

## **Comparación de métodos geotécnicos para la evaluación de asentamientos por consolidación primaria para cimentaciones en balsa**

### **Comparing geotechnical methods to assess primary consolidation settlements for raft foundations a**

Eduardo Rafael Álvarez-Deulofeu<sup>1\*</sup>, Eduardo Beira-Fontaine<sup>1</sup>, Pedro Manuel Cabrera-Castro<sup>1</sup>, Odeysis Reyes-Pérez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

<sup>2</sup>Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Santiago de Cuba, Cuba

\*Autor para la correspondencia: [ealvarez@uo.edu.cu](mailto:ealvarez@uo.edu.cu)

---

#### **Resumen**

Se evaluaron, mediante el libro Excel DISBAL, asentamientos por consolidación primaria en suelos sometidos a presiones impuestas por cimentaciones en balsas. Se compararon los resultados del procedimiento clásico para el cálculo de asentamientos primarios, considerando el índice de compresibilidad del suelo, con aquellos del procedimiento simplificado basado en el método de la sumatoria de capas, recomendado por la norma cubana de cimentaciones superficiales vigente. La novedad del libro Excel DISBAL consistió en que contribuyó a resolver carencias en el país de software basados en métodos geotécnicos actuales y conformes al marco legal de las normativas vigentes de la construcción en Cuba y otras de referencia internacional. El caso de estudio consistió en evaluar el crecimiento en altura de una edificación sustentada en el estado límite por deformación del suelo y ubicada, hipotéticamente, en el campo experimental de Ingeniería Civil de la Universidad de Oriente, donde se realizaron las calas por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas de Santiago de Cuba. Se demuestra que este software permite una adecuada valoración del estado límite por deformación del suelo por ambos métodos, obteniéndose para el caso de estudio asientos por consolidación primaria aceptables; ello contribuye a precisar el número de pisos que alcanzará la edificación.

**Palabras clave:** Consolidación primaria; asentamientos; cimentación en balsa; diseño geotécnico; Libro Excel DISBAL.

### **Abstract**

Primary consolidation settlements in soils subjected to pressures due rafts foundations were assessed by using Excel DISBAL book and results of the classical procedure for calculating primary settlements were compared considering the soil compression index with those of simplified procedure based on summation of layers method, recommended by the current Cuban standard of surface foundations. The novelty of Excel DISBAL book is its contribution for solving shortcomings of software based on current geotechnical methods and in accordance with the legal framework of current construction regulations in Cuba and other international reference. The case study is about evaluating extension in height of a building supported in soil deformation limit state and hypothetically located in the experimental field of Civil Engineering of Universidad de Oriente, where the coves were made by the National Research Company Applied from Santiago de Cuba. It is demonstrated that this software allows an adequate assessment the limit state by soil deformation by both methods obtaining acceptable primary consolidation settlements for the case study; helping to specify the number of floors the building will reach.

**Keywords:** primary consolidation; settlements; raft foundation; geotechnical design; Excel workbook DISBAL.

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

El diseño geotécnico de cimentaciones permite que se cumplan los estados límites últimos de capacidad soportante del suelo, vuelco de la edificación, deslizamiento del cimiento y estados límites de utilización como los asientos, que asegura no rebasar el asiento absoluto máximo o los diferenciales permisibles.

En la actualidad se desarrollan investigaciones teóricas y empíricas para evaluar los métodos de cálculo de diseño geotécnico de cimentaciones (Chagoyén y Negrín 2009). Existen muchos métodos para el cálculo de asientos primarios basados en modelos lineales de comportamiento del suelo (Oh y Vanapalli 2011), como el método de la sumatoria de capas recomendado por la norma cubana de diseño geotécnico de cimentaciones superficiales (2007).

La evaluación de los asientos primarios se realiza frecuentemente por los métodos que más se adecuan a las características del perfil ingeniero-geológico y propiedades físico-mecánicas de los estratos de suelo (Pérez de Corcho y Machado 2016). En suelos finos saturados los asientos crecen significativamente para esfuerzos sostenidos en el tiempo. Para evaluar estos asientos se han desarrollado teorías como la de Terzaghi. Cuando el suelo que subyace al cimiento es arcilla, se deben tomar medidas previas para que la edificación no alcance asientos excesivos.

Debido a la consolidación gradual de las arcillas, la compresibilidad de estos estratos ha recibido especial atención durante los últimos años. Recientemente universidades de Suramérica refieren métodos, teorías y herramientas informáticas para estimar la magnitud y distribución de los asientos (Delgado y Quevedo 2008; Díaz y Tomás 2016) para controlar excesivos asentamientos que garantice disminuir riesgos en las cimentaciones.

