

Aplicación y validación de una metodología integral para la evaluación de la expansividad de suelos arcillosos

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

Fecha de recepción: 22 de agosto de 2007 – Fecha de aceptación: 11 de diciembre de 2008

RESUMEN

Aunque el tema de los suelos expansivos es muy tratado en la literatura internacional, pocos autores han realizado propuestas metodológicas para la evaluación integral del fenómeno. El propósito del trabajo es sugerir una metodología que sirva de guía para la evaluación de la expansividad de los suelos de forma integral. Esta metodología comprende una serie de tareas que se cumplen en las diferentes etapas de investigación: la identificación y clasificación del problema de la expansividad, la determinación del espesor de la capa activa, la cuantificación de las características de expansión, el cálculo del levantamiento y, por último, la elección de la solución.

Palabras clave: arcillas expansivas, suelos expansivos, investigaciones geotécnicas

Application and validation of an integral methodology for the evaluation of expansive clayey soils

ABSTRACT

Although the expansive soils have been widely studied by different authors, just a few have made methodological proposals to comprehensively evaluate this phenomenon. The aim of this paper is to suggest a methodology which will serve as guideline to evaluate soil expansiveness in a comprehensive way. This methodology comprises a series of tasks: identification and classification of potentially expansive soils, estimation of the active zone depth, quantification of the expansion, calculation of heave and choice of a solution.

Keywords: clay expansiveness, expansive soil, geotechnical investigation

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

El problema de los suelos expansivos existe prácticamente en todas partes del mundo (Jiménez Salas et al., 1981 y Das, 2000) y Cuba no está exenta del mismo (Monzón, 1976 y Delgado y Quevedo, 2002). Sus resultados, es decir, el levantamiento, rotura y daño de pavimentos, edificaciones ligeras, revestimientos de canales y embalses ocasionan cuantiosas pérdidas.

El volumen de investigaciones y publicaciones sobre este tema en Cuba es desproporcionalmente bajo con relación a los problemas y dificultades creados en obras cimentadas sobre dichos suelos. Dada la importancia de los fenómenos propios de las arcillas expansivas en el país, se realizó este trabajo, que tuvo como objetivo aplicar una metodología integral para la evaluación de la expansividad de los suelos arcillosos que permite la identificación del problema, su cuantificación y selección de la solución.

La metodología aplicada para la evaluación de la expansividad puede ser resumida en las siguientes tareas:

1. **Identificación y clasificación del problema.** Se debe determinar si el suelo potencialmente expansivo existe o no. Si existe, ¿cuál es el grado de atención que necesita?
2. **Determinación del espesor de la capa activa.** Se analiza el perfil dinámico de succiones y las variaciones previsibles de humedad en los suelos expansivos.
3. **Cuantificación de los índices del hinchamiento.** Si los suelos son lo suficientemente propensos al cambio de volumen. ¿Cuál es el valor numérico más racional de sus propiedades deformacionales?
4. **Cálculo del levantamiento de la capa activa.** ¿Cuál es el movimiento vertical que se debe esperar?
5. **Elección de la solución y cálculo de la misma.** Se deben evaluar y comparar las diferentes alternativas de diseño.

Se debe destacar que, en la metodología aplicada para la evaluación de la expansividad, se parte del criterio de que los cambios de volumen se producen como consecuencia de la variación de la presión efectiva del suelo, ya sea por causas externas o internas. Desde este punto de vista, la naturaleza expansiva de los suelos, dada fundamentalmente por el contenido de minerales arcillosos de estructura laminar expansiva, es una condición necesaria pero no suficiente para que el fenómeno ocurra.

