

ESTUDIO DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS CON COMPORTAMIENTO LINEAL EN LA BASE DE LAS CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS SATURADOS

STUDY OF METHODS OF CALCULATION OF SETTLEMENTS WITH LINEAR BEHAVIOR IN THE BASIS OF SURFACE CEMENTS ON SATURATED SOILS

Autores: Yanilexi Pérez de Corcho Trujillo

Aymet Machado Jácome

Institución: Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Cuba

Correo electrónico: yanilexi@unica.cu

RESUMEN

En el trabajo se explica el procedimiento y las consideraciones para la obtención de las deformaciones con comportamiento lineal en la base de las cimentaciones superficiales en suelos saturados, a través de Métodos Teóricos y Analíticos existentes en la literatura internacional. Se exponen los resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo elaborada con el software MathCad14. Comparaciones entre los métodos de cálculo, con el objetivo de determinar cuál o cuáles de estos métodos se acercan más a las condiciones de los suelos saturados en Cuba.

Palabras clave: Cimentaciones superficiales, Asentamientos, Suelos saturados, Modelos lineales.

ABSTRACT

In the Present work explain the procedure and the considerations taken to obtain the deformations with lineal behavior in the base of the superficial foundations in saturated soils, through some existent Analytic Theoretical Methods in the national and international literature, making a collection of the western and Russian methods. The results obtained are presented by means of the calculation page elaborated with the software MathCad14.0 through charts and tension-deformation graphs, where comparisons were made among the methods found in the international literature and of the Norma standard, with the

objective of determining which of these methods come closer to the conditions of the saturated soil in Cuba.

Keywords: Superficial foundations, Saturated soils, Lineal models, Baseresting.

INTRODUCCIÓN

En el proyecto de cualquier sistema de cimentación, el problema fundamental es evitar que se produzcan grandes asentamientos que puedan dañar la estructura o dificultar sus funciones. Por tal motivo se precisa un diseño geotécnico de las cimentaciones, para garantizar que los estados tensionales que se generan en la masa de suelo no sobrepasen su capacidad resistente, ni provoquen deformaciones que afecten la funcionalidad y seguridad de la estructura.

Durante décadas se han desarrollado varias investigaciones teóricas y prácticas con vistas a evaluar los métodos de cálculo a emplear en el diseño de las cimentaciones superficiales.

Existen numerosos métodos para el cálculo de asentamientos basados en los modelos lineales. La Norma cubana (2007) plantea un método general para el cálculo de asentamientos, es necesario determinar de acuerdo con los métodos existentes y las características del terreno, cuál o cuáles brindan resultados más precisos a la hora de realizar el cálculo de asentamientos en suelos saturados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Generalidades para la determinación de asentamientos en suelos saturados.

La condición saturada como objeto de estudio de esta investigación se presenta en suelos situados por debajo del nivel freático, donde las fases presentes son sólidas y líquidas, es decir, los espacios vacíos o poros del suelo están ocupados por agua. De acuerdo con las leyes de la Hidráulica, bajo esta condición, el agua en los poros se encuentra a una presión positiva, o sea, ejerce una fuerza positiva de igual magnitud y en todas las direcciones, conociéndose como presión de poros debida al agua (u_w).

A efectos prácticos, las partículas del suelo como el agua son indeformables, de manera que los cambios de volúmenes o las distorsiones del suelo son

producto de una reordenación de estas, que giran y/o se deslizan unas sobre otras. En el caso de un suelo saturado se evidencia por la compresión, la reducción de huecos y un reordenamiento de las partículas hacia una estructura más densa o el hinchamiento; aumento de huecos con reordenamiento de las partículas conformando una estructura más abierta. Para que un suelo saturado se consolide o se asiente, es necesario que reduzca su volumen, se ha de reducir los huecos, es decir, se ha de expulsar agua, las partículas se reordenan en una estructura más densa y resistente (Ortuño, 2014)

Cuando un depósito saturado se somete a un incremento de esfuerzos totales como resultado de cargas externas aplicadas, se produce un exceso de presión intersticial. Puesto que el agua no resiste al corte, la presión intersticial se disipa mediante un flujo de agua al exterior, cuya velocidad de drenaje depende de la permeabilidad del suelo. A medida que el agua escape, la sobrepresión intersticial (Δu) irá disminuyendo y la presión efectiva ($\Delta \sigma'$) aumentando en la misma medida. Cuando finalmente se alcanza el equilibrio y desaparece la sobrepresión intersticial todo el incremento de tensión total aplicado se habrá transformado en tensión efectiva, este proceso se denomina consolidación (Ortuño, 2014).

