

# Influencia de la plasticidad y la sobrecarga aplicada en los parámetros de consolidación de unos depósitos costeros del Sur de Veracruz

Jose L. GALLEGOS<sup>a</sup>, Daniel MARTÍN<sup>a,1</sup>, Ignacio CARAZO<sup>a</sup> y  
Francisco MARTÍNEZ<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ingeniería, Consultoría y Asistencia en la Construcción VORSEVI MEXICO,  
S.A. de C.V.

**Resumen.** En materiales saturados de naturaleza arcillosa, el conocimiento de los parámetros de consolidación es un aspecto fundamental para la evaluación de la magnitud y evolución temporal de los asentos previsibles bajo la aplicación de una carga determinada. El ensayo edométrico permite determinar los parámetros de consolidación primaria y secundaria de forma directa, pero es evidente que el comportamiento esfuerzo-deformación unidimensional de los materiales arcillosos saturados está vinculado a otras propiedades índice. Así, en la bibliografía clásica se proponen correlaciones que vinculan el índice de compresión, el coeficiente de consolidación o el coeficiente de consolidación secundaria con el límite líquido, el contenido en humedad y/o la relación de vacíos (Helenelund, 1951; Lambe & Whitman, 1969; US Navy, 1988). Como un aporte al conocimiento geotécnico de los depósitos costeros recientes de la zona sur de Veracruz, y partiendo de ensayos edométricos, de estado y de caracterización realizados sobre dichos materiales sedimentarios, se realiza el análisis del comportamiento esfuerzo-deformación unidimensional y su relación con parámetros índice como el límite líquido y la humedad. Así mismo se realiza un análisis de los coeficientes de consolidación primaria y secundaria en relación con el valor de la sobrecarga aplicada, partiendo de los resultados tiempo-deformación de los escalones de ensayos edométricos sostenidos durante periodos de 192 horas, que permiten la estimación de los parámetros de consolidación secundaria.

**Palabras clave:** Edómetro, consolidación.

## 1. Introducción

En el presente estudio se analizan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados sobre un total de 33 muestras inalteradas obtenidas a una profundidad de entre 5 y 25 m en un total de 12 sondeos.

Se trata de materiales correspondientes a depósitos costeros en una zona de unas 200 Ha. al Sur del estado de Veracruz sobre las que se han realizado ensayos edométricos

---

<sup>1</sup> Autor de Correspondencia, Vorsevi México SA de CV, Bahía Magdalena #26, Col. Veronica Anzures, Del. Miguel Hidalgo, Ciudad de México, México; E-mail: danielmartin@vorsevi.mx



con duraciones de hasta 192 horas por cada escalón de carga, lo que permite una mejor delimitación de los tramos de consolidación primaria y consolidación secundaria.

Partiendo de los diferentes parámetros de consolidación obtenidos, se analiza el ajuste con diferentes correlaciones existentes en la bibliografía.

## 2. Materiales analizados y ensayos disponibles

Los depósitos cuaternarios de las zonas costeras del Sur de Veracruz tienen origen principalmente aluvial, palustre y lacustre. Se ha estudiado una población total de 33 muestras inalteradas obtenidas mediante muestreador Shelby. Sobre éstas se han realizado ensayos de consolidación con siete escalones de carga, de hasta 800 kPa. Los tiempos de consolidación, por cada escalón de carga, fueron de hasta 192 horas. Estos ensayos se complementan con otros ensayos de estado, identificación y resistencia.

Los materiales se identifican principalmente como limos (ML y MH) y arcillas de plasticidad media (CL) con contenidos variables de arena, tratándose en algunos casos de arenas arcillosas (SC) y arenas limosas (SM). En el promedio de las muestras consideradas, el contenido de finos es del 73% y el contenido de arenas del 27%.