Valoración de los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología. Caso de estudio: poblado Crecencio Valdés. La zona de estudio se encuentra ubicada en la llanura costera norte de la región central de Cuba (Municipio Camajuaní, Provincia Villa Clara), a solo unos 8 km de la costa norte y aproximadamente a 1 km de la margen derecha del río Sagua la Chica. (Figura 1)

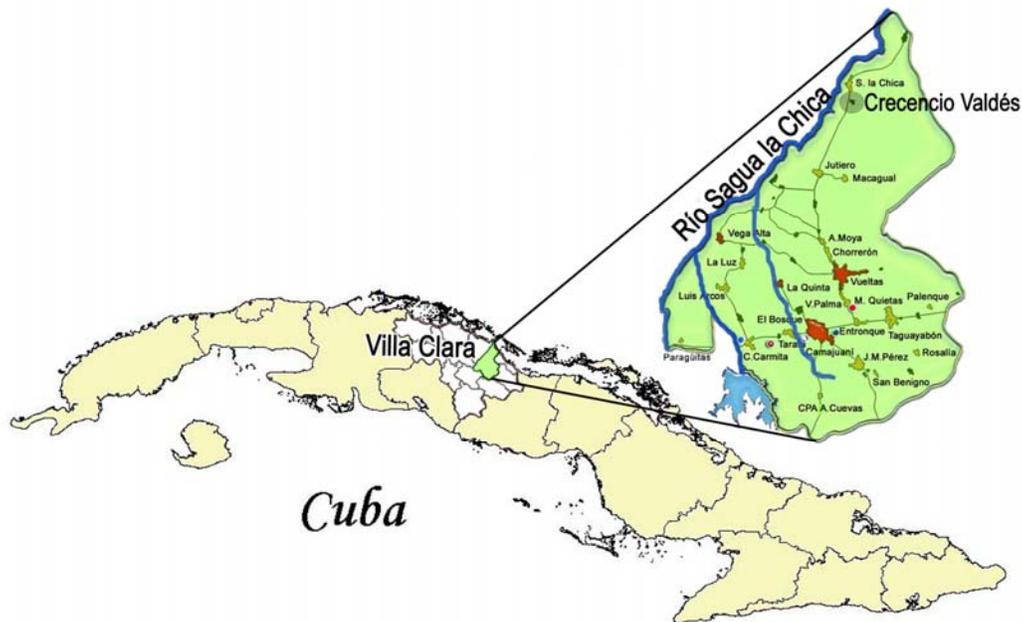


Figura 1. Ubicación del poblado Crecencio Valdés

Las investigaciones se realizaron con el objetivo de valorar la expansividad de los suelos para la construcción de una guardería infantil y una escuela en el área del poblado Crecencio Valdés (Delgado y Quevedo 2002). Estas investigaciones se cumplieron en dos etapas, una de investigación preliminar y otra de investigación detallada. En la primera etapa se dio cumplimiento a las tareas 1 y 2, mientras que a las tareas 3 y 4 se da cumplimiento en la segunda etapa de investigación. A la tarea 5 debe dársele cumplimiento en una etapa de proyecto.

En esta etapa se recopila la información geológico-geotécnica general que se requiere analizar para que el proyectista valore la conveniencia técnico-económica preliminar del emplazamiento. La información se basa en datos obtenidos de investigaciones preexistentes y los planos topográficos, además de un mínimo de trabajos de campo, principalmente de reconocimiento, y dirigidos a la determinación de las propiedades físicas y la clasificación de los suelos, entre otros aspectos. El perfil geotécnico del suelo en el área es de vital importancia y se muestra de forma esquemática en la Figura 2.

