

CALIBRACIÓN DEL *CAM CLAY* PARA SUELOS DEL POSTPAMPEANO

Osvaldo N. Ledesma⁽¹⁾, Alejo O. Sfriso.

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Av. Las Heras 2214, Buenos Aires.

[\(1\)onledesma@fi.uba.ar](mailto:(1)onledesma@fi.uba.ar)

RESUMEN

La formación Postpampeano se extiende sobre la ribera occidental del Río de la Plata y las márgenes y delta del Río Paraná inferior. Está constituida por limos y arcillas de mediana y alta plasticidad de deposición fluvial y marítima normalmente consolidados y con escasa estructuración. Debido a esto, su comportamiento mecánico puede ser descrito a través del modelo *Cam Clay* modificado. En este trabajo se resumen las investigaciones llevadas a cabo en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la FIUBA como parte de un proyecto de caracterización mecánica de los suelos del Postpampeano. Se describen los resultados de ensayos triaxiales y de consolidación unidimensional realizados sobre muestras amasadas y su simulación mediante un programa de elementos finitos. Pudo observarse que el modelo constitutivo describe razonablemente el comportamiento de los suelos arcillosos en trayectorias de compresión dominante pero tiene poca capacidad para simular el comportamiento de los suelos limosos de la formación Postpampeano, tanto en trayectorias de corte dominante como en trayectorias de compresión dominante. Estos resultados fueron tomados como punto de partida para la realización de un análisis inverso sobre un caso real de construcción de una terminal de contenedores emplazada sobre la margen del río Paraná, en la cuál se realizó un proceso de precarga que fue monitoreado y documentado. Se presentan los parámetros de mejor ajuste y discute el alcance y validez del *Cam Clay* como modelo constitutivo para los suelos del Postpampeano.

ABSTRACT

The Postpampeano formation extends along the right margin of the La Plata river and on the margin and delta of the Paraná river. It's composed of limes and clays of high and low plasticity of maritim and fluvial deposition. The mechanical behavior of these soils can be described by the *Cam Clay* model. The paper presents a summary of the investigations carried out in the Soil Mechanics Lab of the University of Buenos Aires as part of a characterization of the Postpampeano formation. Results of triaxial and oedometric tests on disturbed samples are presented together with their respective finite element modellings. The *Cam Clay* Model describes very accurately the behavior of Postpampeano clays, on both a shear dominant stress path and a compression dominant stress path. These results were taken as a starting point to make a back analysis of an actual construction of a container terminal on the margin of the Paraná River. A preload process was performed which was monitored and documented. The fittest parameters are presented and the scope and validity of the *Cam Clay* Model for the Postpampeano formation are discussed.

PALABRAS CLAVE: Postpampeano; *Cam Clay*; ecuaciones constitutivas; análisis inverso.

KEY WORDS: Postpampeano; *Cam Clay*; constitutive equations; back analysis

INTRODUCCIÓN

Dentro de los suelos de la formación PostPampeano se reconocen dos tipos de deposición: marítima y fluvial (Núñez 1986).

El primer caso se corresponde con arcillas de alta plasticidad, ubicadas en la parte inferior de la formación. Éstas poseen una granulometría muy fina y uniforme prácticamente sin partículas tamaño arena. Sobre estos suelos es apreciable la generación de una cierta estructuración por envejecimiento con el consecuente desarrollo de una presión de preconsolidación aparente.

La deposición fluvial se corresponde con las arcillas y limos arenosos superficiales. Este material tiene generalmente muy poca plasticidad. Se observa la presencia de cantidades variables de arenas finas y limos no plásticos, junto con fracciones arcillosas en el rango del 10% al 30%.

El objetivo del trabajo es calibrar el modelo constitutivo *Cam Clay* para ambos estratos característicos de la formación Postpameano.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se realizaron ensayos de consolidación unidimensional sobre muestras arcillosas de deposición marítima y limosas de deposición fluvial. Sobre una muestra arcillosa se realizó un ensayo triaxial de compresión drenada. Los parámetros de resistencia al corte de muestras limosas se tomaron de Sfriso (Sfriso 1997).

ENSAYOS EDMÉTRICOS

Se realizaron 4 ensayos edométricos de consolidación sobre muestras amasadas. En la Tabla 1 se detallan las características físicas de los suelos ensayados.

Ensayo	LL (%)	IP (%)	γ_s (kN/m ³)	Clasif.
1, 2	69	39	26.4	CH
3, 4	32	13	26.5	CL

Tabla 1: Clasificación

Para efectuar los ensayos de consolidación se utilizó un edómetro convencional a palancas de anillo fijo de 3" de diámetro. Se implementó un sistema de adquisición de datos automatizado en colaboración con M. Quintela (Quintela 2007).

