

## Comparación de asentamientos por métodos geodésicos y la modelación determinística

Dr. C. Luis Enrique Acosta González<sup>1</sup>, Ing. Eddy Fernández Ochoa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Holguín, Cuba: luis.acosta@uho.edu.cu, <sup>2</sup>Universidad de Holguín: efochoa@uho.edu.cu

### RESUMEN

En el trabajo se aborda la problemática de la necesidad de la actualización de los valores admisibles de las deformaciones a partir de un análisis comparativo de los asentamientos determinados por métodos directos (geodésicos) en condiciones de campo, con los desplazamientos obtenidos por métodos numéricos "modelación determinística" y los establecidos en la Norma Cubana para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales "NC1: 2007". Para el análisis se seleccionó como caso de estudio una cimentación superficial de un depósito de combustible, tomando como patrón las mediciones geodésicas realizadas durante la prueba de la carga de agua; la modelación de los asentamientos se realizó con el módulo SIGMA/W del software GeoStudio 2012. La comparación se realiza con respecto al asiento máximo absoluto, para diferentes intervalos de tiempo y escalones de carga. La investigación aporta una valiosa información sobre las deformaciones límites para este tipo de estructura y para el control de obras durante las diferentes fases del proceso inversionista, observándose coincidencia entre los asentamientos medidos y los determinados por la modelación, los cuales difieren significativamente de los valores permisibles fijados en la Norma cubana. Los resultados posibilitan el perfeccionamiento de los métodos de cálculo y diseño de cimentaciones basados en el estado límite de deformación, así como alertar sobre la seguridad operacional de este tipo de obra en la industria cubana. La utilización del método geodésico permite calibrar los parámetros del software y ajustar las normas para de diseño de cimentaciones.

PALABRAS CLAVE: Cimentación, valores límites, prueba de carga de agua, deformación, asentamientos.

### Comparison of settlements by geodesic methods and the deterministic modeling

#### ABSTRACT

In the work the problem of the necessity of the upgrade of the allowable values of the deformations is approached starting from a comparative analysis of the settlements determined by direct methods (geodesic) under field conditions, with the displacements obtained by numeric methods "deterministic modeling" and the established ones in the Norma Cuban for the geotechnical design of shallow foundations "NC1: 2007". For the analysis it was selected like case of study a superficial foundation of a deposit of fuel, taking as pattern the geodesic measurements carried out during the water loading test; the modeling of the settlements was carried out with the module SIGMA/W of the software GeoStudio 2012. The comparison is carried out with regard to the maximum absolute settlement, for different intervals of time and load steps. The investigation contributes valuable information on the deformations limits for this structure type and for the control of works during the different phases of the process investor, being observed coincidence between the measured settlements and the determined for the modeling, which differ significantly of the allowable values fixed in the standard Cuban. The results facilitate the improvement of the calculation methods and design of foundations based on the state limit of deformation, as well as to alert about the operational security of this work type in the Cuban industry. The utilization of the geodesic method allows to calibrate the parameters of the software and to adjust the norms for of design of foundations.

**KEYWORDS:** Foundation, limiting values, water loading test, deformation, settlements.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Las cimentaciones constituyen el sustento para la estabilidad de las obras y se diseñan fijando parámetros con ciertos valores límites para resistir las deformaciones, pero en la práctica

se construye en lugares complejos y los fenómenos (naturales y artificiales) provocan un comportamiento del suelo que difiere de las condiciones previstas en la investigación y ensayos de laboratorio (González 2001). De

esta forma se afecta la seguridad operacional, debido a que las particularidades estructurales y la interrelación tecnológica de las unidades industriales que integran las fábricas modernas y las edificaciones requieren tolerancias mínimas en las deformaciones (asentamientos y desplazamientos horizontales) para su funcionamiento y estabilidad (Acosta-González 2009, 2016).

Para el diseño de cimentaciones se han utilizado diferentes normas, que han sufrido modificaciones a partir de los años 80, que incluyen derogaciones. Las más actual NC 1 (2007) se basa en el criterio de deformación para el diseño de las cimentaciones superficiales, sin embargo, los valores fijados para las deformaciones límites (absolutas y relativas) se han mantenido invariables. Por lo que se hace necesario la realización de investigaciones a escala real para el perfeccionamiento de esta norma, teniendo en cuenta que los valores actuales, aunque han sido aceptados por la mayoría de los especialistas, son el resultado de la experiencia de otros países, principalmente de la ex-URSS (Recarey 1999; Acosta-González 2009).

