

DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE VULNERABILIDAD GEOTÉCNICA POR MÉTODOS GEODÉSICOS.

DETERMINATION OF GEOTECHNICAL VULNERABILITY PARAMETERS THROUGH GEODESIC METHODS.

Autores: Luis Enrique Acosta-González. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Investigador agregado. Universidad de Holguín. Cuba. luis.acosta@facing.uho.edu.cu

Yordanys Esteban Batista-Legrá. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Cuba. yebatista@ismm.edu.cu

RESUMEN.

Esta investigación tiene el propósito de determinar los índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos en las balsas de amoníaco del puerto de Moa, con base en un análisis interdisciplinario de geólogos, geodestas e ingenieros civiles. Los resultados aportan criterios técnicos a tener en cuenta en soluciones ingenieriles para el mantenimiento del objeto de obra. Se utilizaron resultados de mediciones geodésicas de precisión, y el proyecto de cimentación del año 1981. Se consultaron diferentes normativas sobre estados límites de deformación en obras y sobre esos criterios se lograron establecer las deformaciones límites de las balsas de amoníaco del puerto de Moa. Para la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos se implementó como herramienta de trabajo la metodología propuesta por la empresa Geocuba, el cálculo espacio temporal de las deformaciones de cada objeto de obra a partir del resultados de mediciones geodésicas y el cálculo de los asentamientos por métodos geotécnicos (método Terzaghi o sumas de capas). Los procesos de deformaciones en los objetos de obra de las balsas de amoníaco evidencian indicios de agrietamiento y posibles fallas en las estructuras.

PALABRAS CLAVE: Vulnerabilidad; deformaciones; cimentación; geodesia; geotecnia.

ABSTRACT.

The purpose of this investigation is to determine the geotechnical vulnerability parameters through geodesic methods in the ammonia cylinders located in the Port of Moa, taking into account some geologist, geodist and civil analysis. The results contribute technical approaches to keep in mind in solutions for the maintenance of the work object . The results of geodesic mensurations of precision were used, taking the footing Project of 1981 as a sample. Different standards were consulted about deformation limits in works, and according to these criteria the ammonia cylinder limit deformations were established. To determine the geotechnical vulnerability parameters through geodesic methods, the methodology proposed by Geocuba was used, taking into consideration the deformation time space calculation of each work object according to the geodesic measurements and the settlement calculation through geotechnical methods (Terzaghi method 1998). The processes of deformations in the work objects of ammonia cylinders show findings of cracks and possible structure failures.

KEY WORDS: Vulnerability; deformations; foundation; geodesy; geotechnics.

1. INTRODUCCIÓN

Las cimentaciones constituyen el sustento para la estabilidad de las obras y se diseñan fijando parámetros con ciertas tolerancias para resistir las deformaciones, pero en la práctica construimos en lugares complejos y los fenómenos naturales provocan un comportamiento del suelo que difiere de las condiciones previstas en la investigación y ensayos de laboratorio, lo cual afecta la seguridad y eficiencia operacional debido a que la interrelación tecnológica de sus objetos y agregados requieren tolerancias mínimas para su funcionamiento (Jiménez Salas- José Antonio. 1981).

Debido al gran auge constructivo y productivo alcanzado por la industria niquelífera ha surgido la necesidad de definir, con la aplicación de los métodos geodésicos, el comportamiento en espacio y tiempo de los distintos objetos de obra de las plantas de níquel; identificar las causas que producen las deformaciones (desplazamientos y asentamientos diferenciales) así como hallar una explicación a los distintos fenómenos que afectan la vulnerabilidad y eficiencia industrial (Acosta- González 1998).

Todo esto ocurre en la Base de Amoníaco de la Empresa Puerto de Moa, situada en el municipio Moa. En esta obra se almacena y disuelve el amoníaco (NH_3) que se utiliza en el proceso químico para la obtención del Ni + Co.

Desde hace algunos años se ha notado que la estructura de los objetos de obra que conforman la misma se ha deformado. En ella se han manifestado: fisuras, grietas, hundimientos y torsiones (Espinosa Gainza 2013). Además, son evidentes las deformaciones del piso donde se emplazan los distintos objetos de obra con agrietamientos en el orden de los 3 cm.