Tabla 1. Ensayos realizados

Ensayo	Número
Contenido de humedad	33
Límite líquido	33
Límite plástico	33
Granulometría por tamizado	33
Peso volumétrico natural	33
Densidad de las partículas	33
Compresión simple	26
Compresión triaxial	31
Consolidación unidimensional en edómetro	33

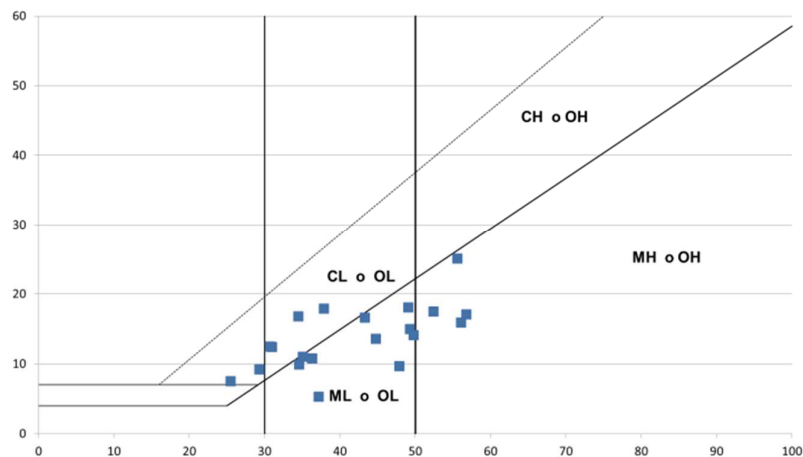


Figura 1. Representación de las muestras con plasticidad en el ábaco de Casagrande.

### 3. Resumen de ensayos de consolidación realizados

#### 3.1. Metodología

En los ensayos de consolidación en edómetro se realizaron siete escalones de carga con presiones de 10, 25, 50, 100, 200, 400 y 800 kPa y dos escalones de descarga con presiones de 400 y 10 kPa. Estos escalones tuvieron una duración de 24 a 192 horas.

A partir de la curva edométrica (relación de vacíos - presión) de cada ensayo realizado, se obtuvieron la presión de preconsolidación ( $P_c$ ), índice de compresión ( $C_c$ ) e índice de hinchamiento ( $C_s$ ).

Para la determinación del coeficiente de consolidación ( $C_v$ ) se ha empleado el método de Taylor, representando las curvas de consolidación, para cada escalón de carga, con escala de  $\sqrt{t}$ . El coeficiente de consolidación secundaria,  $C_a$  se ha calculado como la variación de la relación de vacíos respecto al logaritmo del tiempo, obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla 2.** Resultados de ensayos de consolidación

