

Determinación de la presión de preconsolidación de los suelos típicos de la región central de Cuba y su influencia en el cálculo de los asentamientos

Delgado Martínez, D.¹ y Quevedo Sotolongo, G.²

Fecha de recepción: 22 de agosto de 2007 – Fecha de aceptación: 7 de abril de 2008

RESUMEN

Se estima que en Cuba los suelos cohesivos ocupan aproximadamente el 80% del territorio nacional y en su gran mayoría se encuentran preconsolidados como resultado de las condiciones geoambientales del país; de ahí la necesidad de determinar correctamente la carga de preconsolidación del suelo, corregir la curva edométrica y aplicar estos conceptos en el análisis de los asentamientos. En el trabajo se hace un estudio para definir la forma de determinación de la presión de preconsolidación a partir de diferentes métodos. Después, se valora la influencia de la misma y de los módulos de deformación corregidos en el cálculo de los asentamientos, utilizándose en las comparaciones los resultados de pruebas de carga. La base de datos creada para la realización del trabajo cuenta con 102 suelos preconsolidados característicos de la región central de Cuba, los que fueron estudiados con diferentes fines por empresas de investigaciones geotécnicas del país.

Palabras clave: Suelos cohesivos, carga de preconsolidación de suelos, curva edométrica

Determination of preconsolidation pressure on typical soils of the Cuban central region and its influence in settlement calculations

ABSTRACT

It is estimated that cohesive soils are present in about 80% of the Cuban territory. Most of these soils are preconsolidated as a result of the geo-environmental conditions in the country. That is why it is important, in the Cuban context, to determine accurately the soil preconsolidation load, correct the oedometric curve and apply these concepts to settlement computation. In this paper, a study is presented to define how to estimate the preconsolidation pressure by using several methods. A database was created. It consists of 102 preconsolidated soils, which are typical from the central region of Cuba. These soils were analyzed by several Cuban geotechnical research centers.

Keywords: Cohesive soils, soil preconsolidation load, oedometric curve

¹ Profesor Investigador, Facultad de Construcciones, Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas. Santa clara, Villa Clara, Cuba. E-mail: Domingo@fc.uclv.edu.cu

² Profesor Investigador, Facultad de Construcciones, Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas. Santa clara, Villa Clara, Cuba. E-mail: Quevedo@fc.uclv.edu.cu

INTRODUCCIÓN

Para el diseño correcto de una cimentación, aunque prevalezca el criterio de resistencia del suelo, es necesario verificar siempre la deformación, aspecto que es muchas veces olvidado y que si no ha originado consecuencias mayores es porque los proyectistas seleccionan factores de seguridad muy elevados y las cimentaciones quedan sobrediseñadas. Estos problemas han provocado que en los últimos años se esté realizando un trabajo más serio y profundo para esclarecer las particularidades de los distintos métodos que se usan, o que se pueden usar, para el cálculo de los asentamientos en Cuba.

En el caso de los suelos preconsolidados se debe establecer un método de cálculo de los asentamientos que permita considerar el efecto de la presión de preconsolidación (σ'_c) en el módulo de deformación del suelo. Además, se debe tener en cuenta los diferentes métodos que existen para su determinación y que trabajan con la curva relación de vacíos vs esfuerzo (e vs. σ') obtenida en el ensayo de consolidación, pero desde puntos de vista diferentes.

El problema de los suelos preconsolidados cobra especial importancia si se considera la abundancia de los suelos cohesivos en el territorio cubano y que en su gran mayoría se encuentran preconsolidados como resultado de las condiciones geoambientales del país o de los procesos erosivos.

Estudios sobre este tema en Cuba sólo han sido realizados por Quevedo, Lima y Maury (1982) y Delgado, Quevedo y Alejo (2002).

Esta situación demuestra la necesidad de definir un método para la determinación de la presión de preconsolidación, corregir la curva edométrica para obtener un módulo de deformación antes de σ'_c y otro después de σ'_c y además analizar la influencia de la presión de preconsolidación en el cálculo de los asentamientos.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para el estudio del comportamiento de los suelos preconsolidados de la región central se creó una base de datos con los resultados de las investigaciones geotécnicas realizadas por varias empresas de investigaciones aplicadas. En la base de datos se incluyeron las capas ingeniero-geológicas de suelos cohesivos característicos de la región sobre la base de las regionalizaciones existentes. La limpieza de errores se realizó inicialmente sobre la base de la experiencia y de gráficos de dispersión y después, en una última etapa, se aplicaron criterios de rechazo estadístico.

