



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

Facultad de Ingeniería

SEDE "OSCAR LUCERO MOYA"

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES

TRABAJO DE DIPLOMA

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD GEOTECNICA EN LA BASE DE
AMONIACO DEL PUERTO DE MOA CON EL EMPLEO DE MÉTODOS GEODÉSICOS**

AUTOR: ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

HOLGUIN

2017



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
Facultad de Ingeniería

SEDE “OSCAR LUCERO MOYA”

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES

TRABAJO DE DIPLOMA

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD GEOTECNICA EN LA BASE DE
AMONIACO DEL PUERTO DE MOA CON EL EMPLEO DE MÉTODOS GEODÉSICOS**

TUTOR: Dr.C LUIS ENRIQUE ACOSTA GONZÁLEZ

AUTOR: ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

HOLGUIN

2017

PENSAMIENTO

Una investigación científica tiene que tener una base científica y tiene que disponer de un método científico de análisis.

Fidel Castro



DEDICATORIA

A mis padres fruto y redondez de lo que soy: semilla y luz

Al comandante invicto Fidel, huella indeleble de todos los tiempos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera podido realizarse, sino hubiese contado con la ayuda de algunas personas que además de mostrarme el camino de la investigación, se han convertido en paradigmas a seguir dentro de mi carrera profesional, otros que me han demostrado el valor y la entrega a los sueños con una mirada altruista, solo por el hecho de ayudar a continuar, y a los que me dieron amor y la mejor sonrisa para seguir adelante: Bastón, soporte y fe en todo lo que haga.

A mis padres y mi familia que son ejemplos a seguir en el orden profesional y personal.

A mi tutor el Dr. C. Luis Enrique Acosta González.

A mi novia Grethel Díaz Ramírez y a mis suegros Tere y José.

A mi abuelo técnico y guía de la construcción.

A los compañeros de trabajo de mi madre.

A mis amigos de verdad.

A todos lo que de un modo u otro se preocuparon por mí.

RESUMEN

El Trabajo de Diploma aborda la problemática de los estudios de vulnerabilidad en las obras de ingeniería y de alto riesgo, como es el caso de la Base de Amoniaco del puerto de Moa. Donde se aplica la metodología para la "Determinación de índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos", con un nuevo enfoque metodológico sobre los modelos y terminologías en el análisis integrado de la deformación, tales como: índices y niveles de vulnerabilidad geotécnica, que constituyen indicadores de vigilancia cuantitativos y cualitativos respectivamente. Su cálculo se realiza a partir de la comparación de los valores de las deformaciones (asentamientos) determinadas por mediciones geodésicas en condiciones de campo, con las tolerancias fijadas por la norma cubana para el diseño de cimentaciones. Lo anterior facilita la aplicación de la Geodesia a estudios multidisciplinarios de vulnerabilidad de las estructuras en los procesos de construcción y explotación. Se demuestra la factibilidad de la metodología y la importancia de los estudios integrales de vulnerabilidad en la seguridad operacional de los objetos principales de los depósitos de sustancias tóxicas (Balas y Tanques de solución amoniacal), sus obras auxiliares (casetas de mando , de bombas, de compresores, del panel eléctrico y la torre de enfriamiento) y sus interconexiones, a partir de los resultados obtenidos y la interacción de criterios concluyentes de varias disciplinas como la Geodesia, la Geofísica, la Geotecnia y la Ingeniería Civil que complementa este estudio. En este trabajo de Diploma se utilizaron los siguientes métodos de investigación: métodos teóricos entre ellos: Histórico-lógico, Análisis y síntesis, Hipotético- deductivo y Modelación; de igual manera utilizamos métodos Matemáticos y estadísticos. Empleamos como Norma para la edición bibliográfica el sistema APA.

SUMMARY

The Diploma Work approaches the problem of the vulnerability studies in the engineering works and of high risk, like it is the case of the Base of Ammonia in the port of Moa. Where the methodology is applied for the " Determination of indexes of geodesic methods", with a new methodological focus on the models and terminologies in the integrated analysis of the deformation, such as: indexes and levels of geothenic vulnerability that constitute quantitative and qualitative indicators of surveillance respectively. Its calculation is carried out starting from the comparison of the values of the deformations (settlements) determined by geodesic mensurations under field conditions, with the tolerances fixed by the Cuban norm for the design of foundations. The above-mentioned facilitates the application from the Geodesy to multidisciplinary studies of vulnerability of the structures in the construction processes and exploitation. It is demonstrated the feasibility of the methodology and the importance of the integral studies of vulnerability in the operational security of the main objects of the deposits of toxic substances (Bleat and Tanks of amoniacal solution), their auxiliary works (control huts, of bombs, of compressors, of the electric panel and the cooling tower) and their interconnections, starting from the obtained results and the interaction of conclusive approaches of several disciplines as the Geodesy, the Geophysics, the Geotechnics and the Civil Engineering that it supplements this study. In this Diploma Work the following research methods were used: theoretical methods among them: Historical-Logical, Analysis and Synthesis, Hypothetical - Deductive and Modeling; at the same time we used Mathematical and Statistical methods. We used as bibliographical norms of editions the APA system.

ÍNDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO-I: ESTADO ACTUAL DE LA DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VULNERABILIDAD GEOTÉCNICA EN LA BASE DE AMONIACO DEL PUERTO DE MOA POR MÉTODOS GEODÉSICOS	6
Introducción al capítulo.....	6
I.1 Origen de las deformaciones y comportamiento en las estructuras.....	6
I .1.1 Clasificación de los asentamientos	8
I .2 Situación vulnerable	12
I .2.1 La vulnerabilidad global.....	13
I .2.2 Evaluación de vulnerabilidad	15
I .3 Vulnerabilidad Geotécnica	16
I.4 Principales causas de fallas en las cimentaciones de las estructuras	16
I.5 Métodos para el estudio de las deformaciones en las estructuras	17
I .5.1 Modelos y terminologías para el análisis integrado de las deformaciones.....	19
I .5.2 Modelación de la interacción terreno- estructura.....	20
I .5.3 El análisis tradicional o convencional de la deformación.....	21
I .5.4 Sistemas dinámicos y análisis avanzado de la deformación.....	22
I .5.5 Estudios de índices de vulnerabilidad en las estructuras.....	25
I .6 Conclusiones parciales del capítulo.....	26
CAPITULO-II: EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD GEOTECNICA EN LA BASE DE AMONIACO DEL PUERTO DE MOA CON EL EMPLEO DE MÉTODOS GEODÉSICOS.....	28
Introducción al capítulo.....	28
II.1 Procedimiento general para la introducción de los índices de vulnerabilidad geotécnica	28
II.2 Caracterización de la metodología para la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica en las estructuras.....	29
II .2.1 Esquema tecnológico del análisis integrado de las deformaciones	29
II .2.2 Determinación del desplazamiento máximo admisible.....	30
II .2.3 Estudio geodésico.....	32
II .2.3.1 Precisión de las mediciones.....	32
II .2.3.2 Diseño de la red de control geodésico	32
II .2.3.2.1 Puntos de referencia	33

II .2.3.2Puntos de control.....	33
II .2.3.3Reconocimiento.....	34
II .2.3.4Monumentación de los puntos de referencia y marcas.....	35
II .2.3.5Mediciones geodésicas reiteradas.....	35
II.2.3.6Métodos geodésicos empleados.....	36
II .2.4 Análisis geométrico e interpretación física de las deformaciones.....	37
II .2.5 Determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica.....	38
II .2.6Clasificación del nivel de vulnerabilidad geotécnica del objeto de obra.....	38
II .2.7Informe resultado del análisis de vulnerabilidad geotécnica.....	40
II.3 Aplicación de la metodología para determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos en la base de amoniaco del Puerto de Moa.....	40
II .3Características físico-geológicas de la región niquelífera.....	41
II .3.1Características físico-geológicas de la Base de Amoniaco.....	41
II.3.2 Caracterización general de los parámetros para determinar los índices de vulnerabilidad geotécnica en la base de amoniaco.....	42
II .4Metodología del control de las deformaciones.....	44
II .4.1Método de la nivelación geométrica de alta precisión.....	44
II .4.2 Creación de la base de referencia y puntos de control.....	45
II.5 Resultados obtenidos del análisis integrado de las deformaciones.....	45
II .6Evaluación de los niveles de vulnerabilidad geotécnica en la base amoniaco del Puerto de Moa.....	52
II.7 Interpretación física de las deformaciones.....	53
II .8 Conclusiones parciales.....	54
CONCLUSIONES GENERALES:.....	55
RECOMENDACIONES.....	56
BIBLIOGRAFÍA.....	1
ANEXOS.....	5

INTRODUCCION

El triunfo de la Revolución cubana en 1959 generó un cambio social, estético y cultural. Se tomaron disímiles medidas para favorecer al pueblo y desarrollar la industria en el país. La Minería ocupaba un lugar prioritario en este sentido, y se establece un programa encaminado a precisar y desarrollar el potencial minero de la isla. Cuba en la actualidad cuenta con las principales reservas de níquel del mundo. Esto le ha permitido desarrollar una industria que está representada por tres plantas: Comandante René Ramos Latour, en Nicaro, la Comandante Pedro Soto Alba, en Moa, y la Comandante Che Guevara, en Punta Gorda.¹

Antes del período revolucionario las obras de ingeniería y arquitectura construidas en Cuba, requirieron al menos de un control de deformaciones por métodos geodésicos; sin embargo, no es hasta después de 1980 que se llega a materializar este control para el estudio y seguimiento de la Central Electronuclear (CEN) de Juraguá, los proyectos de la CEN de Holguín, los estudios de las Centrales Hidroacumuladoras (CHA) en Sancti Spíritus y Holguín, la Refinería de petróleo de Cienfuegos, Planta Mecánica de Santa Clara y Camagüey, la construcción de las industrias de níquel en Moa y demás obras sidero-mecánicas que requirieron una mayor presencia y especialización de la Geodesia en el monitoreo de las deformaciones en los procesos de construcción y explotación.

¹ Cuba posee la mayor reserva de níquel del mundo, es su sexto productor mundial y ocupa el segundo lugar en el planeta. En la década de los años 40 y 50 del pasado siglo XX se crea la empresa de níquel-a instancias del gobierno norteamericano que imperaba en Cuba y que necesitaba desarrollar su industria armamentista -, cuyo nombre respondía a Nicaro Nickel Company. En el propio año 60 la Nicaro Nickel Company fue nacionalizada, con lo cual se cumplía la resolución 16 del gobierno revolucionario. En la era revolucionaria la fábrica pasa a llamarse Empresa Cmdte. René Ramos Latour, cuyo nombre llenó de júbilo a los trabajadores de la empresa, sin embargo, en la actualidad no está funcionando. También, existen dos empresas más, localizadas en el municipio de Moa, también al norte de la provincia de Holguín: la Ernesto Ché Guevara y la Pedro Sotro Alba, esta última responde a la empresa mixta cubano-canadiense con la Sherrit International.

Nótese que 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.

A partir del terremoto ocurrido el 25 de marzo de 1992, se comenzaron a ejecutar una serie de investigaciones por parte de diferentes instituciones, tales como: GEOCUBA, el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM) y La Universidad de Holguín, para conocer con exactitud el comportamiento de los suelos de la región niquelífera, principalmente en las zonas Moa, Nicaro y Félton.

La industria niquelífera ha tomado un gran auge constructivo y productivo, favoreciendo la necesidad de –con la aplicación de los métodos geodésicos– definir el comportamiento en espacio y tiempo de sus objetos de obra, así como el esclarecimiento de las causas que producen las deformaciones (desplazamientos horizontales y asentamientos) y hallar una explicación a los distintos fenómenos que afectan la seguridad y eficiencia industrial.

Lo que se ha explicado anteriormente está ocurriendo en la base de amoníaco del Puerto de Moa. En esta obra se almacena y disuelve el Amoníaco (NH_3) que se utiliza en el proceso químico para la obtención del Níquel más Cobalto (Ni + Co).

Esta estructura ha sido emplazada en áreas complejas, con características geológicas y estructurales de interés, presentándose las siguientes limitaciones:

Antecedentes:

1. No existe una base de datos, producto de la comparación de las magnitudes de las deformaciones observadas por métodos geodésicos con los valores

pronosticados y normados por métodos geotécnicos en el proyecto de cimentación.

2. No se realiza el análisis integrado (interdisciplinario) para la interpretación de los resultados de las mediciones geodésicas, con vistas a emitir consideraciones sobre la influencia de las deformaciones, la estabilidad y la seguridad de los objetos estudiados.
3. No se aplica con una metodología específica para el estudio de los objetos industriales, basada en la determinación de los índices y niveles de vulnerabilidad geotécnica en las condiciones ingeniero-geológicas de Cuba.

Considerando la situación planteada anteriormente, se define como problema científico de esta investigación: ¿Cómo evaluar el nivel de vulnerabilidad geotécnica en los depósitos de sustancias tóxicas?

En consecuencia, con el problema científico declarado, se plantea como objeto de la investigación: La base de amoníaco del Puerto de Moa.

Campo de acción: La vulnerabilidad geotécnica en la base de amoníaco del Puerto de Moa.

Se define entonces como objetivo general de la investigación: Evaluar la vulnerabilidad geotécnica en la base de amoníaco del Puerto de Moa con el empleo de métodos geodésicos.

En correspondencia con el objetivo general se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. Considerar los conceptos básicos y principales métodos que se utilizan en el estudio de las deformaciones, mediante el análisis de los antecedentes y estado actual de la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica en las estructuras.
2. Evaluar la vulnerabilidad geotécnica en la base de amoníaco del Puerto de Moa con el empleo de métodos geodésicos, a partir de la aplicación de la metodología para la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica.

3. Validar la factibilidad de la metodología propuesta para la evaluación de la vulnerabilidad geotécnica en las estructuras de la Base de Amoníaco del Puerto de Moa.