En la Figura 1 se representan los resultados de los ensayos realizados sobre las muestras de arcilla de alta plasticidad. Puede observarse un comportamiento lineal entre el logaritmo de las presiones y el volumen específico, que se corresponde con lo predicho por el modelo *Cam Clay*.

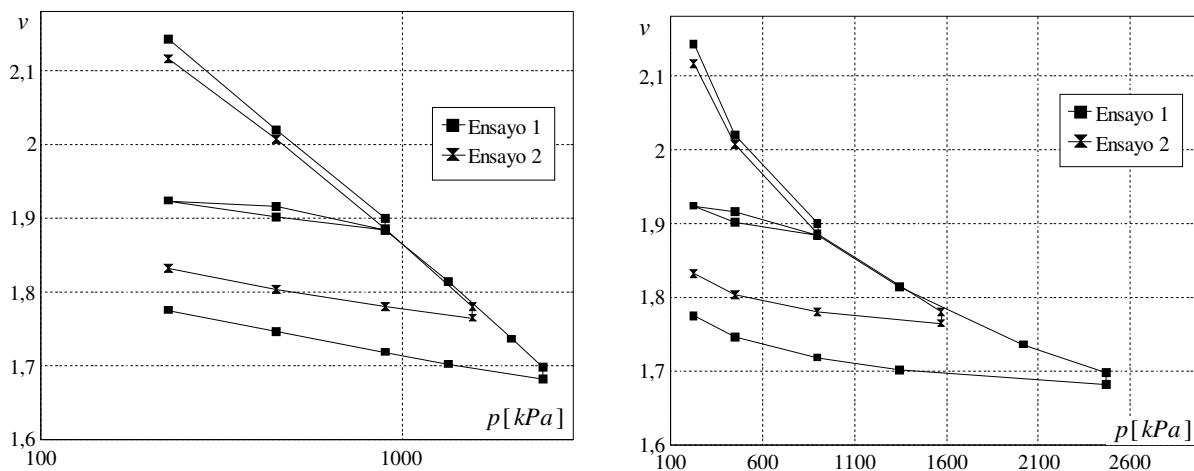


Fig. 1: Ensayos edométricos sobre arcilla.

De acuerdo al modelo *Cam Clay* el volumen específico de un suelo sometido a una presión efectiva p , resulta

$$v = N - \lambda \ln(p_o / p_{ref}) + \kappa \ln(p_o / p) \quad (1)$$

A su vez, la relación entre la presión efectiva p y la presión de preconsolidación p_o depende de la trayectoria de tensiones (definida por $\eta = q/p$) y del parámetro resistente M

$$\frac{p}{p_0} = \frac{M^2}{M^2 + \eta^2} \quad (2)$$

Para un ensayo de consolidación unidimensional, la curva de compresión normal queda definida en función de la presión vertical efectiva p_v por

$$v = \Gamma_{edo} - \lambda \ln\left(\frac{p_v}{p_{vref}}\right) \quad (3)$$

Para las ramas de carga-descarga elástica puede escribirse

$$v = v_\kappa - \kappa \ln\left(\frac{p_v}{p_{vref}}\right) \quad (4)$$

Los parámetros de mejor ajuste para los suelos arcillosos resultan ser $\lambda=0.18$; $\kappa=0.035$; $\Gamma_{edo}=3.11$. Si bien el *Cam Clay* no tiene en cuenta el comportamiento viscoplástico del suelo, se cuantifica este fenómeno mediante el índice de compresión secundaria. El valor promedio que surge de los ensayos es de $C_\alpha=0.013$. Debido a este fenómeno de consolidación secundaria, en la Figura 2 se observa una disminución de volumen específico a presión vertical constante antes del escalón de descarga. Se determinó la permeabilidad de las muestras de arcilla para cada escalón de carga. Se obtuvo un valor promedio de permeabilidad $k = 5.0 \cdot 10^{-10} \text{ m/seg}$ con una variación entre $1.0 \cdot 10^{-11} \text{ m/seg}$, $1.0 \cdot 10^{-9} \text{ m/seg}$.