El objetivo de esta investigación es la realización de un análisis comparativo entre los valores de los asentamientos determinados por métodos geodésicos, los obtenidos por la modelación determinística y los fijados la NC 1 (2007), durante la prueba de la carga de agua en un tanque vertical para el almacenamiento de combustible situado en el área industrial de la región niquelífera de la Provincia Holguín.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Deformaciones límites en las estructuras**

El monitoreo de las deformaciones de grandes obras ingenieras ha sido una realidad en las últimas décadas, debido a que las mismas pueden causar daños y perjuicios severos a las obras o lesiones a las personas y en el peor de los casos las pérdidas de vidas humanas. Estas deformaciones pueden atribuirse a varias causas, como una investigación incompleta de las condiciones ingeniero geológico de la cimentación, la construcción inapropiada de la misma, así como insuficiente conocimiento de las condiciones de operación y la ocurrencia de

eventos naturales como ciclones y terremotos (Acosta-González 2009, 2016).

La supervisión continua o espaciada del comportamiento de la estructura, permite detectar los desplazamientos, que pueden ser utilizados en la verificación de las hipótesis y teorías de la construcción relacionadas con la mecánica de los suelos y en la seguridad operacional de la obra. Debido a la carencia actual de datos de estas investigaciones, las observaciones y registro de las deformaciones a escala real no solo presentan interés científico para el diseño geotécnico, sino también para la comprobación de los métodos numéricos utilizados en la modelación determinística, así como los indicadores del comportamiento a largo plazo de las construcciones (Recarey, 1999; Acosta-González, 2016).

Los métodos teóricos, es decir, determinísticos y estadísticos han propiciado el perfeccionamiento de los valores admisibles, que hoy conforman las normativas existentes para diferentes países, entre los cuales se encuentra el nuestro, estos valores límites se utilizan para la revisión del diseño de las construcciones, donde según Quevedo (2002) actualmente uno de los más utilizados es el Método de los Estados Límites (MEL), que garantiza la funcionalidad de la estructura, chequeándose que todos los desplazamientos o deformaciones que se originan en la base de la cimentación debido a la acción de las cargas, no sobrepasen los límites permisibles, de forma tal que se asegure la correcta explotación de la estructura.

En los tanques de almacenamiento durante los procesos de construcción y explotación es necesaria la inspección dimensional y no destructiva de los mismos con el empleo de los métodos geodésicos y geotécnicos. Dentro de los parámetros principales a controlar durante el monitoreo se encuentran los asentamientos, donde las mediciones geodésicas constituyen un patrón para la comprobación del resto de los métodos (API 653 2009).

### **2.2. Inspección del asentamiento en tanques de almacenamiento**

Los tanques de almacenamiento es el conjunto de recintos y recipientes que contengan o puedan contener líquidos tóxicos, combustibles e inflamables y están presentes en la mayoría de las industrias. Por tal motivo no se concibe

su construcción sin un programa riguroso de inspección (Mayorga – Toala 2013).

Dentro de la inspección general se debe tener en consideración el estudio por verticalidad, redondez, asentamiento y medición de espesores de las placas que conforman el cuerpo, fondo y el techo del tanque (Mayorga – Toala 2013).

Para determinar los efectos del asentamiento en los tanques de almacenamiento, es común monitorear puntos de control situados en la base de la cimentación. En la mayoría de los casos, el programa de monitoreo se inicia con la construcción y continúa durante las operaciones, realizando las mediciones con una frecuencia planeada, basada en las predicciones del asentamiento del suelo. Para los tanques existentes que no tengan información inicial, el programa de monitoreo se debe basar en la historia previa al servicio (API 653 2009).

Los tanques de almacenamiento son estructuras relativamente flexibles y pueden tolerar mayores asentamientos que otras obras de la ingeniería. Sin embargo según (USACE 2002; DYCTA 2005; NC 1:2007; API 653 2009) existe un límite para el asentamiento esperado para ser estimado en el diseño con cierta seguridad.

El asentamiento absoluto se puede predecir a partir de los ensayos geotécnicos de los suelos y por métodos numéricos (estadísticos y determinísticos). Este no genera esfuerzos adicionales en la estructura debido a que su comportamiento es uniforme, sin embargo, cuando son excesivos pueden afectar la interconexiones (tuberías, boquillas), generando esfuerzos no previstos en el diseño. Según NC. 1 (2007), el asiento absoluto medio ( $\bar{S}_C$ ) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{S}_C = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot S_{CAi})}{\sum_{i=1}^n (A_i)} \quad (1)$$

Donde:

$S_{CAi}$  – Asiento absoluto del cimiento (i).