Actualmente, gracias a los avances tecnológicos, se usan herramientas informáticas para evaluar la consolidación primaria. En 2010, Orozco y Equihua presentaron un artículo que incluye la solución de Boussinesq para una poligonal con esfuerzo uniforme.

Las posibilidades de ampliar la hoja de cálculo mencionada anteriormente son variadas e incluye la evaluación de asientos por consolidación primaria mediante el empleo de las soluciones más simples y prácticas. Para facilitar el uso de estas hojas Excel se muestran ejemplos resueltos y consultas hechas por los usuarios (Orozco y Equihua 2012).

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Se evalúa mediante el libro Excel DISBAL (Álvarez *et al.* 2018) la consolidación primaria debido a presiones impuestas por cimentaciones en balsas, una vez chequeados los estados límites de estabilidad al vuelco del edificio, deslizamiento de la balsa y estabilidad de la base de suelo. Este libro Excel permite comparar asientos primarios por el método clásico considerando el índice de compresibilidad del suelo con los calculados por el método de la sumatoria de capas establecidos en la norma cubana de diseño geotécnico de cimentaciones superficiales. Esta comparación contribuye a precisar las dimensiones de la balsa, evitando daños en las edificaciones o en el servicio que prestan.

En el caso particular del edificio estudiado aporta criterios importantes para definir el número de pisos a construir o para ajustar el proyecto de la

cimentación. Para el chequeo del estado límite de deformación del suelo se resuelven los pasos siguientes:

- A. Método clásico considerando el índice de compresibilidad.
- B. Método de la sumatoria de capas en la norma cubana de cimentaciones superficiales.
- C. Comparación de los asentamientos por ambos procedimientos.

### **2.1. Investigaciones experimentales geotécnicas**

Se asume la hipótesis de que el edificio se ubica en el perfil ingeniero geológico del campo experimental de Ingeniería Civil de la Universidad de Oriente, donde se realizaron las calas por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas de Santiago de Cuba. Las investigaciones experimentales publicadas por Cabrera y Beira (2007) se resumen en las Tablas 1 y 2 y la Figura 1a. La profundidad de desplante se fijó a 2,15 m, asentada sobre el primer estrato resistente (arcilla), con los parámetros físico-mecánicos que aparecen en el perfil de la Figura 1b.

Los estratos hasta 9 m de profundidad son arcillas de alta compresibilidad (CH) que sobreyacen arcillas de baja compresibilidad (CL). El número de golpes promedio por pie (Nspt), obtenido en el ensayo de penetración hasta los 7 m de profundidad, refiere una consistencia dura, siendo muy dura por debajo de esta profundidad. Los índices de compresibilidad del suelo ( $C_c$ ) obtenidos del ensayo de consolidación están entre 0,14 y 0,22 y los de expansividad ( $C_s$ ) entre 0,02 y 0,06.

En la Tabla 3 se muestran los valores de razón de preconsolidación (OCR) hasta 6 m, confirmándose que el suelo se comporta como preconsolidado, con valores de OCR superiores a 1.

### **2.2. Caracterización del edificio utilizado en el estudio**

Edificio público de hormigón armado de 30 m de ancho, 36 m de largo y módulos de 7,20 m x 6 m con puntales de 3,30 m, rigidizado a acciones sísmicas mediante un sistema dual de pórticos y paredes a cortante dúctiles. Su altura es variable, analizándose los asientos primarios para subvariantes entre tres y ocho pisos. Se usa balsa de cimentación y el SAP 2000 NL versión 19 para obtener solicitaciones en el centro de gravedad de la balsa (Figura 1c), exportadas al libro Excel DISBAL.

Se consideran incrementos de las solicitaciones sísmicas por aceleraciones sísmicas verticales del suelo para el chequeo de estabilidad al vuelco,

deslizamiento y estabilidad del suelo y los asentamientos primarios solo para cargas gravitatorias que incluyen las cargas vivas de larga duración.

Tabla 1. Valores promedios de parámetros físico-mecánicos del suelo por cada metro de profundidad (Cabrera y Beira 2007)

Est	z (m)	LL (%)	LP (%)	Nspt (Golpes)	$\omega$ (%)	I <sub>c</sub>	$\gamma_f$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	e <sub>o</sub>	S (%)
R	1	64,5	25,6	15	23,6	1,1	18,3	14,8	26,9	0,70	79,0
R	2	63,1	24,6	22	24,4	1,0	19,3	15,5	26,9	0,62	69,0
R	3	56,5	24,4	16	25,6	1,0	18,6	14,8	26,6	0,72	76,0
1	4	60,3	24,6	29	29,8	0,9	18,5	14,2	26,8	0,72	85,0
1	5	56,9	28,2	21	35,8	0,7	17,8	13,1	26,8	0,92	83,0
1	6	81,7	31,8	20	34,0	1,0	17,8	13,3	26,9	0,84	90,0
1	7	80,3	30,8	21	41,9	0,8	16,8	11,9	27,2	1,29	88,5
2	8	74,3	27,6	23	22,3	1,1	18,2	14,9	27,3	0,84	75,0
2	9	54,2	24,5	22	20,4	1,1	19,6	16,2	27,4	0,69	83,0
3	10	49,4	24,2	58	19,7	1,2	20,3	17,0	27,2	0,60	90,7