Los datos procesados estadísticamente fueron obtenidos por los mismos métodos y equipos; lo que garantiza resultados similares. La cantidad definitiva de capas ingeniero-geológicas procesadas fue de 102.

En el trabajo se cuenta con los módulos de deformación general obtenidos por pruebas de carga para tres capas ingeniero-geológicas investigadas para la construcción de naves industriales para las cuales se calcularon los asentamientos.

Una vez creada la base de datos generales en Excel XP se procedió al cálculo de la carga de preconsolidación del suelo por diferentes métodos. Los métodos de cálculo empleados se programaron en Excel. Una vez obtenida la carga de preconsolidación se empleó el programa estadístico SPSS (Versión 11) sobre Windows para obtener los parámetros estadísticos de las diferentes propiedades del suelo y se utilizaron pruebas-t (Miller et al. 1992; Delgado, Quevedo y Alejo, 2002) para la comparación de los métodos empleados en la determinación de σ'_c . Antes de aplicar las pruebas de estadística paramétrica siempre se comprobó la distribución normal de las muestras con la prueba Kolmogorov-Smirnov (Miller et al. 1992; Delgado, Quevedo y Alejo, 2002).

Valoración de los métodos para el cálculo de la tensión de preconsolidación

De los diferentes métodos que aparecen en la literatura técnica para la determinación de la presión de preconsolidación, en este trabajo se hace una valoración de dos métodos gráficos basados en el ensayo de consolidación y que resultan de fácil aplicación en las condiciones de Cuba. En primer lugar, se analiza el método desarrollado por Casagrande (1936), que es el más empleado en el ámbito internacional y aparece en las normas ASTM para la determinación de la presión de preconsolidación y el ajuste de la curva edométrica. En segundo lugar, el método desarrollado por Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1976). Este es un método gráfico mucho menos conocido que consiste en representar en escala bilogarítmica los resultados del ensayo de consolidación y obtener a partir de la curva de e vs σ' dos rectas que se intersecan en un punto que tiene como abscisa la presión de preconsolidación (σ'_c) (Quevedo, Lima y Maury, 1982).

En Cuba la única comparación entre estos métodos fue realizada por Quevedo, Lima y Maury (1982), quienes procesaron 18 muestras obtenidas en tres obras hidráulicas.

Los parámetros estadísticos descriptivos de la presión de preconsolidación y sus intervalos de confianza,

determinados para los suelos finos mediante una prueba-t aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros estadísticos de la presión de preconsolidación

Métodos para determinar σ'_c	Capas n	Intervalo de confianza $\alpha=0,95$		\bar{x} (kPa)	Desviación estándar (kPa)
		inferior	superior		
Casagrande (1936)	102	239	262	250	36,8
Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1976)	102	217	238	227	35,0

A partir de los parámetros estadísticos generales de todas las capas ingeniero-geológicas se aprecia la diferencia entre los resultados de los dos métodos, con valores medios que oscilan entre 227 kPa y 250 kPa, donde los valores medios obtenidos con el método de Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1976) son inferiores a los del método de Casagrande (1936). Los intervalos de confianza para el 95% de probabilidades son bastante estrechos y confiables desde el punto de vista estadístico.

Para realizar la comparación entre los resultados de los métodos se emplearon todos los ensayos que existen en cada capa y se aplicó la prueba-t para muestras apareadas o relacionadas (Miller et al. 1992; Delgado, Quevedo y Alejo, 2002). Con esta prueba se demuestra que existen diferencias significativas entre los valores de la presión de preconsolidación obtenidos por los dos métodos analizados. Estos resultados se comprobaron para las capas ingeniero-geológicas agrupadas según el S.U.C.S., a partir de los valores medios y de pruebas-t para muestras apareadas, confirmando los resultados anteriores.

Estas diferencias entre los dos métodos confirman que la determinación del punto de máxima curvatura para aplicar el método de Casagrande (1936) depende mucho de la experiencia (Quevedo, Lima y Maury, 1982). De ahí que, por falta de experiencia, se tienda a desplazar este punto hacia la derecha. Además, se conoce que resulta más difícil determinar el punto de máxima curvatura en el caso de los suelos arenosos.