METODOLOGÍA

Investigaciones geotécnicas. Etapa preliminar

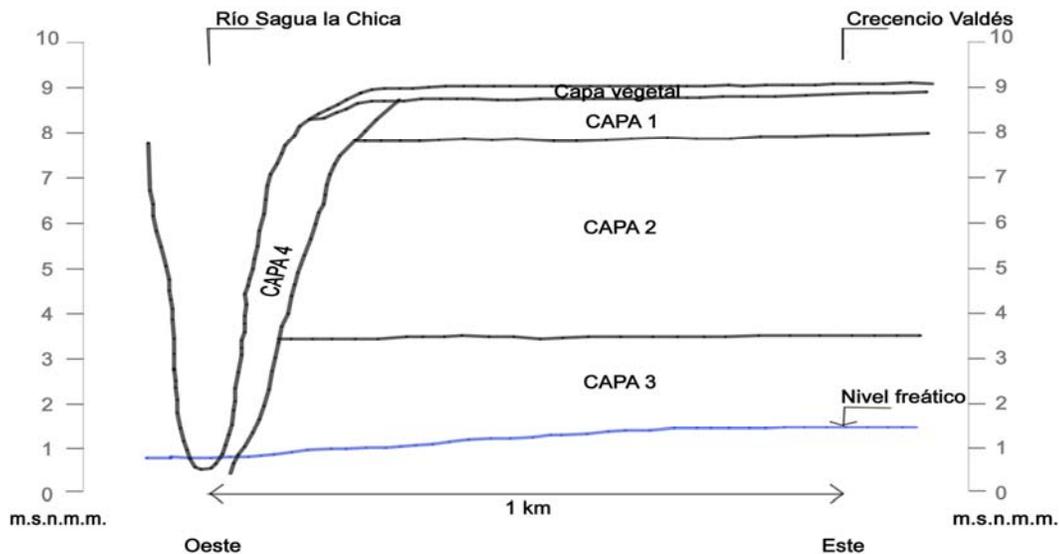


Figura 2. Perfil geotécnico esquemático del área de estudio

En la zona del poblado de Crecencio Valdés las características geotécnicas más importantes se describen a continuación:

- | | |
|--------------|---|
| 0,0 - 0,25 m | Capa vegetal. Material arcilloso con gran contenido de materia orgánica, de color negruzco. |
| 0,25 – 1,0 m | Arcilla muy plástica poco arenosa, de color pardo negruzca, desprovista de gravas y de origen eluvial - deluvial. Clasificación por el S.U.C.S: CH (capa 1). |
| 1,0 – 5,5 m | Arcillas plásticas arenosas, de color pardo a pardo amarillento, con algunas gravitas y nódulos de carbonato de la Formación Camacho. Clasificación por el S.U.C.S: CH-MH (capa 2). |
| > 5,5m | Calizas y dolomitas del Grupo Remedios. Profundidad del nivel freático: 7,50 m (capa 3). |
- Nota: En la zona del río Sagua la Chica aparecen suelos de origen aluvial representados en el perfil geotécnico como capa 4.

Identificación y clasificación del problema de expansividad

El primer paso, que resulta de vital importancia, fue la observación, durante la cual se detectó la presencia de arcillas de plasticidad media o alta, un relieve llano, un clima con un período seco y otro húmedo y el nivel freático relativamente profundo. Estas características indican, en su conjunto, la existencia de suelos expansivos, pero a este nivel de observación no se puede asegurar si son activos o no.

A esto se suma la detección del agrietamiento superficial al finalizar el período seco con grietas de hasta 60 cm de profundidad y separación máxima de 4 – 5 cm, lo cual fue un claro indicio del grado de expansividad del suelo al rehidratarse.

Finalmente, el reconocimiento de las construcciones en el poblado, donde aproximadamente el 75% de las viviendas (de mampostería 200) presentaban daños moderados o ligeros, y las noticias recibidas de los ocupantes bastaron para concluir que existen problemas de expansividad.

El segundo paso es considerar los resultados de los ensayos físicos como indicadores de expansividad. La presencia de dos suelos finos con contenido de arcilla entre 40,5 y 22%, humedades naturales bajas a

medias principalmente en la superficie, plasticidad de baja a alta y clasificación por el S.U.C.S. como CH y CH-MH, respectivamente, son indicadores de expansividad. A partir de información de archivos se supo que las arcillas son del grupo de las esmectitas y que la capacidad total de intercambio catiónico es mayor que 53 m.e./100g, lo cual garantiza la potencialidad a la expansión.

