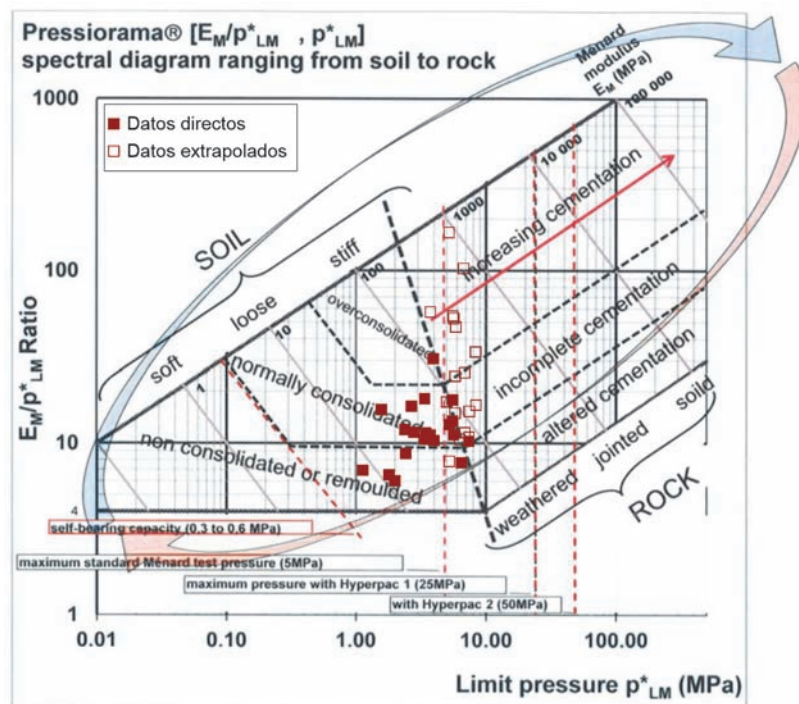


Fig. 9 – Clasificación de la *Fm. Madingo* a partir del Presiorama®

6 – CONCLUSIONES

En los ensayos presiométricos mediante presiómetro tipo Ménard realizados en las margas de la formación *Madingo* se ha obtenido aproximadamente un 45% de ensayos en los que se ha podido determinar la p_l^* , estando el 55% restante fuera del rango de aplicación de este equipo.

Se ha obtenido la siguiente igualdad $p_l^* = 1.57p_f^*$, que proporciona la relación entre la presión límite neta y la presión de fluencia neta para las margas de la formación *Madingo*. Se propone seguir

esta relación para la estimación de p_l^* en los casos en que esta queda fuera del rango del presiómetro Ménard.

A la vista de estos resultados, sería recomendable la utilización de presiómetros Ménard de alta presión para la correcta caracterización geotécnica de las margas de esta formación, así como para corroborar el valor obtenido para la relación entre p_l^* y p_f^* para valores de $E_M > 100$ MPa.

También se calculan los valores del cociente E_M/p_l^* para las margas de esta formación, obteniéndose un valor de 11.54 para las margas con $E_M < 200$ MPa y un valor de 30.72 para las margas con $E_M > 200$ MPa. En el rango de $E_M > 200$ MPa se necesita más investigación dado que los valores disponibles presentan una dispersión importante.

Aunque el valor del cociente E_M/p_l^* acostumbra a ser aproximadamente constante para los materiales de una misma formación, en este caso se obtienen variaciones que podrían ser explicadas por la variabilidad en el contenido de arcillas y en el grado de carbonatación.

Finalmente, se utiliza el Pressiorama® para clasificar las margas de la formación *Madingo*, quedando estas clasificadas entre suelos duros y rocas blandas con distintos grados de cementación, siendo estos resultados los esperables para unas margas.

7 – BIBLIOGRAFIA

- Baguelin, F.; Jézéquel, J.F.; Shields, D.H. (1978). *The pressuremeter and foundation engineering*. Clausthal: Trans Tech Publications, pp. 231
- Bahar, R. (1998). *Properties of clays from Menard pressuremeter test results*. Geotechnical Site Characterization, Robertson & Mayne (eds) Balkema, Rotterdam (1998), pp 735-740.
- Baud, J.P.; Gambin, M. (2013). *Soil and Rock Classification from High Pressure Borehole Expansion Tests*. Geotech. and Geol. Engineering, Springer. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9664-0>
- Brownfield, M.E.; Charpentier, R.R. (2006). *Geology and total petroleum systems of the west-central coastal province (7203), West Africa*; USGS bulletin 2207-B.
- Cassan M. (1988). *Les essais in situ en mécanique des sols*. Editions Eyrolles.
- Harivony, L. (2002). *Analysis of in situ test derived soil properties with traditional finite element methods*. Ph.D. Dissertation, University of Florida.
- Khamehchiyan, M.; Iwao, Y.; Amirsoleymani, T. (1994). *Effect of carbonate content on engineering properties of marl rocks*. Proceedings 7th International Congress IAEG, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Ministère des Mines et de l'Énergie. Direction Générale des Mines (1993). *Note explicative de la carte géologique de la République du Congo. AU 1:1.000.000*.