ID	$P_c$ (kPa)	$C_c$	$C_s$	10 kPa		25 kPa		50 kPa		100 kPa		200 kPa		400 kPa		800 kPa	
				$C_v$	$C_a$	$C_v$	$C_a$	$C_v$	$C_a$	$C_v$	$C_a$	$C_v$	$C_a$	$C_v$	$C_a$	$C_v$	$C_a$
01	62.1	0.183	0.035	8.9E-05	4.4E-03	3.9E-05	2.7E-03	2.2E-04	4.8E-03	2.4E-04	5.2E-03	7.9E-05	8.5E-03	4.5E-04	4.5E-03	4.6E-04	4.5E-03
02	100.7	0.947	0.187	8.7E-05	9.7E-03	1.7E-04	1.4E-02	4.4E-04	3.9E-02	8.6E-05	3.4E-02	2.9E-04	3.3E-02	3.2E-04	3.3E-02	3.1E-04	2.3E-02
03	115.2	0.089	0.014	5.5E-05	4.7E-03	2.7E-05	3.4E-03	3.0E-04	2.0E-03	1.3E-04	3.1E-03	5.2E-04	2.4E-03	4.1E-04	1.4E-03	9.4E-04	1.8E-03
04	95.0	0.449	0.093	8.8E-05	1.7E-03	2.8E-04	1.8E-03	1.7E-04	4.8E-03	1.3E-04	4.8E-03	8.0E-05	1.1E-02	3.5E-04	1.6E-02	4.7E-04	1.6E-02
05	84.0	0.403	0.073	1.5E-04	4.0E-03	2.7E-04	4.8E-03	8.1E-05	3.5E-03	3.0E-04	7.1E-03	1.6E-04	1.0E-02	4.8E-04	1.6E-02	4.5E-04	1.2E-02
06	51.5	0.484	0.069	5.2E-04	5.0E-03	5.0E-04	1.1E-02	1.6E-04	1.2E-02	5.0E-04	1.6E-02	3.4E-04	2.3E-02	1.9E-03	1.4E-02	9.8E-04	1.8E-02
07	101.0	0.399	0.042	5.1E-04	4.4E-03	6.6E-05	5.7E-03	1.0E-03	3.9E-03	1.6E-04	1.3E-02	9.7E-04	1.5E-02	1.0E-03	1.3E-02	2.0E-03	1.2E-02
08	126.8	0.327	0.04	2.9E-04	3.4E-03	1.7E-04	9.2E-03	9.8E-04	4.3E-03	1.6E-04	7.5E-03	8.8E-04	9.7E-03	9.4E-04	1.2E-02	2.1E-03	1.1E-02
09	93.7	0.217	0.029	4.8E-04	3.2E-03	4.6E-04	2.8E-03	1.9E-03	1.9E-03	4.6E-04	3.9E-03	9.5E-04	4.0E-03	2.0E-03	3.3E-03	2.0E-03	4.1E-03
10	111.2	0.221	0.023	3.0E-04	4.1E-03	1.9E-03	6.2E-03	5.2E-03	1.3E-03	1.4E-04	4.7E-03	3.7E-04	5.3E-03	5.2E-03	5.5E-03	5.2E-03	6.6E-03
11	81.3	0.385	0.053	3.3E-04	8.2E-03	3.6E-04	1.7E-02	3.1E-04	4.3E-03	1.6E-04	1.3E-02	4.3E-04	1.2E-02	9.6E-04	1.1E-02	9.7E-04	1.3E-02
12	151.6	0.303	0.089	5.2E-04	1.1E-03	8.6E-04	1.3E-03	3.3E-04	1.8E-03	3.4E-04	3.2E-03	3.4E-04	3.4E-03	9.1E-04	6.2E-03	9.0E-04	9.0E-03
13	96.6	0.154	0.019	3.3E-04	3.3E-03	3.1E-05	3.7E-03	3.3E-04	9.0E-04	8.3E-05	3.7E-03	4.8E-04	3.7E-03	2.0E-03	6.1E-03	5.1E-04	4.5E-03
14	139.2	1.274	0.202	4.8E-04	7.1E-03	9.5E-04	7.9E-03	4.1E-05	1.6E-02	1.0E-03	2.6E-02	8.3E-05	6.5E-02	4.5E-04	8.8E-02	2.9E-04	7.3E-02
15	71.9	0.745	0.121	1.3E-04	2.8E-03	3.2E-04	3.4E-03	1.6E-04	2.5E-02	5.2E-04	1.8E-02	8.3E-05	4.6E-02	3.2E-04	3.4E-02	3.0E-04	2.9E-02
16	127.8	0.311	0.04	1.2E-04	5.0E-03	7.1E-05	8.2E-03	4.1E-04	1.1E-02	3.4E-05	1.6E-02	4.8E-04	6.5E-03	5.1E-04	1.0E-02	5.1E-04	8.0E-03