Una vez constatada la potencialidad a la expansión del suelo se debe proceder a la identificación y clasificación usando algún método conocido. En este caso se empleó un método diseñado teniendo en cuenta las características de los suelos cubanos. Para la elaboración del método se procesó una base de datos de 76 suelos superficiales expansivos detalladamente caracterizados en investigaciones anteriores. Los índices de hinchamiento del suelo, humedad de equilibrio o final (wf, %), hinchamiento libre (hl, %) e hinchamiento controlado (hc, kg/cm²), se obtienen a partir de la humedad natural (wn, %), el límite líquido (w_{LL}, %), el porcentaje de arcilla (A), el índice de consistencia (Ic) y la densidad seca (γ_d, g/cm³). En la tabla 1 se brindan las ecuaciones de regresión obtenidas para predecir los índices de hinchamiento del suelo.

Tabla 1. Ecuaciones de regresión

Nº	Ecuación de regresión	unidad
1	$wf = 0,92 wn + 16,29$	%
2	$wf = 0,51 w_{LL} + 8,85$	%
3	$\log hl = 0,54 \log A + 0,67 Ic - 0,39$	%
4	$hl = 25 \gamma_d + 14,3 Ic - 38$	%
5	$\log hc = 1,21 \log hl - 1,31$	kg/cm ²

Las ecuaciones de predicción obtenidas, aunque permiten una valoración cuantitativa de los índices de hinchamiento, solo se utilizan en etapas preliminares de investigación para clasificar la magnitud relativa

del cambio de volumen. Con este fin se recomienda la siguiente clasificación (Tabla 2). Al aplicar el método propuesto se concluyó que las capas 1 y 2 clasifican como medias según su grado de expansión (tabla 3).

Tabla 2. Clasificación del grado de expansión

h _i (%)	h _c (kPa)	Grado de expansión
<4	<25	nulo
4 - 10	25 - 80	bajo
10 - 22	80 - 200	medio
> 22	> 200	alto

Tabla 3. Clasificación de los suelos según grado de expansión

suelo	wf (%)	hl (%)	hc (kPa)	Grado de expansión
Capa 1	41,0	15 - 17	130	medio

Capa 2	36,6	10 - 11	85	medio
---------------	------	---------	----	-------

Se puede decir que mediante la observación, los ensayos físicos y el método aplicado se pudo llegar a un juicio acertado sobre el problema existente y el grado de atención que necesita.

Determinación del espesor de la capa activa

El espesor de capa activa se determinó a partir de la relación entre la humedad natural (wn) y el límite

plástico (w_{LP}) versus profundidad (Z), y el índice de consistencia (I_c) y el índice de fluidez (I_L) versus profundidad. La toma de muestras se realizó al finalizar el período seco y los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Relación de la profundidad con los índices w_n/w_{LP} , I_L y I_c

Profundidad (m)	Índices			
	wn (%)	wn / w _{LP}	$I_L = \frac{wn - w_{LP}}{IP}$	$I_c = \frac{w_{LL} - wn}{IP}$
Capa 1 ($w_{LL}= 66,1\%$ y $w_{LP} = 32,8\%$)				
0,2 – 0,3	24,28	0,74	-0,25	1,25
0,4 – 0,6	25,63	0,78	-0,21	1,21
0,6 – 0,8	25,21	0,77	-0,22	1,22
0,8 – 1,0	24,97	0,76	-0,23	1,23
1,0 – 1,2	24,22	0,74	-0,26	1,26
Capa 2 ($w_{LL}= 54,6\%$ y $w_{LP} = 27,4\%$)				
1,2 – 1,4	25,28	0,92	-0,08	1,08
1,6 – 1,8	25,47	0,93	-0,07	1,07
2,0 – 2,2	27,22	0,99	-0,01	1,01
2,4 – 2,6	27,61	1,01	0,01	1,01
3,0 – 3,2	29,59	1,08	0,08	0,92
3,4 – 3,5	30,63	1,12	0,12	0,88
3,6 – 3,7	30,99	1,13	0,13	0,87
3,8 – 3,9	33,19	1,21	0,21	0,79
4,0 – 4,1	34,59	1,26	0,26	0,74
4,2 – 4,3	33,43	1,22	0,22	0,78

