

Análisis de la vulnerabilidad geotécnica en las estructuras por métodos geodésicos

Luis Enrique Acosta González¹, Sergio Edilio Ricardo Desdín², Osmany Hernández Cruz³

¹Universidad de Holguín, Cuba, luis.acosta@uho.edu.cu, ²Geocuba Geodesia: sergior@geodesa.geocuba.cu, ³Universidad de Holguín, ohernandezc@uho.edu.cu

RESUMEN

En el trabajo se aborda la problemática del análisis de vulnerabilidad geotécnica en las obras industriales, con un nuevo enfoque metodológico sobre los modelos y terminologías en el análisis integrado de la deformación. Se presenta una metodología para la definición de los índices de vulnerabilidad geotécnica y la evaluación del nivel de vulnerabilidad en la industria cubana, para diferentes particularidades de la interacción estructura-suelo, a partir de la comparación de los valores de las deformaciones (asentamientos) determinadas por métodos geodésicos con las tolerancias fijadas por la norma de cimentaciones. Esto facilita la aplicación de la Geodesia a estudios multidisciplinarios de vulnerabilidad de las estructuras en los procesos de construcción y explotación. Se realiza la validación de la metodología en cuatro casos de estudio de la región niquelífera de Holguín: maquinarias industriales "Secaderos tubulares rotatorios", depósitos de sustancias tóxicas "Base de amoníaco", depósitos de sustancias inflamables "Tanque de combustible" y depósitos de mineral. Se demuestra la factibilidad de los resultados y la importancia de los estudios integrales de vulnerabilidad en la seguridad operacional de las obras industriales y sus instalaciones, a partir de la interacción de criterios concluyentes de varias disciplinas como la Geodesia, la Geofísica, la Geotecnia y la Ingeniería Civil.

PALABRAS CLAVE: Vulnerabilidad geotécnica, deformación, asentamientos.

Analysis of the geotechnical vulnerability in the structures by geodesic methods

ABSTRACT

In the work the problem of the analysis of geotechnical vulnerability is approached in the industrial works by geodesic methods, with a new methodological focus on the models and terminologies in the integrated analysis of the deformation. A methodology is presented for the definition of the indexes of geotechnical vulnerability and the evaluation of the level of vulnerability in the Cuban industry, for different particularities of the interaction structure-soil, starting from the comparison of the values of the deformations (settlements) determined by geodesic methods with the tolerances fixed by the norm of foundations. This facilitates the application from the Geodesy to studies interdisciplinary of vulnerability of the structures in the construction processes and exploitation. It is carried out the validation of the methodology in four cases of study of the region nickeliferous of Holguín: machineries industrial "Rotational tubular dryer", deposits of toxic substances "Base of ammonia", deposits of substances inflammable "Fuel tank" and mineral deposits. It is demonstrated the feasibility of the results and the importance of the integral studies of vulnerability in the operational security of the industrial works and their facilities, starting from the interaction of conclusive approaches of several disciplines as the Geodesy, the Geophysics, the Geotechnics and the Civil Engineering.

KEY WORDS: Geotechnical vulnerability, deformation, settlements.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de grandes obras, tales como: hidrotécnicas, centrales electronucleares y edificios de considerables alturas, implica exigencias de gran rigor con respecto a su seguridad, duración en servicio y eficiencia. Por tal motivo, no se concibe su ejecución sin la aplicación de tecnologías apropiadas de las geociencias, que incluyen las mediciones geodésicas de alta precisión para el monitoreo de las deformaciones en los procesos de construcción y explotación.

En la actualidad se manifiesta la problemática de que los estudios para el monitoreo de las deformaciones no se realizan de forma multidisciplinaria (Geodesia, Geofísica, Geotecnia e Ingeniería Civil), ni se planifican con la rigurosidad necesaria durante los procesos de diseño, construcción y explotación, limitándose el alcance de la Geodesia en la predicción oportuna de la vulnerabilidad de las estructuras. En ocasiones se solicitan los estudios cuando los daños o desviaciones son apreciados a simple vista o afectan la seguridad y funcionamiento de la estructura y su maquinaria industrial, trayendo como consecuencia daños y pérdidas irreparables en el orden tecnológico, económico y social.