**Est.:** estrato      **R:** relleno      **z:** profundidad      **LL:** límite líquido  
**LP:** límite plástico       **$\omega$ :** humedad      **I<sub>c</sub>:** índice de consistencia      **e<sub>o</sub>:** índice de poros  
**S:** saturación

Tabla 2. Módulo edométrico E<sub>m</sub> (kPa) según pruebas de consolidación en el campo experimental de Ingeniería Civil (Cabrera y Beira 2007)

Presión Vertical (kPa)	Módulo edométrico E <sub>m</sub> (kPa)					
	Profundidad (m)					
	1	2	3	4	5	6
200	6 686	8 373	8 924	5 018	3 987	10 766
400	6 434	9 221	9 256	5 555	5 742	11 673
800	9 354	11 328	11 893	7 188	7 765	11 770

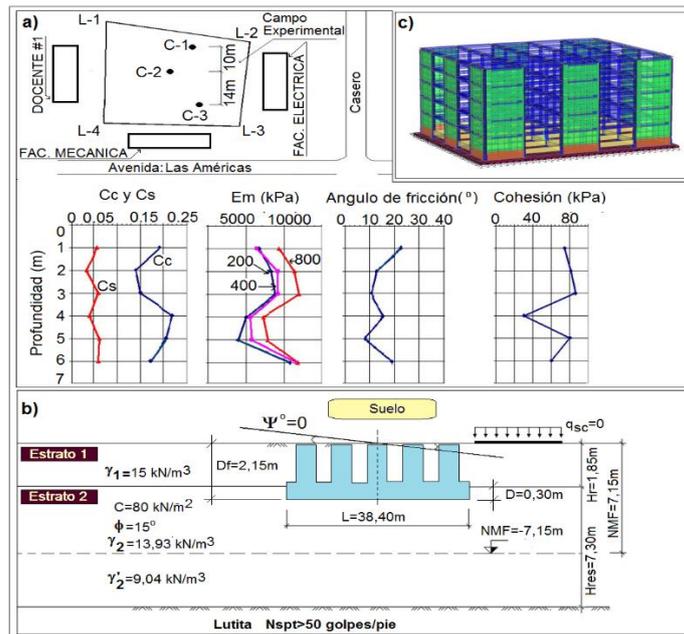


Figura 1. Datos para el diseño geotécnico de la balsa (Cabrera y Beira 2007). a) Parámetros mecánicos del suelo. b) Perfil ingeniero-geológico para el sitio de ubicación del edificio y profundidad de desplante asumida para la balsa de cimentación. c) Modelo estructural. Variante de cinco pisos. SAP 2000 versión 19.

Tabla 3. Razón de preconsolidación del suelo OCR (Cabrera y Beira 2007)

Profundidad (m)	1	2	3	4	5	6
OCR	9,5	4	3,5	2,4	2,12	1,95

### 2.3. Métodos para el cálculo de la consolidación primaria

#### A. Método clásico considerando el índice de compresibilidad

El método clásico para el cálculo de la consolidación primaria, resumido por Braja (2008), se basa en la razón de preconsolidación:

$$OCR = \frac{\sigma_c'}{\sigma_o'} \tag{1}$$

$\sigma_o'$ : Presión vertical efectiva (kPa)

$\sigma_c'$ : Presión de preconsolidación (kPa)

$OCR \leq 1$ : Suelo normalmente consolidado

$OCR > 1$ : Suelo preconsolidado

Para arcillas normalmente consolidadas que muestran una relación  $e - \log \sigma'$  lineal (Figura 2a) (nota:  $\Delta\sigma = \Delta\sigma'$  al final de la consolidación).

$$\Delta e = C_c [\log (+\Delta\sigma') - \log \sigma_o'] \tag{2}$$

$C_c$ : Índice de compresión (pendiente de la gráfica  $e - \log \sigma'_o$ ).

$\Delta e$ : Cambio de la relación de vacíos.