Esto ha motivado que el proceso de mantenimiento de la estructura sea constante y la empresa que administra la planta tenga que gastar considerables sumas de dinero para mantenerla en funcionamiento.

En la obra que nos ocupa en este trabajo se han realizado mediciones geodésicas durante los primeros años de su puesta en marcha, por el Instituto Superior Minero Metalúrgico. Luego, la Empresa de Proyectos del Níquel fue la encargada de continuar con la ejecución de los trabajos y, finalmente, el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (ICGC), hoy GEOCUBA, continuó el monitoreo de la magnitud de los asentamientos (Batista-Legrá 2016). Estas mediciones se dejaron de ejecutar porque en los primeros años de explotación no se manifestaron asentamientos de importancia (Espinosa-Gainza 2013).

Con la ocurrencia de un sismo en la región, en enero de 1999, se le otorgó mayor importancia a los fenómenos que venían ocurriendo en la Base de Amoníaco y se decidió ejecutar otros trabajos, que desde el punto de vista geodésico, aportaran nuevas conclusiones, pero sin tener en cuenta las características geológicas y estructural de la planta y los distintos fenómenos que pueden causar el colapso de los objetos de obra (Batista-Legrá 2016), por tal motivo se impone realizar un estudio integral de las deformaciones, basado en criterios geotécnicos, geodésicos y civiles que permitan determinar índices de vulnerabilidad para tener en cuenta en soluciones ingenieriles y así evitar el fallo de una estructura.

1.1 Características físico-geográfica y estructural

El área de estudio se encuentra enmarcada dentro del municipio Moa, el cual se ubica hacia el noroeste de la provincia Holguín, limitando al norte con el Océano Atlántico, al sur con el municipio de Yateras, al este con el municipio de Baracoa y al oeste con los municipios Sagua de Tánamo y Frank País.

El relieve predominante es montañoso, principalmente hacia el sur, donde es más accidentado en la Sierra de Moa, la vegetación está compuesta fundamentalmente por latifolias. Económicamente, la región es una de las más industrializadas del país pues cuenta con grandes riquezas minerales (Batista-Legrá 2016).

Los suelos del área de estudio están conformados por depósitos sedimentarios del Plioceno Cuaternarios, fluviomarinos con lateritas redepositados e intercalaciones de arcillas, conglomerados y calizas en varios ritmos, pertenecientes a la Formación Punta Gorda. (Espinosa-Gainza 2013).

La Base de Amoníaco del puerto de Moa está formada por los objetos de obras siguientes:

1. Balas de amoníaco
2. Tanques verticales
3. Caseta de compresores
4. Caseta de motobombas
5. Caseta del panel eléctrico
6. Caseta del panel de mando

La investigación solo se centra en la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos en el objeto de obra balas de amoníaco (5 balas).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Determinación de desplazamientos límites admisibles

En la investigación se determinó los desplazamientos límites admisibles para la Base de Amoníaco teniendo en cuenta el estudio integral de las normativas vigentes que se relacionan a continuación.

El diseño de las bases de los cimientos, según Acosta-González (1998), para el estado límite de deformación, se fundamenta en calcular las deformaciones relativas o el asentamiento absoluto máximo teniendo en cuenta el tipo de edificación y sus características estructurales, comparando el valor calculado con el fijado por la norma y que cumpla la condición:

$$S_{\text{calculado}} \leq S_{\text{Límite}}$$

Los valores límites fijados por la Norma cubana de 1990 dependen del tipo de obra y de la forma de trabajo de la estructura.

Por otro lado, Alexandrovich y Cabrera (1990) establecen el criterio de asentamientos máximos, que se distingue entre suelos arenosos y arcillosos por la mayor homogeneidad de los primeros; establece además como **distorsión angular** para cualquier tipo de cimentación 1/500, así como para la **inclinación** en edificios aislados y sin juntas de dilatación el valor de 1/750.

Por otra parte, se consultan las especificaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (*USACE*).