Estos aspectos han propiciado el desarrollo de nuevos procedimientos y terminologías en la modelación y análisis de las deformaciones a partir de un enfoque integrador, con el empleo de novedosos modelos (descriptivos y causa-respuesta), que describen el comportamiento de la interrelación terreno-estructura, expresando los resultados a través de un Sistema de Información Espacial de Deformaciones (SIED), con criterios concluyentes del período de vida de la estructura a partir del nivel de vulnerabilidad geotécnica (Chrzanowski et al. 1990; Acosta2009).

En el presente trabajo se analizan las aplicaciones de la metodología "Determinación de índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos" en la región niquelífera de la provincia de Holguín, Cuba, ubicada en los municipios de Mayarí y Moa (Figura 1). (Acosta, 2009)

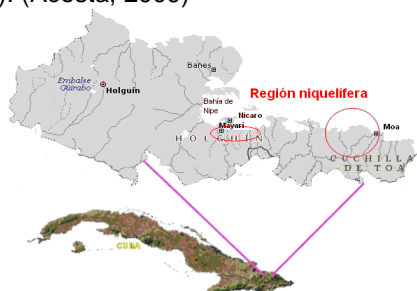


Figura1. Ubicación de la Región Niquelífera

En el diseño de los experimentos para validar la metodología se seleccionaron cuatro casos de estudio:

1. Maquinaria industrial (Secaderos).
2. Depósitos de sustancias tóxicas (Base de amoniaco).
3. Depósitos de mineral.
4. Depósitos de sustancias inflamables (Tanque de combustible).

Estos objetos están conformados por elementos estructurales comunes, presentes en la mayoría de las industrias, así como las condiciones de su cimentación, sustentada principalmente sobre estratos de baja resistencia con características de expansividad, que facilitan la ocurrencia de asentamientos diferenciales; tienen la particularidad de incluir los procesos de construcción y explotación.

Maquinaria industrial "Secaderos": Esta estructura forma parte de la mayoría de las industrias del níquel y de materiales de la construcción; formado por siete secaderos tubulares rotatorios (Figura 2), los cuales van a girar sobre rodillos y engranajes apoyados sobre los cimientos (tecnológicos).



Figura 2. Secador tubular rotatorio (Secadero)

Depósitos de sustancias tóxicas "Base de amoniaco": Se encuentran en las obras de apoyo a la industria, como es el caso de las Bases de Amoniaco y soportan depósitos de sustancias tóxicas (tanques horizontales y verticales), redes de tuberías y obras auxiliares de funcionamiento (Casa de bombas, Panel de control, Casa de compresores y Panel eléctrico). Figura 3.



Figura 3. Base de Amoniaco

Depósito de mineral: Es una estructura formada por muros de contención que soportan el ferrocarril y las cargas dinámicas que transitan por las vías, como son: trenes y vagones, alimentadores, grúas pórticos y transportador de mineral. Tiene una longitud de 370 m, un ancho de 70 m y altura o

profundidad de 4.5 m, su capacidad efectiva es de 116 550 m³. (Figura 4).



Figura 4. Vista frontal del depósito

Depósitos de sustancias inflamables “Tanque de combustible”: Es una estructura metálica, con un diámetro exterior de 32 m y una altura de 22.5 m, está cubierto por una bóveda de acero. La superestructura se cimentó sobre un anillo circular de hormigón armado de 900 mm de espesor, a 1.40 m sobre la superficie del terreno, apoyada en una capa de 1.9 m de macadán confinado y material de la cantera de Pilon en capas de 30 cm. El peso muerto de la estructura es aproximadamente de 3 000 t (Figura 5).



Figura 5. Tanque de combustible

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Metodología para la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica en las obras estructurales

La esencia de la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica (IVG) radica en la relación empírica que existe entre los valores de las deformaciones obtenidos por métodos teóricos y los determinados a partir de mediciones geodésicas a escala real y en condiciones de campo. 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 NC 1 (2007), donde actualmente uno de los más utilizados es el Método de los Estados Límites (MEL). Figura 6.