17	25.0	0.114	0.026	6.4E-05	8.1E-03	1.8E-05	6.8E-03	3.2E-04	5.3E-03	7.4E-05	2.5E-03	2.1E-03	1.6E-03	2.8E-04	1.4E-03	4.8E-04	2.8E-03
18	166.9	0.207	0.021	5.2E-04	8.7E-04	5.2E-03	1.1E-03	4.3E-04	1.2E-03	9.9E-04	3.6E-03	2.0E-03	1.2E-03	1.0E-03	2.6E-03	1.0E-03	1.4E-03
19	56.6	0.195	0.02	9.8E-04	1.7E-03	3.2E-04	5.9E-03	4.8E-04	2.5E-03	5.1E-04	3.2E-03	1.0E-03	1.3E-03	9.8E-04	1.9E-03	1.0E-03	2.6E-03
20	77.2	0.131	0.016	5.0E-04	1.4E-03	9.2E-05	3.2E-03	5.1E-04	1.2E-03	2.1E-03	1.7E-03	1.0E-03	8.6E-04	2.0E-03	3.4E-03	2.1E-03	1.6E-03
21	48.3	0.894	0.104	1.7E-04	1.5E-02	9.0E-04	1.7E-02	7.3E-05	5.8E-02	2.9E-04	5.8E-02	1.5E-04	7.3E-02	1.5E-04	5.5E-02	1.8E-04	5.4E-02
22	80.8	0.36	0.056	3.3E-04	3.9E-03	3.3E-04	1.2E-02	9.9E-04	7.1E-03	1.7E-04	1.1E-02	4.9E-04	9.8E-03	5.1E-04	1.0E-02	3.4E-04	9.4E-03
23	134.6	0.243	0.027	1.6E-04	3.0E-03	3.3E-04	9.2E-03	4.4E-04	3.2E-03	8.0E-05	8.5E-03	4.5E-04	5.6E-03	5.1E-04	7.1E-03	8.7E-04	7.9E-03
24	51.0	0.514	0.111	3.0E-04	5.5E-03	2.4E-04	2.7E-03	8.7E-06	8.6E-03	2.7E-04	1.4E-02	8.1E-05	8.7E-03	4.3E-04	2.0E-02	2.9E-04	2.5E-02
25	257.1	0.322	0.043	1.7E-04	2.1E-03	5.3E-04	3.3E-03	4.4E-04	3.3E-03	5.3E-05	4.8E-03	4.8E-04	6.1E-03	2.1E-03	9.1E-03	2.0E-03	9.1E-03
26	49.5	0.98	0.237	6.7E-05	2.1E-02	3.2E-05	2.7E-02	2.2E-04	2.3E-02	8.1E-05	3.6E-02	1.1E-04	4.1E-02	2.5E-04	2.3E-02	1.2E-04	4.5E-02
27	112.0	0.155	0.02	7.1E-06	6.8E-02	1.2E-03	7.4E-16	1.1E-03	3.4E-03	1.1E-03	4.7E-04	8.2E-06	1.2E-03	4.5E-04	7.7E-03	2.0E-03	3.9E-03
28	97.6	0.517	0.078	1.3E-04	1.1E-02	5.1E-04	6.0E-03	1.6E-04	1.3E-02	4.8E-04	1.1E-02	1.7E-04	1.9E-02	5.0E-04	2.5E-02	5.0E-04	2.0E-02
29	50.2	0.42	0.043	1.6E-04	5.5E-03	8.2E-05	8.2E-03	4.7E-04	1.2E-02	3.3E-04	1.8E-02	9.8E-04	2.3E-02	1.0E-03	1.6E-02	1.0E-03	1.3E-02
30	60.6	0.413	0.044	1.4E-04	2.0E-03	1.6E-04	6.4E-03	4.8E-04	6.4E-03	3.3E-04	8.8E-03	7.7E-04	1.5E-02	4.5E-04	1.3E-02	8.3E-04	1.1E-02
31	83.2	0.5	0.112	1.6E-04	2.1E-03	2.6E-04	3.9E-03	1.6E-04	7.7E-03	3.1E-04	9.6E-03	8.6E-05	1.3E-02	2.4E-04	1.0E-02	2.7E-04	7.3E-03
32	142.4	0.184	0.03	2.0E-04	5.0E-03	3.2E-04	1.7E-03	5.1E-04	4.8E-03	3.3E-04	7.0E-03	5.2E-04	4.6E-03	1.0E-03	4.3E-03	9.9E-04	4.3E-03
33	117.4	0.406	0.064	3.3E-04	5.5E-03	3.4E-04	9.0E-03	4.8E-04	7.6E-03	3.4E-04	2.2E-02	5.0E-04	1.2E-02	2.0E-03	1.0E-02	2.0E-03	7.8E-03