2.2. Metodología empleada para determinar los índices de vulnerabilidad

Se utilizó la metodología para determinar los parámetros que van a definir los índices de vulnerabilidad que, según García-Díaz y Acosta-González (2005), la relación entre el promedio de las deformaciones espaciales medidas en un objeto de obra y las deformaciones límites fijadas o calculadas (predichas) en el proyecto de ejecución de la obra se puede definir como el índice **absoluto** de vulnerabilidad geotécnica de la obra (I_{va}).

$$I_{va} = \frac{S_{med}}{S_{Lím}} \quad (1)$$

Donde:

S_{Med} : Asentamiento medido promedio

S_{Limite} : Asentamiento límite promedio

La relación entre el promedio de las deflexiones, distorsiones angulares medidas en un objeto de obra y las límites fijadas o calculadas en el proyecto de ejecución de la obra se puede definir como el índice **relativo** de vulnerabilidad geotécnica de la obra (I_{vr}).

$$I_{vr} = \frac{\Delta_{med}}{\Delta_{Lím}} \quad (2)$$

Donde:

Δ_{med} : Deflexión y/o distorsión angular medida

$\Delta_{Lím}$: Deflexión y/o distorsión angular límite

Estos índices, de acuerdo al resultado de las relaciones enunciadas en las fórmulas 1 y 2, se van a clasificar en distintos niveles de vulnerabilidad, que se reflejan en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los niveles de vulnerabilidad geotécnica por las deformaciones lentas de los suelos, determinadas por métodos geodésicos

Índices de Vulnerabilidad geotécnica	$(I_{va,r}) < 1$	$(I_{va,r}) \approx 1$	$(I_{va,r}) > 1$		
			$1 > (I_{va,r}) < 1.5$	$1.5 > (I_{va,r}) < 2$	$(I_{va,r}) > 2$
Nivel de Vulnerabilidad	BAJA	LIMITE	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
Etapas de deformación de suelos en función de la carga	Compacción	Pueden haber Desplazamientos locales	Compactación + Desplazamientos locales	Desplazamientos considerables	Levantamiento. Pueden ocurrir riesgos incluso de vuelcos y destrucción de suelos.

2.3. Determinación de parámetros por métodos geodésicos

2.3.1. Cálculo de la velocidad de asentamiento

Para determinar los parámetros que van a definir los índices de vulnerabilidad por métodos geodésicos se calcularon las velocidades de asentamiento utilizando la fórmula 3.

$$V = \frac{S_{final} - S_{inicial}}{\Delta T} \quad (3)$$

Donde:

S_{final} : Asentamiento al finalizar el periodo de observaciones

$S_{Inicial}$: Asentamiento al inicio del período de observaciones

ΔT : Tiempo de observación

Los asentamientos promedios se calcularon a partir del asentamiento final promedio de las marcas extremas situadas en un mismo cimiento; el valor de la luz fue referido hasta el centro de gravedad de los cimientos.

2.3.2. Cálculo de la distorsión angular

Para determinar los valores de la distorsión angular se utilizó la expresión siguiente:

$$\beta = \frac{\Delta_{mm}}{L} \quad (4)$$

Donde:

β : Distorsión angular

Δ_{mm} : Inclinación

L : Longitud del cimiento (Luz).

2.4. Determinación de parámetros por métodos geotécnicos

Para el cálculo de los parámetros por métodos geotécnicos, en el caso que nos ocupa, corresponde en su mayoría a una cimentación profunda, por tanto el análisis se realizó para un grupo de pilotes. Los pasos a seguir responden íntegramente al método Terzaghi (1952), considerando que la carga comienza a transmitirse a través del pilote a partir del estrato donde se encuentra la arena arcillosa a los 6.20 m de profundidad (Figura 1), por lo que el área de influencia se localiza en la capa correspondiente al cieno donde se apoya toda la cimentación.