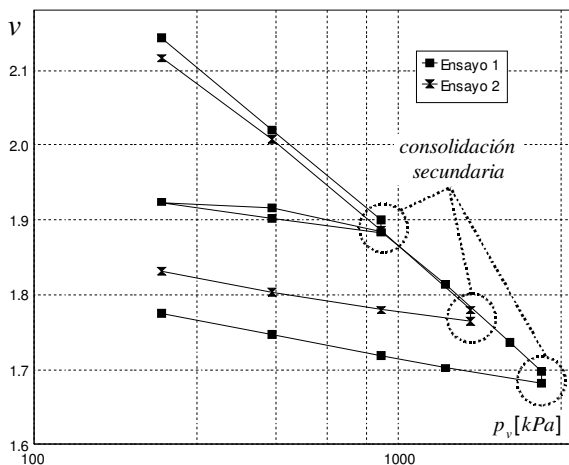


Fig 2: Efecto de la consolidación secundaria.

Para los suelos limosos, los parámetros de mejor ajuste fueron $\lambda=0.08$; $\kappa=0.015$; $\Gamma_{edo}=2.20$; $C_\alpha=0.009$. Se determinó la permeabilidad de las muestras de limo para cada escalón de carga. Se obtuvo un valor promedio de permeabilidad $k = 2.0 \cdot 10^{-8} \text{ m/seg}$ con una variación entre $2.0 \cdot 10^{-9} \text{ m/seg}$, $4.0 \cdot 10^{-8} \text{ m/seg}$. En la Figura 3 se representan los resultados de los ensayos realizados sobre las muestras limosas.

Puede observarse que las arcillas tuvieron el comportamiento típico de los materiales cohesivos que, al menos para el caso de la consolidación primaria, puede ser reproducido por el modelo *Cam Clay* con razonable precisión. Por el otro lado, las muestras de muy baja plasticidad tuvieron un comportamiento fuertemente no lineal aún en el gráfico semilogarítmico de la figura 3, comportamiento que no puede ser reproducido por el modelo *Cam Clay*. Esto significa que el comportamiento de estos suelos en trayectorias de consolidación dominante no puede ser simulado con precisión con éste modelo. De cualquier manera, los suelos limosos son significativamente menos compresibles que las arcillas plásticas subyacentes en la mayoría de los casos en los que se estudia el problema de asentamientos por consolidación, por lo que el empleo del modelo constitutivo *Cam Clay* para estos suelos introduce un error tolerable en la mayoría de las aplicaciones prácticas.

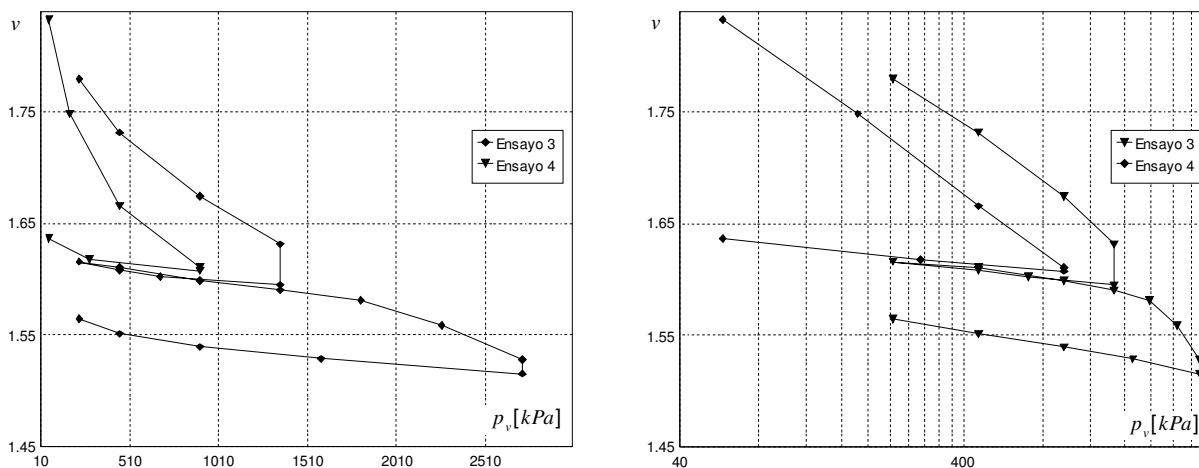


Fig 3: Ensayos edométricos sobre muestras de arcilla limosa.

PARÁMETROS DE RESISTENCIA

Se llevó a cabo un ensayo triaxial de compresión drenado a presión constante sobre una muestra arcillosa con límite líquido $LL=69$ en la que se midió un ángulo de fricción interna crítico $\phi_c=29.5^\circ$ para una deformación axial específica $\varepsilon_a=23.0\%$ y una deformación volumétrica específica $\varepsilon_v=4.4\%$. Este es un valor más alto que los esperables para este tipo de suelos. Como referencia, para los suelos limosos de deposición fluvial, el ángulo de fricción interna está comprendido entre $25^\circ-30^\circ$, (Sfriso 1997).