Los resultados obtenidos demuestran que todo el espesor de la capa 1 se corresponde con la zona activa y que en la capa 2 la capa activa alcanza 2,5 m. Los índices analizados indican por sí solos un déficit de humedad en el suelo ($w_n/w_{LP}<1,0$; $I_L < 0$ y $I_c > 1$), o sea, la humedad natural del suelo se encuentra muy por debajo de la humedad de equilibrio hasta una profundidad de 2,5 m, donde comienza a estabilizarse el perfil de succiones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Investigaciones geotécnicas.

En esta etapa se obtienen los resultados que permiten realizar el proyecto ejecutivo de la obra, por lo que la información final tuvo carácter definitivo y máxima precisión. Los resultados se obtuvieron mediante el empleo de un conjunto de métodos de investigación. La toma de muestras también se realizó a finales del período seco y se realizaron los ensayos planificados

para la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos en el área de estudio.

Cuantificación de las características de expansión

Los ensayos que con carácter especial se realizaron para la determinación de los índices de hinchamiento son los siguientes: edómetro simple modificado (Ralph y Magor, 1972), edómetro a volumen constante (Sullivan y McClelland, 1969) y la interpretación conjunta de estos ensayos como si se tratara del edómetro con muestras dobles inundadas (Holtz, 1970). La cantidad mínima de ensayos fue 4. Los resultados finales obtenidos para el ensayo edométrico simple modificado aparecen en la tabla 5, de igual forma los resultados del ensayo edométrico a volumen constante aparecen en la tabla 6. Los valores de hinchamiento libre (hl) que se muestran en las tablas son para la sobrecarga de tierras y los de hinchamiento probable (h_{prob}) son para una presión actuante de 35 KPa.

Tabla 5. Interpretación de los resultados del edómetro simple modificado

Capa	Índices			
	hl (%)	h _{prob} (%)	wf (%)	hc (kPa)
1	14,0	4,8	39,21	142
2	11,9	3,1	36,89	84

Tabla 6. Interpretación de los resultados del edómetro a volumen constante

Capa	Índices			
	hl (%)	h _{prob} (%)	wf (%)	hc (kPa)
1	12,4	3,5	37,69	150
2	10,2	2,1	34,90	90

El ensayo edométrico con muestras dobles inundadas no se realizó, pero sí la interpretación conjunta del ensayo edométrico simple modificado y del ensayo edométrico a volumen constante como si se tratara del ensayo propuesto por Holtz (1970). Para esto solo fue necesario que los ensayos se realizaran con la misma muestra. En la tabla 7 aparecen los resultados obtenidos para la curva C, que es la curva de

interpolación media que pasa por el valor de la presión de hinchamiento obtenida en el ensayo edométrico a volumen constante y el hinchamiento libre obtenido en el ensayo edométrico simple modificado. Esta curva representa la estimación del cambio de volumen para muestras cargadas, con presiones intermedias e inundadas, según el ensayo de muestras dobles inundadas.

Tabla 7. Interpretación de los resultados del ensayo edométrico con muestras dobles inundadas

Capa	Índices			
	hl (%)	h _{prob} (%)	wf (%)	hc (kPa)
1	14,0	4,1	39,09	150
2	11,9	2,6	36,03	90

Los resultados obtenidos de hl (12-14 %) y hc (90-150 kPa) guardan una excelente correspondencia con los pronosticados en la tabla 3.