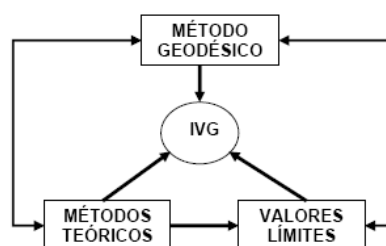


Figura 6. Determinación de los IVG

De acuerdo con Acosta (2009) la metodología para la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica en la vigilancia de las estructuras en los procesos de construcción y explotación, se distingue por combinar los valores de las deformaciones límites proyectadas con las observadas realmente por métodos geodésicos, lo que facilita los análisis multidisciplinarios e integrados de la deformación. Su esquema tecnológico se muestra en la Figura 7.

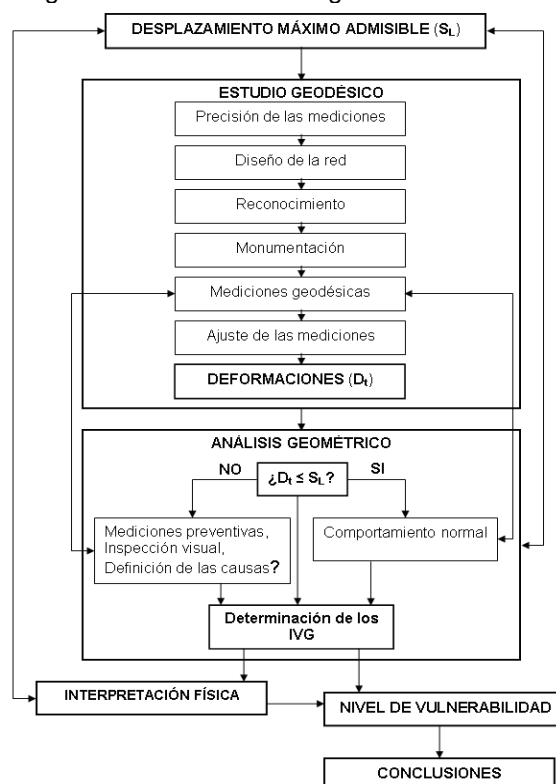


Figura 7. Esquema tecnológico

2.2. Deformaciones límites

A medida que particularizamos en la investigación de obras estructurales especiales en nuestro país, contribuimos al perfeccionamiento de la NC 1 (2007), debido a 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.

La definición del valor máximo admisible es imprescindible para el inicio del estudio geodésico, debido a que actualmente en muchos casos se obvia este parámetro, lo que trae como consecuencia afectaciones económicas y conclusiones que no se correspondan con la realidad del fenómeno que estamos investigando. Las tolerancias se tomarán de NC 1 (2007) y excepcionalmente para determinados casos, serán calculadas con la utilización de los métodos teóricos.

Para cada proyecto de ejecución de la obra los proyectistas civiles deben calcular el Estado Límite de deformación para un período determinado que incluye la puesta en servicio, al cual en lo adelante llamaremos deformaciones límites de la obra. En el procedimiento de cálculo NC 1 (2007) se especifica la revisión de las deformaciones límites (en los procesos de construcción y explotación). Donde se establece la condición:

$$D_t \leq T \quad (1)$$

Donde: D_t : Deformaciones totales medidas (absolutas y relativas).
 T : Tolerancias límites definidas por las normativas.

Al exponer estas tolerancias NC 1 (2007) utiliza la terminología de asentamiento medio, absoluto y distorsión angular, que detallaremos su significado a continuación.

El asentamiento medio se determina por las formulas:

$$S_{medio} = \left| \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{n} \right| \quad (2)$$

$$S_{medio} = \left| \frac{S_1 F_1 + S_2 F_2 + \dots + S_N F_N}{\sum_1^N F} \right| \quad (3)$$

Donde:

S_1, \dots, S_n - Asentamientos de los puntos de control.
 F_1, \dots, F_n - Áreas de la base de los cimientos, correspondientes a los puntos de control.

n : Número de puntos y N : número de cimientos.