El método de Casagrande (1936) es de difícil aplicación en algunos suelos, fundamentalmente en los suelos arenosos, donde se dificulta obtener el punto de máxima curvatura, por lo que se necesita de cierta experiencia en su aplicación. Por esa razón con el método de Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1976) se obtienen valores de σ'_c inferiores al método de Casagrande (1936).

El método de Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1976) es de muy fácil aplicación y para todo tipo de suelos

se definen correctamente las dos rectas. La solución analítica del método puede ser programada cuando se realiza el cálculo computacional de la consolidación, lo que representa un gran ahorro de tiempo. Con este método se obtienen soluciones más correctas y con menos dispersión.

Estudio de los módulos de deformación

A partir de la presión de preconsolidación del suelo, determinada empleando el método de Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1976), y el peso propio actuante del suelo sobre cada muestra estudiada se procedió al cálculo de los índices de recompresión (Cr), de compresibilidad (Cc) y de expansión (Cs) del ensayo edométrico para la curva de laboratorio y una curva teórica de campo en suelos preconsolidados. A partir de las curvas edométricas de campo y laboratorio se obtuvieron los módulos de deformación edométricos (Es, inverso de mv) para cargas inferiores y superiores a la presión de preconsolidación (σ'_c).

Los índices de recompresión, de compresibilidad y de expansión, determinados a partir de la curva e vs. log σ' en el laboratorio, son algo diferentes a lo encontrado en el campo. La razón principal es que el suelo se remodela en alguna medida durante el muestreo. Estos aspectos son analizados por diferentes autores, los que establecen la forma de corrección de la curva edométrica (Jiménez Salas, y Justo Alpañés, 1975; Lambe y Whitman, 1999; Das, 2000).

Según los resultados obtenidos para los parámetros estadísticos de estos índices (Tabla 2), la relación de pendiente entre Cs y Cc para las curvas corregidas de campo alcanza valores entre 1/4 y 1/5, similares a los que describe Das (2000) para algunos tipos de suelos; sin embargo, en otras investigaciones (citadas por Das, 2000) se obtiene una razón aproximada de 1/25, con un intervalo típico de 1/5 a 1/10. Jiménez Salas y Justo Alpañés (1975) comentan que esta relación oscila entre 1/4 y 1/10 para suelos típicos españoles. Además, en la presente investigación, las pendientes de Cr y Cs guardan cierto paralelismo, resultado que

se refleja también en la literatura (Delgado Vargas, 1999). Internacionalmente ha existido una fuerte tendencia a establecer correlaciones empíricas de Cc y Cs con propiedades físicas y de plasticidad de los suelos (Jiménez Salas y Justo Alpañés, 1975; Delgado Vargas, 1999; Lambe y Whitman, 1999). Estas relaciones generalmente tienen un carácter cualitativo porque no son generalizables a todo tipo de suelo.

Tabla 2. Estadígrafos descriptivos de los índices Cc y Cs de la curva de laboratorio y de Cr, Cc y Cs de la curva de campo

Índice	Capas n	\bar{x}
Cc, curva de laboratorio	102	0,1579
Cs, curva de laboratorio	102	0,0522
Cr, curva de campo	102	0,0878
Cc, curva de campo	102	0,3804
Cs, curva de campo	102	0,1429

En el caso de los suelos preconsolidados se determinó un valor del módulo de deformación edométrico antes

de la presión de preconsolidación (E_{s1}) y un valor del módulo de deformación después de la presión de preconsolidación (E_{s2}). En la tabla 3 se muestran los valores medios y los intervalos de confianza de los módulos de deformación para las curvas de campo y de laboratorio de todos los suelos cohesivos estudiados. Asimismo, en la tabla 3 se aprecia que los módulos edométricos para cargas inferiores a σ'_c son superiores a los módulos edométricos para cargas mayores que σ'_c . En el caso de la curva de laboratorio (ensayo edométrico) esta razón media es de 1,55 y en las curvas de campo (corregidas) la razón media alcanza 2,37, lo cual demuestra la existencia de diferencias importantes entre los módulos E_{s1} y E_{s2} .