De acuerdo al modelo constitutivo *Cam Clay* el parámetro M puede determinarse para una trayectoria de compresión dominante como

$$M = \frac{6 \sin(\phi)}{3 - \sin(\phi)} \quad (5)$$

De esta forma resulta, para la muestra arcillosa ensayada, $M=1.18$. De acuerdo con los valores publicados para el ángulo de fricción interna crítica de suelos fluviales (Sfriso 1997), M varía entre $0.98-1.2$.

CALIBRACIÓN NUMÉRICA

Se calibraron los parámetros del modelo constitutivo *Soft soil creep model* disponible en Plaxis (Vermeer 1998) para ajustar los ensayos de consolidación realizados. Estos parámetros se indican en la Tabla 2

Ensayo	Clasif.	γ_{sat} [kN/m ³]	K [m/seg]	C_c	C_s	C_α	e_{ini}	H_{ini} [mm]	c [kPa]	Φ [°]	ψ [°]
1	CH	16.9	6 E-10	0.41	0.08	0.013	1.37	12.95	1	29.5	0
3	CL	19.1	6 E-7	0.18	0.03	0.008	0.82	12.70	1	25.0	0

Tabla 2: Datos de entrada para el *Soft Soil Creep model*.

En las Figuras 4 y 5 se representan los resultados de los ensayos experimentales y su simulación mediante elementos finitos. En ambas figuras se grafica la relación de vacíos al final de cada escalón de carga, incluyendo la consolidación secundaria, en función de la relación de la presión vertical efectiva en escala logarítmica.

Puede observarse que los resultados tienen un mejor ajuste en el caso de la muestra arcillosa y un ajuste no tan bueno en el caso de la muestra limosa, como debe esperarse por el hecho de que el modelo *Cam Clay* predice una curva $v-\ln(p)$ lineal mientras que el ensayo experimental es no lineal. En particular, se observa que en el caso de la muestra limosa, la modelación numérica predice un asentamiento en el primer escalón de carga más grande que el medido en el ensayo experimental.

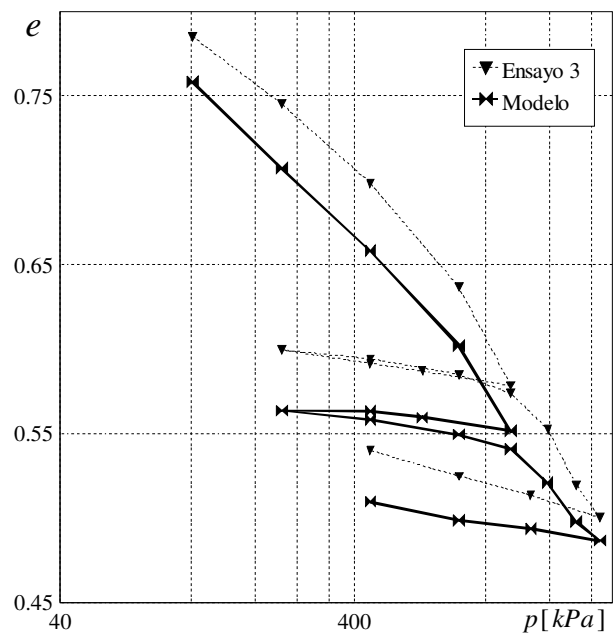
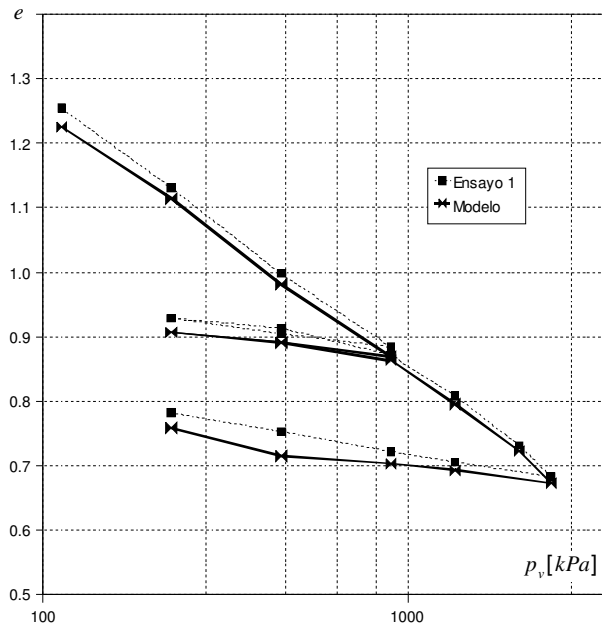


