

Monitoreo geodésico de los asentamientos en tanques verticales de almacenamiento de combustible

Luis Enrique Acosta-González
Sergio Edilio Ricardo-Desdín
Yusleydis Cano-Ricardo
Elizabeth Rivas-Freeman

Resumen

Se estudió el comportamiento de los asentamientos de un tanque vertical para el almacenamiento de combustible. El monitoreo se realizó por el método geodésico de la nivelación geométrica de alta precisión de segunda categoría. Durante el proceso constructivo se varió el proyecto original, sustituyendo la cimentación profunda por una superficial, a partir del empleo de técnicas de compactación para el mejoramiento de la resistencia del suelo. Los valores de deformación obtenidos dieron una valiosa información sobre el uso de la variante de cimentación propuesta en función del tiempo y las cargas, registrándose un asentamiento máximo absoluto de 132,6 mm. Los desplazamientos en los puntos de control, situados en el perímetro del tanque, tuvieron un carácter diferencial con un valor máximo de 44,2 mm lo que provocó el agrietamiento de la estructura de cimentación.

Palabras clave: tanques de almacenamiento; monitoreo; deformación; asentamiento; prueba de carga.

Geodesic monitoring of settling in vertical fuel tanks

Abstract

The behavior of the settling in a vertical tank used for fuel storage was studied. Monitoring was conducted using the geodesic model for the geometric leveling of high accuracy category II. The original project varied during construction by replacing deep foundations with a surface one applying compaction techniques to improve soil resistance. The deformation values obtained provided valuable information on the implementation of the proposed foundation alternative depending on time and loads. The maximum settling was reported to be 132,6 mm. The displacements in the control points located in the perimeter of the tank had a distinct nature with a maximum of 44,2 mm, which caused the foundation structure to crack.

Keywords: storage tanks; monitoring; deformation; settling; load test.

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de las deformaciones de grandes estructuras tecnológicas 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 & García 2007).

En todos los casos 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. Por lo que, las observaciones y registro de las deformaciones no solo presentan interés científico para el diseño geotécnico, sino también son indicadores del comportamiento a largo plazo de las construcciones (Heunecke & Welsch 2000; Acosta-González 2011).

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 (Das 2008). 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 2011).

En los tanques de almacenamiento (API 653 2009) 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.

Al realizar un estudio del monitoreo de estructuras similares se evidencian las limitaciones siguientes (Acosta-González 2011):

- No se cuenta de antemano con el valor permisible de la deformación.
- Datos insuficientes del estudio ingeniero geológico.

- Las mediciones geodésicas se realizan solamente en el perímetro de la cimentación de la estructura, sin considerar la ubicación de puntos en la parte central, que según (Godoy & Sosa 2003; Savvaidis 2003) es la zona donde ocurren las mayores deformaciones.
- No se realizan las mediciones siguiendo la correspondencia del crecimiento de la carga sobre su base, omitiendo en ocasiones la prueba de carga de agua e interrumpiendo las mediciones radicalmente, sin la previa valoración de los modelos de pronósticos.
- Las observaciones no se realizan de forma permanente y automatizada con la utilización de otros dispositivos, no geodésicos (instrumentación geotécnica y sensores).
- No se coloca una densidad suficiente de puntos de control en las bases (cimentaciones), limitando la obtención del modelo óptimo de las deformaciones.

Durante los últimos años se han propuesto varios métodos de diseño, basados en las consideraciones teóricas o resultados para la evaluación de los modelos, pero los conocimientos sobre la capacidad portante y asentamientos de cimentaciones superficiales y profundas presenta sus limitaciones, debido a la falta de datos que pueden proporcionar los ensayos de campo a escala real (Heunecke & Welsch 2000; Recarey 2000). Por lo tanto, cualquier variante similar de este caso para el monitoreo de los asentamientos en las cimentaciones de depósitos, ofrecen información valiosa sobre el mecanismo real de la deformación y el rol de los factores que afectan el comportamiento de los pilotes en grupo y otras soluciones de cimentación (Savvaidis & Ifadis 2001).