Cálculo del levantamiento de la capa activa

Una vez cuantificadas las características de expansión del suelo con los resultados de los ensayos edométricos con inundación que fueron realizados, se calculó el levantamiento de la capa activa. El método de cálculo empleado utiliza los resultados de los ensayos edométricos realizados, recomendándose el

de muestras dobles inundadas, y la capa activa se discretizó por el método de sumatoria de capas. Los cálculos se realizaron para una profundidad de cimentación de 0,8 m, una cimentación corrida de (4 x 0,4) m, una presión actuante de 35 kPa y el espesor de la capa activa (H_a) de 1,7 m. Los resultados obtenidos aparecen en la tabla 8. Los valores de h_{prob} y Δe que se brindan en la tabla son los correspondientes a las presiones actuantes en el nivel de cimentación.

Tabla 8. Levantamiento del estimado de la capa activa

Ensayos	Parámetros y cálculo del levantamiento		
	h _{prob} (%)	Δe	Método de cálculo propuesto $h = \sum \frac{\Delta e}{1 + e_0} \cdot H_a$ (cm)
Edómetro simple modificado	4,8 3,1	0,091 0,064	2,61
Edómetro a volumen constante	3,5 2,1	0,066 0,044	

Edómetro con muestras dobles inundadas	4,1	0,078	2,19
	2,6	0,055	

El empleo de los resultados del ensayo edométrico con muestras dobles inundadas y el método de cálculo del levantamiento de la capa activa utilizado permitió obtener evaluaciones más realistas del fenómeno ($S_{cál} = 2,19$ cm). De no contar con los resultados del ensayo edométrico con muestras dobles inundadas, en su defecto se debe emplear el edómetro a volumen constante.

Elección de la solución y cálculo de la misma

Después de calculado el levantamiento de la capa activa del suelo y su dependencia de las presiones que actúan sobre este, el proyectista está en condiciones de analizar las diferentes alternativas de diseño y elegir la solución de cimentación.

El análisis de las alternativas de proyecto debe comenzar con la comparación de los levantamientos calculados ($S_{cál}$) y la distorsión angular ($tg p$) con los valores límites. Los valores límites permisibles fueron obtenidos según Quevedo et al. (2001), reduciéndolos según las recomendaciones de la SNIP (1983). La profundidad de cimentación se incrementó hasta que se cumplieran los levantamientos permisibles. Además, la distorsión angular cumple la especificación fijada, debido a la homogeneidad del perfil de suelo, a que las cargas actuantes son similares, a que las longitudes de las cimentaciones corridas son pequeñas y a que se proyectaron medidas de protección contra el humedecimiento de la capa activa. Estas condiciones, unidas a la profundidad elegida de cimentación, garantizan valores bajos de distorsión angular. En la tabla 9 se muestran los resultados.

Tabla 9. Comparación de las deformaciones permisibles

Valores de cálculo		Valores límites	
$S_{cál}$ (cm)	tg p	S_{perm} (cm)	tg p
2,19	< 0,0001	$10(0,25) = 2,50$	$0,002(0,5) = 0,001$

Se comprueba que la obra cumple con las deformaciones límites, pero los elementos más ligeros colocados directamente sobre el suelo expansivo pueden ser afectados por los levantamientos, por lo que se decide actuar sobre el terreno para evitar daños a estos elementos y evitar la distorsión angular.

El cambio más importante al proyecto original fue la solución de cimentación corrida, pues se aumentó su profundidad en 0,2 m (0,8 m total). El ancho de la cimentación corrida se redujo de 0,60 a 0,45 m y en la zapata se colocó piedra (rajón) compactada con un espesor de 0,5 m. Además, la excavación se realizó de forma rápida y protegida de la desecación y se colocó un colchón de arena y grava de 0,2 m de espesor en toda el área de la obra. En la estructura se colocaron vigas de tranque de hormigón armado sobre las paredes de bloques para rigidizarlas y se reforzaron las paredes en los puntos de concentración de esfuerzos. Otras medidas fueron la construcción de una acera perimetral de hormigón asfáltico, del mismo ancho de la zona activa (o sea, 2,5 m), la sustitución del patio central con áreas verdes, que aparecía en el proyecto original, por uno revestido y soluciones de drenaje adicionales que incluyeron la elección de una segunda variante de ubicación de la obra en cotas más altas. Además, se decidió utilizar tuberías y conexiones flexibles con soterrado

profundo (0,8 m) para alejarlas de la zona de mayores cambios volumétricos.