Fig 4: Ensayos edométricos sobre muestra arcillosa **Fig 5:** Ensayos edométricos sobre muestra limosa

Si se corrige el asentamiento inicial del primer escalón de carga para la muestra limosa se obtiene el gráfico que muestra la Figura 6,

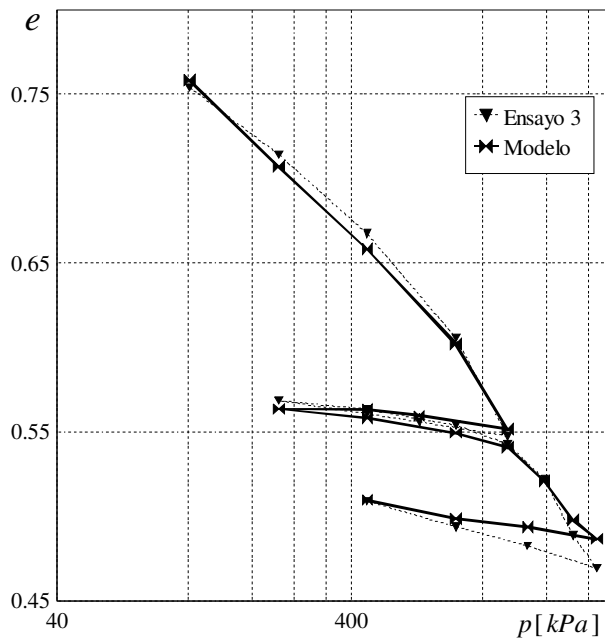


Fig.6: Ensayos edométricos sobre muestras limosas, corregidos por primer escalón de carga

Los parámetros de entrada definidos en la Tabla 2 fueron elegidos a partir del ajuste de las curvas de relación de vacíos en función del tiempo para cada escalón de carga. En las Figuras 7 y 8 se representan los resultados de dos de estas curvas obtenidas para las muestras arcillosas en escala logarítmica de tiempo. En un caso se trata de un escalón de carga sobre la línea de compresión normal (LCN), en el otro el escalón está sobre una curva de carga-descarga. Puede observarse que el ajuste del modelo no es muy bueno para la descarga. Esto es debido a que el modelo *Cam Clay* predice una descarga elástica, mientras que los resultados experimentales incluyen una componente significativa de expansión por hinchamiento. Es importante tener en cuenta este fenómeno cuando se interpretan resultados

experimentales, máxime teniendo en cuenta que en el modelo *Cam Clay* el parámetro κ se emplea para calcular el módulo de Young.

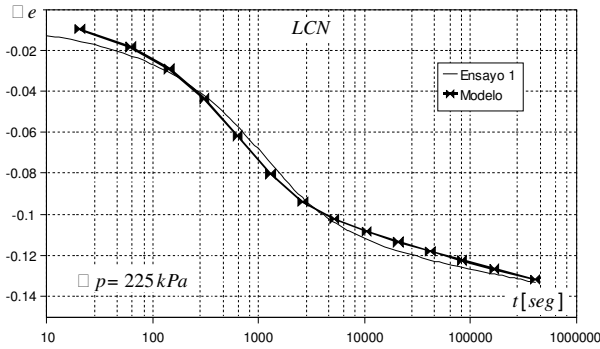


Fig. 7: Escalón sobre LCN. Muestra arcillosa

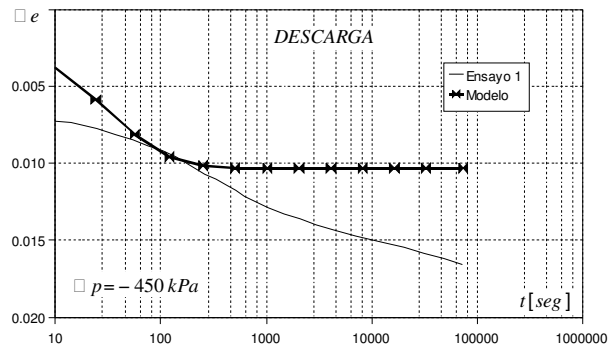


Fig. 8: Escalón de descarga. Muestra arcillosa

ANÁLISIS INVERSO

Se tomaron como punto de partida los resultados de los ensayos realizados y sus parámetros de ajuste numérico para reproducir el caso real de construcción de una terminal de contenedores emplazada sobre la margen del río Paraná, en la cuál se realizó un proceso de precarga que fue monitoreado y documentado (Larrague y Sfriso 2001, Sfriso y Larrague 2003).