El objetivo de esta investigación fue el monitoreo geodésico de los asentamientos de un tanque vertical para el almacenamiento de combustible con capacidad de 15 000 t, situado en el área industrial de la región niquelífera de la provincia Holguín. La vigilancia de esta obra se ha llevado a cabo, teniendo en cuenta que por material guardado, un comportamiento inesperado o daño de la estructura produciría el derrame del líquido con consecuencias adversas para el medio ambiente y la seguridad operacional de la industria.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Inspección del asentamiento en tanques de almacenamiento

Tanques de almacenamiento se denomina al 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 (API 653 2009; Jaca et al. 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 (API 653 2009; Fernández et al. 2011).

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 650 2010) existe un límite para el asentamiento esperado para ser estimado en el diseño con cierta seguridad. Los efectos indeseables más significativos de los asentamientos (absolutos y diferenciales) en los tanques de almacenamiento son:

- El asentamiento absoluto del tanque.
- El asentamiento diferencial de una parte que puede provocar esfuerzos internos adicionales no previstos en las interconexiones de las tuberías.
- El asentamiento diferencial a lo largo del perímetro, que puede generar sobre tensiones en la superestructura.
- El asentamiento diferencial entre el tanque y las tuberías externas.

El asentamiento absoluto se puede predecir a partir de los ensayos geotécnicos de los suelos. 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}) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\overline{S_C} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot S_{CAi})}{\sum_{i=1}^n (A_i)} \quad (1)$$

Donde:

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

A_i – Área de cimientado (i).

n – Cantidad total de cimientados 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 (β) y se calcula por la siguiente expresión (NC. 1 2007):

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

Donde:

ΔS_{CA} – Asiento diferencial entre dos cimientados aislados contiguos o diferencia de desplazamiento vertical (flecha) en un tramo de un cimientado corrido o balsa.

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

2.2. 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 (Geocuba 2002). Figura 1.



Figura 1. Tanque de almacenamiento de combustible.

2.3. Diseño y consideraciones de la cimentación

Debido a que durante el estudio ingeniero geológico (Geocuba 2002) se encontraron capas de suelo de baja resistencia 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.

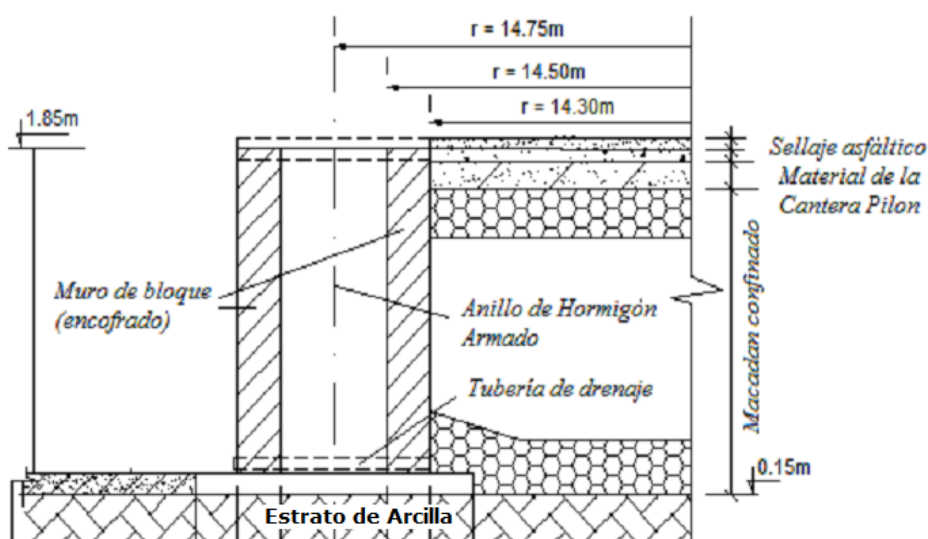


Figura 2. Detalle de la cimentación del tanque.

La cimentación se apoya sobre un estrato homogéneo de arcilla de un valor promedio de 6.10 m. Su descripción se muestra en la Tabla 1 (Geocuba 2002).

Tabla 1. Características del suelo que soporta la cimentación

Suelo (Capa)	Denominación	γ (t/m ³)	I _p	ϕ^0	C (kg/cm ²)	E (kpa)
1	Arcilla calcárea blanca, amarillenta hasta cremo-amarillenta con presencia de limo, aleurita, y escasa de grava fina, consistencia media hasta dura.	1.96	0.16	11	0.2	13 300

Teniendo en cuenta la interacción entre el suelo y la estructura en una masa o espacio semi-infinito, el asentamiento total predicho (Geocuba 2002) fue de 14.7 cm. El valor normado según (USACE 2002; DYCTA 2005; NC 1:2007; API 650 2010) es de 20 cm.