Entonces la consolidación primaria  $S$  se calcula:

$$S = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_o + \Delta \sigma'}{\sigma'_o} \quad (3)$$

$S$ : Consolidación primaria (m)

$H$ : Espesor del estrato (m)

$e_0$ : Relación de vacíos inicial

Para arcillas preconsolidadas (Figura 2b), para  $\sigma'_o + \Delta \sigma' \leq \sigma'_c$ , la variación  $e - \log \sigma'$  en campo será a lo largo de la línea  $cb$ , de la cual la pendiente será aproximadamente igual a la pendiente de la curva de descarga de laboratorio. La pendiente de esta curva es comúnmente utilizada para obtener el coeficiente de expansividad ( $C_s$ ). Luego:

$$\Delta e = C_s [ \log (\sigma'_o + \Delta \sigma') - \log \sigma'_o ] \quad (4)$$

$$S = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_o + \Delta \sigma'}{\sigma'_o} \right) \quad (5)$$

Si  $\sigma'_o + \Delta \sigma' > \sigma'_c$ , entonces:

$$S = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_o + \Delta \sigma'}{\sigma'_c} \quad (6)$$

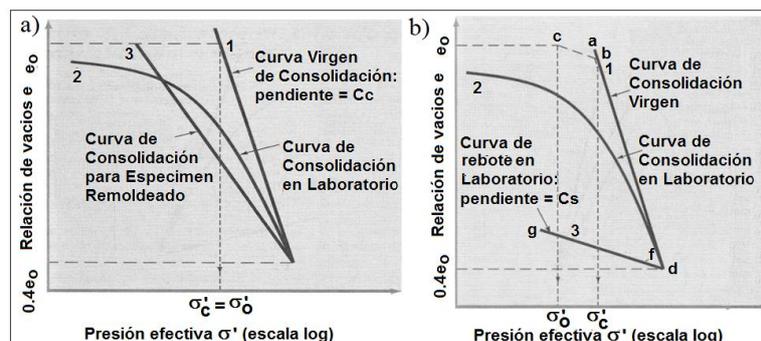


Figura 2. Consolidación primaria de arcillas (Braja 2008). a) Arcilla normalmente consolidada de baja a mediana sensibilidad. b) Arcilla preconsolidada de baja a mediana sensibilidad.

Si la curva  $e - \log \sigma'$  está dada, es posible tomar  $\Delta e$  de la gráfica para el rango apropiado de presiones, el cual puede ser sustituido directamente en la ecuación general para calcular el asentamiento ( $S$ ). El cálculo de asentamientos requiere el ajuste de las curvas de consolidación; un procedimiento reciente derivado de la teoría de Juárez-Badillo es propuesto por Medina y Melis (2003).

## B. Método de la sumatoria de capas en la norma cubana

Este método se usa para cualquier propiedad del suelo y trabaja a partir de una discretización del modelo, mediante un promedio pesado, analizando tres puntos en cada sub-estrato del estrato compresible. Los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Definir potencia activa y dividir en sub-estratos el estrato compresible.

La potencia activa es definida por aquella profundidad en que las tensiones debidas a carga impuesta sean del orden del 20 % de las tensiones efectivas debidas a peso propio del suelo.

- 2) Calcular presión bruta  $P$ , presión neta  $P'$  y factor de influencia  $J_z$  (Quevedo 1994, 1989; citado por Pérez de Corcho y Machado 2016).
- 3) Calcular tensiones por carga impuesta  $\sigma_{zp}'$  y de peso propio  $\sigma_{zg}'$  en la vertical que pasa por los puntos característicos  $P_c$  del cimiento ( $X_{pc} = 0,37 l$ ), para la frontera superior ( $H_{is}$ ), centro ( $H_{ic}$ ) e inferior ( $H_{ii}$ ) de cada estrato.
- 4) Calcular la variación de la deformación unitaria ( $\varepsilon$ ) para los puntos mencionados anteriormente en cada subestrato (Quevedo 1994, 1989 y Broche 1994; citados por Pérez de Corcho y Machado 2016).
- 5) Cálculo de los asientos absolutos para el punto característico:

$$S_i = \sum_{i=1}^{NE} \left[ \frac{H_i}{6} (\varepsilon_{is} + 4\varepsilon_{ic} + \varepsilon_{ii}) \right] \quad (7)$$

$NE$ : Cantidad de subestratos por debajo del nivel de solera para la potencia activa (Ha).

$H_i$ : Espesor del subestrato  $i$ .

$\varepsilon_{is}$ : Variación de la deformación unitaria vertical en un punto de la frontera superior del estrato  $i$ , referida al punto característico.

$\varepsilon_{ic}$ : Igual, pero en el centro del estrato  $i$ .

$\varepsilon_{ii}$ : Igual, pero en la frontera inferior del estrato  $i$ .