Las diferencias entre los módulos E_{s1} (laboratorio vs. campo) y E_{s2} (laboratorio vs. campo) son evidentes en el análisis gráfico y quedan demostradas al comparar los valores medios desde el punto de vista estadístico cuando se aplica la prueba-t para muestras apareadas.

Tabla 3. Valores medios de los módulos de deformación edométricos de campo y laboratorio

Módulos	Capas n	Intervalo de confianza $\alpha=0,95$		\bar{x} (kPa)
		inferior (kPa)	superior (kPa)	
E_{s1} prom. campo	102	26 900	46 500	36 700
E_{s2} prom. campo	102	13 000	18 000	15 500
Razón prom. campo	102	2,07	2,58	2,37
E_{s1} prom. lab.	102	21 200	32 300	26 600
E_{s2} prom. lab.	102	14 800	19 700	17 200
Razón prom. lab.	102	1,43	1,63	1,55

Para analizar de una forma concreta la influencia de la preconsolidación del suelo en sus características deformacionales, se utilizó la relación o razón E_{s1}/E_{s2} que existe para las curvas corregidas (de campo) que son las que en mejor medida reflejan el comportamiento del suelo. Las capas ingeniero-geológicas fueron agrupadas según el S.U.C.S. y se establece el nuevo valor medio de esta relación, así como los intervalos de confianza. Los resultados se muestran en la tabla 4 y al analizar la misma llama la

atención cómo los módulos de deformación para cargas inferiores a la de preconsolidación resultan como promedio de 1,33 a 2,84 veces superiores. En consecuencia, cuando los suelos preconsolidados son puestos a trabajar a cargas inferiores a la de preconsolidación, las deformaciones que se obtienen son muy inferiores a cuando actúan cargas superiores; además, estos suelos bajo cargas pequeñas o medias resultan menos deformables que un suelo normalmente consolidado.

Tabla 4. Valores de E_{s1}/E_{s2} (razón) para la curva de campo

Clasificación según S.U.C.S.	Capas n	Intervalo de confianza $\alpha=0,95$		\bar{x}
		inferior	Superior	
CH	31	2,30	3,26	2,84
CL	23	1,99	2,54	2,31
MH	15	2,06	2,42	2,24
ML	10	1,42	1,91	1,70
SC	14	1,18	1,45	1,33

Al analizar la razón entre los módulos se aprecian tendencias lógicas ya que las arcillas, especialmente las de alta plasticidad, son las que presentan razones superiores, correspondiéndose con los suelos de mayor preconsolidación. Por tanto, la razón entre los módulos se puede emplear como un coeficiente de conversión de un módulo de un suelo normalmente consolidado a un módulo de un suelo preconsolidado, esta razón o coeficiente cobra especial importancia cuando las propiedades deformacionales del suelo se obtienen por tablas y se puede establecer que el suelo es preconsolidado. Para facilitar la aplicación de esta recomendación la razón entre los módulos se ha denominado coeficiente de conversión (k) y los valores recomendados de k son los que se obtienen para la curva de campo, que es la corregida y que mejor expresa las condiciones *in situ*. Con la finalidad de establecer un único intervalo del coeficiente k para los suelos cohesivos y que éste se ajustara en función de alguna propiedad física, se aplicó una prueba de homogeneidad de la varianza y un análisis de varianza (ANOVA) (Miller et al. 1992; Delgado, Quevedo y Alejo, 2002) a los valores de k de toda la muestra de suelos. En ambos casos se consideró los grupos de suelos según el S.U.C.S. como variables independientes.

Los resultados confirman estadísticamente la posibilidad de agrupación de los valores de k independientemente de la clasificación de los suelos según el S.U.C.S. Por lo tanto, se puede aplicar este coeficiente, cuyos valores aparecen en la tabla 4, o ajustar los valores de k obtenidos en este último análisis en función del índice de consistencia (I_c) y la relación de vacío (e) del suelo, según la tabla 5, para alcanzar mayores precisiones.