La consolidación puede ser Primaria o Secundaria:

Primaria: Se produce por drenaje gradual del agua retenida en los poros del suelo y reducción de vacíos generando una disminución gradual de la presión intersticial provocada por la aplicación de la sobrecarga, fenómeno en el que se transfiere la carga soportada por el agua al esqueleto mineral, la velocidad de consolidación depende de la permeabilidad de suelo. Finaliza cuando el exceso de presión intersticial (Δu) vuelve a ser nula. Este proceso puede durar desde segundos o minutos hasta siglos.

Secundaria: Se produce en algunos terrenos a presión efectiva constante, producto a la fluencia viscosa entre partículas, reorientación y rotura de granos del suelo y luego de que la carga está casi toda soportada por este y no por el agua. Es de gran importancia en suelos con alto contenido de materia orgánica (Ortuño, 2014).

El asiento total de una cimentación puede calcularse como:

$$S_{\text{total}} = S_i + S_c + S_s$$

Si: Asiento inmediato, instantáneo o elástico.

Sc: Asiento por consolidación primaria.

Ss: Asiento por consolidación secundaria.

Asentamiento instantáneo: es un asiento elástico, que se presenta principalmente en terrenos arenosos compactados y rocosos. En el caso de suelos saturados se asume que es el asentamiento que se produce sin cambio de volumen y tiene lugar de forma rápida.

Cálculo de asentamientos a partir de los modelos lineales

Los métodos más utilizados para el cálculo de asentamientos han sido los basados en modelos lineales. En estos se garantiza el comportamiento lineal del suelo, cumpliendo con la condición que la tensión actuante sea menor que la Tensión Límite de Linealidad para las cargas de servicio, como lo hace la escuela rusa (Quevedo, 1989). Y en otros casos, como son las tendencias occidentales, con la introducción de grandes coeficientes de seguridad, o suponiendo que el suelo se encuentra en condiciones de falla local, (J. Badillo 1970; Sowers 1979, González-Cueto 2001; González Fleites 2013).

El cálculo de asentamientos por métodos lineales parte de definir los siguientes aspectos (Quevedo y González-Cueto 2007):

- Parámetro deformacional que caracteriza el suelo, en la mayoría de los casos, viene dado por el Módulo General de Deformación (E_0), que hace al modelo lineal desde la definición de su material.
- Determinación del espesor del suelo donde se espera que ocurren las deformaciones lineales; nombrada como potencia activa (H_a).
- Introducción de coeficientes empíricos en las ecuaciones propuestas.
- Cálculo de las tensiones por carga impuesta en el suelo, mediante la discretización del gráfico que caracteriza esta distribución de presiones en el suelo, partiendo siempre de modelos lineales.

Para adentrarse en el cálculo de asentamiento por métodos lineales, resulta necesario tener un conocimiento preciso de la curva de comportamiento tenso - deformacional del suelo, y el significado de los valores de tensiones de los puntos notables de la misma. Véase Figura. 1.1

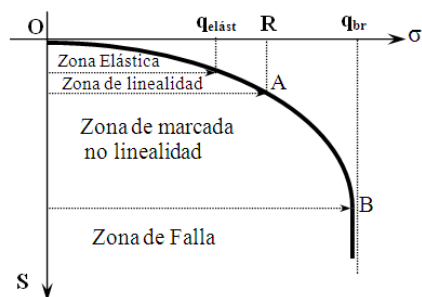


Figura 1: Comportamiento tenso - deformacional del suelo.