La terminal Zárate está a 90 km al Norte de Buenos Aires, sobre el margen del Río Paraná. El lugar de emplazamiento de la terminal está sobre un estrato de 24 m de espesor de suelos del Postpampeano. Durante la segunda etapa de su construcción, en el año 1998, fue necesaria la planificación de un proceso de precarga para una superficie de 80000 m² ubicada a lo largo de 400 m sobre la orilla del río. Se esperaba una carga máxima en servicio de 70 kPa.

En la primera etapa se colocó un refulado 3.20 m a 3.60 m de espesor. Éste representó una carga aproximada de 60 kPa que fue puesta en el sitio en un período de aproximadamente 3 meses. Luego se dejó transcurrir un período de 5 meses sin adicionar carga.

En la segunda etapa del proceso se colocó suelo compactado en un espesor entre 3.40 m a 3.60 m en el transcurso de otros 3 meses. De esta forma, se llegó un valor de precarga total de unos 123 kPa. Debido a que esta carga permaneció en su sitio más tiempo del que originalmente se había planeado, el suelo prácticamente alcanzó la consolidación primaria para la carga de 123 kPa.

El Postpampeano presenta, en el sitio, un primer estrato de suelos limosos de 11 m de espesor seguido por un estrato de arcillas de alta plasticidad de 13 m de espesor que descansa directamente sobre las arenas de la formación Puelchense. En la Tabla 3 se resumen las características físicas y mecánicas de varias muestras obtenidas en los distintos estratos, que luego fueron sometidas a ensayos de consolidación.

Clasif.	C _c	γ_{sat} [kN/m ³]	k [cm/seg]	e	ω [%]	Cota [m]	P _s /P _v
SM	0.21	17.9	3.36e-5	1.1	41	56	1.2
ML	0.15	18.8	5.35e-6	0.89	34	7.5	1.36
SM	0.20	17.9	3.25E-5	1.09	41	9.7	1.07
CH	0.52	15.5	2.06E-7	2.1	78	14.4	1.32
CH	0.63	15.8	1.21E-7	1.92	71	17.7	1.42
CH	0.39	16.5	9.2E-8	1.6	60	19.6	1.33

Tabla 3: Caracterización de los diferentes estratos

En la tabla, ω es la humedad natural; γ_{sat} es el peso unitario saturado y p_s/p_v es grado de preconsolidación. De acuerdo a los ensayos de consolidación, existe cierto grado de estructuración por envejecimiento con una consecuente presión de preconsolidación aparente.

Una vez que el relleno hidráulico fue lo suficientemente resistente como para que se pudiera transitar por su superficie, se colocaron tres piezómetros sobre el estrato de arcillas de alta plasticidad y se dispusieron tres indicadores de asentamiento en cada uno de los dos estratos. Para ese momento ya había ocurrido un

asentamiento que fue estimado en 50 cm. En la figura 9 se grafican los resultados de las mediciones de cada uno de los instrumentos.