Tabla 5. Valores del coeficiente k

Valores de k	$e \geq 0,85$	$e = 0,81$	$e \leq 0,78$
$I_c \leq 0,89$	2,07	2,22	2,37
$I_c = 1,11$	2,22	2,37	2,47
$I_c \geq 1,33$	2,37	2,47	2,58

El procesamiento estadístico confirma la posibilidad de emplear el valor de la razón E_{s1}/E_{s2} como un coeficiente de conversión de los módulos de deformación que aparecen en tablas para obtener un valor de E_0 (módulo de deformación general, obtenido a partir de ensayos triaxiales o pruebas de carga) para suelos preconsolidados, trabajando en un intervalo de cargas inferior a σ'_c , o cualquier análisis análogo con los módulos edométricos. Además, se debe considerar que la mayoría de las tablas que ofrecen módulos de deformación están

comprometidas con las teorías de linealidad y los módulos se ofrecen para intervalos de 100 a 200 kPa o similares. Pueden emplearse como valores de este coeficiente los que aparecen en las tablas 4 ó 5.

Estudio de un suelo preconsolidado y cálculo de los asentamientos. Caso de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada al oeste de la ciudad de Santa Clara, región central de Cuba. Para los estudios se emplearon los datos del informe ingeniero-geológico (A.A.V.V., 1977), elaborado para la construcción de Planta Mecánica por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Villa Clara, y un trabajo sobre el tema realizado por Chuprin (1981). En los mismos aparecen los resultados de tres pruebas de carga realizadas a suelos cohesivos preconsolidados y la caracterización físico-mecánica de los suelos a partir de ensayos de laboratorio. Se seleccionó esta investigación por el nivel de detalle con que se realizó y por tratarse de una obra de gran importancia que constituye prácticamente un caso único. A continuación se brindan las características fundamentales del área y los resultados obtenidos. El perfil esquemático del área de estudio es el siguiente:

0,00 – 0,35 m	Capa vegetal
0,35 – 11,00 m	Arcillas margosas algo limosas, de consistencia media. Clasificación según el S.U.C.S.: CH. Capas 1, 2 y 3
11,00 – 20,00 m	Intercalaciones de calizas, arcillas y tobas. Capa 4. Nivel freático: 7,25 m

En la zona, entre otras, se perforaron las calas 29, 40 y 48 y al lado se realizaron las pruebas de carga en calicatas de igual numeración. Las zonas donde se realizaron las pruebas de carga coinciden con los cimientos a analizar y para los mismos se realizó el control geodésico de las deformaciones en los primeros cinco años después de la construcción. Los resultados obtenidos a partir del control geodésico de las deformaciones de los cimientos aparecen en la tabla 6.

Tabla 6. Resultado del monitoreo de las deformaciones

Cimientos	Asentamientos (cm)
1	2,51
2	1,59
3	1,01

Los cálculos de los asentamientos se realizaron por el método de sumatoria de capas según Quevedo et al. (2001). Se ejemplifican tres cimientos reales de la obra de 2 x 2 m de área, una profundidad de cimentación de 2,00 m y una presión actuante neta de 207 kPa (carga actuante N', para la combinación de carga del segundo estado límite de 800 kN) inferior a la tensión límite de linealidad del suelo (R'). La presión de preconsolidación se calculó a partir de los ensayos de consolidación aplicando el método de Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1976). Los valores medios de σ'_c para las capas 1, 2 y 3 son de 187, 191

y 180 kPa, respectivamente (Delgado, Quevedo y Alejo, 2002).

Primeramente se calcularon los asentamientos empleando el módulo de deformación general obtenido por tablas a partir de la propiedades físicas del suelo, como tradicionalmente se hace al no contar con la misma y después afectando el valor de E_0 de tabla por el valor del coeficiente k propuesto en el trabajo, pues se conoce que el suelo es preconsolidado. Los resultados aparecen en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de los cálculos de asentamientos para E_0 de tabla y E_0 corregido

Cimientos	Ha (m)	Según E_0 de tabla		Según E_0 corregido por k		
		E_0 (kPa)	S (cm)	k	E_0 (kPa)	S (cm)
1 (c-29, cc-1)	4,05	5 000	5,66	2,30	11 500	2,46
2 (c-40, cc-2)	4,05	8 000	3,54	2,30	18 400	1,54
3 (c-48, cc-3)	4,05	11 000	2,57	2,30	25 300	1,12

Nota: Ha, potencia activa o espesor para el cual se calculan los asentamientos

En los resultados se aprecia que existen diferencias al considerar el efecto de la preconsolidación, ajustándose en mejor medida los resultados al emplear el coeficiente k . Para comprobar si esta tendencia se mantiene se volvió a calcular los asentamientos empleando el valor de E_s recomendado en el informe ingeniero-geológico y los valores de E_{s1} y E_{s2} que se obtienen de corregir la curva edométrica a partir de la presión de preconsolidación, pero para ello fue necesario establecer con anterioridad la forma de considerar los módulos E_{s1} y E_{s2} en los cálculos.