$A_i$  – Área de cimiento (i).

$n$  – Cantidad total de cimientos del objeto de obra.

Los asentamientos diferenciales se producen cuando el desplazamiento es desigual en la base de la cimentación, estos producen la inclinación del tanque y del borde del perímetro del tanque, generando la inclinación del líquido con la respectiva acumulación de tensiones y deformaciones en un área, pudiendo ocasionar daños en la estructura (base y fondo) y en las interconexiones (tuberías, boquillas). Esta deformación es relativa, que normalmente se representa por la distorsión angular ( $\beta$ ) y se calcula por la siguiente expresión (NC. 1 2007):

$$\tan \beta = \frac{\Delta S_{CA}}{L_c} \quad (2)$$

Donde:

$\Delta S_{CA}$  – Asiento diferencial entre dos cimientos aislados contiguos o diferencia de desplazamiento vertical (flecha) en un tramo de un cimiento corrido o balsa.

$L_c$  – Distancia entre dos cimientos aislados o distancia entre los puntos donde se mide la diferencia de flecha de un cimiento corrido o balsa.

### 2.3. Características de la estructura

La estructura está compuesta por un tanque cilíndrico vertical con capacidad de almacenamiento de 15 000 t de combustible, con un diámetro exterior de 32 m y una altura de 22.5 m terminado por una bóveda de acero. La superestructura se cimentó sobre un anillo circular de hormigón armado de 0.9 m de espesor, a 1.40 m sobre la superficie del terreno. El peso muerto de la estructura es aproximadamente de 3 000 t (ENIA 1988). Figura 1.

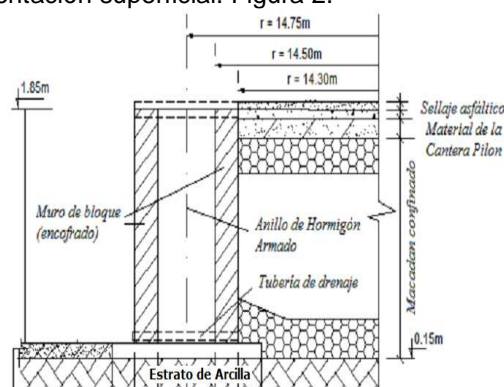


Figura 1. Tanque de combustible

### 2.4. Diseño y consideraciones de la cimentación

Según ENIA (1988), durante el estudio ingeniero geológico se encontraron capas de

suelo de baja resistencia, por lo que se proyectó una cimentación profunda sobre pilotes en grupo, no obstante, a partir del mejoramiento de las condiciones del suelo por técnicas de fortalecimiento a partir de la compactación de columnas de Macadán confinado en capas de 30 cm, fue variada la concepción inicial de proyecto por una cimentación superficial. Figura 2.

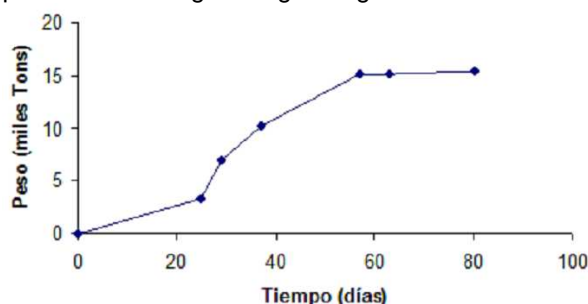


**Figura 2. Detalle de la cimentación**  
La cimentación se apoya sobre un estrato homogéneo de arcilla de un valor promedio de 6.10 m. (ENIA 1988).

Teniendo en cuenta la interacción entre el suelo y la estructura en una masa o espacio semi-infinito, el asentamiento total predicho por ENIA (1988) fue de 14.7 cm. El valor normado según (USACE 2002; DYCTA 2005; NC 1:2007; API 653 2009) es de 20 cm.

## 2.5. Requisitos técnicos para la determinación de los asentamientos

Tanto para el método geodésico como para la modelación determinística se determinaron los asentamientos en función del crecimiento de la carga sobre la base de la cimentación (0, 25, 50, 75 y 100%), tomándose como patrón la prueba de la carga de agua. Figura 3.