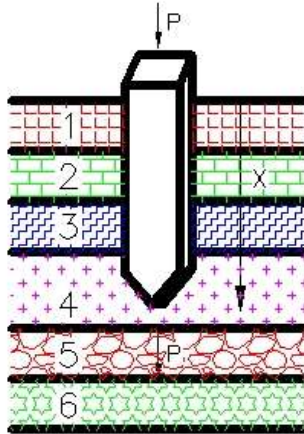


Figura 1. Ubicación de los pilotes en los estratos

Se consideró que desde la superficie hasta una profundidad denominada (x), el terreno no existe, el pilote queda sustentado únicamente por debajo de dicha profundidad y la carga sobre el pilote es igual a la suma de la carga actuante sobre su cabeza más el peso del pilote, más el rozamiento negativo hasta la profundidad (x). Según normas para cimentaciones (Madrid, 2002):

$$S = \sigma_{zi} * \frac{h_i}{E_i} \quad (5)$$

Donde:

S : Asentamiento del estrato

σ_{zi} : Tensión en el punto

h_i : Potencia del estrato

E_i : Módulo de deformación

2.4. Análisis comparativo

La investigación se centró en la comparación de los valores medidos por el método geodésico, los pronosticados por el geotécnico, los establecidos por las normas de construcción y la aplicación de la metodología creada, esto nos permitió dar el criterio de vulnerabilidad del objeto de obra.

3. RESULTADOS

Considerando los problemas de interacción suelo-estructura y las normativas vigentes para obtener resultados más precisos en las deformaciones límites de las balas de amoníaco del puerto de Moa se establecen a continuación las tolerancias admisibles (Tabla 2).

Tabla 2. Tolerancias admisibles en las balas de amoníaco

Objetos de obra	Tolerancias	
	Absolutas (Asentamientos en mm)	Relativas (Distorsión Angular)
Balas de amoníaco	75	0,001

La velocidad de asentamiento fue calculada para cada bala de amoníaco, obteniendo valores despreciables que no incluimos en la realización de este trabajo. Los asentamientos promedios y distorsiones angulares se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Velocidad de asentamiento y distorsión angular en las balas de amoníaco

Balas	Cimientos	Marcas extremas	Asent promedio	Luz (m)	Δ mm	Distorsión angular
1	1	1-2	-0,70	13,0	0,52	0,00004
	2	3-4				
2	1	21-22	-0,76	13,0	0,83	0,00006
	2	23-24				
3	1	31-32	-1,02	13,0	0,23	0,00002
	2	33-34				
4	1	41-42	-1,47	13,0	0,67	0,00005
	2	43-44				
5	1	51-52	-1,60	13,0	0,97	0,00007
	2	53-54				
	2	151-152				

Se realizó un análisis para todos los cimientos de las balas de amoníaco, considerando principalmente los valores promedios en los extremos de los cimientos ya que existe simetría en la ubicación de las marcas; actúa el mismo sistema de cargas y como particularidad especial sus cimientos se encuentran situados sobre suelos de igual compresibilidad con una distribución uniforme del sistema de presiones. En la Tabla 4 se muestran los principales resultados de los cálculos realizados en la investigación, las deformaciones por métodos geodésicos, geotécnicos y por las normas, determinando los niveles de vulnerabilidad.

Tabla 4. Análisis comparativo en las balas de amoníaco

Balas de amoníaco	Método	Deformaciones		Vulnerabilidad		Nivel de Vulnerabilidad
		Absolutas	Relativas	Absolutas	Relativas	
1	Geodésico	- 0,70mm	0.0000 4	0,00 9	0,04	Baja
	Geotécnico	9,78cm	...			
	Normas	75mm	0,001			
2	Geodésico	- 1,47mm	0,02 0	0,05	Baja
	Geotécnico	9,78cm	...			
	Normas	75mm	0,001			
3	Geodésico	+1,36m m	0,01 8	0,08	Baja
	Geotécnico	9,78cm	...			
	Normas	75mm	0,001			
4	Geodésico	+2,67m m	0,03 6	0,41	Baja
	Geotécnico	9,78cm	...			
	Normas	75mm	0.001			
5	Geodésico	+1.04m m	0,01 4	0,03	Baja
	Geotécnico	9.78cm	...			
	Normas	75mm	0,001			
	Geotécnico	9,78cm	...			
	Normas	75mm	0,001			

4. DISCUSIÓN

Los resultados del estudio realizado demuestran, de forma general, que las cinco balas de amoníaco estudiadas presentan un nivel de vulnerabilidad geotécnica bajo, las mismas se encuentran cimentadas sobre pilotes y se consideran estables; las deformaciones que se pueden observar directamente en el terreno corresponden a las capas superficiales del terreno, por lo que la vulnerabilidad de este objeto de obra está presente en las tuberías de interconexión, las cuales están apoyadas sobre bases que poseen una cimentación superficial que sufren las deformaciones que se detectaron durante el estudio, quedando las tuberías sin apoyo, en flexión, esto puede provocar un efecto de torsión y ocasionar el colapso de las interconexiones (Figura 2).