Para dar solución al problema planteado y cumplir los objetivos propuestos en la investigación, se plantea como Hipótesis: Si se aplica una metodología para la evaluación de los niveles de vulnerabilidad geotécnica en la base de amoníaco del Puerto de Moa, es posible tomar decisiones oportunas y elevar la seguridad operacional de la industria.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron los siguientes métodos de investigación:

Métodos teóricos:

- Histórico-lógico: Para la revisión y análisis de los documentos y definir los principales antecedentes y fundamentos de los métodos en la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica de objetos industriales.
- Análisis y síntesis: Para revelar la actualidad del problema que se investiga, analizar los datos existentes e informaciones relacionadas con la temática. Se consultó y analizó toda la información disponible en Internet, visitando los sitios WEB más importantes de instituciones productivas, de investigación y universidades.
- Hipotético-deductivo: Para proponer la hipótesis inicial a partir de la experiencia acumulada en el tema, así como para deducir los resultados esperados y verificar su nivel de cumplimiento.
- Modelación: Se trabajó con modelos matemáticos para describir la interacción estructura – suelo.

Métodos matemáticos y estadísticos:

- Matemáticos -Estadísticos: Se aplicó para el diseño de los experimentos y el análisis de los resultados de las mediciones.

Novedad: Se aplica una metodología para el análisis integrado de las deformaciones, a partir de la introducción de los índices de vulnerabilidad geotécnica en la vigilancia de

los objetos de obra de la base de amoníaco, lo que permite la aplicación de la Geodesia en la seguridad operacional de la industria y en las soluciones de proyectos de otras disciplinas como ingeniería Civil.

Del mismo modo, se demuestra la factibilidad de la aplicación de los métodos geodésicos para comprobar los valores de las deformaciones límites establecidos en las normativas para el diseño geotécnico en Cuba para la base de amoníaco del Puerto de Moa.

Actualidad del tema: La evaluación de la vulnerabilidad de los depósitos de sustancias tóxicas "Base de Amoníaco" constituye una temática actual y de interés a nivel nacional e internacional, siendo una preocupación constante de especialistas y proyectistas, el hecho de definir criterios rigurosos (cuantitativos y cualitativos) para la vigilancia de estas obras en los procesos de construcción y explotación. Con ello se logra hacer correcciones oportunas a las desviaciones detectadas durante control de estas obras.

Aporte de la investigación: Se evalúa la vulnerabilidad geotécnica de una obra de alto riesgo, a partir del empleo de una metodología que permite la toma de decisiones interdisciplinarias para mantener la seguridad operacional de los principales objetos, obras auxiliares y las interconexiones en la Base de Amoníaco del Puerto de Moa.

Límite de la investigación: Evaluar la vulnerabilidad geotécnica en los objetos de obra de la Base de Amoníaco y sus interconexiones.

La investigación en lo adelante está estructurada en dos capítulos, conclusiones, recomendaciones y anexos. El primer capítulo aborda los aspectos de carácter teórico y práctico referencial sobre el estado actual de la temática a investigar. En el capítulo II, se aplica una metodología para determinar y evaluar los índices de vulnerabilidad geotécnica de depósitos de sustancias tóxicas en calidad de objeto de estudio.

CAPITULO-I: ESTADO ACTUAL DE LA DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VULNERABILIDAD GEOTÉCNICA EN LA BASE DE AMONIACO DEL PUERTO DE MOA POR MÉTODOS GEODÉSICOS

Introducción al capítulo

En el Capítulo I se conceptualiza a partir de las valoraciones de diferentes especialistas los tipos de deformaciones y su comportamiento en la estructura, del mismo se abordan términos de vulnerabilidad y riesgos que se tendrán en cuenta en la base de amoníaco del Puerto de Moa, así como las principales causas de fallas en las cimentaciones. La investigación está dirigida desde una dimensión histórica, teórico – metodológica y empírica.

I.1 Origen de las deformaciones y comportamiento en las estructuras

La deformación es un fenómeno espacial que ocurre principalmente por la acción de las cargas en el transcurso del tiempo, en el cual varía la forma de un objeto o parte de éste y se expresa por dos componentes básicos: el asentamiento y el desplazamiento horizontal. Estas se originan fundamentalmente por dos grupos de causas; causas naturales y causas técnico- exógenas². Dentro de la primera, como su nombre lo indica es todo lo relacionado con cambios medioambientales o sea de origen natural en este caso tenemos en cuenta:

- Variación de las características geotécnicas del suelo, dentro de las cuales se destacan los cambios en la relación de vacíos y la orientación de las partículas bajo la acción de las cargas.
- Los procesos endógenos provocados por las fuerzas tectónicas y sus resultados (terremotos, volcanes), etc.
- Los procesos exógenos provocados por fenómenos atmosféricos (lluvia, viento, sol, temperatura), manifestándose en la variación de las condiciones hidrotécnicas del suelo.

² Monitoreo geodésico de la deformación en tanques verticales de almacenamiento de combustibles, cimentados sobre pilotes y otras soluciones constructivas. IX Congreso Internacional Geomática 2016.

En cambio, las relacionadas en el orden técnico- exógenas tienen presente:

- Las características estructurales relacionadas con la acción del peso de la obra y obras circundantes, la forma, dimensiones y consistencia del cimiento. Así como la distribución de las cargas dinámicas y estáticas en la obra.
- La vibración de los cimientos provocados por los diferentes agregados, mecanismos, movimientos del transporte y otras influencias dinámicas.
- Variación de las condiciones portadoras del suelo, relacionadas con la disminución o aumento del nivel de las aguas subterráneas durante la ejecución de los trabajos de construcción y explotación.

El comportamiento de las estructuras puede variar según las deformaciones, estas definen su estabilidad y funcionabilidad. Un comportamiento tenso-deformacional que difiera sustancialmente del concebido en el diseño original puede causar severos daños si no es detectado oportunamente. Estas pueden surgir por la influencia de diferentes factores naturales y técnicos-exógenos, tanto en su base como en la propia construcción.

En la literatura consultada se abordan las clasificaciones de las deformaciones³; sin embargo estos estudios hacen mayor referencia a los asentamientos que a los desplazamientos horizontales, al parecer por tratar principalmente las estructuras como edificios y puentes, con cimentaciones rígidas e hiperestáticas que no permiten este desplazamiento; estos son más comunes en presas, taludes y muros de contención. Sin embargo, en algunos casos el fallo de las obras por esta causa ha producido resultados desastrosos.

Desde el punto de vista teórico nos sumamos al criterio de Acosta (2009) quien señala que la clasificación establecida por *USACE EM 1110-1-1904 (1990)*; *USACE EM 1110-2-1009 (2002)* es una de las más aceptadas en la actualidad porque la misma subdivide las deformaciones en desplazamientos verticales (asentamientos) y desplazamientos

³ En este sentido se consultó HEUNECKE, O. & WELSCH, W. 2000 *USACE EM 1110-2-1009, (2002)* SAVVAIDIS, P. 2003.

horizontales, concediéndole la importancia o prioridad en el monitoreo en función del tipo de estructura y los daños que pueda ocasionar por su fallo.

Teóricamente existen varias definiciones sobre asentamientos entre las que se destacan los estudios comprendidos en el Manual de carreteras del Paraguay Normas de Ensayos de Materiales 2011⁴, y trabajos de Técnicas de Refuerzo y Recimentación Sistemas no Tradicionales (2014). Del mismo modo los estudios de Acosta (2009), quien como se verá posteriormente en la metodología que expone y utilizaremos en nuestra investigación, tiene en cuenta los desplazamientos verticales para hallar los índices de vulnerabilidad.

Por lo que asumimos que el asentamiento es la deformación vertical producida por el aumento de carga casi siempre de forma vertical en un espesor de suelo determinado, resultado de la consolidación del suelo bajo la acción del peso de la estructura y en casos aislados del propio peso del terreno.

Es necesario destacar que dentro de los asentamientos debemos tener en cuenta: los hundimientos, encogimientos e hinchamientos porque afectan la estabilidad del suelo y constituyen elementos medidores de este.

Los hinchamientos y encogimientos son deformaciones originadas por el incremento o disminución del volumen de algunos tipos de suelos arcillosos al variar su humedad, temperatura o la acción de agentes químicos.

Los hundimientos de la superficie terrestre son causados fundamentalmente por excavaciones de yacimientos minerales, disminución del volumen del manto freático, en una región considerable de territorio.⁵

I .1.1 Clasificación de los asentamientos

En las investigaciones realizadas se muestra una de las clasificaciones más aceptadas de los asentamientos en función del tiempo ⁶(Tabla 1):

⁴ Manual de carreteras del Paraguay Normas de Ensayos de Materiales tomo 6 volumen I (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones - 1ra Edición – 2011,

⁵ 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.

Tabla 1 Clasificación de los asentamientos en función del tiempo.

Tiempo	Tipo	Etapas
$t = 0$	Asentamiento inicial	Sci: Asentamiento por consolidación inicial. Sde: Asentamiento por distorsión elástica. Ssi: Asentamiento secundario inicial.
$t > 0$	Asentamiento diferido	Sd: Asentamiento por consolidación primaria Ssd: Asentamiento por consolidación secundaria
$t \gg 0$	Asentamiento secular	Ss: Asentamiento secular

Como se explicó anteriormente los asentamientos constituyen deformaciones de los suelos, y estas a su vez de acuerdo con el grado de uniformidad de su magnitud en plano pueden ser: uniformes y diferenciales como se explicará más adelante.

También es importante conocer que el asentamiento de una edificación consta de dos partes principales:⁷

1. Asentamiento inmediato:

Este tipo de caso se puede notar a medida que avanza la construcción, esta parte en algunos manuales deja recomendaciones para evitar una falla de las cimentaciones antes de terminar la construcción.

⁶ González, M. (2001) El terreno. ISBN: 84-830 1-530-7. Ediciones UPC

González de Vallejo, Luís I. et al. (2006), Ingeniería Geológica Parte I y II. ISBN-84-205-3104-9. Editorial ORVMU.SA. España.

⁷ Asentamientos Diferenciales de Estructura docx Feb 19, 2014.

2. Asentamiento por consolidación:

Se manifiesta debido a la reducción del volumen del suelo, causada por la extracción de una parte del agua de los poros del suelo, esto se ve en suelo con una napa freática superficial o en suelos arcillosos.

Los asentamientos uniformes se presentan cuando en el subsuelo las deformaciones son igual en cualquier punto de la superficie construida, este caso se presenta en lugares en el que el tipo de suelo, es el mismo en el área de construcción y también el contenido de agua, considerando las cargas en sus cimentaciones iguales en cada una de ellas. (Figura 1)

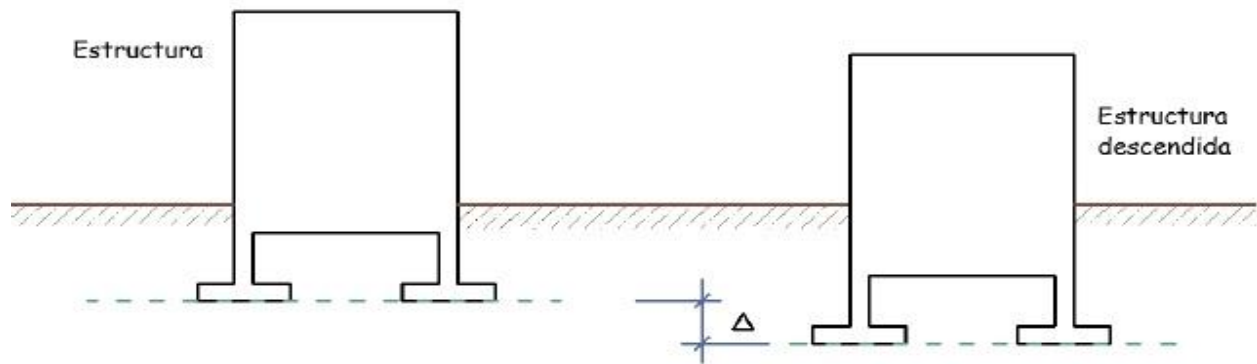


Figura 1 Asentamientos uniformes.

Mientras que, los asentamientos diferenciales se muestran en la mayoría de los casos, cuando la estructura tiene diferentes asentamientos de un punto a otro y cambia la magnitud y distribución de los esfuerzos con el que fue diseñado la estructura; se puede dar por la variación de la composición del suelo, lo que causa que sean diferentes. Pueden provocar fallas funcionales debido al descuadre de ventanas y puertas, también produce cortes en elementos estructurales, giros que pueden causar torsión y flexión, debido a que la estructura sufre diferentes asentamientos. (Figura 2)

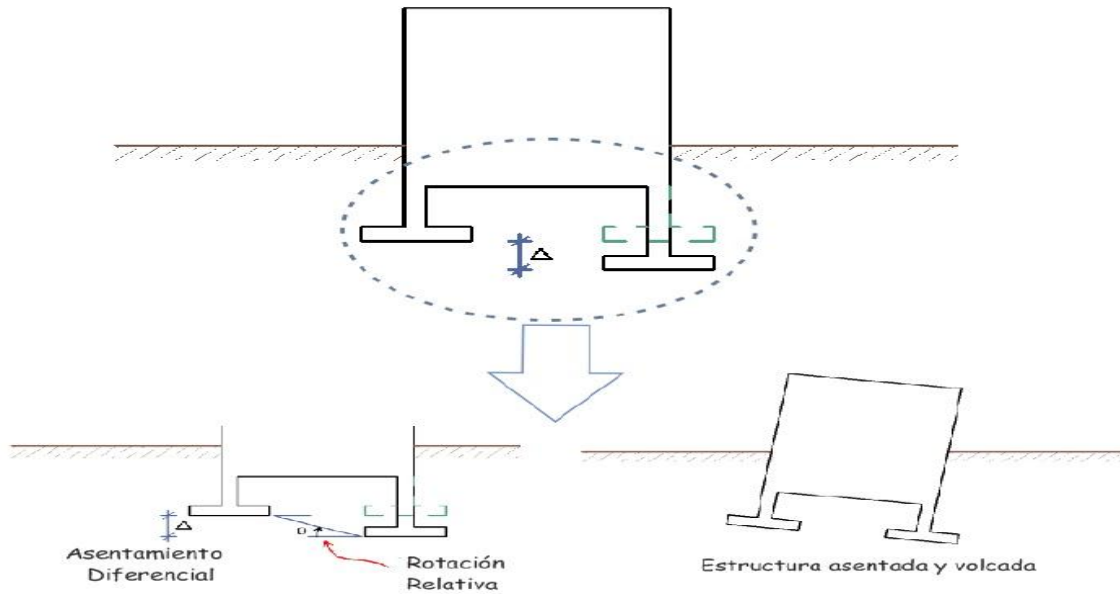


Figura 2 Asentamientos diferenciales.