**Figura 3. Prueba de la carga de agua.**  
Para la medición de los asentamientos y la realización de la modelación determinística, se

tuvo en cuenta diferentes variables para cada ciclo o periodo. Tabla 1.

**Tabla 1. Características técnicas de los ciclos o periodos** (Acosta-González, 2009)

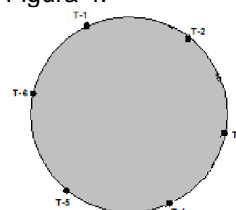
Variables / Ciclo	1	2	3	4	5	6	7
Tiempo (días)	0	25	29	37	57	63	80
Carga (t)	0	3	7,0	10,3	15,0	15,0	15,4
Altura columna de agua (m)	0	5	10.2	15	22	22	22.5
% llenado real	0	26	46	68	100	100	102
Tensión (t/m <sup>2</sup> )	3,8	8,8	14	18,8	25,8	25,8	26,4

## 2.6. Método geodésico

El estudio geodésico se realizó en correspondencia con MET 30-27 (2004) desarrollada por GEOCUBA y tiene como máxima expresión la obtención del valor de la deformación ( $D_t$ ) a partir de la realización de los trabajos de campo y gabinete.

Los trabajos de campo se componen por el reconocimiento, la monumentación de las marcas y los ciclos de mediciones necesarios para cuantificar las deformaciones observadas. El monitoreo de los asentamientos se inició inmediatamente de la terminación de la estructura, realizando siete ciclos de observaciones durante la prueba de la carga de agua y fue continuado durante el proceso de operación en servicio.

Para el monitoreo de los asentamientos de la base del tanque fueron colocadas seis marcas (T1, T2,..., T6) alrededor de su perímetro y tres referencias (PR1, PR2 y C8) fuera del área de influencia del bulbo de presiones que ejerce la cimentación. Figura 4.



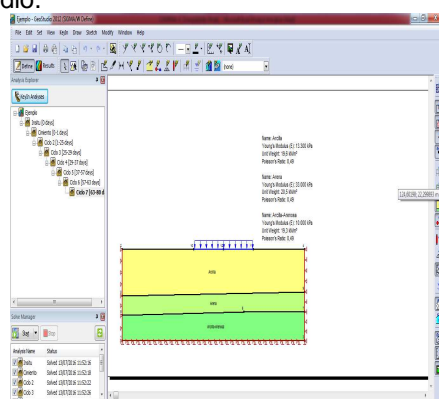
**Figura 4. Distribución de los puntos**

Para la determinación de los asentamientos de las marcas en función de las cargas y el tiempo fue usado el método geodésico de la nivelación

de alta precisión de 2<sup>da</sup> categoría. Las mediciones se realizaron con un nivel automático con micrómetro óptico WILD N3. En cada ciclo se realizó la nivelación de los puntos de referencia y puntos de control, manteniendo los mismos requisitos técnicos, así como el ajuste de las observaciones (Savvaidis 2003; MET 30-27 2004; Acosta-González 2009). De esta forma fue determinada las alturas de los puntos de control para cada periodo. El desplazamiento vertical o asentamiento de las marcas se determinó de acuerdo con MET 30-27 (2004), realizando una comparación entre las alturas entre cada ciclo.

### 2.7. Modelación determinística

La modelación de los asentamientos se realizó con el módulo SIGMA/W del software GeoStudio 2012, a partir de la configuración del mismo para las condiciones y parámetros en la interacción estructura-suelo, tomando los resultados de los ensayos de laboratorio según ENIA (1998). En la Figura 5 se muestra la pantalla inicial con los datos sobre el objeto de estudio.

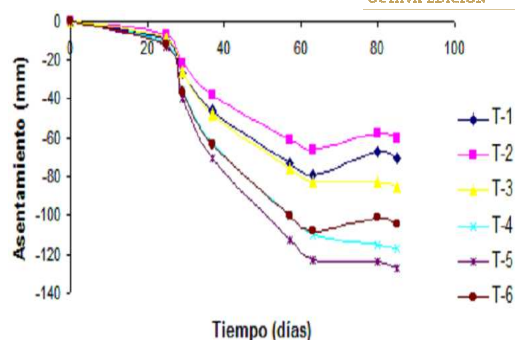


**Figura 5. Configuración inicial del software**

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Asentamientos determinados por el método geodésico

Las observaciones se iniciaron durante la prueba de la carga de agua a partir de lo cual el tanque fue gradualmente llenado hasta 15 000 t en aproximadamente 88 días. El agua fue mantenida durante una semana con el 100 % de llenado, luego se aplicó una sobrecarga (102 %) que se mantuvo por 17 días y finalmente fue vaciado lentamente (descarga) en un periodo de ocho días. El comportamiento de los asentamientos de los puntos de control se muestra en la Figura 6.