En suelos con  $E_0$  como parámetro deformacional.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{zp}'}{E_0} \quad (8)$$

$\sigma_{zp}'$ : Incremento de presión vertical efectiva producido por las cargas impuestas para el punto del suelo donde se evalúa el asiento.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Método clásico considerando el índice de compresibilidad

Los asentamientos absolutos por consolidación primaria se calcularon por el método clásico usando el Libro Excel DISBAL (Tabla 4), a partir de los resultados del ensayo de consolidación a la profundidad de análisis, para las subvariantes entre tres y ocho pisos. Se consideró la presión de preconsolidación estimada de la curva de compresibilidad (Figura 3), la cual se obtuvo de las pruebas de consolidación realizadas a las muestras de suelo que se tomaron en el campo metro a metro hasta la profundidad de 6 m.

Tabla 4. Asentamiento absoluto por el método clásico para la variante de edificio de cinco pisos. Libro Excel DISBAL

Estrato	z (m)	$e_0$	$C_s$	$C_c$	$\sigma'_c$ (kPa)	$J_i$	$\Delta\sigma'$ (kPa)	$\sigma'_o$ (kPa)	S (m)
1	0,0	0,682	0,06	0,2	190	1,000	61,16		
1	0,5	0,682	0,06	0,2	190	0,999	61,12	37,76	0,0149
1	1,0	0,608	0,06	0,2	191	0,996	60,91		
2	1,0	0,608	0,06	0,2	191	0,996	60,91		
2	1,5	0,608	0,06	0,2	191	0,987	60,38	51,29	0,0126
2	2,0	0,710	0,06	0,2	185	0,973	59,48		
3	2,0	0,710	0,06	0,2	185	0,973	59,48		
3	2,5	0,710	0,06	0,2	185	0,952	58,23	64,81	0,0098
3	3,0	0,691	0,06	0,2	187	0,927	56,69		
4	3,0	0,691	0,06	0,2	187	0,927	56,69		
4	3,5	0,691	0,06	0,2	187	0,899	54,96	78,33	0,0082
4	4,0	0,908	0,06	0,2	270	0,868	53,11		
5	4,0	0,908	0,06	0,2	270	0,868	53,11		
5	4,5	0,908	0,06	0,2	270	0,838	51,22	91,86	0,0061
5	5,0	0,828	0,06	0,2	275	0,807	49,34		
6	5,0	0,828	0,06	0,2	275	0,807	49,34		
6	5,5	0,828	0,06	0,2	275	0,777	47,52	103,01	0,0054
6	6,0	0,828	0,06	0,2	275	0,748	45,77		
7	6,0	0,828	0,06	0,2	275	0,748	45,77		
7	6,5	0,828	0,06	0,2	275	0,721	44,12	111,79	0,0047
7	7,0	0,828	0,02	0,2	275	0,696	42,56		

Asiento Absoluto (m) = 0,0617

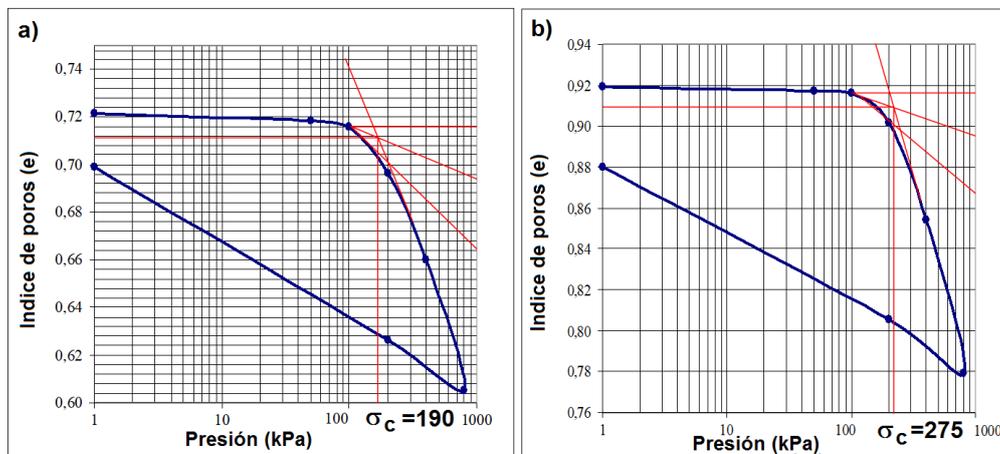


Figura 3. Presión de preconsolidación obtenida de las pruebas de consolidación. Campo experimental de Ingeniería Civil (Cabrera y Beira 2007). a) Profundidad de 3 m. b) Profundidad de 5 m.

Los asentamientos acumulados evaluados por el método clásico para el punto característico (Tabla 4) resultan menores a los del centro de gravedad y punto de esquina de la cimentación, también ofrecidos por el Libro Excel DISBAL. Los asentamientos absolutos acumulados para el centro de gravedad de la cimentación y para los puntos de esquina prácticamente no difieren, debido a que las tensiones impuestas discrepan muy poco con la profundidad para ambos puntos. Esto está muy relacionado con la potencia activa, que resulta de las características ingeniero-geológicas del perfil de suelo seleccionado.