En nuestra investigación son de gran importancia -como se verá después-, los asentamientos diferenciales que se determinan por la diferencia de los desplazamientos entre dos puntos, situados en cimientos contiguos o aislados, lo cual trae como consecuencia el surgimiento de los siguientes movimientos (valores relativos) en el cuerpo de la obra:

1. Giro o inclinación.
2. Distorsión angular.
3. Flecha relativa.
4. Ángulo de torsión de la construcción.

En nuestro estudio la distorsión angular y la flecha relativa son deformaciones necesarias para la metodología a aplicar, pues afectan la vulnerabilidad de los elementos de una obra estructural. La flecha relativa (Δ/L), es el máximo desplazamiento de un punto respecto a la línea que una los puntos extremos de una dirección (Δ) dividido por la distancia (L) entre dichos puntos, y la distorsión angular (β), es la relación (δ/L) entre el asiento diferencial entre dos puntos (δ) y la distancia que los separa (L). (Figura 3).

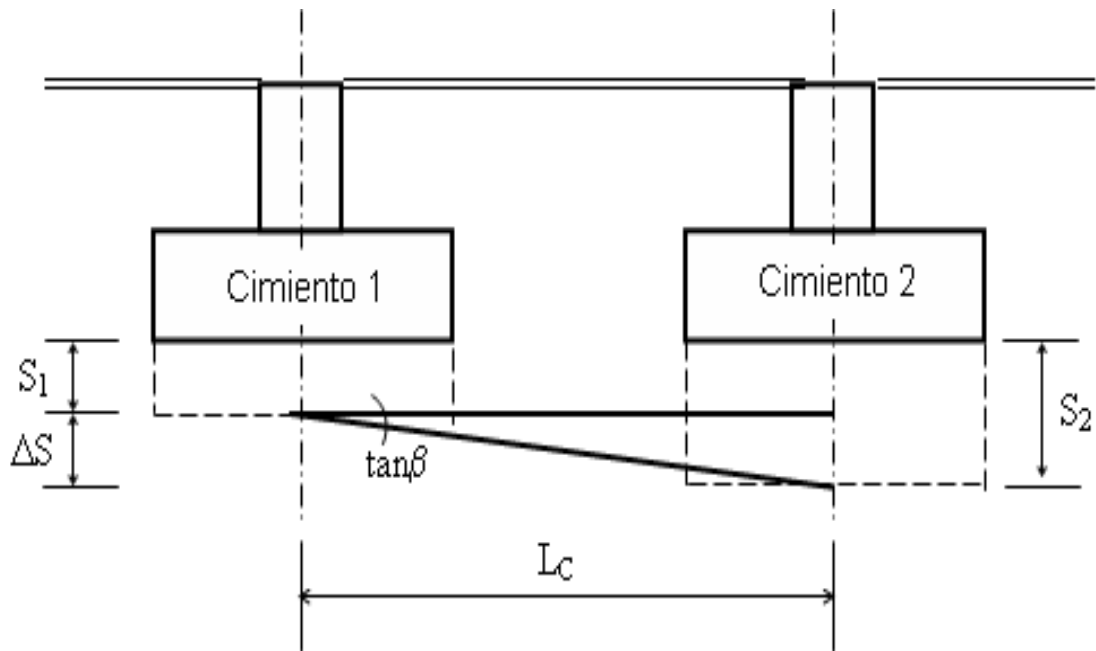


Figura 3 Desplazamiento de un cimiento superficial [NC 1: 2007].

I.2 Situación vulnerable

Es necesario conocer cuando estamos ante una situación vulnerable pues ello prevé y atenúa las consecuencias a las que nos enfrentamos. El ser vulnerable a un fenómeno natural nos hace ser susceptible de sufrir daño y tener dificultad de recuperarse de ello. No toda situación en que se halla el ser humano es vulnerable, pues hay situaciones en las que la población sí está realmente expuesta a sufrir daño de ocurrir un evento natural peligroso (sismo, aluvión, huracán, tempestad eléctrica), etc. Sin embargo hay otras, en que la gente está rodeada de ciertas condiciones de seguridad, por lo cual puede considerarse protegida⁸.

La situación de vulnerabilidad está determinada por la aplicación de políticas dimensionadas a nivel de estructura social y económica en los diferentes países para mitigar los daños que estas provocan, sin embargo dependen de varias causales como: formas de producción atrasadas, escasez de bienes, analfabetismo y bajo nivel de educación, escasos recursos naturales, segregación social, concentración de la

⁸ Marskey, A. 1993. Comp. CO. La Red. 24-29 p.

propiedad, entre otros. Del mismo modo, las precarias condiciones económicas por sí mismas también generan condiciones de vulnerabilidad, ya que la magnitud de daño real es mayor si la población carece de los recursos a partir de los cuales pueda recuperarse.

Existen condiciones de vulnerabilidad física detrás de las cuales hay causas socioeconómicas. Ahora se puede entender la responsabilidad del hombre en la producción de los desastres naturales, sabiendo que los fenómenos naturales no causarían ningún daño si se hubiera entendido cómo funciona la naturaleza y de ahí crear un ambiente acorde con dicho conocimiento.

Resulta significativo destacar que la prevención es indispensable para evitar situaciones vulnerables en todos los órdenes de la vida. Cuba es un ejemplo a resaltar donde no solo se consolida la voluntad del hombre, sino que forma parte de la estructura socio-política del país, que a su vez ha propiciado en la población una cultura sobre el tema, donde la especialización del capital humano, comunicación oportuna y los recursos tecnológicos y materiales contribuyen a tener una responsabilidad colectiva.

I .2.1 La vulnerabilidad global

La vulnerabilidad global es un fenómeno que no solo determina un espacio físico determinado, sino que implica todo un sistema por lo que es necesario conocer su conceptualización. La vulnerabilidad es el grado de pérdida (que puede ser medido de 0 a 100 por ciento) generado como resultado de la acción o presencia de un fenómeno potencialmente dañino en un lugar específico. El riesgo es directamente proporcional a la vulnerabilidad, esto es, cuanto mayor es la vulnerabilidad, mayor será el riesgo en el que se encuentra una región o población en particular. La vulnerabilidad global se divide en distintas vulnerabilidades que se encuentran interconectadas entre sí, pudiendo destacar que estas divisiones son sólo diferentes perspectivas que permiten evaluar la vulnerabilidad como un fenómeno global y entre estas están⁹:

⁹ Wilches-Chaux, G. 1998. La vulnerabilidad Global. Los desastres no son naturales.

1. La vulnerabilidad natural.

Es la vulnerabilidad intrínseca a la que está expuesto todo ser vivo, determinada por los límites ambientales dentro de los cuales es posible la vida y por las exigencias internas de su propio organismo.

2. La vulnerabilidad física.

Está referido directamente a la ubicación de asentamientos humanos en zonas de riesgo, y las deficiencias de sus infraestructuras para absorber los efectos de dichos riesgos.

3. La vulnerabilidad Social.

Se refiere al nivel de cohesión interna que posee una comunidad. Cuanto mejor y mayor se desarrollen las interrelaciones dentro de una comunidad, es decir sus miembros entre sí y a su vez con el conjunto social, menor será la vulnerabilidad presente en la misma. La diversificación y fortalecimiento de organizaciones de manera cuantitativa y cualitativa encargadas de representar los intereses del colectivo, pueden considerarse como un buen indicador de vulnerabilidad social, así como mitigadores de la misma.

4. La Vulnerabilidad Política.

Constituye el valor recíproco del nivel de autonomía que posee una comunidad para la toma de decisiones que le afectan, es decir mientras mayor sea la autonomía, mayor será la vulnerabilidad política de la comunidad.

5. La vulnerabilidad Técnica.

Viene dada por la presencia y/o ausencia de infraestructuras o diseños de edificaciones resistentes o adaptables a la diversidad de eventos o amenazas a la cual está una comunidad expuesta.

6. La vulnerabilidad educativa.

Está representada principalmente con la preparación académica en distintos niveles, que permite a los ciudadanos aplicar tales conocimientos en su vida cotidiana como

herramienta válida para enfrentar las situaciones de peligro presentes en la zona que habita.

7. La vulnerabilidad ecológica.

Las condiciones ambientales y ecológicas presentes en una zona la definen, esto es, cuanto mayor sea la degradación ambiental y cuanto menos sostenible sea el uso dado a los recursos naturales presentes, mayor será la vulnerabilidad ecológica. Por ser la naturaleza un sistema en constante actividad que desarrolla dentro de sí ciclos, es posible afirmar que así como ingresa energía a ésta, así mismo expulsará la misma cantidad con el fin de mantener el balance interno e incluso externo.

8. Vulnerabilidad económica.

Se manifiesta directamente por los indicadores de desarrollo económico presentes en una población, pudiéndose incluso afirmar que cuanto más deprimido es un sector mayor es la vulnerabilidad a la que se encuentra ante los desastres, es importante acotar que al inicio el desastre viene dado directamente por la presencia de un fenómeno natural, pero es la vulnerabilidad humana, la degradación ambiental, el crecimiento demográfico y la falta de preparación y educación ante los mismos, los factores que dominan los procesos de desastres, llegándolos a convertir en catastróficos.

9. Vulnerabilidad institucional.

Está representada por la presencia o ausencia de organizaciones o comités encargados de velar por el adecuado manejo y coordinación de las situaciones de emergencias presentes, como consecuencias de un fenómeno o desastre, esto se traduce en la capacidad de respuesta ante tales situaciones de emergencia.

I .2.2 Evaluación de vulnerabilidad

Los estudios de vulnerabilidad estiman el grado de pérdida o daño que pueda causar la ocurrencia de un evento o fenómeno natural de determinada severidad. Los elementos analizados incluyen poblaciones, instalaciones y recursos físicos tales como: centros de producción, lugares de reunión pública y patrimonio cultural, actividades económicas y

funcionamiento normal de la población¹⁰. La vulnerabilidad de áreas geográficas seleccionadas por ejemplo, las de mayor potencial de desarrollo o las ya desarrolladas que estén ubicadas en zonas peligrosas, pueden estimarse.

I.3 Vulnerabilidad Geotécnica

El concepto de vulnerabilidad plantea que es la incapacidad de resistencia cuando se presenta un fenómeno amenazante, o la incapacidad para reponerse después de que ha ocurrido un desastre¹¹; ésta depende de disímiles factores tales como: la edad, la salud de la persona, las condiciones higiénicas, y ambientales así como la calidad, condiciones de las construcciones y su ubicación en relación con las amenazas. Mientras tanto, la Geotecnia forma parte de la geología aplicada que estudia la composición y propiedades de la zona más superficial de la corteza terrestre, para el asiento de todo tipo de construcciones y obras públicas. La vulnerabilidad geotécnica es la susceptibilidad de los elementos del objeto de obra amenazados a un peligro o grupo de peligros geotécnicos determinados, tales como: deficiente compactación, elementos externos que producen vibraciones, licuación, variaciones de humedad y temperatura entre otros¹².

I.4 Principales causas de fallas en las cimentaciones de las estructuras

Dentro de la ingeniería Civil una adecuada cimentación propicia que se transmitan todas las cargas de la estructura al terreno, de manera tal que las deformaciones resultantes puedan ser toleradas por toda la estructura y ésta tenga estabilidad y una vida útil más duradera.

Es imprescindible tener en cuenta las diversas formulaciones existentes para describir las fallas, entre las que se denotan: Reimbert, M., A. Reimbert, (1997); Ruiz, G. y E. Hernández, (1997). Estas se exponen principalmente por: la socavación en los apoyos, transmisión de cargas, movimientos laterales, apoyo desigual, arrastre y levantamiento,

¹⁰ OEA (Organización de Estados Americanos). 1991. Desastres, planificación y desarrollo: manejo de amenazas naturales para reducir los daños. USAID. Washington. US. 80 p.

¹¹ <https://www.unisdr.org/2004/campaign/booklet-spa/page8-spa.pdf>

¹² MET 30-27. GEOCUBA. 2004

errores de diseño y de construcción, variación del nivel freático, efecto de las vibraciones y de los movimientos sísmicos.

Como se expresó anteriormente es a partir del terremoto ocurrido el 25 de marzo de 1992, que se comenzaron a ejecutar una serie de investigaciones por parte de diferentes instituciones en Cuba; sin embargo no hemos tenido una falla catastrófica en ninguno de los altos edificios, presas y grandes objetos industriales construidos en el transcurso del tiempo, pero sí han existido daños de menor envergadura que han puesto en peligro en determinado grado la seguridad de la obra en donde, no han sido caracterizadas y monitoreadas a partir de parámetros medibles, que pudieran estar relacionados con índices de vulnerabilidad geotécnica.¹³

I.5 Métodos para el estudio de las deformaciones en las estructuras

La ingeniería Civil utiliza diversos métodos de otras ciencias para estudiar y valorar las deformaciones que ocurren en las construcciones, apoyados fundamentalmente en la teoría de la mecánica de suelos, y en el estudio de las propiedades ingeniero-geológicas de la obra y su área de emplazamiento. Específicamente el Método geodésico ofrece una información rápida, objetiva y verdadera de las deformaciones haciéndolo a su vez el más adecuado para realizar el estudio de las deformaciones.