En la práctica se pueden emplear cualquiera de las dos fórmulas, ya que los resultados son similares, en el caso de las losas de cimentación Sundakov (1981) recomienda utilizar la expresión (3) y para cimientos aislados, donde el área no es representativa, se usará la expresión (2).

El asentamiento absoluto es el valor máximo del desplazamiento en toda el área de la cimentación.

La distorsión angular (β) es una deformación relativa, producida por los asentamientos diferenciales, contiene elementos de la flecha relativa, inclinación, sus valores se dan en radianes y se calcula USACE (2002) mediante la expresión:

$$\beta = \frac{\Delta S}{L} \quad (4)$$

Donde:

ΔS - Asentamiento diferencial entre dos puntos.

L - Distancia entre los puntos donde se produce el asentamiento.

$$\Delta S = S_{máx} - S_{mín} \quad (5)$$

Donde:

$S_{máx}, S_{mín}$ - Valores máximos y mínimos de los asentamientos absolutos, en toda el área cargada de la cimentación.

Ambos indicadores de la deformación límite (S_L y β), se emplearán luego para el cálculo de los índices de vulnerabilidad geotécnica en diferentes objetos de obras.

La NC 1 (2007) presenta la limitante, que en la mayoría de los casos para las cimentaciones superficiales solo se hace referencia al asentamiento producido por las cargas verticales, excepto en las construcciones (presas y taludes) que poseen muros de contención y se deben considerar los desplazamientos horizontales producidos principalmente por la acción (empuje activo) de las cargas.

2.3. Estudio geodésico

El estudio geodésico se realiza en correspondencia con MET 30-27 (2004) desarrollada por GEOCUBA y tiene como máxima expresión la obtención del valor de la deformación (D_t).

Las observaciones de los desplazamientos deben cumplir las siguientes condiciones:

1. *Precisión*, donde el error de determinación ($e_{máx}$) de las coordenadas debe ser menor o igual a un cuarto de la deformación total máxima esperada ($e_{máx} \leq 1/4 D_t$). En los estudios de la deformación USACE (2002) calcula el error de máximo por:

$$e_{máx} = 1.96 \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_f^2} \quad (6)$$

Donde:

σ_i : Precisión durante el ciclo inicial.

σ_f : Precisión durante el ciclo final.

2. La *periodicidad* de las observaciones será una función de las velocidades de las

deformaciones y de la precisión que seamos capaces de lograr.

3. Se considera *movimiento o desplazamiento* total (D_t), aquel que sea mayor que el error máximo de determinación ($D_t > e_{máx}$).

Los métodos a emplear para el control de deformaciones pueden ser

tradicionales (Sundakov, 1981): Nivelación geométrica, nivelación trigonométrica, trilateración de lados cortos, nivelación hidrostática, microtriangulación con metodologías rigurosas y otros no tan tradicionales USACE (2002) como las mediciones combinadas que facilitan las Estaciones Totales y la tecnología GPS.

La confirmación de la estabilidad de los puntos de referencia es uno de los problemas principales en el análisis de las deformaciones, aún no resuelto, la dificultad radica en los defectos de los datos de las redes de monitoreo y cualquier distorsión puede afectar la fiabilidad de los resultados. En nuestro país se ha desarrollado una estrategia MET 30-27 (2004) para los análisis de estabilidad, que ha sido aplicada sucesivamente en la mayoría de los proyectos, con resultados satisfactorios.

Los puntos de control se ubicarán en el objeto de estudio de forma tal que permita el análisis geométrico y la interpretación física de las deformaciones, lo que propicia que con los resultados de las observaciones se pueda valorar sobre su deformación (asentamiento, desplazamiento horizontal e inclinación) en su base. Estos puntos se colocarán directamente en el cuerpo de los elementos estructurales (cimientos, columnas, losas y vigas).

El reconocimiento es una de las etapas más importantes para el estudio geodésico, en él debe participar un equipo multidisciplinario. La tarea principal es diseñar una red que modele el comportamiento del objeto, donde se le presta especial atención a la ubicación de los puntos de referencia, que constituyen la base y fiabilidad del estudio.