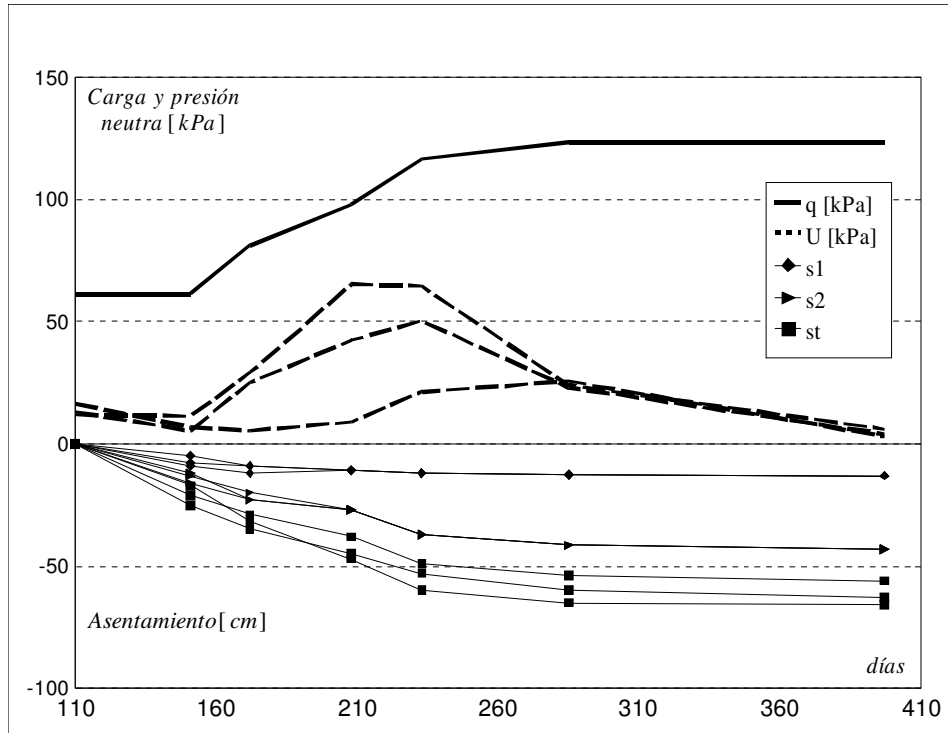


Fig. 9: Resultados de las mediciones ;Larrague, J. y A. Sfriso, 2001

En la figura, U es la presión neutra, q es la sobrecarga total actuante, s_l es el asentamiento del estrato limoso, s_2 es el asentamiento del estrato de arcilla, y s_t es el asentamiento total medido en la superficie. Para la modelación en Plaxis se adoptó el esquema que se muestra en la figura 10.

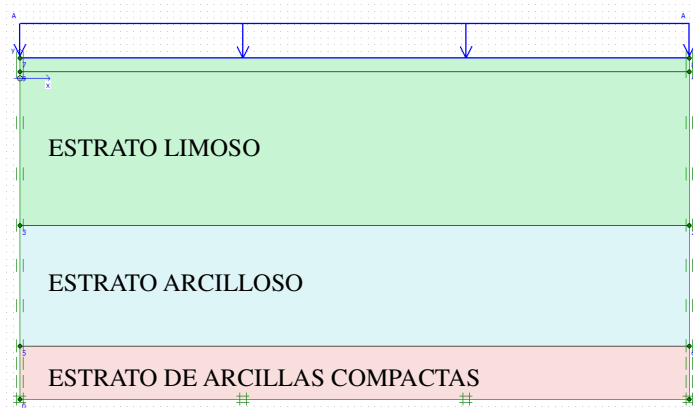


Fig. 10: Esquema de Plaxis; *Soft Soil Creep Model*

Los parámetros adoptados para la reproducción numérica se detallan en la Tabla 4.

Estrato	C_c	γ_{sat} [kN/m ³]	k [cm/seg]	e	C_s [%]	C_a [m]	ϕ °	OCR
Limoso	0.10	18.0	5.8 E-7	1.0	0.01	0.0010	25.0	1.5
Arcilloso	0.41	16.0	5.8 E-8	1.8	0.08	0.0013	29.5	1.0
Arcillas compactas	0.41	16.0	1.2 E-8	1.65	0.08	0.0013	29.5	1.0

Tabla 4: Caracterización de los diferentes estratos

No pudo determinarse un set de parámetros que produjesen un correcto ajuste de las curvas de asentamiento y de presiones neutras al mismo tiempo. Dado que es de esperar un mayor error en la

medición de las presiones neutras en el campo, se optó por ajustar las curvas de asentamiento de la mejor manera posible. Para lograr esto debieron corregirse los valores de permeabilidad con respecto a los empleados al realizar la modelación numérica de los ensayos edométricos. Los altos valores de permeabilidad adoptados sugen como consecuencia de la presencia de lentes permeables distribuidas erráticamente en el estrato (Sfriso 1997). El coeficiente de compresibilidad C_c y el coeficiente de consolidación secundaria C_a definidos para el estrato limoso debieron modificarse respecto de los valores estimados mediante los ensayos de consolidación. También fue necesario el empleo de un $OCR=1.5$ para el caso de los suelos limosos. Si bien la estructuración que presentan los estratos de arcillas de alta plasticidad genera una presión de preconsolidación medida en los ensayos de consolidación realizados sobre muestras inalteradas del orden de $OCR=1.3$ para la modelación numérica se consideró la muestra como normalmente consolidada. Esto se explica debido a que los valores del índice de compresión medidos en los ensayos edométricos son un 50% mayores a su valor residual. (Sfriso 1997).

Los resultados de la calibración de grafican en la figura 11 Dado que no se tienen datos precisos de los asentamientos ocurridos en la primera etapa, estos se estiman mediante el ajuste entre las curvas de los asentamientos medidos y los calculados numéricamente. El asentamiento total previo al registro de las mediciones, determinado de esta manera es de $s_t=27\text{cm}$, en lugar de los 50 cm estimados.