Entre los métodos no geodésicos, los más empleados son los geotécnicos que actualmente se combinan con los geodésicos para los análisis integrados de las deformaciones. De forma general, ellos prevén el empleo de plomadas, inclinómetros, deformómetros, extensómetros, acelerómetros, microinclinómetros, fisurometros, sensores u otros métodos de mediciones. Estos métodos no son objeto de la presente investigación.

El Método geodésico se aplica en el monitoreo de las deformaciones y se fundamenta en el establecimiento, de lugares determinados en la construcción y su entorno, de un conjunto de puntos de control o chequeo de estabilidad. Los cuales se le miden con elevada precisión para obtener su posición real en el espacio, es decir, coordenadas X,

¹³ Cotilla Rodríguez, Mario Octavio. Apuntes necesarios de los acontecimientos sismológicos en Cuba. 1999, pp.71-93

Y, y Z. Todos estos valores están referidos a un sistema inicial de cuyos valores “supuestamente” son invariables. De esta forma se realizan mediciones en diferentes períodos de tiempo, principalmente en función del crecimiento de la carga sobre su base y la velocidad de las deformaciones¹⁴.

La diferencia de coordenadas de un ciclo con respecto al primero, u otro en particular, refleja la magnitud del movimiento ocurrido en ese espacio de tiempo. Paralelamente, se registran o se miden los valores de los fenómenos o causas que puedan provocar estas deformaciones (características del suelo, magnitud de las cargas, nivel hidrostático, temperatura ambiente del aire, precipitaciones, velocidad y dirección del viento). Además, se dispone de los estudios ingeniero-geológicos del área de emplazamiento y de los materiales constitutivos de la estructura en su conjunto, así como de la tecnología y la fundamentación para el diseño y construcción de la obra.

El método más aplicado en el estudio de los asentamientos de las obras ingenieras es el de la nivelación geométrica. Sin embargo existen otros métodos como: la nivelación hidrostática, nivelación trigonométrica y método estereofotogramétrico.

Nótese que los métodos geodésicos propician la determinación del valor real de los asentamientos, permitiendo utilizar los mismos como condiciones de borde para comprobar los modelos existentes y aportar a la racionalidad de los diseños geotécnicos y estructurales, por lo que son más convenientes en este tipo de estudio. Los sistemas de monitoreo garantizan el seguimiento de los parámetros establecidos en el proyecto y prestan especial interés a la vigilancia del comportamiento deformacional que se produce en la interacción estructura-suelo, en los procesos de construcción y explotación, propiciando la detección temprana de daños con su respectiva optimización al realizar los ajustes necesarios.

¹⁴ USACE.EM.1110-2-1009. (2002) “U.S. Army Corps of Engineers Manual ””Structural deformation Surveying” Washington, DC 20314-1000, Junio.

I .5.1 Modelos y terminologías para el análisis integrado de las deformaciones.

Como expresamos anteriormente existen diversos factores que con el paso del tiempo inciden en las deformaciones que se producen en las obras ingenieriles. Para el estudio de la deformación, de cualquier tipo, de un cuerpo deformable incluye el análisis geométrico y la interpretación física. El examen geométrico describe los cambios en la superficie y dimensiones del objeto monitoreado, así como los movimientos del cuerpo rígido (traslación y rotación), su objetivo principal ¹⁵es la determinación de los desplazamientos y campos de tensiones en los dominios del espacio y el tiempo.

La interpretación física de las deformaciones está dirigida a obtener información sobre el estado de las tensiones internas en un cuerpo deformable y de la relación causa-deformación¹⁶. Esto se ha logrado utilizando métodos estadísticos tales como: el análisis de correlación entre las deformaciones observadas y sus causas, o por métodos determinísticos, que utiliza, la información de las causas, propiedades de los materiales y las leyes físicas que rigen en la relación esfuerzo-tensión. Ambos métodos conducen al desarrollo de modelos de predicción de deformaciones.

Mientras que el análisis determinístico puede utilizar métodos numéricos, ya que la solución directa puede ser difícil o imposible de obtener; el más utilizado en la actualidad es el Método de los Elementos Finitos (MEF).

Actualmente la meta del análisis geodésico de la deformación son los procesos dinámicos, por lo que según *USACE.EM.1110-2-1009(2002)*; *Szostak-Chrzanowski., A., A. Chrzanowski, M. Massiera, (2008)* para el entendimiento de los modelos y terminologías se requiere de acercamientos interdisciplinarios (Geodesia, Geofísica, Geotecnia e Ingeniería Civil), para dar soluciones apropiadas en los análisis integrados de las deformaciones.

¹⁵ Chrzanowski, A. et al. (1982) On the Analysis of Deformation Surveys. 4 th Canadian Symposium on Mining Surveying and Deformation Measurements. The Canadian Institute of Surveying, Banff, 07.-09.06.1982. Proceedings

¹⁶ . 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

I .5.2 Modelación de la interacción terreno- estructura.

Las obras estructurales funcionan como un sistema integrador, donde el terreno y la estructura son los componentes básicos. Esto implica que el análisis, diseño y comportamiento de las obras de ingeniería en general, dependan no sólo de las solicitaciones que surgen producto a acciones de agentes externos o internos que actúan sobre ellas, además de su funcionabilidad, sino que lo hacen también, en buena medida, como respuesta conjunta al sistema y de la manera que el suelo se deforma, durante la transmisión de las cargas al medio. (Figura 4).

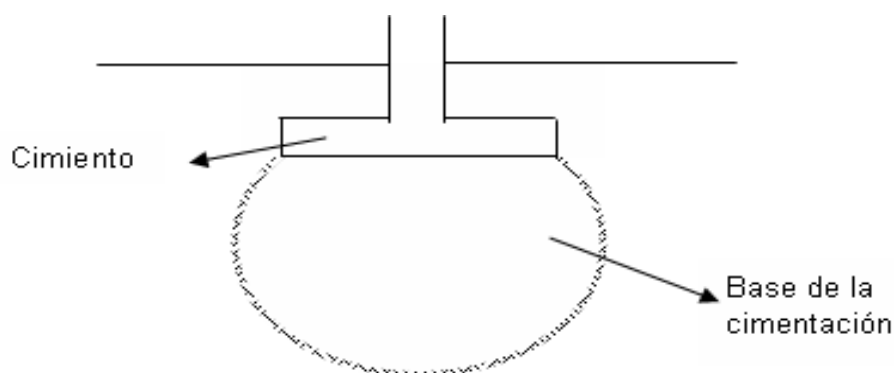


Figura 4 Esquema del cimiento y base de la cimentación. *Quevedo (2002)*.

En la investigación bibliográfica realizada por *Recarey, C.A. (1999)* se plantea, que las formas de modelación se han clasificado internacionalmente en dos grandes grupos, uno primero que considera el terreno como un modelo rígido o convencional; y otro segundo, que toma en cuenta la deformabilidad del mismo por diferentes modelos, basados en las teorías de la elasticidad, plasticidad, daño y fractura.

Asimismo las formulaciones realizadas *González, A.V., (2000)*; *Quevedo, (2002)* han propiciado que se desarrollen nuevos procedimientos de análisis, diseño y diagnóstico de estructuras, con el empleo de los novedosos modelos constitutivos, que describen el comportamiento de los diferentes materiales que conforman la edificación, estructura u obra de ingeniería y el terreno que la sustenta, con respecto a su estado tenso-deformacional.

De forma general este análisis evidencia la necesidad de desarrollar nuevas herramientas para la modelación y comprobación de los modelos existentes, en el

estudio integrado de las deformaciones (absolutas y relativas), donde un papel esencial estará asignado al método geodésico¹⁷ con su respectiva fundamentación económica.

La unión de criterios entre especialistas sobre esta problemática es fundamental pues propicia un análisis individual desde cada disciplina que permite contribuir con su conocimiento específico, cuantificando y analizando el respectivo proceso, no obstante, su medición y técnicas del análisis pueden permanecer diferentes. Por lo que la comunicación entre las disciplinas (Geodesia, Geofísica, Geotecnia, Ingeniería Civil), deben unirse a partir de criterios técnicos y conocer cómo se emplean éstos a partir de su propia especialización.

I .5.3 El análisis tradicional o convencional de la deformación.

En las mediciones de la deformación la tarea tradicional ha sido la investigación de los movimientos o desplazamientos de un objeto con respecto al espacio y tiempo. La modelación geodésica del objeto (y su contorno) significa analizar la continuidad por puntos discretos, de manera que estos caractericen el mismo, y que los movimientos de los puntos representan los movimientos y distorsiones del objeto; es decir, que solamente se modela la geometría del objeto. Además, la observación de los puntos característicos en ciertos intervalos de tiempo se realiza para monitorear adecuadamente el curso temporal de los movimientos, modelando sólo el aspecto temporal de los procesos. (Tabla 2)

Tabla 2 La modelación geodésica de la deformación en el espacio y tiempo.

Dominio	Objeto Real.	Modelación del Objeto.
Geométrico	El objeto es continuo	Por puntos característicos.
Tiempo	El objeto está en movimiento	El objeto es monitoreado en ciertos intervalos.

¹⁷ Acosta, L. E. (1995) Determinación de la Interrelación estructura- suelo en la Planta de Níquel " Las Camariocas" Moa., Universidad de Holguín, Facultad de Ingeniería Civil, Holguín, Cuba, 63 pp.

En este análisis se distinguen ¹⁸ dos clases de modelos, los de congruencia y los cinemáticos. Los modelos de congruencia son los que realizan una comparación completamente geométrica del estado del objeto, representado por puntos característicos, para dos intervalos de tiempo diferentes y los cinemáticos describen la deformación en base a función dada o asumida de tiempo, por ejemplo, las aproximaciones polinómicas, como las velocidades y aceleraciones.

Para monitorear las deformaciones en las estructuras de nuestro país se utilizan métodos tradicionales debido a las limitaciones de tecnologías necesarias, propiciando los estudios al problema de forma convencional o tradicional, donde sólo considera la geometría del objeto y su comportamiento espacio-temporal; sin embargo ello, no está en correspondencia con los adelantos científico-técnicos en la temática del estudio de las deformaciones que se realizan de forma permanente y automatizada a partir de los modelos dinámicos, con la exposición de los resultados a través de un Sistema de Información Espacial de Deformaciones(SIED). No se ha desarrollado una metodología general de modelación, que permita realizar indistinta y multidisciplinariamente, el análisis para la interpretación física de las deformaciones y emitir criterios sobre la vulnerabilidad geotécnica de la obra.

I .5.4 Sistemas dinámicos y análisis avanzado de la deformación.

En el análisis de la deformación los modelos dinámicos son los más avanzados, pues no sólo consideran el cambio de la geometría de un objeto en el espacio y tiempo, sino también investigan los factores (fuerzas, cargas, propiedades de los materiales) que causan la deformación. Los tres elementos: “fuerzas actuantes”, como señal de entrada; “la transmisión a través del objeto”, como el proceso de transferencia y “la respuesta del objeto”, como la señal de salida, forman una cadena causal –o según la terminología de teoría del sistema – un proceso o sistema dinámico (Figura 5).

¹⁸ Heunecke, O. (2000) Ingenieurgeodätische Beiträge zur Überwachung von Bauwerken. Workshop ‘Dynamische Probleme – Modellierung und Wirklichkeit’, Hannover. Proceedings, pp. 159-176

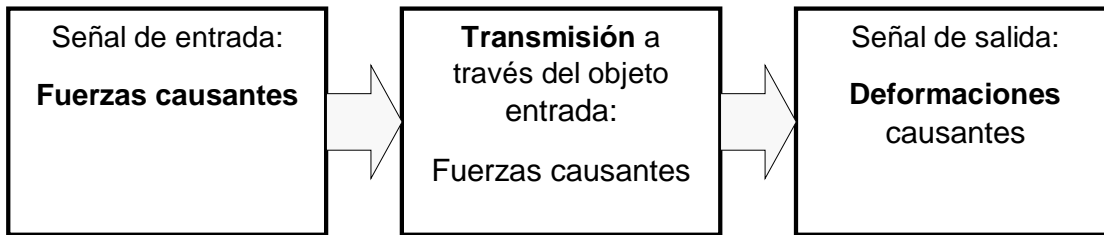
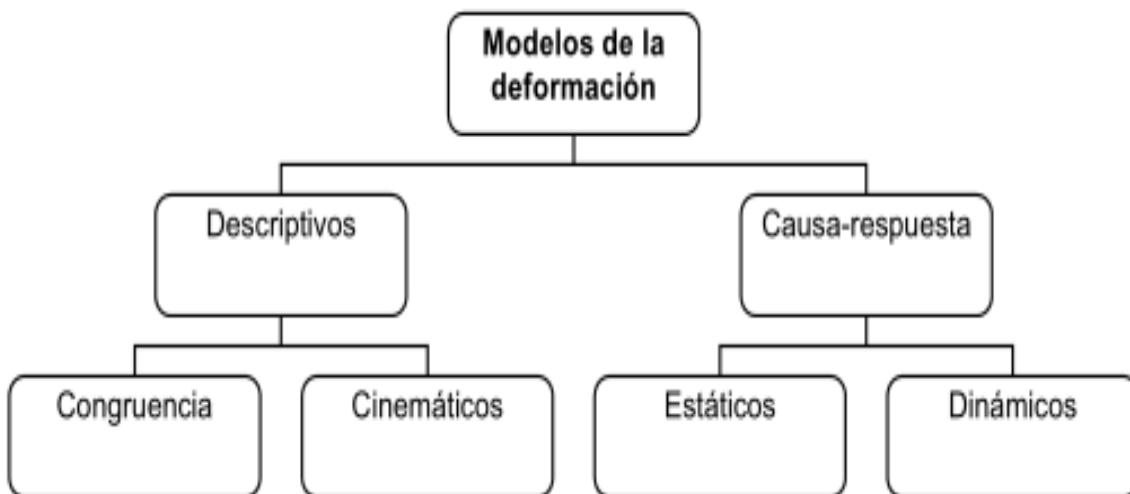


Figura 5 La deformación como un elemento de un sistema dinámico.