Los puntos de referencia y las marcas se construyen según MET 30-27 (2004). Para determinar las deformaciones se necesitan como mínimo tres ciclos de observaciones y, como máximo, cuantos sean necesarios en dependencia de las exigencias y de la magnitud del proceso de deformación a evaluar, por lo que, la periodicidad de las mediciones es determinante desde el punto de vista técnico y económico y es una problemática no resuelta en la actualidad.

De forma general se recomienda (Sundakov 1981; USACE 2002; MET 30-27 2004) que la periodicidad de las mediciones dependerá de la velocidad de las deformaciones en los procesos de construcción y

explotación de la obra. En la etapa constructiva de las obras estructurales suelen ocurrir las mayores deformaciones, esto implica que se deben realizar las mediciones en función del crecimiento de la carga (0, 25, 50, 75 y 100 %), y luego en el proceso de explotación los ciclos se espaciarán hasta alcanzar la fase de atenuación de las deformaciones, excepto, en suelos arcillosos donde el proceso de atenuación puede demorar varios años. El criterio más usado para la definición de la fase de atenuación o estabilización es la condición de que el valor de la deformación en los últimos tres ciclos permanezca dentro del rango de los límites de precisión o su error máximo de determinación.

El procesamiento de las mediciones se realizó por las herramientas desarrolladas en MET 30-27 (2004), que incluye el ajuste de las observaciones por el programa "AJUSNIV". De esta forma fueron determinadas las coordenadas de los puntos de control para cada ciclo. El valor de la deformación (D_i) se obtuvo a partir de la comparación de las coordenadas de las marcas entre cada ciclo.

Una vez concluido el estudio geodésico estamos en condiciones de realizar el análisis geométrico del proceso de la deformación, donde se chequeará el cumplimiento de la condición en el estado límite de servicio, con la particularidad de verificarlo a partir de mediciones a escala real y en condiciones de campo.

2.4. Análisis de vulnerabilidad geotécnica

Al chequear la condición $\Delta D \leq T$?, si la respuesta es afirmativa (SI), el comportamiento de la estructura es normal, pero es necesario revisar en qué etapa se encuentra la misma, si es en el proceso de construcción, deben continuarse los estudios, teniendo en cuenta que las deformaciones pueden incrementarse por el crecimiento de la carga sobre su base, principalmente la de uso; cuando la obra está en el periodo de explotación, pueden concluir el análisis de la deformación. Si el resultado es NO, entonces debemos definir las causas que producen las deformaciones como parte de la interpretación física, para ello realizaremos inspecciones visuales y mediciones preventivas por un equipo multidisciplinario, que a partir del nivel de vulnerabilidad geotécnica tomará las decisiones correspondientes, desde el mantenimiento hasta la paralización o fuera de servicio, por requisitos de seguridad operacional.

La relación entre los valores de las deformaciones máximas medidas en un objeto de obra (D_i) y las límites calculadas en el proyecto de ejecución de la obra (S_L) se puede definir como el **índice de vulnerabilidad geotécnica absoluto** (IVG_a).

$$IVG_a = \frac{D_t}{S_L} \quad (7)$$

La relación entre los valores máximos de las distorsiones angulares medidas y las límites calculadas en el proyecto de ejecución de la obra se puede definir como **el índice de vulnerabilidad geotécnica relativo** (IVG_r).

$$IVG_r = \frac{\beta_{observado}}{\beta_{límite}} \quad (8)$$

La determinación de los índices de vulnerabilidad está sujeta a la vigilancia de la estructura en los procesos de construcción y explotación, en correspondencia con Acosta (2009) las relaciones (7) y (8) se pueden dar los siguientes casos:

1. Las deformaciones medidas son menores que las deformaciones límites calculadas por proyecto. El $IVG_{a,r}$ es menor que 1. Se concluye que la vulnerabilidad geotécnica es baja. La obra se comporta según los parámetros de diseño. (Etapas de compactación)
2. Las deformaciones medidas son aproximadamente iguales a las deformaciones límites calculadas por proyecto. El $IVG_{a,r}$ es aproximadamente igual a 1. Se concluye que la vulnerabilidad geotécnica es "límite". La obra se comporta según los parámetros de diseño, puesto que no han sido superados; pero deben evitarse factores externos que puedan intensificar las deformaciones y hacer que estas superen sin dificultad los estados límites calculados.
3. Las deformaciones medidas son mayores que las deformaciones límites calculadas por proyecto. El $IVG_{a,r}$ es mayor que 1.
 - Para $IVG_{a,r}$ entre 1 y 1.5 se concluye que la vulnerabilidad geotécnica es media. Los cimientos de la obra se comportan fuera de los parámetros de diseño y deben adoptarse medidas para minimizar los riesgos que puede provocar un comportamiento anómalo de los suelos. (Etapas de deformación, "compactación y desplazamientos locales")
 - Para $IVG_{a,r}$ entre 1.5 y 2.0 se concluye que la vulnerabilidad geotécnica es alta. Los cimientos de la obra se comportan fuera de los parámetros de diseño. Comportamiento anómalo de los suelos. (Etapas de deformación "desplazamientos considerables")
 - Para $IVG_{a,r}$ mayores que 2.0 se concluye que la vulnerabilidad geotécnica es muy alta. Los cimientos de la obra se comportan muy

por encima de los parámetros de diseño. (Etapas de deformación "Levantamiento", aparecen desplazamientos laterales).

Esta clasificación se perfeccionará en la medida que se realicen ensayos a escala real para diferentes obras estructurales, para casos puntuales, desde un elemento estructural hasta un objeto de obra. En la Tabla 1 se muestra un resumen, que facilita el entendimiento de las condiciones expresadas anteriormente en función del nivel de vulnerabilidad geotécnica (NVG). (Acosta, 2009)

Tabla 1. Clasificación del NVG

IVG	IVG < 1	IVG ≈ 1	(IVG _{a,r}) > 1		
			1 > IVG < 1.5	1.5 > IVG < 2	IVG > 2
NVG	BAJA	LÍMITE	MEDIA	ALTA	MUY ALTA

El informe final con los resultados de los análisis de vulnerabilidad geotécnica se confecciona sin ambigüedades, se debe dejar claro la precisión con que se determinaron las deformaciones absolutas y relativas, así como el nivel de vulnerabilidad geotécnica a que está expuesta la obra.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Control de las deformaciones

En los objetos investigados se realizó el estudio de la deformación por métodos geodésicos en función de las cargas verticales, es decir, el asentamiento, excepto en el depósito de mineral donde se consideraron los desplazamientos horizontales. Para la determinación de los asentamientos se utilizó el método de la nivelación geométrica de precisión y para los desplazamientos horizontales se usó el método combinado.

La nivelación de primera categoría como caso especial se utilizó en los objetos que conforman la Base de amoniaco. Estableciendo MET 20-27 (2007) un Error Medio Cuadrático (EMC) en la determinación de las alturas < ± 1,0 mm y un error de cierre de la nivelación (f_h) menor o igual al calculado por la fórmula:

$$f_h = \pm 0.3 \text{ mm} \sqrt{n} \quad (9)$$

La nivelación de segunda categoría se utilizó para el resto de las obras estructurales (secaderos, depósito de mineral y el tanque de combustible), debido a que su cimentación se sustenta principalmente sobre suelos arcillosos de baja compresibilidad, con un EMC en la determinación de las alturas < ± 2,0 mm y el error de cierre de la

nivelación (f_h) menor o igual al calculado por la fórmula:

$$f_h = \pm 0.5 \text{ mm} \sqrt{n} \quad (10)$$

Donde: n- Numero de puestas de instrumento.

El método combinado se utilizó en el depósito de mineral, debido a que la mayor componente de la deformación se manifiesta en los desplazamientos horizontales. Las coordenadas (x, y) de los puntos de referencia y de las marcas se determinaron por la combinación de la tecnología GPS y la Estación Total. Se obtuvo una precisión de $\pm 5 \text{ mm}$, lo cual satisface las exigencias para este tipo de estructura. Las observaciones de la base de referencia se realizaron utilizando la tecnología GPS, por el método estático-relativo de forma radial. El tiempo de medición en los puntos principales fue de 1 hora y en los puntos de control de 30 minutos.