**Figura 6. Asentamiento de los puntos**

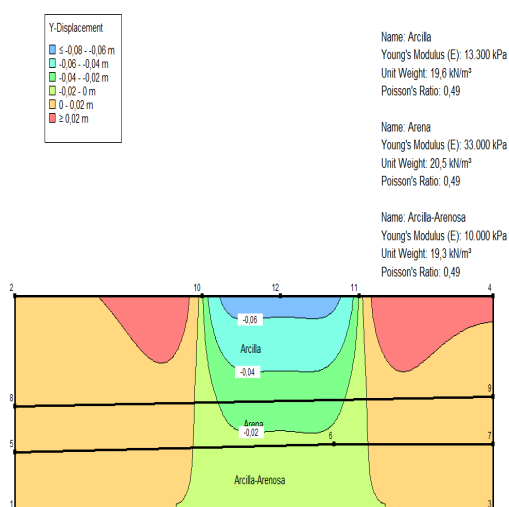
En la figura anterior, se aprecia que los desplazamientos verticales de las marcas, generalmente siguen el proceso de carga y descarga del tanque, describiendo dos procesos (Recarey 1999), el primero un comportamiento lineal y el segundo no lineal. Evidenciando un carácter diferencial de los asentamientos, siendo máximos en las marcas T4, T5 y T6 con un valor medio absoluto máximo de 91.0 mm.

A partir del ciclo cinco (100% de la carga) se observa una tendencia a la atenuación de los asentamientos, con independencia que se mantiene esta carga por un periodo de seis días, además de aplicar una sobrecarga (102%) de manera constante por 17 días y del proceso de descarga que se puede visualizar en el último tramo de la curva. Esta tendencia a la atenuación de las deformaciones se corresponde con el reacomodo de las partículas del suelo como parte del proceso de consolidación del suelo.

### 3.2. Modelación de los asentamientos por el modulo SIGMA/W

La modelación se realizó según GeoStudio (2012) para diferentes escalones de carga en correspondencia con los periodos de medición para el método geodésico, logrando que exista continuidad en el monitoreo y poder correlacionar y visualizar los resultados de los desplazamientos para cada ciclo. Figura 7.

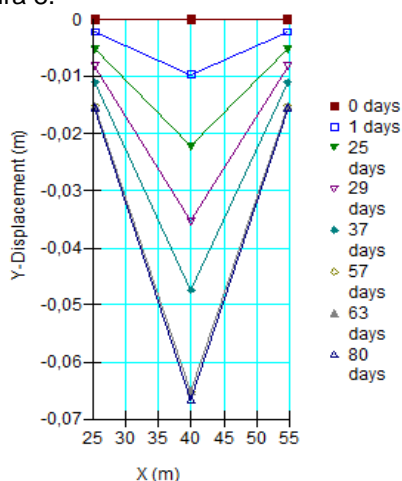




**Figura 7. Asentamientos máximos absolutos para el último ciclo**

Los desplazamientos máximos absolutos se observan en el estrato superior (arcilla), con un valor de 80 mm, una vez que se avanza hacia los estratos inferiores en la frontera de la potencia activa estos valores disminuyen significativamente, llegando a ser despreciables para este tipo de análisis.

En software GeoStudio (2012) proporciona diferentes reportes sobre los resultados de la modelación, dentro de los cuales podemos visualizar el resumen de los valores de los desplazamientos verticales para todos los ciclos. Figura 8.



**Figura 8. Desplazamientos verticales**

### 3.3. Análisis comparativo

El análisis comparativo se realizó tomando como patrón los valores de los asentamientos determinados por el método geodésico, con los desplazamientos obtenidos por la modelación

determinística mediante el modulo SIGMA/W y los establecidos en la Norma Cubana para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales "NC1: 2007". Los resultados se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Análisis comparativo**

Método/ Ciclo	Asentamiento máximo absoluto (mm)							$\Delta_{\text{máx}}$ (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	
<b>Geodésico</b>	0	10	31	55	87	95	91	0
<b>Modelación SIGMA/W</b>	10	24	40	50	70	70	80	11
<b>NC 1: 2007</b>	200							109

Las diferencias ( $\Delta$ ) entre los asentamientos determinados por el método geodésico y los obtenidos por la modelación determinística se mantiene constante en todos los ciclos, con valores entre los 10 y 25 mm. En el ciclo 5 se alcanza el 100% de la carga sobre la base de la cimentación, razón por la cual a partir de este período los desplazamientos verticales manifiestan una tendencia a la atenuación.