### 4. Análisis de los parámetros del ensayo de consolidación

#### 4.1. Presión de preconsolidación

Considerando la presencia del nivel freático entre los 3 y los 5 m de profundidad y la densidad natural media de todas las muestras analizadas ( $16,70 \text{ kN/m}^3$ ), se puede indicar



que, en general, las muestras estudiadas pertenecen a materiales normalmente consolidados considerando como tales aquellos en los que la presión de preconsolidación es inferior a 1,5 veces el esfuerzo efectivo existente en el terreno.

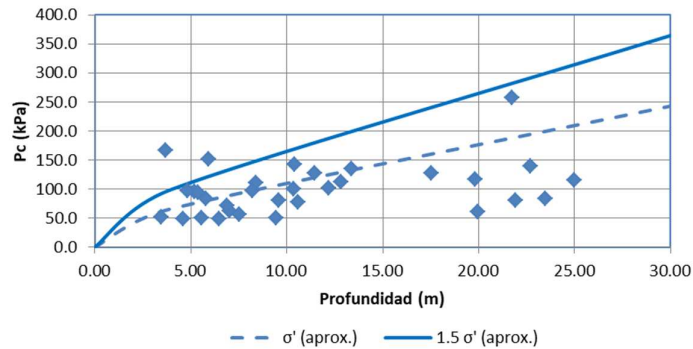


Figura 2. Presión de preconsolidación vs profundidad

#### 4.2. Relación $C_c/C_s$

De forma general, se admite una relación entre el valor del índice de compresión y el índice de hinchamiento de entre 1/4 y 1/10. En el caso de los materiales analizados, se verifica esta relación, obteniéndose el mejor ajuste para la relación  $C_s = C_c / 5.6$

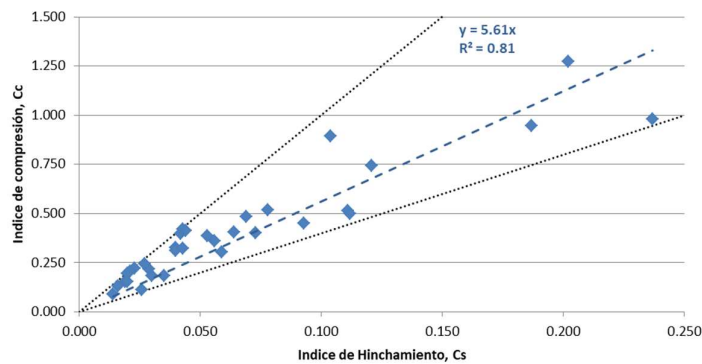
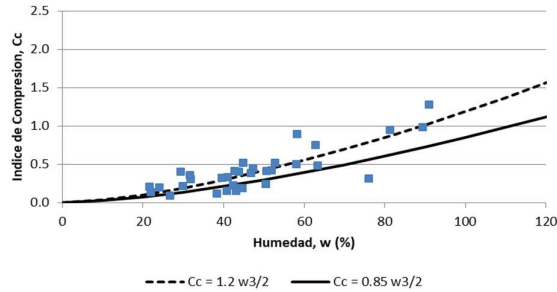


Figura 3. Relación  $C_c / C_s$

#### 4.3. Relación humedad natural - $C_c$

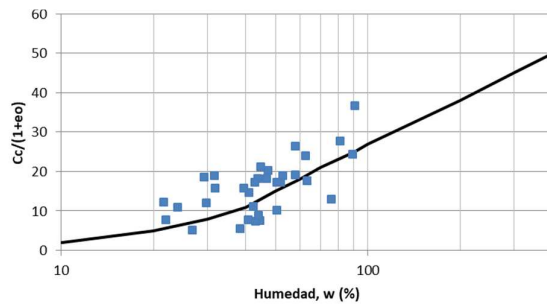
Según Helenelund (1951) el valor del índice de compresión de un material se puede estimar a partir de la humedad natural según la correlación  $C_c = 0.85 w^{3/2}$

Considerando los resultados obtenidos en los ensayos disponibles, se obtiene un ajuste razonable considerando la corrección del factor 0.85 en la expresión, por 1.2:  $C_c = 1.2 w^{3/2}$