La curvatura por desplazamientos horizontales del muro 'E' se determinó utilizando el método de las alineaciones, tomando como referencia la alineación entre los puntos 'E0' y 'E30' ubicados en el inicio y final del muro respectivamente. Las coordenadas del resto de las marcas se determinaron por el método polar.

El análisis de la estabilidad de la Base de referencia de los objetos estudiados se realizó por MET 30-27 (2004), los resultados obtenidos son confiables y satisfacen las exigencias para el análisis integrado de las deformaciones, ya que los valores de los desplazamientos determinados no están influenciados por los datos iniciales.

Los puntos de control se situaron en los elementos estructurales de forma tal que representen las áreas más deformables y pueda modelarse la geometría del objeto por sus puntos característicos, lo que permite poder juzgar sobre el tipo de deformación (asentamiento, desplazamiento horizontal, inclinación y torsión) en su base.

El objeto "Secaderos" se controla a partir de los puntos 'CF-XIII', 'CF-3A' y 'E-14', por estar próximos al mismo. Para su monitoreo se colocaron un total de 77 marcas. Figura 8.

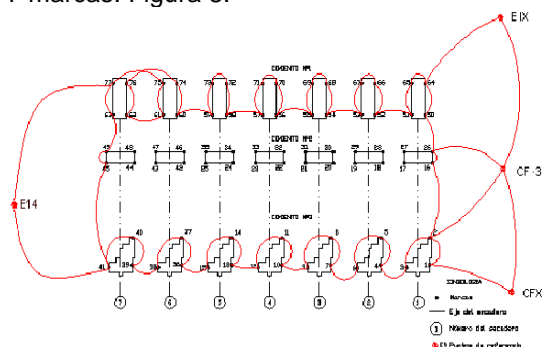


Figura 8. Esquema de la base geodésica

En la "Base de amoniaco" se realizó el análisis integrado de las deformaciones para todas las estructuras que la conforman, es decir, los tanques de solución amoniacal, balas de almacenamiento de amoniaco, obras auxiliares de funcionamiento, así como el área interior y exterior. El sistema de referencia para el control de los asentamientos está formado por tres puntos o ramillete de profundidad ('PR-1', 'PR-2' y 'PR-3'), situados fuera del área de influencia de la obra. Figura 9.

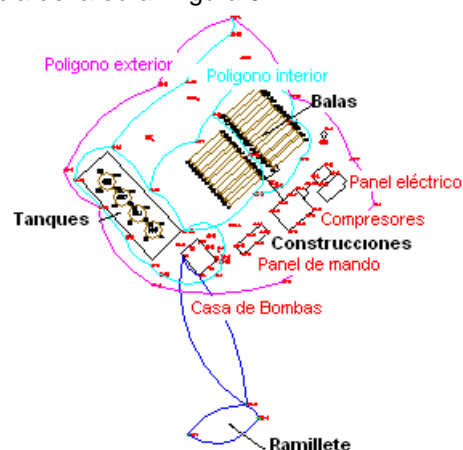
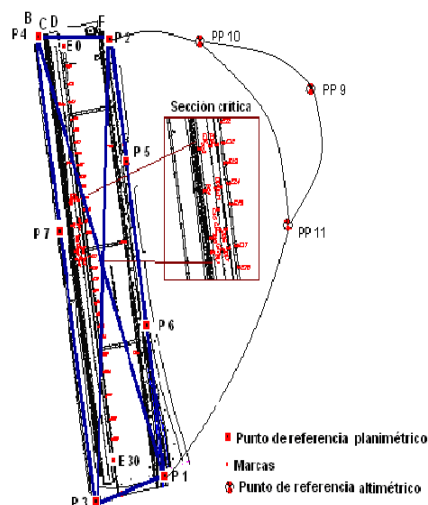


Figura 9. Esquema de la base geodésica

Para el monitoreo de las deformaciones (asentamientos y desplazamientos horizontales) en el "Depósito de mineral" se creó una base de referencia conformada por puntos planimétricos y altimétricos, ubicados fuera del objeto de estudio, a partir de la cual se determinaron las coordenadas de los puntos de control (marcas) empotradas en los diferentes cimientos y muros del objeto. (Figura 10).