La potencia activa es relativamente pequeña con relación a las dimensiones de la balsa, por lo que los coeficientes de influencia, que determinan la variación de las tensiones impuestas para los puntos mencionados anteriormente varían muy poco con la profundidad. Se aprecia, además, que las tensiones impuestas para las variantes de edificios estudiadas pueden considerarse bajas; nótese que para el punto característico a 2,5 m de profundidad ya están por debajo de las tensiones efectivas del suelo (Tabla 4) que, según las pruebas de consolidación, clasifica como un suelo preconsolidado.

### 3.2. Método de la sumatoria de capas en la norma cubana

Los asentamientos absolutos se calcularon por el método de la sumatoria de capas por el Libro Excel DISBAL (Tabla 5 y Figura 4) para las subvariantes entre tres y ocho pisos, considerando la variación del módulo de deformación del suelo obtenido de ensayos edométricos realizados en el campo metro a metro hasta la profundidad de seis metros.

Los resultados dependen mucho de la estimación del módulo de deformación del suelo, asumidos constantes para cada uno de los substratos. Una buena aproximación ofrecerá resultados aproximados a los del método clásico. Basado en los ensayos edométricos, para los substratos inferiores, se asumen módulos de deformación mayores a aquellos de los substratos superiores (Tabla 5).

Tabla 5. Asentamiento absoluto por el método de la sumatoria de capas para la variante de edificio de cinco pisos. Libro Excel DISBAL

<b>Estrato</b>	<b>E<sub>s</sub> (kPa)</b>	<b>z (m)</b>	<b>z/B</b>	<b>J<sub>i</sub></b>	<b>Δσ (kPa)</b>	<b>ε<sub>i</sub></b>	<b>S (m)</b>
1		0,0	0,0000	1,000	61,15	0,0087	
1	7 000	0,5	0,0154	0,999	61,12	0,0087	0,0087
1		1,0	0,0309	0,996	60,90	0,0087	
2		1,0	0,0309	0,996	60,90	0,0087	
2	7 000	1,5	0,0463	0,987	60,37	0,0086	0,0086
2		2,0	0,0617	0,973	59,47	0,0085	
3		2,0	0,0617	0,973	59,47	0,0085	
3	7 000	2,5	0,0772	0,952	58,22	0,0083	0,0083
3		3,0	0,0926	0,927	56,69	0,0081	
4		3,0	0,0926	0,927	56,69	0,0081	
4	7 000	3,5	0,1080	0,899	54,95	0,0079	0,0078
4		4,0	0,1235	0,868	53,11	0,0076	
5		4,0	0,1235	0,868	53,11	0,0048	
5	11 000	4,5	0,1389	0,838	51,22	0,0047	0,0047
5		5,0	0,1543	0,807	49,34	0,0045	
6		5,0	0,1543	0,807	49,34	0,0045	
6	11 000	5,5	0,1698	0,777	47,52	0,0043	0,0043
6		6,0	0,1852	0,748	45,77	0,0042	
7		6,0	0,1852	0,748	45,77	0,0042	
7	11 000	6,5	0,2006	0,721	44,11	0,0040	0,0040
7		7,0	0,2160	0,696	42,55	0,0039	