Al calcular los asentamientos, en el caso de los suelos preconsolidados, si se establece un módulo de deformación antes de σ'_c y otro después de σ'_c para aplicar el método de sumatoria de capas, que es el recomendado en Cuba (Quevedo et al., 2001), las deformaciones verticales unitarias se deben calcular como se ilustra en la figura 1. Los cálculos se pueden realizar indistintamente en función de E_s o de mv . Los resultados de los asentamientos calculados aparecen en la tabla 8.

Donde:

$$mv = \frac{1}{E_s} \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = (\sigma'_c - \sigma'_{zg}) \cdot mv_1 + [(\sigma'_{zg} + \sigma'_{zp}) - \sigma'_c] \cdot mv_2 \quad (2)$$

mv – coeficiente de compresibilidad volumétrica

mv_1 – antes de σ'_c

mv_2 – después de σ'_c

σ'_{zg} – tensión efectiva por peso propio dentro de la masa de suelo

σ'_{zp} – incremento de la tensión efectiva por carga impuesta dentro de la masa de suelo

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{H_{ai}}{6} (\varepsilon_{is} + 4\varepsilon_{ic} + \varepsilon_{il}) \quad (3)$$

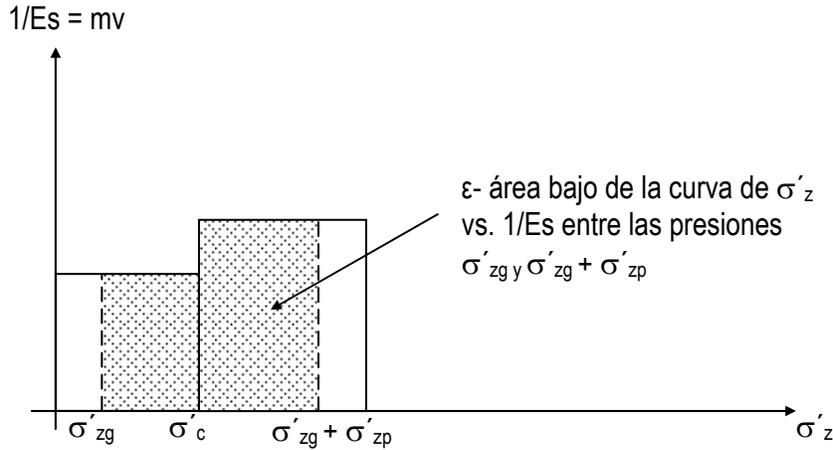


Figura 1. Cálculo de las deformaciones verticales unitarias

Tabla 8. Resultados de los cálculos de asentamientos para Es recomendado y Es1 y Es2 corregidos

Cimientos	Ha (m)	Según Es recomendado		Según Es1 y Es2 corregido		
		Es (kPa)	S (cm)	Es1 (kPa)	Es2 (kPa)	S (cm)
1 (c-29, cc-1)	4,05	6 000	4,71	10 409	5 433	3,03
2 (c-40, cc-2)	4,05	6 500	4,35	15 948	6 263	2,09
3 (c-48, cc-3)	4,05	15 000	1,88	31 941	14 441	1,03

En los resultados se aprecia que los valores de los asentamientos calculados a partir de los valores de Es recomendados en el informe ingeniero-geológico sobrealoran los asentamientos al no considerar el efecto de la preconsolidación; además, los asentamientos obtenidos a partir de Es1 y Es2 corregidos del ensayo de consolidación son similares a los obtenidos a partir del E0 de tabla afectado por k, lo que es lógico según las hipótesis de trabajo y

coincide con los asentamientos reales medidos. Después, como se cuenta con los resultados de las pruebas de carga, se procedió a calcular los asentamientos a partir del E0 general y un E01 y E02 obtenidos gráficamente a partir de los resultados de la prueba de carga (considerando el cambio de pendiente producto de la preconsolidación). Los resultados se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados de los cálculos de asentamientos para E0 general y E01 y E02 de la prueba de carga