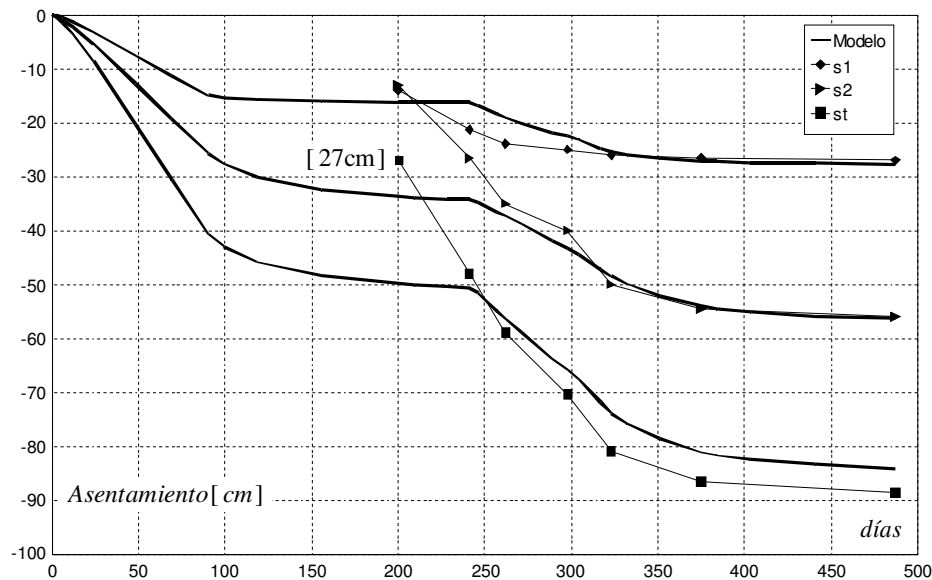


Fig. 11: Asentamientos promedio medidos y modelación numérica

En la Figura 12 se representan los valores medidos de presión neutra U junto con los valores numéricos obtenidos para los parámetros de la Tabla 4.

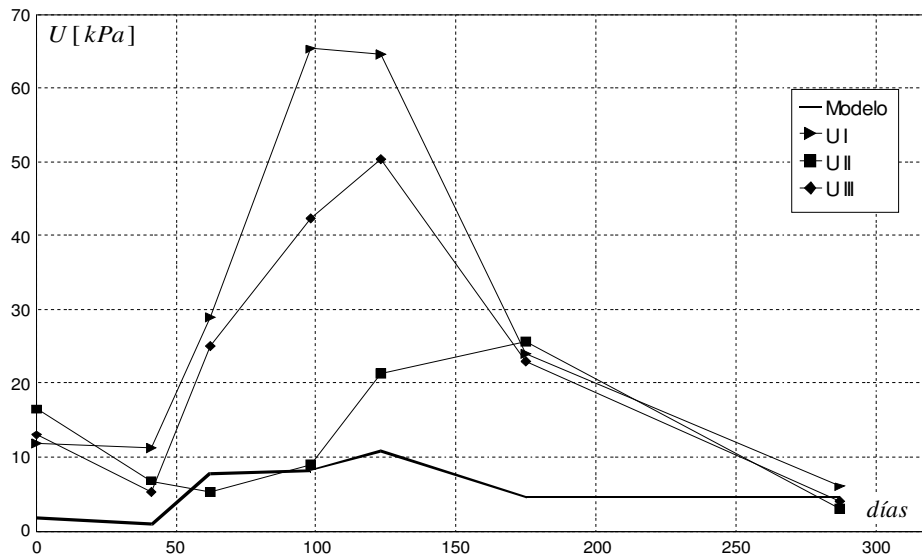


Fig. 12: Presión neutra

CONCLUSIONES

El comportamiento mecánico de las arcillas de deposición marítima del Postpampeano puede ser reproducido con suficiente precisión mediante el modelo *Cam Clay* si se adiciona la componente viscoplástica de deformación. Si bien no puede conseguirse un ajuste de una precisión semejante para el caso de los suelos de carácter limoso, los resultados obtenidos son válidos desde el punto de vista ingenieril ya que los asentamientos producidos por la consolidación de estos suelos son de menor orden de magnitud que los que corresponden a las arcillas.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

LARRAGUE, J. y SFRISO, A. 2001. Ground improvement in Zárate. Foundations and Ground Improvement, ASCE. pp. 514-523.

NUÑEZ, E. 1986. Geotechnical conditions in Buenos Aires City. V Intern. Congress IAEG, IV, 2623-2630

QUINTELA, M., 2008. Rigidez edométrica de la formación Pampeano. Tesis de grado, LMS, FIUBA.

SFRISO, A., 1997. Formación Postpampeano: predicción de su comportamiento mecánico. III CLIGJ., Caracas, Venezuela, 1-10

SFRISO, A. y LARRAGUE, J. 2003. Slope failure at the Paraná shoreline, Argentina. Soil & Rock America. XII PCSMGE Vol I, pp. 204-210.