**Figura 4.** Relación índice de compresión vs humedad propuesta por Henelelund (1951) ajustada

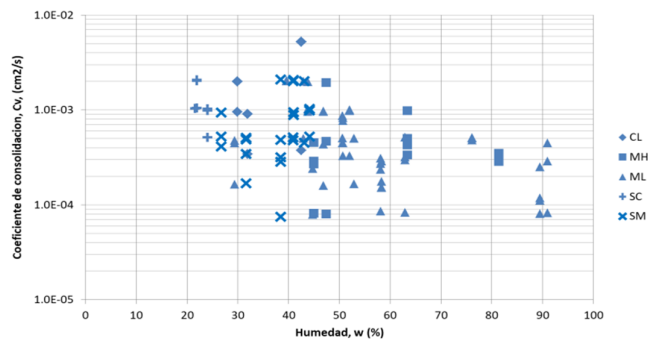
Otra propuesta de relación entre el índice de compresión y la humedad natural es la realizada por Lambe & Whitman en 1969:



**Figura 5.** Relación  $C_c / 1+e_0$  vs humedad propuesta por Lambe & Whitman (1969)

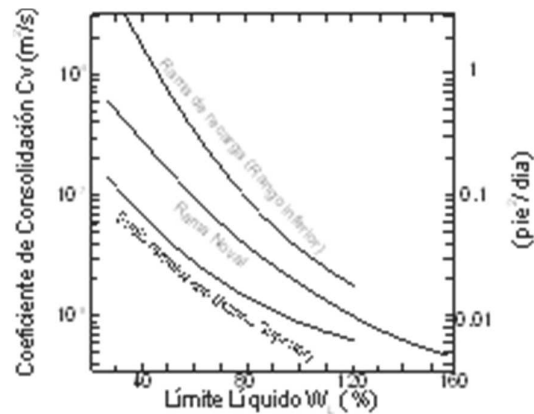
#### 4.4. Análisis de los valores del coeficiente de consolidación, $C_v$

En la siguiente figura se representan los valores de  $C_v$  obtenidos para los escalones de presión de la rama de consolidación noval de la curva edométrica. Si bien no se aprecia ninguna correlación, se pueden apreciar gráficamente los rangos de resultados clasificados según la clasificación SUCS.



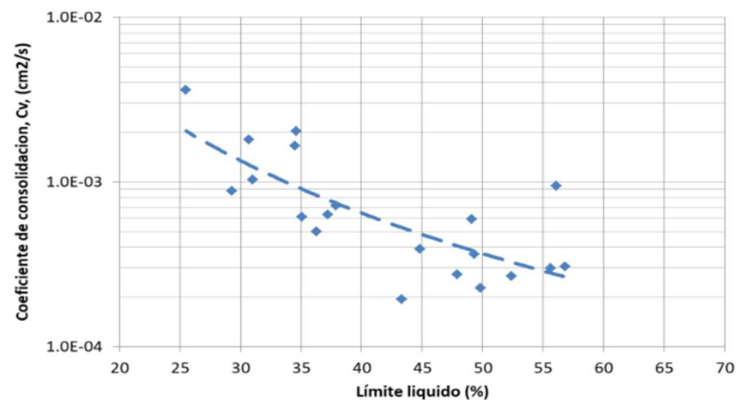
**Figura 6.** Representación gráfica  $C_v$  frente a  $w$  de las muestras analizadas

El *Design Manual 7.01* de *Naval Facilities Engineering Command* [3] propone la siguiente correlación aproximada del límite líquido y el coeficiente de consolidación:



**Figura 7.** Correlación aproximada  $C_v$  – límite líquido. Fuente: Traducido de NAVFAC D.M. 7.01 (1986) [3]

Esta propuesta, establecida para arcillas de Estados Unidos, no se verifica para arcillas inalteradas españolas según Jimenez Salas [1]. En nuestro caso tampoco se aprecia ajuste, aunque sí se aprecia tendencia a que los valores de  $C_v$  disminuyan al aumentar el límite líquido del material.