2.4. Método geodésico

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 3.

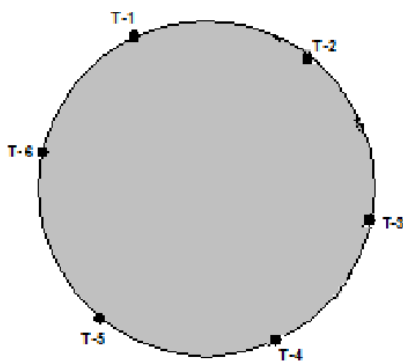


Figura 3. Distribución de las marcas en la periferia del tanque.

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^{da} 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). 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 comparando las alturas entre cada ciclo.

Los ciclos de observaciones fueron definidos en función del crecimiento de la carga sobre su base (0, 25, 50, 75 y 100%), tomándose como patrón la prueba de la carga de agua. Figura 4.

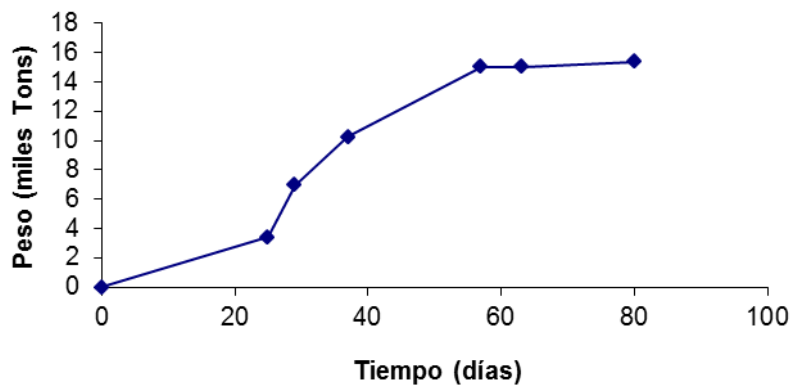


Figura 4. Prueba de la carga de agua.

El tanque se llenó gradualmente hasta 15 000 t de agua en aproximadamente 88 días. El agua se mantuvo durante una semana con el 100 % de llenado, luego se aplicó una sobrecarga (102 %) que se mantuvo por 17 días y finalmente se vació lentamente (descarga) en un periodo de ocho días.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento de los asentamientos de los puntos de control, generalmente siguen el proceso de carga y descarga del tanque, describiendo dos etapas (Recarey 2000), la primera un comportamiento lineal y la segunda no lineal (Figura 5).

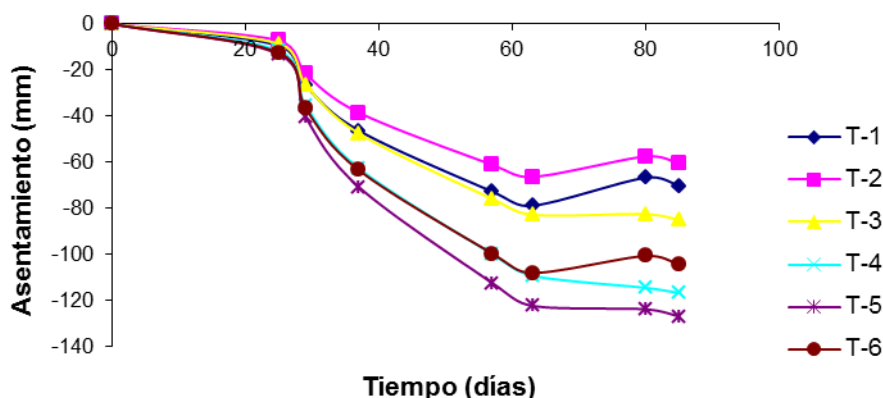


Figura 5. Asentamiento de los puntos de control.

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. Después de la sobrecarga y del vaciado del tanque no se produjo una recuperación significativa de las deformaciones.

Esta tendencia a la atenuación de las deformaciones se corresponde con el reacomodo de las partículas como parte del proceso de consolidación del suelo.