La tensión estructural elástica del suelo ($q_{elást.}$) define la frontera hasta donde el suelo tiene comportamiento perfectamente elástico, y por tanto las deformaciones que ocurren bajo esfuerzos iguales o menores que ese valor siempre se recuperan después que cesen las tensiones actuantes.

La tensión límite de linealidad (R): es la frontera entre el comportamiento tenso-deformacional lineal del suelo y el comportamiento elasto-plástico del mismo. Entiéndase como un comportamiento lineal del suelo, aquel en que se mantiene una cierta proporcionalidad entre la tensión aplicada y la deformación producida, pero no existe una recuperación total de la forma inicial del suelo al ser retirada la carga, siempre va a existir una deformación permanente en el mismo. Para cualquier punto sometido a un esfuerzo inferior que el valor de R , el suelo mantendrá un comportamiento linealmente deformable y en ningún punto del mismo la zona se encontrará en inminente falla.

La tensión bruta de rotura resistente por estabilidad (q_{br}): valor de tensión para la cual el suelo se encuentra en inminente falla.

Debe aclararse que cuando se habla de modelos y métodos lineales, se está en la porción de la curva comprendida entre la tensión estructural elástica ($q_{elást.}$) y la tensión límite de linealidad (R).

Otro de los procedimientos empleados para garantizar un comportamiento lineal del suelo y garantizar que los cálculos se realicen en una etapa lejos de la falla, es la introducción de coeficientes de seguridad elevados en el proceso de diseño de la cimentación. Estos valores oscilan entre 2.5 y 3.5, el más empleado es tres. (Quevedo 1987; González-Cueto 1997, 2001, González Fleites 2013).

Cálculo de asentamiento por métodos lineales

Los métodos lineales pueden ser generales o específicos. Generales, cuando se aplican a cualquier tipo de suelo sin importar las condiciones en las que se encuentre; específicos, cuando existe algún caso particular de un tipo de suelo determinado.

Entre los métodos generales más utilizados para la determinación de asentamientos tenemos: el método de Sumatoria de Capas, Capa Equivalente (Tsitovish 1983) y método edométrico de Terzaghi, entre los específicos tenemos al Método de Potencia Limitada y al Método de Skempton-Bjerrum.

Para realizar el estudio se empleará el método Edométrico, el método de Skempton-Bjerrum y el método de Sumatoria de Capas de la Norma Cubana.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis y comparación de los métodos utilizados para el cálculo de asentamientos en suelos saturados a partir de modelos lineales.

El método edométrico de Terzaghi (1936) estudia el asiento en la hipótesis unidimensional partiendo de los resultados obtenidos del ensayo edométrico, sin tener en cuenta al asiento inmediato, pero tiene la ventaja de poderse aplicar a suelos estratificados, en general da valores inferiores a los reales, con divergencias en dependencia de la dureza del suelo y tienen mayor importancia los efectos tridimensionales.

Tiene la ventaja de proporcionar unos resultados de fácil aplicación respecto al tiempo necesario para que se produzcan los asientos, un dato que muchas veces tiene gran influencia sobre el proceso constructivo.

Para suelos con comportamiento tenso-deformacional lineal, el asentamiento se calcula de la siguiente forma:

$$S_{edo} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta e \cdot H_i}{1 + e_0}$$

Siendo:

Δe = variación del índice de poros.

$$\Delta e = e_0 - e_f$$

H_i = espesor de los estratos

e_0 = índice de poros inicial del suelo correspondiente a la presión.

e_f = índice de poro final que se halla por el incremento de presión por carga impuesta.

Para realizar el cálculo del asentamiento, el suelo se divide en substratos de 0.4b o 1m para alcanzar resultados más reales del suelo. Se calcula la tensión por carga impuesta, por estrato en cualquier punto y después se calculan las tensiones por peso propio para e_0 y para e_f por el incremento de presión por carga impuesta $\sigma'_{zg} + \sigma'_{zp}$, esto se realiza a través de la siguiente curva:

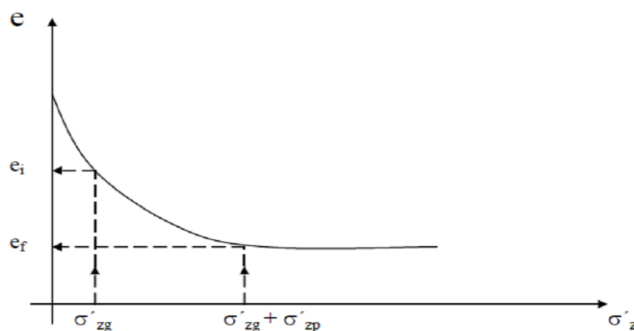


Figura 1. Curva para el cálculo del asentamiento en el método edométrico de Terzaghi

Método de Skempton-Bjerrum (1957).

Este método constituyó el primer paso de avance en el cálculo de los asientos, desde que Terzaghi en 1923 propuso el ensayo edométrico y postuló la teoría de la consolidación ya que no solo elimina algunas imprecisiones del ensayo edométrico, sino que tiene en cuenta el llamado asiento de deformación, factor poco atendido en el método tradicional de Terzaghi.

El cálculo de asentamiento por consolidación supone que el incremento de la presión de poros del agua (Δu) inmediatamente después de la aplicación de la carga es igual al incremento del esfuerzo (Δp), en cualquier profundidad. El procedimiento para el cálculo de asentamientos por este método es el siguiente:

- Determinar el asiento por consolidación (S_{edo}) el cual se da a lo largo del tiempo ocurriendo principalmente en suelos arcillosos saturados cuando son sometidos a una carga creciente causada por la construcción de una cimentación, dependiendo principalmente de la deformación unitaria vertical (ϵ) y el incremento de la relación de vacíos (Δe).
- Determinar el parámetro (A) presión de poros del agua.

Propiedad de los suelos	A
Arcilla blanda muy sensible	1
Arcilla normalmente consolidada	0.75
Arcilla sobreconsolidada	0.375
Arcilla arena consolidada	0.25

Tabla1. Presión de poros del agua.

- Determinar α que depende de H_e/B , siendo H_e la profundidad de la capa de arcilla y B el ancho de la cimentación.

H_e/b	α
0.25	0.74
0.5	0.53
1	0.37
2	0.26
4	0.2
10	0.14

Tabla2. Valores del Coeficiente α .

- Determinar μ que depende de A y α .

$$\mu = A + \alpha \cdot (1 - A)$$

- Calcular el asentamiento real de consolidación que está dado por la multiplicación del asentamiento por consolidación y el coeficiente μ .

$$S = S_{edo} \cdot \mu$$

Método de Sumatoria de Capas planteado en la Norma Cubana de cimentaciones

En la Norma Cubana actual de diseño geotécnico de cimentaciones superficiales, se propone para el cálculo de los asentamientos, como principio general, el método de Sumatoria de Capas, planteándose algunas modificaciones que se verán a continuación mediante la exposición de la metodología para la aplicación de este método.

Este método se puede utilizar para cualquier propiedad del suelo y trabaja a partir de una discretización del modelo, mediante un promedio pesado,

analizando tres puntos en cada uno de los estratos, lo que simplifica los cálculos con respecto al método de sumatoria de capas propuesto por la escuela rusa, expuesto anteriormente.

- Primeramente debe definirse la potencia activa de la cimentación, y dividir en subestratos el suelo, mientras el espesor de estos sea más pequeño, mayor exactitud se logrará en los cálculos.
- Determinar las fuerzas de presión bruta actuante (P) y presión neta (P'), así como el factor de influencia (Jz) según lo establecido (Quevedo 1994, 1989).
- Calcular el valor de las tensiones por carga impuesta (σ'_{zp}) y las tensiones por peso propio (σ'_{zg}), en la vertical que pasa por los puntos característicos (Pc) del cimiento ($X_{pc} = 0.37 l$), para la frontera superior (H1s), centro (H1c), e inferior (H1i) de cada estrato. (Ver Figura. 1.5)

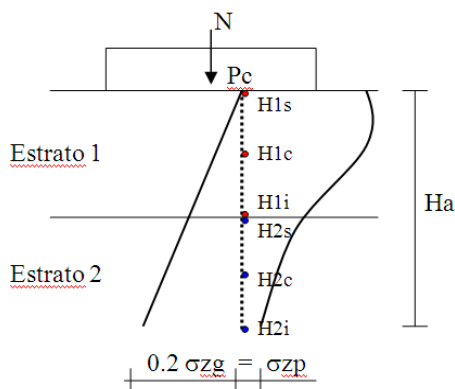


Figura 2: Distribución de Tensiones en el suelo.