**Figura 8.** Representación resultados  $C_v$  (rama de consolidación noval) – límite líquido.

#### 4.5. Análisis de los valores del coeficiente de consolidación secundaria, $C_a$

El mismo manual de diseño de NAVFAC [3] indicado anteriormente incluye también una propuesta de correlación aproximado entre el coeficiente de consolidación secundaria y la humedad natural del material.

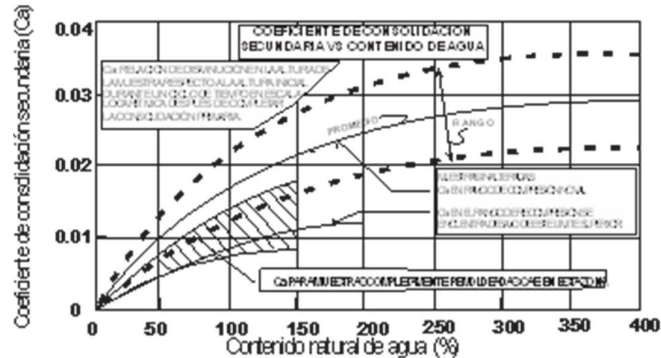


Figura 9. Correlación aproximada  $C_a$  – humedad. Fuente: Traducido de NAVFAC D.M. 7.01 (1986)

Sin embargo, con nuestros resultados no se aprecia una clara correlación con la humedad ni con el límite líquido.

Por otro lado, en la bibliografía también se propone la correlación entre el valor de  $C_a$  y el valor de  $C_c$ . Kulhawy & Maine, indican que la relación entre  $C_a$  y  $C_c$  es un valor relativamente constante para un suelo determinado [2].

En el caso particular de los materiales en estudio, dada su naturaleza relativamente variable se puede comprobar que la relación  $C_a/C_c$  es variable. En el siguiente gráfico se representan los valores  $C_a/C_c$  frente al límite líquido del material. Para ello se ha considerado  $C_a$  como la media de los valores de  $C_a$  de cada muestra para los escalones de presión por encima de la presión de preconsolidación. En el mismo se pueden acotar valores de la relación  $C_a/C_c$  obtenida según la tipología del material en base a su clasificación SUCS.

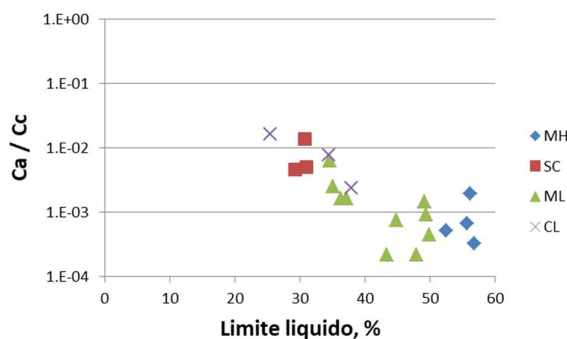


Figura 10. Relación  $C_a/C_c$  frente al límite líquido para las diferentes muestras analizadas

#### 4.6. Análisis de las deformaciones registradas en el ensayo edométrico

Se ha realizado un análisis independiente de las deformaciones instantáneas, de consolidación y de consolidación secundaria registradas en los ensayos edométricos. En la siguiente figura se representa la evolución del módulo edométrico con el incremento



del esfuerzo en la rama de consolidación noval de las muestras ensayadas agrupadas por su clasificación SUCS.

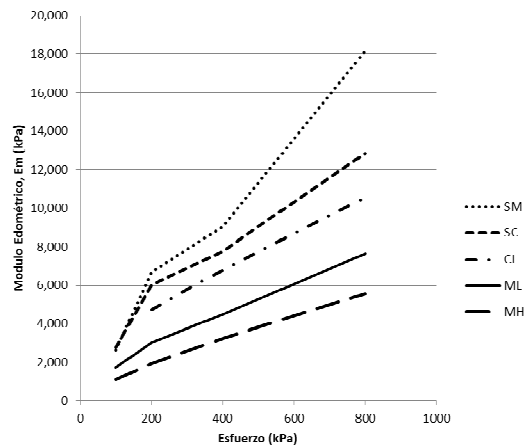


Figura 11. Evolución de los módulos edométricos en función de la carga aplicada

Finalmente, otro aspecto de interés es la proporción que supone la deformación por asentamiento secundario en el total de las deformaciones del material. En los ensayos considerados los asentamientos por consolidación secundaria oscilan en términos generales entre un 10 y un 20 % de la deformación total. Se puede apreciar cierta tendencia a una mayor proporción de asentamientos por consolidación secundaria cuanto mayor es la humedad natural del material.