Cimientos:	Ha (m)	Según E0 prueba de carga		Según E01 y E02 prueba de carga		
		E0 (kPa)	S (cm)	E01 (kPa)	E02 (kPa)	S (cm)
1 (c-29, cc-1)	4,05	9 000	3,14	11 801	5 093	2,79
2 (c-40, cc-2)	4,05	13 000	2,17	16 034	7 917	1,99
3 (c-48, cc-3)	4,05	26 700	1,06	30 300	14 661	1,01

Los asentamientos calculados a partir de la interpretación de la prueba de carga con un E01 y E02 son los que mejor se ajustan a los reales. Sin embargo, los resultados obtenidos a partir de un único valor de E0 (prueba de carga), de Es1 y Es2 (curva edométrica corregida) y de E0 (de tabla afectado por k) son muy similares entre sí y ligeramente superiores a los medidos. Estos cálculos confirman la necesidad de corregir la curva edométrica al considerar el efecto de

la preconsolidación y la necesidad de emplear el coeficiente k propuesto cuando se obtiene el módulo por tablas y el suelo es preconsolidado. La confiabilidad del empleo del coeficiente k se puede apreciar también si se toma E0 por tabla y se divide el E0 general (prueba de carga) entre el valor de E0 de la tabla, con lo que se obtiene un coeficiente k hipotético muy similar a los propuestos, los resultados se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Resumen de las conversiones

Tablas según:	E_0 (kPa) tabla	k hipotético	E_0 (kPa) prueba de carga	k propuesto
SNIP (1983) y Anteproyecto de norma cubana de cimentaciones (2001)	5 000	2,16	10 801	2,07
	8 000	1,73	13 834	
	11 000	2,43	26 700	
Norma Checa de cimentaciones (1973)	10 000	1,38	13 834	a
		2,67	26 700	
Departamento técnico ENIA (1991)	8 000	1,73	13 834	2,58
		3,33	26 700	
RI-005 (1985)	10 000	1,38	13 834	
		2,67	26 700	

En el caso de Planta Mecánica los coeficientes de conversión hipotéticos oscilan entre 1,38 y 3,33, mientras que los coeficientes recomendados en el trabajo para los suelos CH están entre 2,30 y 3,26 y, en general, para los suelos cohesivos, entre 2,07 y 2,58. En el caso analizado según la tabla 4 se obtiene un valor de k de 2,30. Las tablas de la propuesta de norma cubana de cimentaciones son las que mejor se ajustan a las características de los suelos cubanos y permiten obtener a partir del k propuesto un módulo de suelo preconsolidado prácticamente idéntico al real. Estos resultados confirman que el coeficiente k propuesto posee intervalos de confianza estrechos y confiables al no sobrestimar el efecto de la preconsolidación.

CONCLUSIONES

- El método de Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1976) para la determinación de σ'_c es de fácil aplicación y para todo tipo de suelo se definen correctamente las dos rectas, no necesitándose prácticamente experiencia para su aplicación. Las ventajas de este método con respecto al de Casagrande (1936), que es el normado por la A.S.T.M, fueron confirmadas estadísticamente.
- Al corregir las curvas edométricas de laboratorio y obtener una curva teórica de campo a partir de la cual se pueden calcular los índices de compresión o los módulos edométricos, se elimina en cierta medida la influencia del remoldeo que genera el muestreo y no conocer inicialmente el valor de la presión de preconsolidación.
- El cálculo de los asentamientos por el método de sumatoria de capas permite considerar el efecto de la preconsolidación del suelo en los módulos de deformación de mismo y obtener asentamientos de cálculo muy próximos a los reales. Por tanto, cuando se diseña por tablas y

se puede determinar que el suelo es preconsolidado, los módulos obtenidos se afectan por k ; si existen ensayos de consolidación se corrige la curva edométrica a partir de σ'_c .