- Determinar la variación de la deformación unitaria vertical (ε), en cada uno de los puntos mencionados anteriormente, en cada estrato. El valor de ε puede ser estimado a partir de diferentes parámetros característicos de los suelos, que pueden ser consultados en varias referencias (Quevedo 1994, 1989; Broche 1994).
- Cálculo de los asientos absolutos en cada punto característico de la base, para lo cual se necesita conocer los siguientes parámetros:

$$S_i = \sum_{i=1}^{NE} \frac{H_i}{6} (\varepsilon_{is} + 4\varepsilon_{ic} + \varepsilon_{il})$$

Donde:

NE: Cantidad de estratos por debajo del nivel de solera hasta una profundidad igual a la potencia activa (Ha).

H_i : Espesor del estrato i existente por debajo del nivel de solera hasta una profundidad igual a la potencia activa.

ε_{is} : Variación de la deformación unitaria vertical en un punto de la frontera superior del estrato i calculada en una vertical que pasa por el punto característico.

ε_{ic} : Igual, pero en el centro del estrato i .

ε_{il} : Igual, pero en la frontera inferior del estrato i .

- En Suelos con E_0 como parámetro deformacional.

$$\varepsilon = \frac{\sigma'_{zp}}{E_0}$$

Donde:

σ'_{zp} – incremento de la presión efectiva vertical en el punto de la masa de suelo donde se determinará, es producida por las cargas impuestas a esta.

- Suelos con parámetros deformacionales diferentes de E_0 .

En este caso se puede determinar la variación de la deformación unitaria utilizando los resultados de los ensayos edométricos o consolidación triaxial que caracteriza la compresibilidad de los suelos. Curva de e vs $\sigma'z$ (Ver figura 1.2).

$$\varepsilon = \frac{e_i - e_f}{1 + e_f}$$

Donde:

e_i : índice de poros correspondientes a la presión $\sigma'zg$ en el punto de la masa de suelos donde se determina ε .

e_f : índice de poros correspondientes a la presión $\sigma'zg + \sigma'zp$ en el punto de la masa de suelo donde se determina ε .

Para calcular la Variación de la deformación unitaria vertical se puede utilizar también la Curva de ε_0 vs $\sigma'z$ (Ver figura 1.4).

$$\varepsilon = \varepsilon_{0f} - \varepsilon_{0i}$$

Donde:

ε_{0i} : deformación unitaria vertical correspondiente a la presión $\sigma'zg$ en el punto de la masa de suelo donde se determina ε .

ϵ_{of} : deformación unitaria vertical correspondiente a la presión $\sigma'_{zg} + \sigma'_{zp}$ en el punto de la masa de suelo donde se calculará ϵ .

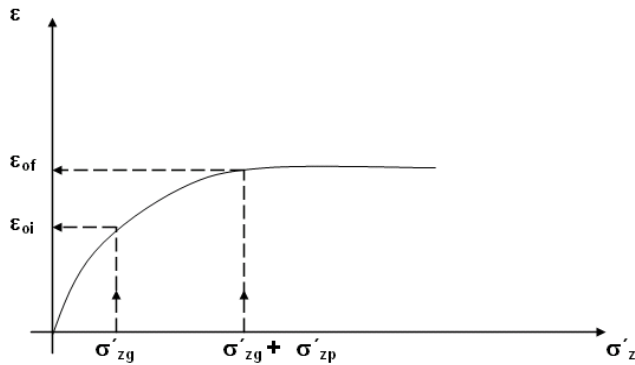


Figura 3. Determinación de ϵ usando la Curva ϵ vs. σ'_z .

Comparación entre los métodos para el cálculo de asentamientos en suelos saturados.