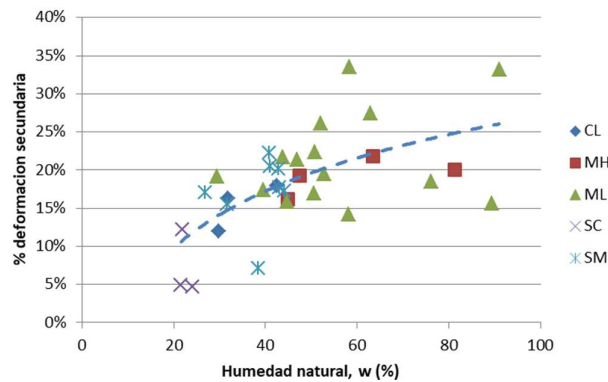


Figura 12. Proporción que supone la deformación secundaria frente a la humedad natural del material

## 5. Conclusiones

Tras el análisis realizado, se puede indicar que los depósitos estudiados están constituidos por materiales de naturaleza variable, con presencia predominante de limos



de plasticidad media y existencia en proporciones variables de arenas y arcillas. De forma general, los materiales están normalmente consolidados.

Analizando la correspondencia de los parámetros de consolidación obtenidos en laboratorio con algunas correlaciones existentes en la bibliografía técnica, se aprecia que, para los materiales estudiados:

- El valor del coeficiente de consolidación del ensayo edométrico  $C_c$ , es del orden de 5.6 veces el del coeficiente de hinchamiento  $C_s$ .
- Se aprecia un buen ajuste de la correlación entre  $C_c$  y humedad de Helenelund (1951), considerando un valor para el coeficiente de 1.20 en lugar de 0.85. Asimismo, los resultados son coherentes con la correlación entre  $C_c/1+e_0$  y humedad de Lambe & Whitman (1969).
- Los resultados no cumplen la correlación entre el coeficiente de consolidación,  $C_v$  y el límite líquido de NAVFAC D.M. 7.01 (1986), aunque sí se corrobora la tendencia general de que el valor de  $C_v$  es menor cuanto mayor es el límite líquido.
- Tampoco se verifica, en las muestras estudiadas, la correlación propuesta en NAVFAC D.M. 7.01 entre el coeficiente de consolidación secundaria  $C_a$  y la humedad.
- El valor de la relación  $C_a/C_c$  es similar para materiales con igual clasificación USCS, siendo en general menor cuanto mayor es la plasticidad.
- El valor de las deformaciones de consolidación secundaria es, para las muestras consideradas, en entre el 10 y el 20 % del total de deformaciones, siendo esta proporción mayor cuanto mayor es la humedad natural del material.

Finalmente hay que indicar que las muestras consideradas se corresponden a unas zonas concretas del sur de Veracruz, con lo que las consideraciones y conclusiones expuestas, se deben considerar una aportación al conocimiento de estos depósitos y aunque puedan considerarse para una primera aproximación a los valores de los parámetros de consolidación, se requiere la realización de ensayos para una determinación fiable de estos parámetros en cada caso.

## Bibliografía

- [1] Jimenez Salas & de Justo Alpañés, *Geotecnia y Cimientos I*. Ed. Rueda 1971.
- [2] Kulhawy & Maine, *Manual on Estimating Soil Properties for Foundations Design*. Electric Power Research Institute, 1990
- [3] *Soil Mechanics Design Manual 7.01* Naval Facilities Engineering Command, 1986
- [4] Bowles, J. E. *Foundation analysis and design*, Ed. McGraw-Hill, 1982.
- [5] *ASTM D2435 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. American Society for Testing and Materials, 2011.