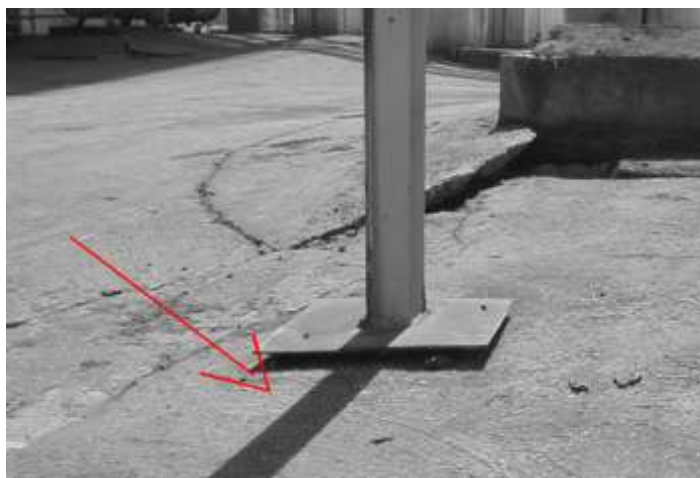


Figura 2. Vista de las deformaciones en capas superficiales

Por tal motivo se impone la necesidad de realizar soluciones ingenieriles a esta obra, que cuenta con 14 balas de almacenamiento del gas y una de traspaso, con capacidad de cien toneladas cada una. Este gas, altamente tóxico, afectaría de forma letal los repartos Rolando Monterrey y 26 de Junio y el resto del municipio Moa se vería severamente afectado, según estudios de la defensa civil del territorio.

5. CONCLUSIONES

1. Se demostró que las deformaciones visibles en el área no se corresponden con el objeto de obra balas de amoníaco, sino con las capas superficiales del terreno, aplicando criterios geodésicos, geotécnicos y civiles, en función de la determinación de los diferentes factores presentes en la zona de estudio y considerando la principal vulnerabilidad en las base de apoyo de las tuberías de interconexión.
2. La investigación aporta los valores de las tolerancias absolutas y relativas admisibles para las balas de amoníaco y se incorpora a la metodología usada en el trabajo.
3. Los resultados aportan criterios técnicos a tener en cuenta en soluciones ingenieriles para el mantenimiento de la Base de Amoníaco.

6. REFERENCIAS

Acosta González, L. E.1998: *Evaluación los factores deformantes en los objetos industriales a partir de mediciones geodésicas reiteradas*. Jose Rueda Pérez (tutor). Tesis de Maestría. ISPJAE, Facultad de Ingeniería Civil. 112 p.

Alexandrovich Radiestsku, Leonid & Cabrera Marzo, Pablo.1990: *Geodesia ingeniera*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 332 p.

Batista Legrá, Y. 2007: *La geodesia en los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos en las estructuras*. Luis E. Acosta González (tutor). Tesis de grado. Academia Naval Granma. 98 p.

Batista Legrá, Y. 2016. Modelación de coordenadas espaciales en la región minera de Moa. Orlando Belete Fuentes (tutor). Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 98 p.

Espinosa Gainza, Y. 2013: *Evaluación geotécnica de la estabilidad de la base de amoníaco del Puerto de Moa*. Jose Rueda Pérez (tutor). Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 104 p.

García Díaz, J. & Acosta González, L. 2006: Determinación de índices de vulnerabilidad geotécnica en obras por métodos geodésicos. En: II Taller de Geodesia y Geomecánica Aplicada a la Construcción. Memorias. Santiago de Cuba, Cuba, 5-8 diciembre, 203-205.

Jiménez Salas, José Antonio. 1981: *Geotecnia y cimentos*. 2 ed. Editorial Rueda, Madrid, 255 p.

Terzaghi, K. 1952: *Mecánica teoría de los suelos*. Editorial ACME, Buenos Aires, Argentina, 388 p.