Estos modelos pueden ser descriptivos y de causa-respuesta, con las siguientes variantes, por su capacidad de tomar en cuenta los factores “tiempo” y “cargas” (Figura 6)



(Figura 6) Modelos en el análisis geodésico de la deformación.

Los modelos estáticos se utilizan para evaluar la capacidad de carga en las estructuras, como por ejemplo, los tanques, silos, puentes y torres. En contraste con la situación estática, en la modelación dinámica el objeto está en constante movimiento, por lo que se requiere de procedimientos para realizar las observaciones de forma permanente y automatizada, que es una limitación en nuestro país dada la tecnología que poseemos.

Los modelos dinámicos ¹⁹pueden ser paramétricos o no paramétricos; los no paramétricos suelen definirse como de actitud o estadísticos, experimentales o

¹⁹ Eichhorn, A. et al. (2008) Investigation of dynamic thermal effects with non-parametric and parametric deformation models. 4rd IAG / 13th FIG Symposium, Lisbon, Portugal, May 12-15. Deng, N. et al. (2008)

empíricos; la evaluación de la aplicación no paramétrica también se llama “aproximado operacional”. En la mayoría de los casos los modelos aplicados al análisis de la deformación son no paramétricos.

De forma general estos modelos que se desarrollan a partir de pronósticos que emiten varios especialistas, permiten brindar una importante información al ingeniero geodesta sobre el valor de las deformaciones, que a su vez, facilita el diseño del esquema de monitoreo, así como la selección del modelo de análisis de deformación en el dominio geométrico.

Sin embargo en la práctica no funciona adecuadamente, pues no existe un acercamiento verdaderamente interdisciplinario al diseño, análisis y estudios de las deformaciones. Entre las principales causales se encuentran:

- La incomprensión de los métodos de identificación del sistema (modelos paramétricos y no paramétricos) por los ingenieros geodestas
- Inadecuada familiarización de otros especialistas con los nuevos métodos avanzados del análisis geodésico de la deformación en los procesos dinámicos.

No obstante se ha logrado por la combinación de técnicas desarrolladas en la teoría del sistema, como los filtros con la aplicación de técnicas de la Ingeniería Civil; de conjunto con el Método de los Elementos Finitos (MEF) y Geodesia, por ejemplo, los procedimientos de la evaluación estadística y consideraciones de fiabilidad, que ofrecen nuevos aspectos a investigar para el futuro.

Utilizando los métodos y modelos apropiados que conducen a las técnicas del análisis y modelos integrados altamente sofisticados se puede analizar con mayor exactitud los sistemas dinámicos, lo que permite explotar al máximo las herramientas y potencialidades para este fin; considerando que los objetos y estructuras de la ingeniería o sus partes están sometidos a las resultantes de los desplazamientos para numerosos factores internos y externos.

Los resultados más acertados en la interpretación física se obtienen a partir de la combinación de los métodos estadísticos y determinísticos de los análisis, donde el modelo determinístico es “calibrado” mediante la comparación con el modelo estadístico (empírico) y con el que realmente es observado la deformación. La Universidad de New Brunswick ha implementado el método generalizado que permite realizar de forma simultánea el análisis integrado de las deformaciones, por métodos geodésicos y geotécnicos.²⁰

A nivel internacional y específicamente en nuestro país se ha demostrado que la dificultad principal está en la disponibilidad de programas de software apropiados para procesar los datos registrados, así como el uso de sensores. En contraste se ha recurrido a la utilización de modelos más simplificados como por ejemplo, la introducción de coeficientes o índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos, considerando esta vía como factible desde el punto de vista técnico y económico, pues permite describir e interpretar el proceso de deformación y ofrecen la posibilidad de uso en muchas aplicaciones prácticas.

I .5.5 Estudios de índices de vulnerabilidad en las estructuras

La máxima expresión en el análisis integrado de las deformaciones lo constituyen los índices de vulnerabilidad geotécnica. Esta herramienta se utiliza como sistema de vigilancia para poder reaccionar oportunamente ante un comportamiento inesperado en el proceso de deformación en las construcciones, y poder tomar las medidas necesarias.²¹

Entre los procedimientos más empleados para el diseño de cimentaciones se encuentra el criterio geotécnico de deformación, donde se obtienen los desplazamientos absolutos y relativos que alcanzará la estructura a nivel de proyecto, estos serán comparados, a su vez, con los desplazamientos máximos que se le permiten alcanzar a la cimentación en función de su uso, finalidad de la obra y de las características de la superestructura, las cuales se han preestablecido sobre la base de observaciones empíricas y se

²⁰ Ocit, Acosta 2009, p. 26.

²¹ Ibid, p. 27.

registran en las diferentes normas y códigos Carter, M. (2002); Quevedo (2002), debiendo cumplirse en el diseño, que los valores calculados sean iguales o menores que los establecidos en la norma.

Es importante destacar los estudios realizados por González, A. V (2000); Quevedo, G. (2002) a los ensayos efectuados por varios autores a diferentes suelos (arenas y arcillas), donde se resalta que los más frecuentes han sido los de relajación, tensión y velocidad de deformación constante, implementados en ensayos de compresión simple y de consolidación, utilizando equipos de compresión axial, cortante y consolidómetros.

Sin embargo, estos autores no hacen referencia a los ensayos triaxiales, al parecer por la complejidad de operación del equipamiento (los cuales simulan mejor a escala de laboratorio el comportamiento del terreno) ni a los ensayos *in situ* o de campo (que permiten caracterizar el comportamiento del suelo a escala natural), quizás por su elevado costo de ejecución, principalmente las mediciones geodésicas.

La deformación estimada en ocasiones se aprecia por los resultados de las pruebas de cargas sobre el terreno, mediante estampas aplicadas sobre pequeñas áreas y durante el diseño, estos resultados se aplican a las grandes áreas de cimentación. En la mayoría de los casos, según demuestra la práctica, las deformaciones previstas en la construcción, con frecuencia, no coinciden con los reales.

I.6 Conclusiones parciales del capítulo

Después de haber realizado un análisis crítico del estado actual y perspectivas de los métodos geodésicos para definir los índices de vulnerabilidad geotécnica, se ha llegado a una serie de conclusiones que ilustran la necesidad y validez científica de la investigación que se describe en la presente tesis:

1. La vigilancia de las grandes obras ingenieras está encaminada al desarrollo de nuevas tecnologías, en las que los métodos geodésicos y modelos dinámicos desempeñan un papel importante en la determinación del valor real de la deformación.
2. Los valores admisibles para los diseños de las cimentaciones en nuestro país, se han establecido por la experiencia de otros países y no han tenido variaciones

significativas, lo que evidencia la necesidad de realizar ensayos del comportamiento suelo-estructura a escala real por métodos geodésicos para ajustar los mismos.

3. Los análisis de vulnerabilidad geotécnica favorecen el entendimiento interdisciplinario (Ingeniería Civil, Geotecnia y Geofísica), lo cual propicia que se tomen las decisiones más adecuadas en las etapas de diseño, construcción y explotación de la obra ingeniera. Demostrando la factibilidad de realizar la presente investigación.

CAPITULO-II: EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD GEOTECNICA EN LA BASE DE AMONIACO DEL PUERTO DE MOA CON EL EMPLEO DE MÉTODOS GEODÉSICOS.

Introducción al capítulo

En este Capítulo expondremos y aplicaremos la metodología para la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos (Acosta, 2009), con el fin de evaluar la vulnerabilidad geotécnica en la base de amoníaco en el Puerto de Moa.

II.1 Procedimiento general para la introducción de los índices de vulnerabilidad geotécnica

En el análisis integrado de las deformaciones por métodos geodésicos la tendencia mundial está dirigida a los sistemas de vigilancia y alerta temprana sobre la seguridad de las construcciones.

La determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica reside en la relación empírica que existe entre los valores de las deformaciones obtenidos por métodos teóricos y los determinados, a partir de mediciones geodésicas en condiciones de campo. Los métodos teóricos, es decir, determinísticos y estadísticos han favorecido el perfeccionamiento de los valores admisibles, que hoy conforman las normativas existentes para diferentes países, específicamente en Cuba, estos valores límites se utilizan para la revisión del diseño de las construcciones, donde actualmente ²²uno de los más utilizados es el Método de los Estados Límites (MEL). (Figura 7)

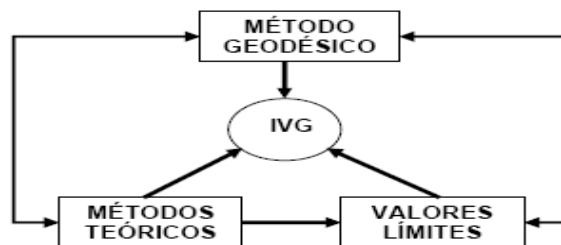


Figura 7 Esencia de los índices de vulnerabilidad geotécnica (IVG).

²² Quevedo, G. (2002) Aplicación de los Estados Límites y Teoría de Seguridad en el Diseño Geotécnico en Cuba. Tesis de grado Científico, UCLV.

Al adentrarnos en la investigación de obras estructurales especiales en nuestro país, y desde la provincia de Holguín en el trabajo Doctoral de Acosta (2009)- máximo referente en este estudio-, observamos que contribuye al perfeccionamiento de la normativa, 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

II.2 Caracterización de la metodología para la determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica en las estructuras

II .2.1 Esquema tecnológico del análisis integrado de las deformaciones

Para realizar los trabajos se desarrolla esquema tecnológico de la (Figura 8)

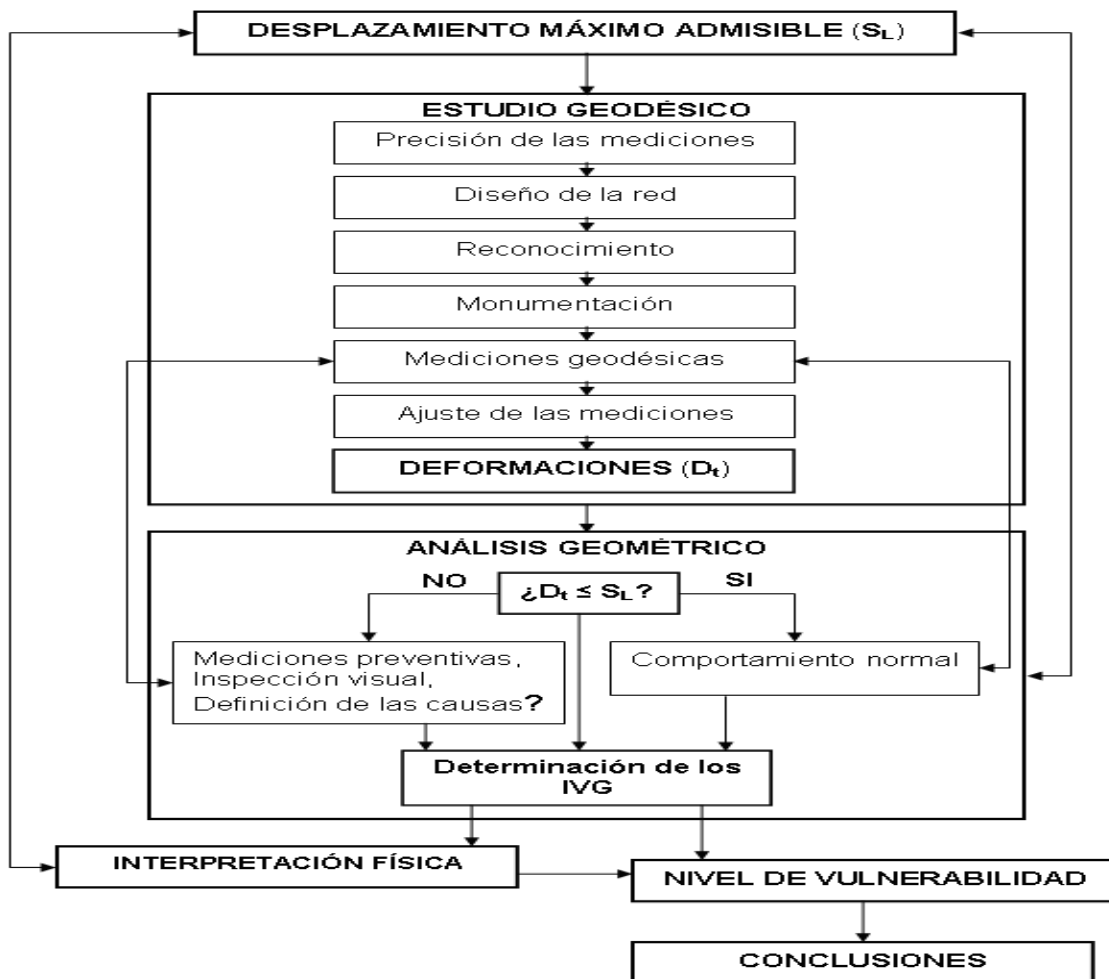


Figura 8 Esquema tecnológico para determinar los IVG.

II .2.2 Determinación del desplazamiento máximo admisible

El valor máximo admisible es fundamental para el inicio del estudio geodésico debido a que actualmente en la mayoría de los 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 la [NC 1: 2007] y excepcionalmente para determinados casos, serán calculadas con la utilización de los métodos teóricos.

Los proyectistas civiles deben calcular el “Estado Limite de Deformación “de la estructura para un determinado período de vida en cada proyecto de ejecución el cual se llama deformaciones límites de la obra. El procedimiento de cálculo se detalla en (NC 1: 2007).

Según la (NC 1: 2007), el Método de los Estados Límites aplicado al cálculo de las cimentaciones se fundamenta en la obtención de un diseño, donde las cargas y las tensiones a las que está sometido el suelo en las bases de los cimientos; así como las deformaciones y desplazamientos que ellas originan en dichas bases, estén cerca de los límites permisibles y nunca lo sobrepasan.