El asentamiento medio observado durante la prueba de la carga de agua fue de 94 mm y el desplazamiento máximo absoluto se registró en el punto de control T-5, con un valor de 127,4 mm.

El comportamiento de los desplazamientos durante la prueba de la carga de agua tuvo un carácter diferencial, demostrado por una diferencia de 44.2 mm entre el valor promedio de las marcas del extremo Norte (T1, T2 y T3) con las del extremo Sur (T4, T5 y T6), lo que ha inducido esfuerzos adicionales en los elementos estructurales produciendo grietas que evidencian el fallo de la estructura de cimentación (Figura 6).



Figura 6. Grietas en la estructura (Acosta-González 2011).

La profundidad y dimensiones de las grietas aumentan en la dirección del área de mayores asentamientos, donde se encuentran ubicadas las marcas T4, T5 y T6.

Acosta-González (2011) refiere que el modelo de la deformación vertical del tanque de combustible fue muy similar al comportamiento observado en los otros tanques de almacenamiento, lo que puede ser producto de estar sustentado sobre suelos de baja resistencia (compresibles). Con la diferencia que en el caso de la cimentación sobre pilotes no sufrió agrietamiento.

Durante el proceso de explotación (carga de servicio) se continuó con el monitoreo de los asentamientos del tanque, con una periodicidad cercana a los dos años, realizando un total de 13 ciclos de observaciones. Este intervalo fue variado en algunos casos producto de eventos meteorológicos extremos y por el incremento de la actividad sísmica en la zona. Figura 7.

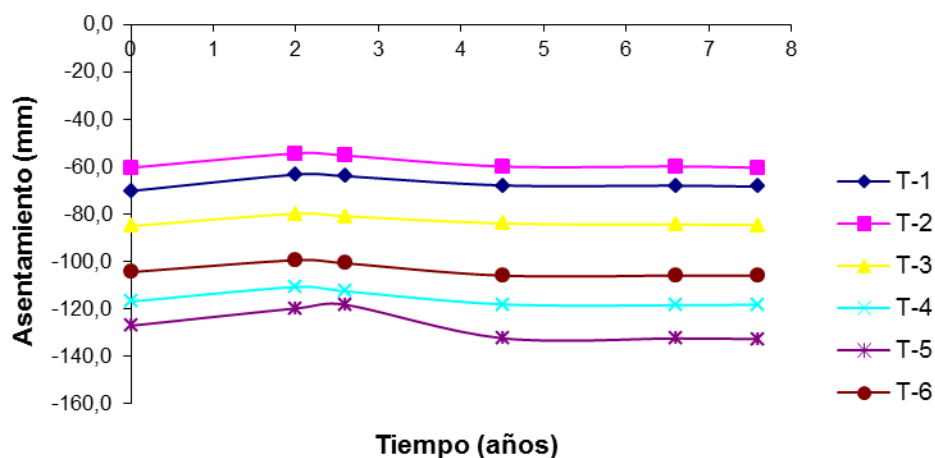


Figura 7. Asentamientos durante el proceso de explotación.

Los asentamientos durante el proceso de explotación no son representativos, debido a que las diferencias entre los últimos tres ciclos de observaciones no sobrepasan el error de determinación de los mismos, existe una tendencia a su atenuación por el proceso de consolidación del suelo.

El valor máximo de asentamiento observado durante el periodo de observaciones fue de 132,6 mm, el cual no se ha incrementado en el tiempo, lo que evidencia la conclusión del proceso de monitoreo a partir de mediciones geodésicas reiteradas. No obstante, se continuará la vigilancia teniendo en cuenta las grietas de la estructura de cimentación (Acosta-González 2011).

4. CONCLUSIONES

- El asentamiento medio observado durante la prueba de la carga de agua fue de 94 mm, que representa el 63,9 % del valor predicho y el 47 % del establecido en la NC 1 (2007). Lo que evidencia la necesidad de utilizar el método geodésico como patrón para comprobar y ajustar estos valores.
- El asentamiento máximo absoluto durante el proceso de monitoreo se produjo en el punto de control T-5, alcanzando un valor de 132,4 mm.
- El mayor asentamiento diferencial entre los puntos de control fue de 44,2 mm, que sobrepasa el valor estimado en los cálculos y en las normas de construcción, lo que ha generado esfuerzos adicionales no previstos en el diseño, con la respectiva concentración de tensiones en el área de mayor deformación, produciendo el agrietamiento (fallo) de la estructura de cimentación.