Para realizar el cálculo de los asentamientos se consideró que la cimentación fuera cuadrada con $b=l$, el suelo fuera homogéneo, las condiciones de trabajo de la base de cimentación fueran desfavorables, el tipo de falla grave y el valor permisible para el asentamiento absoluto de la estructura se tomó de la tabla 2 de la Norma Cubana y es el siguiente:

Asiento medio de 15cm para edificios de varias plantas con muros de carga de bloques o fábricas de ladrillos armado y con vigas de hormigón armado.

Los suelos en cuestión presentan las siguientes características:

Suelo	C (kPa)	Φ (°)	E (kPa)	m_v (kPa ⁻¹)	γ_{sat} (kN/m ³)	$\gamma_{relleno}$ (kN/m ³)	d (m)	μ
Capdevila CH (arcilla de alta compresibilidad)								
1	28	7	3500	3×10^{-4}	17.35	17	1.4	0.33
Sagua la Grande CH (arcilla de alta compresibilidad)								
2	30	9	7500	1×10^{-4}	17.35	17	1.4	0.33

Tabla 3. Características de los suelos.

Curvas de compresibilidad de los suelos con 100% grado de saturación en carga y descarga.

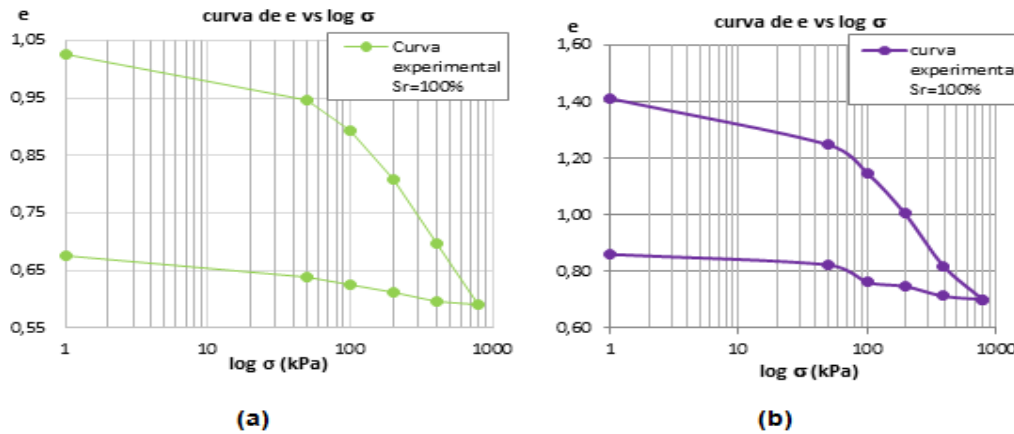


Figura 4. Curva de e vs $\log \sigma$ para 100% de grado de saturación, (a) Capdevila y (b) Sagua la Grande.

Para el diseño geotécnico de las cimentaciones se consideró una combinación de carga de $1.2CP+1.6CT+0.8CV$ y se tomaron en cuenta las siguientes cargas actuantes con una excentricidad nula.

Variantes de cargas No.	CP			CT			CEviento		
	N' (kN)	H (kN)	M (kNm)	N' (kN)	H (kN)	M (kNm)	N' (kN)	H (kN)	M (kNm)
1	900	15	0	600	10	0	70	100	0

Tabla 4. Cargas Actuantes.

En este caso se calcularon los asentamientos para los suelos utilizando la curva de compresibilidad de dichos suelos, el suelo 1 (Capdevila) presenta un índice de poros inicial de 1.03 y para el suelo 2 (Sagua la Grande) el índice de poros inicial es de 1.4.

Para este caso el método establecido por la Norma Cubana determina la variación de la deformación unitaria utilizando los resultados de los ensayos edométricos o consolidación triaxial que caracteriza la compresibilidad de los suelos.