La revisión de las deformaciones límites calculadas en el proyecto de ejecución de la obra se realiza con el objetivo de fijar esta magnitud para elegir la tecnología con que se realizarán las mediciones y como un elemento para calcular los índices de vulnerabilidad geotécnica a que está expuesta la obra. Estableciendo la condición:

$$D_i \leq S_L \quad (1)$$

Siendo: D_i : Deformaciones totales medidas (absolutas y relativas).

S_L : Tolerancias límites definidas por las normativas.

Para ello consideraremos (NC 1: 2007) dos indicadores básicos: la deformación límite del desplazamiento absoluto (S_L) y la distorsión angular (β).

Las tolerancias definidas por proyecto se obtienen de las normativas, donde se establecen los límites adecuados. Estas varían en función del tipo de terreno y de la

estructura cimentada por lo que, no siempre coinciden para diferentes países, los valores establecidos para nuestro país *NC 1: 2007*.

Al exponer estas tolerancias [*NC 1: 2007*] se 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.

La fórmula (3) se utiliza en el caso de las losas de cimentación y para cimientos aislados la expresión (2).

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 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:

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

Aquí se presenta la limitante que en la mayoría de los casos, excepto Presas y Taludes no se hace referencia a los desplazamientos horizontales.

II .2.3 Estudio geodésico.

El estudio geodésico se realizó en correspondencia con las metodologías MET 30-27: 2004; MET 30-45: 2004 desarrolladas 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.

II .2.3.1 Precisión de las mediciones

Las observaciones de los desplazamientos deben cumplir las siguientes condiciones:

1. Precisión, donde el error máximo de determinación ($e_{\text{máx}}$) de las coordenadas debe ser menor o igual a un cuarto de la deformación total máxima esperada ($e_{\text{máx}} \leq 1/4 D_t$).
2. La periodicidad de las observaciones será una función de las velocidades de las deformaciones y de la exactitud que seamos capaces de lograr.
3. Se considera movimiento o desplazamiento total (D_t), aquel que sea mayor que el error máximo de determinación ($D_t > e_{\text{máx}}$).

II .2.3.2 Diseño de la red de control geodésico

Esta es una etapa decisiva ya que un mal diseño puede provocar que no logremos determinar correctamente las deformaciones que experimenta el objeto de estudio. En particular las mediciones geodésicas permiten, a partir de puntos considerados fijos ubicados en sectores estables, realizar medidas de deformaciones (asentamientos y desplazamientos horizontales) sobre puntos de control instalados en las estructuras, a través de instrumental de alta precisión. La distancia entre las marcas y su posición

depende del estado observado de los elementos estructurales y no estructurales durante el reconocimiento realizado por el equipo de trabajo (civil + geodesta); así como del análisis de los resultados del estudio ingeniero-geológico que se haya desarrollado para ejecutar la obra; teniendo en cuenta las variables del suelo con características heterogéneas en el área de emplazamiento de la construcción.

II .2.3.2.1Puntos de referencia

Los puntos de referencia se deberán colocar fuera del área de acción de la carga sobre el suelo, vibraciones y cualquier otra variable que incida en la dinámica de la estructura, su alejamiento del objeto que se construye, se establecen según las investigaciones ingeniero-geológicas de la zona, determinado por los cortes de las rocas originarias estables e incompresibles. Estos se sitúan fuera de la zona de influencia de la presión ejercida por la cimentación o bulbo de presiones. En la práctica se recomienda situarlos a una distancia mayor o igual a seis veces el ancho de la cimentación, excepto en presas que la zona activa del bulbo de presiones que provoca las deformaciones puede propagarse de 400 a 800 m. Para la ubicación de estos puntos debemos auxiliarnos de los perfiles litológicos (calas) y de no existir, lograr que todos estén cimentados sobre un estrato resistente, no es recomendable situarlos en suelos arcillosos.

II .2.3.2.2Puntos de control

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, vigas). Su ubicación se sustentará fundamentalmente en aquellos lugares donde mayores posibilidades efectivas existen para determinar las deformaciones, distribuyéndose los mismos en aquellas áreas donde existen cambios bruscos de la carga y representen los puntos más deformables y críticos.

El proyecto de ubicación se elabora tomando en consideración las particularidades de los elementos estructurales y el perfil litológico que sustenta la cimentación. Los lugares

escogidos para su ubicación deben prestar comodidad para la colocación del instrumental necesario durante las mediciones (miras y prismas) y el trabajo a su alrededor.

La cantidad de marcas y posición depende del estado observado de los elementos estructurales y no estructurales durante el reconocimiento realizado por el equipo de trabajo multidisciplinario (civil + geodesta). En esta etapa se realiza una evaluación preliminar de la red, ajustándola y determinando las marcas más débiles. En caso de ser necesario se replantea el diseño actual de la red.

En la práctica se proyecta la posición de las marcas por el equipo de trabajo por apreciación, como se menciona arriba y en función de los siguientes criterios:

1. Existen daños en elementos estructurales y no estructurales: Las marcas se colocan tanto en todos los elementos estructurales, como en los elementos no estructurales, donde se necesite demarcar ambos lados separados por grietas u otro efecto de la deformación. Se colocan tantas marcas como sean necesarias.
2. No existen daños en elementos: Las marcas se colocan sólo en los elementos estructurales. Se colocan tantas marcas como elementos estructurales existan.

II .2.3.3Reconocimiento

En esta etapa que es una de las más importantes en el estudio geodésico se define el lugar el lugar idóneo para la ubicación de los puntos de referencia y de control, que constituyen la base y fiabilidad del estudio, es decir, se materializa el diseño proyectado. Se trabaja sobre la proyección, que puede ser un croquis, lo suficientemente explícito como para proyectar o diseñar la red de control geodésico. Es conveniente utilizar los planos del objeto de obra, donde se destacan las marcas geodésicas de una forma más precisa. La tendencia actual es realizar la proyección sobre el mapa digital.

En esta etapa la tarea principal es diseñar una red que modele el comportamiento real del objeto, teniendo en cuenta además la racionalidad en el uso de los recursos.

II .2.3.4 Monumentación de los puntos de referencia y marcas

Los puntos de referencia y las marcas se construyen según *MET 30-27,2004* y los puntos de control pueden situarse en el momento de la fundición del elemento estructural (cimiento, columna, viga) de la construcción, pero por lo general se colocan una vez construidos estos, en este caso, será necesario esperar un mes como tiempo mínimo después de la fundición. Para empotrar la marca en el hormigón, el equipo de trabajo utilizará un taladro eléctrico, barrenas de tungsteno y cemento concentrado. Para la monumentación en superficies metálicas se utilizarán equipos de soldar. En el caso de la fijación de marcas en hormigón debe esperarse el tiempo necesario de fraguado para comenzar el primer ciclo de mediciones, en investigaciones específicas se ha establecido un tiempo mínimo de cinco días.

II .2.3.5 Mediciones geodésicas reiteradas

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.

De forma general se recomienda *USACE.EM.1110-2-1009, (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. Se realizarán mediciones de forma excepcional después de eventos sísmicos y meteorológicos.

La velocidad de las deformaciones (V) en un intervalo de tiempo se determina por la fórmula:

$$V = \frac{S_{final} - S_{inicial}}{\Delta t} \quad (6)$$

Donde:

$S_{final, inicial}$ – Desplazamiento absoluto, al inicio y final del periodo de observación.

Δt - Intervalo de tiempo en que ocurre la deformación.

El intervalo de tiempo para los estudios de la deformación puede variar en correspondencia con el propósito del monitoreo, pero está generalmente relacionado ²³a la condición del diseño de la estructura, como la edad de la misma, clasificación de los peligros, regulaciones de seguridad y probabilidad de fallo, a partir de lo cual se determinan los índices de vulnerabilidad geotécnica y una frecuencia apropiada de las mediciones.

La vigilancia del proceso de deformación es obligatoria una vez, terminados los cimientos, luego continúa hasta culminar la construcción, así como en el periodo de explotación hasta la fase de estabilización de las deformaciones. 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 de determinación.

II.2.3.6 Métodos geodésicos empleados

En el anterior capítulo mencionamos diferentes métodos para el estudio de las deformaciones; ya sea métodos tradicionales como: Nivelación geométrica, nivelación trigonométrica, trilateración de lados cortos, nivelación hidrostática, microtriangulación con metodologías rigurosas y los no tradicionales como: las mediciones combinadas que facilitan las Estaciones Totales, la tecnología GPS y los sensores electromagnéticos se pueden emplear en este estudio.

²³ García, J. y L.E. Acosta. (2005) Determinación de índices de vulnerabilidad geotécnica en obras por métodos geodésicos. Segundo Taller de Geodesia y Geomecánica Aplicada a la Construcción, UNAIC, Santiago de Cuba, Cuba.

Los métodos no tradicionales permiten obtener sistemas de coordenadas que nos posibilitan trabajar, ya sea con todos los componentes por separado del desplazamiento (deformación) o con el vector espacial de dicha deformación.

Teniendo en cuenta que se trabaja con deformaciones determinadas por diferentes ciclos en el mismo sistema de coordenadas y con la misma metodología, el vector espacial no depende del sistema de coordenadas que se emplea, por lo que las deformaciones totales espaciales (3D) se determinarán por la fórmula siguiente:

$$D_t = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} \quad (7)$$

La fórmula (7) puede simplificarse al cálculo de deformaciones unidimensionales

($D_t = \Delta z$) o bidimensionales ($D_t = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$) adaptándose al empleo de todos los métodos tradicionales Anexo 1.

II .2.4 Análisis geométrico e interpretación física de las deformaciones

Al concluir 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.

Al chequear la condición ¿ $D_t \leq S_L$?, si la respuesta es afirmativa (SI), el comportamiento de la estructura es normal, pero es necesario revisar en que 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, podemos 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.

II .2.5 Determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica

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

$$IVG_a = \frac{D_t}{S_L} \quad (8)$$

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

$$IVG_r = \frac{\beta_{observado}}{\beta_{límite}} \quad (9)$$

El empleo del índice absoluto o relativo de vulnerabilidad geotécnica, o ambos se decide en dependencia de las características geotécnicas y estructurales del objeto de estudio, donde la rigidez juega un papel determinante.

En dependencia de las limitaciones del método empleado para el control de las deformaciones, en ocasiones en las relaciones (2.9) y (2.10) se emplean solo las deformaciones verticales y se manifiesta la limitación que las tolerancias no están definidas espacialmente.

II .2.6 Clasificación del nivel de vulnerabilidad geotécnica del objeto de obra

La determinación de los índices de vulnerabilidad está sujeta al monitoreo de la estructura en los procesos de construcción y explotación. El propósito de la vigilancia es el descubrimiento oportuno de un posible daño, que incide en el funcionamiento y seguridad de la construcción para poder reaccionar apropiadamente y a tiempo. Para un mayor entendimiento interdisciplinario cuantitativa y cualitativamente se propone (Acosta, 2009) la clasificación mostrada en la Tabla 3.

Tabla 3 Clasificación de los niveles de vulnerabilidad geotécnica (NVG).

IVG	$(IVG_{a,r}) < 1$	$(IVG_{a,r}) \approx 1$	$(IVG_{a,r}) > 1$		
			$1 > (IVG_{a,r}) < 1.5$	$1.5 > (IVG_{a,r}) < 2$	$(IVG_{a,r}) > 2$
NVG	BAJA	LÍMITE	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
Etapas	Comportamiento Normal	Desplazamientos locales	Incremento de los Desplazamientos	Desplazamientos considerables	Daños estructurales

En correspondencia con las relaciones (8) y (9) 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. (Etapa 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. (Etapa 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. (Etapa 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. (Etapa de deformación “Levantamiento”, aparecen desplazamientos laterales).

II .2.7 Informe resultado del análisis de vulnerabilidad geotécnica

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. Se incluirán los siguientes registros:

1. Compendio de coordenadas con la evaluación de errores.
2. Compendio de deformaciones absolutas y relativas.
3. Planos del objeto de obra.
4. Análisis geométrico e interpretación física de las deformaciones.
5. Dictamen con el nivel de vulnerabilidad geotécnica de la obra.

II.3 Aplicación de la metodología para determinación de los índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos en la base de amoniaco del Puerto de Moa

Para la aplicación de esta metodología se tuvo en cuenta una serie de cuestiones concernientes a esta estructura, la cual abarcan procesos explotación que pertenecen a la región niquelífera de Holguín.

II .3Características físico-geológicas de la región niquelífera

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, por el Este con el municipio de Baracoa, y al Oeste con el municipio con los municipios Sagua de Tánamo y Frank País.

La Región se encuentra enclavada dentro del Grupo Orográfico Sagua- Baracoa, lo cual hace que el relieve predominante sea montañoso, principalmente hacia el Sur, donde es más accidentado en la Sierra de Moa, que se extiende en dirección submeridional. Hacia, el Norte el relieve se hace más suave, disminuyendo gradualmente hacia la costa, influenciado además por la acción del hombre.

Como característica fundamental de esta región hay que destacar la intensidad con que actúan los procesos exógenos en la geología del área, encontrándose su máxima representación en los procesos erosivos y en el intemperismo químico de las rocas que da como resultado la formación de las típicas lateritas, lo que se conoce como laterización. Las rocas madres de la región generalmente son gabros y peridotitas. Las condiciones hidrogeológicas se caracterizan por la presencia de las aguas subterráneas, así como la existencia de las aguas temporales en la capa superior.

II .3.1Características físico-geológicas de la Base de Amoniaco

La Base de Amoniaco pertenece actualmente a la Unidad Básica Puerto de Moa y se encuentra ubicada al sur de la Dársena Caguasey, de la bahía de Cayo Moa Grande, en el municipio de Moa, provincia de Holguín Anexo 2. Está conformada por 7 objetos de obra, interconectados principalmente por tuberías, que incluye cuatro tanques apoyados para la preparación de la solución amoniacal, 15 balas metálicas de almacenamiento del amoniaco, las casetas de mando , de bombas, de compresores, del panel eléctrico y la torre de enfriamiento. Figura(9)



Figura 9 Vista aérea de la Base de Amoniaco del puerto de Moa.