Se tomaron medidas adicionales como alejar la construcción de los árboles, prohibir su siembra hasta distancias iguales a 1,5 veces de altura del árbol adulto y eliminar los jardines para evitar diferencias de humedades, además de alejar los desagües que se colocaron a una distancia mayor de 20 m de la edificación.

CONCLUSIONES

- La evaluación de la expansión de un suelo implica la realización de una serie de tareas que se deben llevar a cabo por etapas, las cuales pueden unirse o separarse, pero deben ser inviolables. En el caso de estudio analizado se obtienen resultados satisfactorios al aplicar la metodología propuesta.
- El análisis conjunto de las diferentes propiedades físicas del suelo es un indicador razonable de la expansión, por lo que la aplicación del método de identificación y clasificación propuesto en la metodología brinda muy buenos resultados.
- Con el ensayo edométrico simple modificado, el ensayo edométrico a volumen constante y el

ensayo edométrico con muestras dobles inundadas se resuelve gran parte del problema de la evaluación de la expansividad. Los resultados de estas técnicas de ensayo permiten analizar la influencia de las diferentes secuencias de aplicación de la carga (historial de tensiones) y del proceso de humectación, por lo que se puede contar con aproximaciones más realistas de las condiciones de montaje y trabajo de las cimentaciones sobre los suelos estudiados.

- El cálculo del levantamiento de la capa activa, a partir de ensayos edométricos con inundación y la discretización de la capa activa por el método de sumatoria de capas, permite obtener evaluaciones más realistas.
- Los resultados de la investigación demuestran que la metodología propuesta es apropiada para el estudio de los suelos expansivos cubanos y es lo suficientemente precisa y flexible como para que se generalice a otras regiones.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- DAS, B. M. (2000). *Principios de la ingeniería de cimentaciones*. Cimentaciones sobre suelos difíciles. México: International Thompson Editores. 4ta edición. 862 p.
- DELGADO, D. y QUEVEDO, G. (2002). “Aplicación de una metodología para la evaluación de la expansividad de los suelos arcillosos” 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.
- HOLTZ, W.G. (1970). “Suggested Method of Test for One Dimensional Expansion and Uplift Pressure of Clay Soils”, *Special Technical Publication 479*, Philadelphia, American Society for Testing and Materials.
- JIMÉNEZ SALAS, J. A. ET AL. (1981). *Geotecnia y cimientos III. Cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia*. Primera parte. Madrid: Editorial Rueda. 2da edición. 2 tomos. 2104 p.
- MONZÓN, V. (1976). “Suelos Expansivos” en *Voluntad Hidráulica*, La Habana, Vol.40 (diciembre), 1976, pp.13-27.
- 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.
- RALPH, T.K. y MAGOR, N. (1972). “The Prediction of Heave from Laboratory Test”, *South African Building Institute Bulletin*, N° 8, pp. 23-34.
- SNIP-2.02.01. (1983). “Bases de edificios y construcciones”. Moscú: Gostroi (en ruso)
- SULLIVAN, R.A. y MCCLELLAND, B. (1969). “Predicting Heave of Buildings on Unsaturated Clay”, en *2nd International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils*, Texas, pp. 404-420.

Delgado Martínez, D. y Quevedo Sotolongo, G. (2009). **Aplicación y validación de una metodología integral para la evaluación de la expansividad de suelos arcillosos.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-1, pp. 5-12, ISSN: 1665-529X