Asiento Absoluto (m) = 0,0464

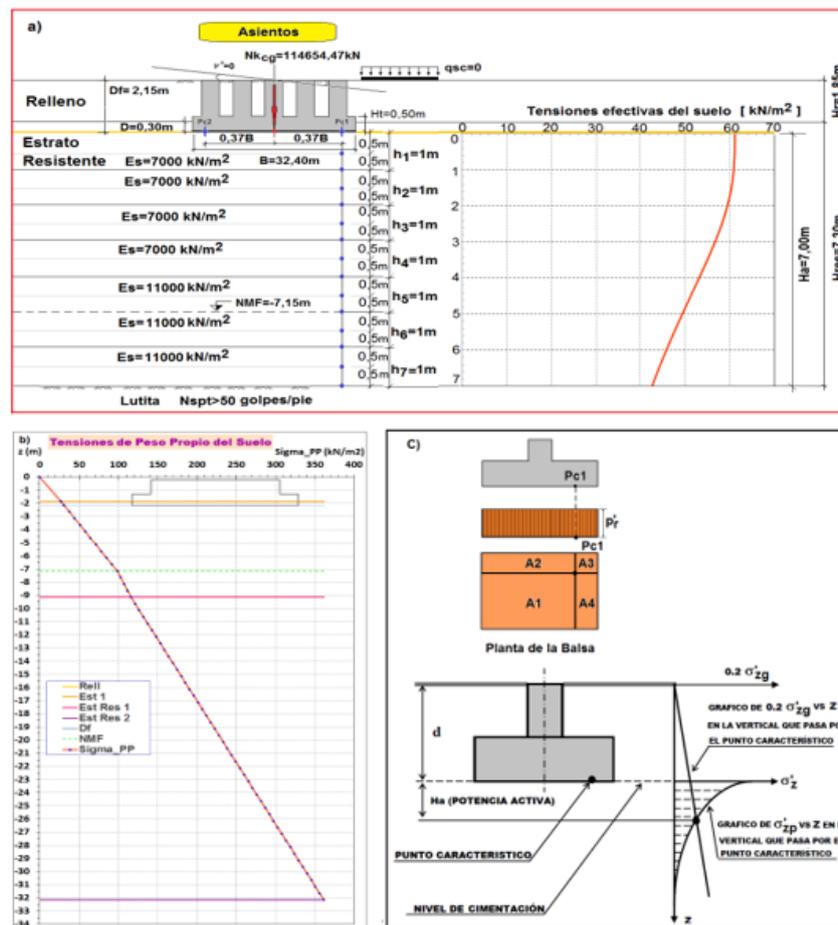


Figura 4. Cálculo de asiento primario. Método de sumatoria de capas. a) Tensiones impuestas del suelo (libro Excel DISBAL). b) Tensiones efectivas de peso propio del suelo (libro Excel DISBAL). c) Profundidad activa del suelo según la norma cubana.

### 3.3. Comparación del chequeo de asientos por ambos métodos

De la evaluación del asiento absoluto acumulado hasta la potencia activa del suelo se resume lo siguiente:

- 1) Los asientos por el método clásico para el centro de gravedad de la balsa y para los puntos de esquina no difieren prácticamente, al divergir poco con la profundidad las tensiones impuestas para ambos puntos. La potencia activa es pequeña con relación a las dimensiones de la balsa, así sus coeficientes de influencia varían poco con la profundidad.
- 2) Los asientos por el método clásico para el punto característico, para el cual se consideran iguales aproximadamente los asientos del cimiento rígido y flexible (Figura 4) son menores a los del centro de gravedad y punto de esquina, ya que sus tensiones impuestas disminuyen más con la profundidad.

- 3) Los asentamientos por el método clásico son mayores a los del simplificado que considera módulo de deformación constante para cada uno de los substratos, siendo los asentamientos primarios acumulados para las variantes entre tres y ocho pisos menores que 8 cm, valor máximo especificado en la norma cubana para el edificio estudiado (Figura 5a). Según el método clásico se cumple el asiento primario total hasta la variante de siete pisos. Para el edificio de ocho pisos no cumple aunque la diferencia es relativamente pequeña para fines prácticos (Figura 5b).
- 4) Considerar módulos de deformación constantes para calcular la consolidación primaria sugerida por la norma cubana pudiera ofrecer asentamientos absolutos menores que aquellos obtenidos con el índice de compresibilidad y expansividad, aspecto este a considerar por el proyectista en el chequeo del estado límite por deformación (Figura 5).
- 5) Para las variantes estudiadas los asentamientos absolutos por ambos métodos muestran una variación aproximadamente lineal con el incremento del número de pisos. Esto se justifica por el incremento lineal de las cargas con el número de pisos, de lo cual resultan bajas tensiones impuestas. Estas tensiones, además, quedan siempre por debajo de la tensión de linealidad del suelo debido, fundamentalmente, a las dimensiones de la balsa de cimentación.