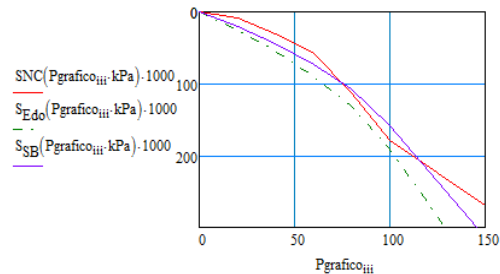
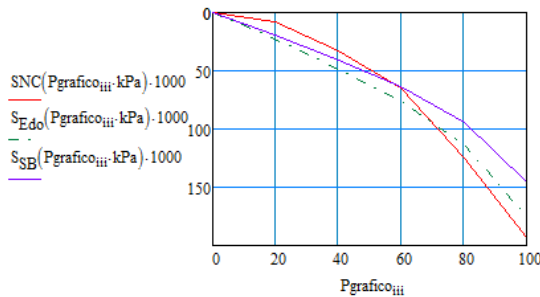
Suelo	Cargas	b=l (m)	Ha (m)	S _{NC} (cm)	S _{edom} (cm)	S _{Sk-B} (cm)
1	1	4.25	6.35	16.502	14.532	12.046

2	1	3.9	6.6	20.133	22.391	18.438
---	---	-----	-----	--------	--------	--------

Tabla 5. Valores de Asentamientos.

Suelo 1: Capdevila

Suelo 2: Sagua la Grande



Como se puede apreciar en la tabla 5 los valores de los asentamientos por los tres métodos utilizados solo se diferencian como máximo entre un 6% y un 9%, por lo que cualquiera de los tres puede ser utilizado para dichos cálculos. Aunque el método de Skempton-Bjerrum da valores de asentamientos menores.

Cuando determinamos el asentamiento de la norma cubana a partir de la curva de compresibilidad de los suelos y se comparó con el método edométrico, se puede observar que a menor índice de poros se comporta mejor este último y a mayor índice de poros la Norma Cubana, la causa principal de la diferencia de valores de asentamientos para estos métodos es la forma en que se realiza la discretización del estrato para determinar las tensiones por cargas impuestas.

CONCLUSIONES

Los métodos analíticos que se trabajaron fueron propuestos por sus autores en momentos muy diferentes del desarrollo de la Geotecnia, sin embargo los resultados que brindan son coherentes entre sí, pudiendo deducirse que los basamentos o hipótesis sobre los que se desarrollan no han sufrido grandes transformaciones con el cursar del tiempo. Se demostró que es factible el empleo de los métodos mencionados para el cálculo de los asentamientos en los suelos saturados, debido a que se obtienen valores de asentamientos considerablemente aceptables; por lo tanto el empleo de los mismos no solo garantizan diseños racionales y seguros para el país; sino que implementa el empleo de nuevas vías de cálculo para el desarrollo del conocimiento en esta rama de la Mecánica de Suelos Saturados.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- ALVA, J.E.: *Cimentaciones superficiales*. Disponible en <http://civilgeeks.com>. Visitado el 10 de mayo de 2015.
- DAS, B. M.: *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*, Ed. Félix Varela, La Habana, 2009.
- DAS BRAJA, M.: *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Disponible en <http://civilgeeks.com>. Visitado el 4 de marzo de 2015.
- GONZÁLEZ CUETO, A.V. Y QUEVEDO SOTOLONGO, G.: *Cimentaciones Superficiales*. Disponible en <http://civilgeeks.com>. Visitado el 21 de febrero de 2014.
- JUÁREZ BADILLO, E. Y RICO RODRÍGUEZ, A.: *Mecánica de Suelos*, Ed. Limusa, t. 1, México, 2005.
- ORTUÑO, L.: *Cimentaciones superficiales. Asientos*. Disponible en <http://civilgeeks.com>. Visitado el 10 de enero de 2015.
- Quevedo Sotolongo, G: «Aplicación del Método de los Estados Límites en el Diseño de las Cimentaciones Superficiales», en *Ingeniería Estructural*, pp. 95-106, Vol. 2(III), Santa Clara, 1987.
- Therzaghi, K.V.: *Compresibilidad y consolidación de los suelos, El ensayo edométrico*. Disponible en <https://prezi.com/gbz-vb3eurgk>. Visitado el 18 de febrero de 2015.