- Los asentamientos diferenciales entre los puntos de control periféricos sucesivos, pueden ser producto a la variabilidad del perfil del suelo y por la diferenciación en la compactación del mismo.
- Existe una tendencia a la estabilización de los asentamientos en el proceso de explotación, teniendo en cuenta que la diferencia entre sus ciclos no sobrepasa su error de determinación.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los colaboradores de la Empresa Geocuba Oriente Norte, a los técnicos y especialistas del Taller de Geodesia de la Agencia Geocuba Holguín, por los datos y el apoyo en las investigaciones de campo y gabinete. A los árbitros anónimos y editores, por sus valiosos señalamientos y comentarios.

6. REFERENCIAS

- ACOSTA-GONZÁLEZ, L.E. 2011: Monitoreo del nivel de vulnerabilidad geotécnica en estructuras por métodos geodésicos ". Memorias VII Congreso Internacional Geomática. ISBN 978-959-723-01-7.
- ACOSTA, L.E. & GARCÍA, J. 2007: La Geodesia en los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos de desastres. Informática, XII Convención y Expo Internacional. La Habana, Cuba. <http://www.bvs.hn/cu-2007/ponencias/GEO/GEO-106.pdf>
- API 650. 2010: Welded steel tanks for oil storage, American Petroleum Institute, Washington, D.C.
- API 653. 2009: Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. Publicación de la American Petroleum Institute. Fourth edition. Washington, D.C.
- DAS, B.M. 2008. Fundamentals of geotechnical engineering. Third edition. CL-Engineering ed.. ISBN-10: 0-495-29572-8.
- DYCTA. 2005: Norma Inglesa. Diseño y Cálculo de Tanques de Almacenamiento. 130 pág.
- FERNÁNDEZ, S.; JACA, R.C. & GODOY, L.A. 2011: Descenso de apoyos en el revestimiento lateral de naves industriales. *Mecánica Computacional*, 30: 857-874.
- GEOCUBA. 2002: Informe sobre las observaciones de los asentamientos por métodos geodésicos en el Tanque de combustible 1 de la CTE de Felton.
- GODOY, L.A. & SOSA, E.M. 2003: Localized support settlements of thin-walled storage tanks. *Thin-Walled Structures*, 41 :941-955.

- HEUNECKE, O. & WELSCH, W. 2000: A Contribution to Terminology and Classification of Deformation Models in Engineering Surveys. *Journal of Geospatial Engineering*, 2(1) :35-44
- JACA, R.C; BURGOS, C. A. & GODOY, L. A. 2013: Evaluación de fallas de tanques horizontales de almacenamiento de fluidos. *Mecánica Computacional* 32 :3463-3482.
- MET 30-27. GEOCUBA. 2004: Metodología para el control de deformaciones de obras a partir de métodos geodésicos.
- NC 1: 2007: Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales.
- RECAREY, C.A. 2000: Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo. Memorias 4to. Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción. La Habana, Cuba.
- SAVVAIDIS, P. & IFADIS I. 2001: Geodetic Monitoring of the Deformation of a 50,000 t Sugar Storage Tank Founded on 124 Long Bored Piles. Proceedings of Inter. Symp. On Geodetic, Photogrammetric and Satellite Technologies, Sofia, 160-167.
- 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.
- USACE.EM.1110-2-1009. 2002: "U.S. Army Corps of Engineers Manual". Structural deformation Surveying. Washington, DC 20314-1000, Junio.

Luis Enrique Acosta-González, luis.acosta@uho.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Universidad de Holguín, Cuba.

Sergio Edilio Ricardo-Desdín, sergior@geodesa.geocuba.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Investigador Auxiliar. Geocuba Geodesa, Cuba.

Yusleydis Cano-Ricardo, yusleydis@uho.edu.cu

Ingeniero civil. Profesor Instructor. Universidad de Holguín, Cuba

Elizabeth Rivas-Freeman, erivas@uho.edu.cu

Ingeniero civil. Profesor Asistente. Universidad de Holguín, Cuba