Se toma como base el resultado del último ciclo teniendo en cuenta que esta tendencia a la atenuación final se corresponde con el reacomodo de las partículas del suelo como parte del proceso de consolidación. Estas diferencias se encuentran dentro del rango del error máximo de determinación de los desplazamientos (USACE, 2002), por tanto son considerados aceptables, lo que demuestra la factibilidad del módulo SIGMA/W para el cálculo y pronóstico de asentamientos en las bases de las cimentaciones de los depósitos de combustible.

La diferencia entre los asentamientos obtenidos por el método geodésico y la modelación con respecto a la NC 1: 2007 es significativa, lo que evidencia la necesidad de continuar este tipo de investigación para otros casos de estudio con el objetivo de proponer nuevos valores límites para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales, tomando como patrón las mediciones geodésicas.

### 4. CONCLUSIONES

- La diferencia entre los asentamientos obtenidos por el método geodésico y la modelación fue de 11 mm, que está en el orden del su error máximo de

determinación para este tipo de obra, demostrándose la factibilidad del uso del Software GeoStudio 2012 para la modelación y predicción de los desplazamientos a partir de la utilización del su módulo SIGMA/W.

- La diferencia entre los asentamientos obtenidos por el método geodésico y la modelación con respecto a la NC 1: 2007 es significativa, lo que evidencia la necesidad de continuar este tipo de investigación para ajustar los valores límites para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales, tomando como patrón las mediciones geodésicas a escala real.
- Los resultados evidencian la factibilidad de utilizar el método geodésico como patrón para la comprobación y perfeccionamiento de los métodos de la modelación determinística.

## 5. REFERENCIAS

1. Acosta, L. E. (2009) Determinación de índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos. (Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Instituto Superior "Politécnico José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba.
2. Acosta, L. E. (2016). Monitoreo del nivel de vulnerabilidad geotécnica en las estructuras por métodos geodésicos. Memorias del II Foro Internacional de Control de la Calidad y Patología de las Construcciones "COPACON". ISBN 978-959-247-152-8.
3. API 653. (2009). Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. Publicación de la American Petroleum Institute. Fourth edition. Washington, D.C.
4. DYCTA. (2005). Norma Inglesa. Diseño y Cálculo de Tanques de Almacenamiento. 130 pág.
5. ENIA. (1988). Informe sobre las investigaciones Ingeniero- geológicas para la construcción de la CTE de Felton.
6. GEOSTUDIO (2012). Manual de usuario. Alberta. Canadá.
7. González, M. (2001). El terreno. Ediciones UPC. España.
8. Mayorga, M.O. (2013). Inspección física y análisis estructural para determinar operatividad de un tanque cilíndrico vertical para almacenamiento del Fuel Oil de acuerdo a norma API 653 luego de un siniestro. (Trabajo de Diploma). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.
9. MET 30-27 (2004). Metodología para el control de deformaciones de obras a partir de métodos geodésicos.
10. NC 1 (2007). Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales.
11. Quevedo, G. (2002). Aplicación de los Estados Límites y Teoría de Seguridad en el Diseño Geotécnico en Cuba. (Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias), Universidad Central de Las Villas, Cuba.
12. Recarey, C.A. (1999). Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo. (Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Universidad Central de Las Villas, Cuba.
13. Savvaidis, P. (2003). Long term geodetic monitoring of the deformation of a liquid storage tank founded on piles. Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece.
14. USACE.EM.1110-2-1009 (2002). Structural deformation Surveying Washington, DC 20314-1000, Junio.

## SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

Ingeniero Civil. Doctor en Ciencias Técnicas. Master en Geodesia Aplicada. Profesor Titular e Investigador Auxiliar del Departamento de Construcciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Holguín. Especialista en Topografía y Geotecnia con más de 20 años de experiencia en la producción. Ha participado en múltiples eventos nacionales e internacionales y posee varias publicaciones científicas.