Anexo. Relación de símbolos utilizados

- \bar{x} - valores medios
- σ' - tensión efectiva (kPa)
- σ'_c - Tensión o presión de consolidación (kPa)
- ε_i - deformación vertical unitaria de cada subcapa de suelo
- ε_{ic} - deformaciones verticales unitarias en la parte central del estrato
- ε_{il} - deformaciones verticales unitarias en la parte inferior del estrato
- ε_{is} - deformaciones verticales unitarias en la parte superior del estrato
- C_c - índice de compresibilidad
- C_r - índice de recompresión
- C_s - índice de expansión
- E_0 - módulo de deformación general (kPa)
- E_{01} - módulo de deformación general antes de σ'_c (kPa)
- E_{02} - módulo de deformación general después de σ'_c (kPa)
- E_s - módulo de deformación edométrico (kPa)
- E_{s1} - módulo de deformación edométrico antes de σ'_c (kPa)
- E_{s2} - módulo de deformación edométrico después de σ'_c (kPa)
- H_a - potencia activa o espesor de la capa activa (m)
- H_{ai} - espesor de una subcapa de la capa activa (m)
- n - número de muestras
- N' - carga actuante para la combinación de carga del segundo estado límite (kN)
- R' - tensión límite de linealidad del suelo (kPa)
- S - asentamiento (cm)
- α - probabilidad para un nivel de confianza del 95%

Referencias bibliográficas

- A.A.V.V. (1977). "Informe ingeniero-geológico para la construcción de Planta Mecánica" en archivos Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas de Villa Clara, Villa Clara. 280 p.
- CHUPRIN, V.N. (1981). "Cimientos bifuncionales y compuestos. Métodos de cálculo, investigaciones experimentales e implantación". Santa Clara: Empresa de Construcciones Mecánicas y Universidad Central de Las Villas. 63 p.
- CSN 731001. (1973). "Norma Checa de cimentaciones superficiales". 37 p.
- DELGADO, D.; QUEVEDO, G. y ALEJO, T. (2002). "Análisis del comportamiento tenso deformacional de los suelos preconsolidados y su influencia en el cálculo de los asentamientos" en *Memorias del V Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción*. Universidad Central de las Villas. C.D. ISBN: 959-250-070-3.
- DEPARTAMENTO TÉCNICO. (1991). Instructivo sobre parámetros y correlaciones geotécnicas requerido para el diseño de obras compatibilizadas. ENIA. 29 p.
- JIMÉNEZ SALAS, J.A. Y JUSTO ALPAÑÉS, J.L. (1975). *Geotecnia y Cimientos I: Propiedades de los suelos y de las rocas*. Madrid: Editorial Rueda. 2da edición. 466 pp
- LAMBE, T.W. y WHITMAN, R. V. (1999). *Mecánica de suelos*. México: Editorial Limusa. 2da edición. 582 p.
- QUEVEDO, G. ET AL. (2001). "Anteproyecto de norma cubana de diseño geotécnico de cimentaciones superficiales" en formato digital, Universidad Central de Las Villas, Facultad de Construcciones. 42 p.
- QUEVEDO, G.; LIMA, R. y MAURY, C. (1982). "Métodos para el cálculo de la tensión de preconsolidación en los suelos" en *Ingeniería Estructural* (septiembre-diciembre). pp 302-308.
- R-005. (1985). "Regulaciones de investigación. Investigaciones geológicas para micropresas de materiales locales". 29 p.
- MILLER, I. ET AL.(1992). "Probabilidad y estadística para ingenieros". Prentice-Hill. México. 265 p.
- CASAGRANDE, A. (1936). "The determination of the preconsolidation load and its practical significance". Proc., First International conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 3, Cambridge, Mass., pp 60-64.
- JUÁREZ BADILLO, E.; RICO RODRÍGUEZ, A. (1976). "Mecánica de suelos". tomo 3era edición. Editorial Limusa, México. 443 p.
- DAS, B. M. (2000). *Principios de la ingeniería de cimentaciones. Cimentaciones sobre suelos difíciles*. México: International Thompson Editores. 4ta edición. 862 p.
- SNIP-2.02.01.183. (1983). "Bases de edificios y construcciones". Moscú: Gostroi (en ruso).

Este documento se debe citar como:

Delgado Martínez, D. y Quevedo Sotolongo, G. (2008). **Determinación de la presión de preconsolidación de los suelos típicos de la región central de Cuba y su influencia en el cálculo de los asentamientos.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-1, pp. 21-29, ISSN: 1665-529X