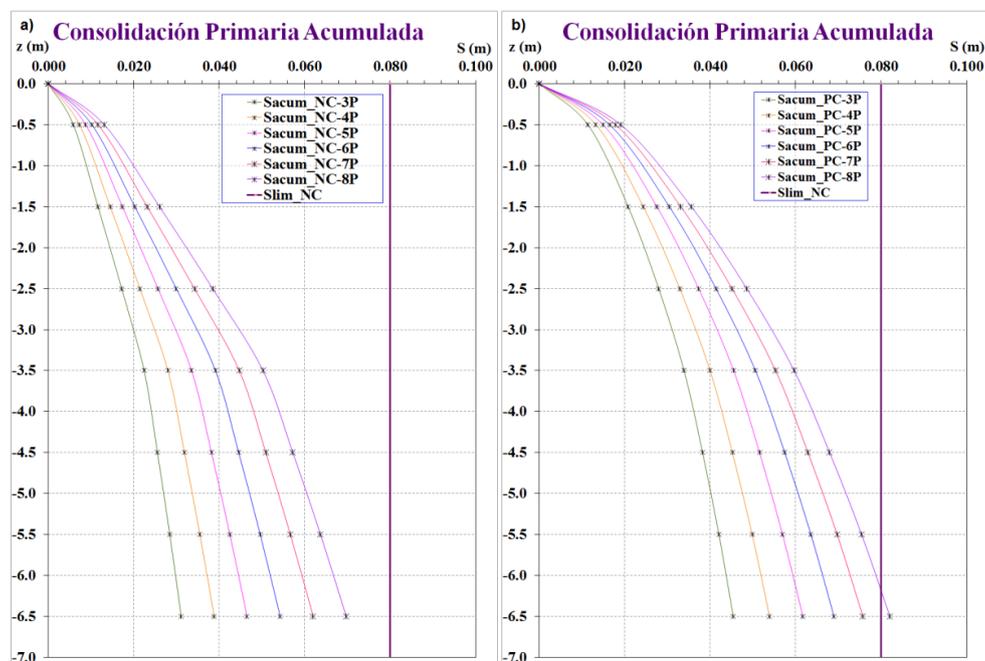


Figura 5. Comparación de la consolidación primaria para la variante de edificio estudiada para un número de pisos variable entre tres y ocho pisos. a) Método de la sumatoria de capas. Libro Excel DISBAL. b) Método clásico. Libro Excel DISBAL.

#### 4. CONCLUSIONES

- Para estudios de suelo basados en calas y pruebas experimentales que caractericen tenso-deformacionalmente el suelo, el libro Excel DISBAL permite una valoración más completa de la consolidación primaria pues posibilita comparar resultados del método clásico con los del método de la sumatoria de capas, en la norma cubana.
- Para el caso de estudio este software proporciona una adecuada valoración del estado límite por deformación del suelo por ambos métodos, para cualquier modelo de edificio, lo cual agiliza los resultados de proyecto.
- La comparación de los resultados del procedimiento clásico, mediante el empleo del índice de compresibilidad para el cálculo de asentamientos primarios y el procedimiento de la norma cubana, confirma la necesidad de exigentes estudios de suelo, con vistas a la racionalización del diseño de las cimentaciones en balsas.

#### 5. REFERENCIAS

- Álvarez, E. R.; Beira, E.; Cabrera, P. M. y Reyes, O. 2018: Comparación de métodos geotécnicos para la evaluación de la consolidación primaria por cimentaciones en balsa. En: Primera Convención Internacional Ciencia y Conciencia de la Universidad de Oriente. Memorias. Santiago de Cuba, Cuba, 23-26 abril.
- Braja, M. D. 2008: *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. La Habana: Félix Varela. 594 p.
- Cabrera, P. y Beira, E. 2007: Caracterización geotécnica del campo experimental de ingeniería civil de la Universidad de Oriente. *Revista Académica de la FI-UADY*, 11(2): 57-66. ISSN: 1665-529X.
- Chagoyén, E. y Negrín, A. 2009: Diseño óptimo de cimentaciones superficiales rectangulares. Formulación. *Revista de la Construcción*, 8(2): 60-71.
- Delgado, D. y Quevedo, 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): 21-29. ISSN: 1665-529X.
- Díaz, E. y Tomás, R. 2016: Cálculo del asiento elástico tridimensional de cimentaciones de rigidez variable en terrenos con una capa rígida inclinada. *Informes de la Construcción*, 68(542): e144.
- Medina, L. y Melis, M. 2003: Determinación de los parámetros del modelo de estado crítico Cam Clay para suelos de Madrid. *Revista de Obras Públicas*, 3(432): 29-45.

- Norma Cubana NC 1 para el Diseño Geotécnico de Cimentaciones Superficiales. 2007: La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- Oh, W. T. y Vanapalli, S. K. 2011: Modeling the applied vertical stress and settlement relationship of shallow foundations in saturated and unsaturated sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(3): 425-438.
- Orozco, M. y Equihua, L. N. 2012: Utilización de la hoja de cálculo: cálculo, esfuerzos, subsuelos. En: XVII Reunión Nacional de Profesores de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Memorias. Cancún, Quintana Roo, México. Consulta: 12/04/2018. Disponible en: [http://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1\\_Reunion.../1.../A2ORCM\\_1](http://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1_Reunion.../1.../A2ORCM_1).
- Orozco-Calderón, M. y Equihua-Anguiano, L. N. 2010: Fórmulas de Boussinesq para un triángulo rectángulo y programación de la solución de Damy y Casales en hoja de cálculo. En: XVI Reunión Nacional de Profesores de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Memorias. Acapulco, Guerrero, México, Vol. 1: 31-36.
- Pérez de Corcho, Y. y Machado, A. 2016: Estudio de los métodos de cálculo de asentamientos con comportamiento lineal en la base de las cimentaciones superficiales en suelos saturados. *Universidad & Ciencia*, 5(1): 59-72. Consulta: 18/05/2017. Disponible en: <http://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/viewFile/234/124>.

Recibido: 30/05/2018

Aceptado: 12/04/2019