Es una zona semipantanososa, que para la construcción de la obra fue necesario rellenarla para solucionar con cimientos superficiales y en otros casos cimentar sobre pilotes. El manto freático es superficial y está afectado por una posible corriente subterránea que atraviesa el área. Desde el punto de vista tectónico, esta área se localiza en el bloque Moa Oriental, que es limitado por la falla Moa y la posible falla que atraviesa la ciudad de Moa, las que han manifestado cierta actividad.

Por las características especiales de esta obra, principalmente por las consecuencias de su fallo, se seleccionaron para el monitoreo todas sus estructuras (balas de almacenamiento de amoniaco, tanque de almacenamiento de solución amoniaca y las obras auxiliares de funcionamiento), con sus interconexiones e incluso las áreas libres de construcciones.

II.3.2 Caracterización general de los parámetros para determinar los índices de vulnerabilidad geotécnica en la base de amoniaco

Objetos de obra principales:

- Balas de almacenamiento de amoniaco.

Este objeto está conformado por 15 balas metálicas horizontales distribuidas en dos filas, la fila 1 contiene de la bala 1 a la 7 y la fila 2 de la 8 a la 15. Su construcción es

simétrica y se apoyan sobre dos pedestales de hormigón ubicados en sus extremos. La cimentación es profunda, con los dados de los pedestales apoyados sobre pilotes de hormigón. Figura (10)



Figura 10 Balas metálicas para el almacenamiento de amoniaco

- Tanques verticales de solución amoniacal.

Los tanques metálicos se encuentran en el sector suroeste de la Base de amoniaco del Puerto de Moa, dos de ellos (TK 607 y TK 608) contienen agua tratada y el resto (TK 603 y TK 604) solución amoniacal, en su conjunto se utilizan para la preparación de la solución amoniacal (Figura). Están sustentados en una cimentación profunda, conformada por una balsa circular sobre pilotes apoyados (desde 14.0 hasta 16.0 m) en una capa profunda de suelos arcillosos. Figura (11)



Figura 11 Tanques metálicos, para la preparación de la solución amoniacal

Objetos de obra secundarios:

- Obras auxiliares de funcionamiento.

Para la operación de la Base de Amoniaco están presentes las obras auxiliares, como: las casetas de mando, de bombas, de compresores, del panel eléctrico y la torre de enfriamiento; todos ellos entrelazados por una red de tuberías requerida por el proceso tecnológico que allí se realiza. Figura (12)



Figura 12 Obras auxiliares de funcionamiento

II .4Metodología del control de las deformaciones

En la Base de amónico del Puerto de Moa se realizó un estudio de la deformación por métodos geodésicos en función del asentamiento. Para su determinación se utilizó el método de la nivelación geométrica de alta precisión. El equipamiento utilizado posee el certificado de “Apto para el uso”, emitido por el Laboratorio de Metrología 57, perteneciente a la Empresa GEOCUBA Oriente Norte.

II .4.1Método de la nivelación geométrica de alta precisión

Para la determinación de las alturas de los puntos de referencia y de las marcas fue usado el método geodésico de la nivelación geométrica de alta precisión de rayos cortos de primera categoría, teniendo en cuenta las características de la estructura y del suelo que la soporta.

Estableciendo [MET 30-27:2004] un Error Medio Cuadrático (EMC) en la determinación de las alturas $< \pm 1,0$ mm y un error de cierre de la nivelación (f_h) menor o igual al calculado por la fórmula:

$$f_h = \pm 0.3mm\sqrt{n} \quad (10)$$

Las mediciones se realizaron con el nivel de alta precisión, de micrómetro óptico WILD N3 y miras de invar de 1m hasta 3m.

El análisis de la estabilidad de los puntos de referencia de los objetos estudiados se realizó por el método "Costachel", los resultados obtenidos son confiables y satisfacen las exigencias para el análisis integrado de las deformaciones, teniendo en cuenta que los valores de los desplazamientos determinados no están influenciados por los datos iniciales.

II .4.2 Creación de la base de referencia y puntos de control

La base de referencia fue ubicada fuera del objeto de estudio y está formada por tres puntos de profundidad ('PR-1', 'PR-2' y 'PR-3').El adecuado estudio geodésico y el comportamiento de las deformaciones a permitido que su esquema de observación se mantenido invariable desde el primer ciclo de mediciones. Figura (13)

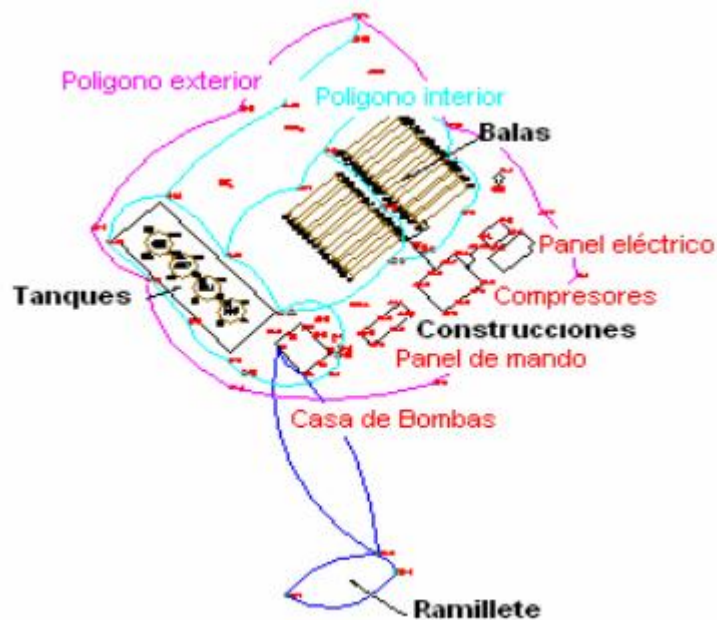


Figura 13 Base de referencia y puntos de control

II.5 Resultados obtenidos del análisis integrado de las deformaciones

Luego de realizar los pasos pertinentes en el estudio geodésico y revisar los materiales de campo en gabinete se procedió al ajuste de los polígonos, empleando el programa

“AJUSNIV”, y se confeccionaron las tablas comparativas de las alturas de las marcas y los gráficos tridimensionales que posibilitan el análisis e interpretación, determinando el tipo, dirección y magnitud de las deformaciones. Tanto los datos de las mediciones efectuadas, así como las características topográficas de la red de puntos y sus errores medio cuadráticos, están referidos en Espinosa Gainza, 2003

Objeto de obra principales:

- Tanques verticales de solución amoniacal.

El Objeto está formado por 4 Tanques (2 de agua y 2 de solución amoniacal), inicialmente se observaban 16 marcas (4 por cada tanque); actualmente solamente quedan 13 de ellas, ubicándose 4 en el tanque 'TK-603' ('T1' a 'T4'), 1 en el tanque 'TK-604' ('T6'), 4 en el tanque 'TK-607' ('T-9' a 'T-12') y 4 marcas en el tanque 'TK-608' ('T-13' a 'T-16').

El comportamiento histórico de las deformaciones se ha caracterizado por su fluctuación con períodos de ascensos y descensos, lo que puede ser producto de la variación de la humedad del suelo que sustenta los pilotes y por la carga de uso en el momento de la medición, por ejemplo, la comparación entre los ciclos 12 y 13, para un intervalo de tiempo de 460 días, manifiesta una tendencia al asentamiento en todas las marcas, con valores promedios para cada tanque en el rango de los 6 mm, que se consideran significativos ya que con el tiempo de construcción que lleva esta obra (aproximadamente 20 años), los asentamientos no han alcanzado la fase de atenuación final.

La tendencia del asentamiento en todas las marcas expresa una relación proporcional con la carga de uso (% de llenado), observándose una dependencia relativamente directa entre la dirección y las magnitudes de las deformaciones, con el aumento o disminución de la carga por el efecto del peso de los tanques Anexo 3, 3.1 y 3.2.

En este objeto se observa el deterioro en los elementos situados alrededor de la cimentación (pisos, aceras, apoyo de las tuberías), provocado por un hundimiento generalizado que va aumentando para cada tanque en la dirección sur, siendo más significativo en el 'TK-603' que posee un desplazamiento con la rotura de los pisos de

49 cm al este y 34 cm al sur-oeste. Este hundimiento se produce también en el pedestal, por lo que se han tenido que situar insertos de aproximadamente 59 cm para calzar la tubería, los cuales en estos momentos se han separado 12 cm de las tuberías.

Esta problemática ocurre por el hundimiento de las capas superficiales del suelo y sus cimentaciones y no afecta a los tanques, apoyados sobre una cimentación profunda (pilotes), que tienen índices de vulnerabilidad geotécnica absolutos y relativos menores de 0.5, lo que implica un nivel de vulnerabilidad baja. Figura (14)



Figura 14 Desplazamientos producidos alrededor de los tanques.

- Balas de almacenamiento de amoníaco.

En el último ciclo se observaron 57 marcas de un total de 60, debido a que 3 de ellas se encuentran obstruidas y no se puede colocar la mira sobre las mismas (bala 3 marca 33, bala 4 marca 43 y bala 13 marca 133).

La tendencia de las deformaciones para 13 ciclos, en un periodo de tiempo de 8.9 años, es al ascenso, con magnitudes en un rango de los 4 hasta 7 mm, que son mayores en la fila de las siete primeras balas, lo que puede ser posible por la acción de la carga de uso o la influencia del manto freático.

Los efectos producidos por las deformaciones (asentamientos e hinchamientos) han ocasionado desperfectos (daños) en los elementos estructurales que se observan a simple vista, como son: intenso agrietamiento en los pedestales de las balas, hundimiento de los apoyos de las tuberías, socavación de las bases de las escaleras, hundimiento del piso. Estos desperfectos producen esfuerzos y tensiones adicionales no previstos en el diseño de la estructura; por ejemplo, al perder un apoyo la tubería, se producen los efectos de la flexión y la torsión o al desplazarse el apoyo de la escalera,

surge la fuerza de tracción que a su vez incrementa el peso de la bala que tributa sobre el cemento. Figura (15)



Figura 15 Desplazamientos producidos por el hundimiento del suelo.

Esta problemática ocurre por el hundimiento de las capas superficiales del suelo y sus cimentaciones y no afecta las balas apoyadas sobre una cimentación profunda (pilotes), que tienen índices de vulnerabilidad geotécnica absolutos y relativos menores de 0.5, lo que implica un nivel de vulnerabilidad baja.

Objeto de obra secundarios:

- Obras auxiliares de funcionamiento.

Se observa una tendencia al hundimiento en las cimentaciones superficiales, que es similar en la mayoría de los objetos de obra principales, con la problemática o el fenómeno de la fluctuación de las deformaciones con el predominio del asentamiento, lo que ha provocado el daño, principalmente de los cimientos de la estructura, los apoyos que soportan las tuberías, pisos y aceras. Este fenómeno puede producirse por las variaciones del manto freático en un suelo arcilloso, y sin dudas, de una deficiente compactación en el proceso de construcción.

- Casa de bombas.

Las mediciones para el estudio de las deformaciones se ejecutaron en 6 puntos de control ('D-1' a 'D-6'), empotrados en la cimentación al lado de las columnas metálicas de la caseta de las electrobombas y 5 marcas ('E-1' a 'E-5') en los cimientos de los pedestales (columnas cortas), que soportan las tuberías aéreas del mismo objeto de obra.

El comportamiento general de las deformaciones de manera acumulativa en la estructura ha sido un periodo de ascenso hasta el ciclo 6, con un valor promedio de +4.20 mm; luego un descenso entre el ciclo 6 y 7 de -4.42 mm, y a partir del ciclo 8 hasta el 11 se produce un ascenso, con valores significativos, principalmente entre los ciclos 10 y 11 donde la marca 'D-5' alcanzó el valor de +5.72 mm; posteriormente en el ciclo 12 la tendencia es al asentamiento con -0.92 mm. En las marcas 'E' ha sucedido de forma similar; es decir, con un carácter diferencial caracterizado por ascensos y descensos.

Esta tendencia es semejante a la ocurrida en otros objetos de esta obra con la problemática o el fenómeno de la fluctuación de las deformaciones con el predominio del hundimiento, lo que ha producido el daño de los cimientos de la estructura y los apoyos que soportan las tuberías. La viga o losa de cimentación ha colapsado por agrietamiento aproximadamente a 1/4 y 3/4 de su longitud en la dirección de las marcas 'D1'-'D6', provocándose un hundimiento con la rotura de la acera. Figura (16)



Figura 16 Rotura de la acera

Los índices de vulnerabilidad geotécnica absolutos y relativos son menores de 0.5, lo que implica un nivel de vulnerabilidad baja.

- Panel de control o de mando.

En este objeto se situaron 6 marcas denominadas con la letra 'A', que forman dos filas, distribuidas uniformemente en las esquinas y en el centro de la construcción. Actualmente se observan 5 marcas, por estar obstruida la marca 'A-2'.

Al comparar los ciclos 12 y 13 ,para un intervalo de 467 días, observamos que se producen discretos descensos con bastante uniformidad en un rango desde $-1,72$ mm hasta de $-2,89$ mm en la marca 'A-4'; sin embargo, en el acumulado entre los ciclos 13 y 1 se manifiesta un ascenso promedio uniforme de 3.37 mm.

Esta fluctuación de las deformaciones hasta el momento ha sido absorbida y distribuida por los elementos de la estructura, pero su repetición y acumulación en el futuro pueden causar el agrietamiento de las paredes. Aquí los daños se localizan en los elementos que se encuentran alrededor de la cimentación, principalmente en la pared que contiene las marcas 'A-1', 'A-5' y 'A-6'; en esa dirección los fragmentos de la rotura del piso y las aceras son considerables, manteniendo un tramo de acera en voladizo (próximo a la marca 'A1') con una separación del suelo de 16 cm.