'T2',..., 'T6') alrededor su perímetro, que se controlan del punto auxiliar 'C-8' y del Ramillete (PR1', 'PR2' y 'PR3'), situados fuera del área de influencia de la cimentación del tanque, a 60 y 150 m respectivamente. (Figura 11).

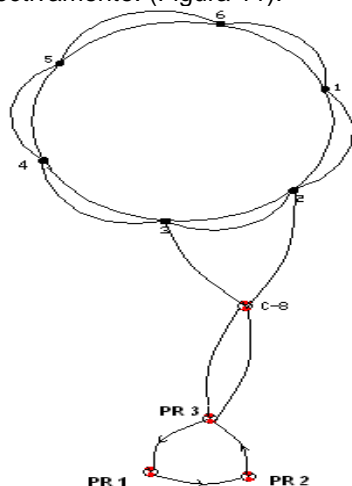


Figura 11. Esquema de la base geodésica

3.2. Evaluación de los niveles de vulnerabilidad geotécnica (NVG)

Luego de realizado el análisis geométrico y la interpretación física del proceso de la deformación, determinamos los niveles de vulnerabilidad, que demuestran la aplicación de la metodología a los casos de estudios. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Evaluación de los NVG

OBJETOS			IVG _{a,r}		NVG
			IVG _a	IVG _r	
Maquinaria Industrial "Secaderos"	5		0.7	0.7	Límite
	6		0.8	0.8	Límite
	7		1.0	0.9	Límite
Depósitos de sustancias tóxicas "Base de amoniaco"	Tanques(TK 603)		0.1	0.1	Baja
	Balas (RP- 08)		0.1	0.4	Baja
	Obras auxiliares	Bombas	0.1	0.2	Baja
		Mando	0.1	0.1	Baja
		Compresor	0.9	2.0	Alta
		Panel eléctrico	0.2	1.3	Media
Depósitos de Mineral			3.2	4.0	Muy Alta
Depósitos de sustancias Inflamables "Tanque de combustible".			0.7	1.0	Límite

4. CONCLUSIONES

Se crea una nueva metodología integral que permite incorporar los métodos geodésicos a los estudios de vulnerabilidad geotécnica para la industria cubana, demostrándose su factibilidad en las obras estructurales: maquinaria industrial (secaderos), depósitos de sustancias tóxicas (base de amoniaco), depósitos de sustancias inflamables (tanque de combustible) y depósitos de mineral, donde se pudo comprobar:

1. En la Base de amoniaco el carácter diferencial de las deformaciones ha causado daños que afectan su seguridad operacional y sus obras auxiliares (Casa de compresores y Panel eléctrico) tienen niveles de vulnerabilidad de alta y media respectivamente.
2. El secadero 7 tiene un nivel de vulnerabilidad límite y los secaderos 5 y 6 están muy próximos de alcanzarla.
3. El depósito exterior de mineral presenta un nivel de vulnerabilidad de muy alta, observándose daños en sus elementos estructurales, que son más significativos en su parte central, lo que afecta la seguridad operacional.
4. El Tanque de combustible alcanzó un nivel de vulnerabilidad límite, observándose serios daños en su cimentación.

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. Chrzanowski, A. et al. (1990). Combination of Geometrical Analysis with Physical Interpretation for the Enhancement of Deformation Modelling. XIX. FIG Congress, Helsinki 1990, Proceedings, Com. 6, pp. 326-341
3. MET 30-27 (2004). Metodología para el control de deformaciones de obras a partir de métodos geodésicos.
4. NC 1 (2007). Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales.
5. Sundakov, A. Ya. (1981). Trabajos Geodésicos para la Construcción de Grandes Obras Industriales y Altos Edificios. Editorial Mir. Moscú.
6. 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.