Los índices de vulnerabilidad geotécnica absolutos y relativos son menores de 0.1 , lo que implica un nivel de vulnerabilidad baja. Figura (17)



Figura 17 Rotura y voladizo de la acera alrededor de la cimentación

- Casa de compresores.

Para el monitoreo de la estructura se colocaron 8 marcas empotradas en las columnas, que forman dos filas y están denominadas por la letra 'F' (Figura 3.18); no se observaron 2 marcas ('F-6' y 'F-7') por estar obstruidas.

Los valores acumulativos, entre los ciclos 1 y 13, corroboran el carácter diferencial de las deformaciones, con ascensos promedios de $+3.02$ mm en las marcas de la 'F1' a la 'F4', y asentamientos significativos, de -71.76 y -60.60 mm en las marcas 'F1' y 'F8'.

Al comparar los ciclos 13 y 12 se observa que las marcas 'F-5' y 'F-8', localizadas en los extremos y en la parte norte, presentan asentamientos significativos (-7.35 mm y -8.06 mm respectivamente), lo que constituye un motivo de preocupación para el buen funcionamiento (estado técnico) de las estructuras que descansan en estos puntales.

La deformación del piso y los pedestales (descenso de 25 cm), que soportan los compresores se puede apreciar a simple vista. Además existe una acera en voladizo con un hundimiento del piso-suelo que evidencia el fallo inmediato, así como la losa de piso que está rota y fraccionada. Figura (18)



Figura 18 Rotura del piso y aceras por agrietamiento.

El índice de vulnerabilidad geotécnica absoluto es de 0.9 y el relativo es de 2.0, por lo que la vulnerabilidad se clasifica como alta, con daños estructurales visibles causados por los asentamientos diferenciales, que es significativo con respecto a las demás estructuras. Esta construcción no posee paredes, que de tenerlas, sin dudas, se observaría un intenso agrietamiento, la misma puede salir del servicio por los requisitos de seguridad operacional, debido a que la acción del equipamiento instalado puede acelerar el proceso de deformación.

- Panel eléctrico.

De un total de 4 marcas fijadas originalmente en la esquina de la caseta ('C-1', 'C-2', 'C-3' y 'C-4'), en este ciclo se observan solo 3, pues la marca 'C-1' se encuentra destruida.

Los valores de las deformaciones acumulativas del ciclo 1, con respecto al 13, manifiestan un carácter diferencial con ascensos en las marcas 'C2' y 'C3' de 9.70 y

2.13 mm, y un asentamiento de -19.02 mm en la marca 'C4', lo cual provoca la inclinación de la construcción.

El índice de vulnerabilidad geotécnica absoluto es de 0.2 y el relativo es de 1.3, por lo que la vulnerabilidad se clasifica como media, con daños estructurales visibles causados por los asentamientos diferenciales. Esto afectó la capacidad resistente de la construcción y produjo daños significativos en el cuerpo de la misma, pisos y aceras. De esta forma se crean las condiciones para su fallo o quedar fuera de servicio por razones de seguridad industrial, debido a que el efecto del equipamiento instalado puede acelerar el proceso de deformación. Figura (19) .



Figura 19 Rotura de la acera y pedestal.

II .6Evaluación de los niveles de vulnerabilidad geotécnica en la base amoníaco del Puerto de Moa

Luego de realizado el análisis geométrico y la interpretación física del proceso de la deformación, determinamos los niveles de vulnerabilidad en los objetos de obras principales y secundarias, que demuestran la aplicación de la metodología en el caso estudio. Los resultados se muestran en la Tablas 4 y 5. Ver además Anexo 4.

Tabla 4 Evaluación de los niveles de vulnerabilidad geotécnica en los objetos obras principales.

Objeto de obra principales	Magnitud de las Deformaciones		IVG		NVG
	Absolutas (mm)	Relativas	IVGa	IVGr	
Tanques(TK 603)	+ 5.00	0.00014	0.1	0.1	Baja
Balas (RP- 08)	+ 2.68	0.00041	0.04	0.4	Baja

Tabla 5 Evaluación de los niveles de vulnerabilidad geotécnica en los objetos obras secundarios.

Objeto de obra secundarios	Magnitud de las Deformaciones		IVG		NVG
	Absolutas (mm)	Relativas	IVGa	IVGr	
Casa de bombas	5.34	0.00038	0.1	0.2	Baja
Panel de control o de mando	3.92	0.00089	0.05	0.04	Baja
Casa de compresores	- 71.76	0.0040	0.9	2.0	Alta
Panel eléctrico	- 19.02	0.0026	0.2	1.3	Media
Interconexiones	- 270.90	0.0279	>2	>2	Muy alta

II.7 Interpretación física de las deformaciones

En consecuencia con la metodología aplicada en el caso de estudio "Base de Amoníaco" se deben definir las causas que provocan los elevados índices y niveles de vulnerabilidad geotécnica en los objetos de obra analizados, durante el proceso de la deformación (asentamiento) del suelo. La causa fundamental es la reducción del volumen del estrato 4 (de baja resistencia) que ha sido confinado por los estratos superiores y los inferiores de mayor resistencia; incidiendo además las cargas

transmitidas por las cimentaciones superficiales y el peso propio de la obra; produciendo un desplazamiento o hundimiento (subsistencia) generalizado, afectando las estructuras cimentadas superficialmente. Lo anterior influye que el nivel de vulnerabilidad sea de muy alta y como caso más crítico tenemos las interconexiones, que han perdido sus apoyos y están expuestas a sollicitaciones no previstas en el diseño. (Figura 20) y Anexo 2.

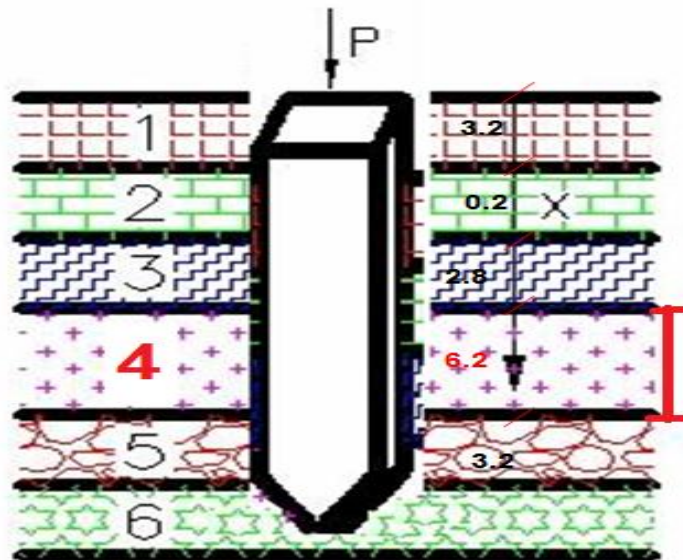


Figura 20 Detalle del perfil del suelo que soporta la cimentación.

II .8 Conclusiones parciales

1. Los índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos permiten alertar sobre la seguridad industrial en obras estructurales, perfeccionando los métodos de cálculo para el diseño de las construcciones, a partir de la comprobación de los valores límites de las deformaciones en las diferentes etapas de deformación de los suelos en función de la carga.
2. En la base de amoníaco del Puerto de Moa se definieron niveles de vulnerabilidad baja en las Balas y Tanques, sin embargo, las obras auxiliares de funcionamiento (Casa de compresores, Panel eléctrico y Interconexiones) tienen niveles de vulnerabilidad de muy alta, alta y media, con daños apreciables, lo que afecta la seguridad operacional de la obra en su conjunto, aspecto de gran importancia para la defensa civil

CONCLUSIONES GENERALES:

1. La metodología aplicada permite incorporar los métodos geodésicos a los estudios de vulnerabilidad geotécnica para la industria cubana, demostrándose su factibilidad en los objetos de obra de la Base de Amoníaco del Puerto de Moa.
2. En la Base de amoníaco del Puerto de Moa se definieron niveles de vulnerabilidad baja en las Balas y Tanques, sin embargo, las obras auxiliares de funcionamiento (Casa de compresores, Panel eléctrico y las interconexiones) tienen niveles de vulnerabilidad de alta, media y muy alta, con daños apreciables, lo que afecta la seguridad operacional de la obra en su conjunto, aspecto de gran importancia para la defensa civil.
3. La aplicación de la metodología permitió tomar decisiones oportunas durante la vigilancia de la seguridad operacional de los objetos de obra que conforman la Base de Amoníaco.

RECOMENDACIONES

- Generalizar la metodología propuesta en los estudios de vulnerabilidad geotécnica de obras industriales y aplicarla a otras obras, tales como: altos edificios, chimeneas, puentes y presas.
- Informar a los órganos competentes la presencia de niveles de vulnerabilidad “alta” y “muy alta” en las obras estructurales objeto de estudio, teniendo en cuenta el grado de riesgo que representan.
- Presentar los resultados de este trabajo en eventos científicos.

BIBLIOGRAFÍA

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 González, 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.

Acosta González, L. E. (1995). Determinación de la Interrelación estructura- suelo en la Planta de Níquel (Tesis).“ Las Camariocas” Moa. Universidad de Holguín, Facultad de Ingeniería Civil, Holguín, Cuba, p. 63.

Acosta González, L.E (2009). Determinación de índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos: (tesis doctoral). Instituto Técnico Militar “José Martí”. Habana, p.10- 68.

Asentamientos Diferenciales de Estructura docx Feb 19, 2014.

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.

Chrzanowski, A. et al. (1982) On the Analysis of Deformation Surveys. 4 th Canadian Symposium on Mining Surveying and Deformation Measurements. The Canadian Institute of Surveying, Banff, 07.-09.06.1982. Proceedings.

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, p. 326-341.

COPACON (2016). Monitoreo del nivel de vulnerabilidad geotécnica en las estructuras por métodos geodésicos. Memorias II Foro Internacional de Control de la Calidad y patología de las Construcciones. ISBN 978-959-247-152-8.

Cotilla Rodríguez, Mario Octavio. Apuntes necesarios de los acontecimientos sísmológicos en Cuba. 1999, pp.71-93

DAS, B.M. 2008. Fundamentals of geotechnical engineering. Third edition. CL-Engineering ed.. ISBN-10: 0-495-29572-8.

Deng, N. (et al). (2008) Introduction and analysis of commonly used non-parametric models of dam deformation in china. 4rd IAG / 13th FIG Symposium, Lisbon, Portugal, May 12-15.

DYCTA. 2005. Norma Inglesa. Diseño y Cálculo de Tanques de Almacenamiento. pp130

ECURED. Consejo Popular Rolo Monterrey Recuperado en: <http://www.ecured.cu/tesis-doctorales/.../Consejo Popular.html>

Eichhorn, A. et al. (2008) Investigation of dynamic thermal effects with non-parametric and parametric deformation models. 4rd IAG / 13th FIG Symposium, Lisbon, Portugal , May 12-15.

Fernández, S.; Jaca, R.C. & Godoy, L.A. 2011: Descenso de apoyos en el revestimiento lateral de naves industriales. Mecánica Computacional, 30: 857–874.

García, J. & Acosta González L.E. (2005) Determinación de índices de vulnerabilidad geotécnica en obras por métodos geodésicos. Segundo Taller de Geodesia y Geomecánica Aplicada a la Construcción, UNAIC, Santiago de Cuba, Cuba.

GEOCUBA. (2002): Informe sobre las observaciones de los asentamientos por métodos geodésicos en el Tanque de combustible 1 de la CTE de Felton.

GEOCUBA (2004) MET 30-27.: Metodología para el control de deformaciones de obras a partir de métodos geodésicos.

Godoy, L.A. & Sosa, E.M. 2003: Localized support settlements of thin-walled storage tanks. Thin-Walled Structures, 41:941-955.

González, M. (2001) El terreno. ISBN: 84-830 1-530-7. Ediciones UPC

González de Vallejo, Luís I. (et al). (2006), Ingeniería Geológica Parte I y II. ISBN-84-205-3104-9. Editorial ORVMU.SA. España.

Heunecke, O. & Welsch, W. 2000: A Contribution to Terminology and Classification of Deformation Models in Engineering Surveys. Journal of Geospatial Engineering, vol. 2. No. 1, pp. 35-44, Hong Kong.

Jaca, R.C; Burgos, C. A. & Godoy, L. A. 2013: Evaluación de fallas de tanques horizontales de almacenamiento de fluidos. Mecánica Computacional Vol XXXII, págs. 3463-3482.

Krusnick, Abel. (19 febrero, 2014). Asentamiento diferencial de estructuras. Recuperado en <http://www.industria.org>

La vulnerabilidad <https://www.unisdr.org/2004/campaign/booklet-spa/page8-spa.pdf>.

Martín, Astorga. E. (2011) La industria del níquel en el desarrollo socioeconómico cubano actual. Reflexiones en torno a una política industrial. Instituto Superior Minero metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

Narváez López, R (2012): Vulnerabilidad geotécnica de los quebrados arroyo seco y Puca Puca en la Ciudad de Ayacucho: (Tesis de grado). Ayacucho. México, p 23-29.

IX Congreso Internacional Geomática (2016). Monitoreo geodésico de la deformación en tanques verticales de almacenamiento de combustibles, cimentados sobre pilotes y otras soluciones constructivas.

Norma Cubana 1: 2007: Norma para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales.

OEA (Organización de Estados Americanos). 1991. Desastres, planificación y desarrollo: manejo de amenazas naturales para reducir los daños. USAID. Washington. US, p. 80.

Quevedo, G. (2002) Aplicación de los Estados Límites y Teoría de Seguridad en el Diseño Geotécnico en Cuba. Tesis de grado Científico, UCLV.

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.

Wilches-Chaux, G. 1998. La vulnerabilidad Global. Los desastres no son naturales.

ANEXOS

Anexo1. Deformaciones límites admisibles [NC 1: 2007]

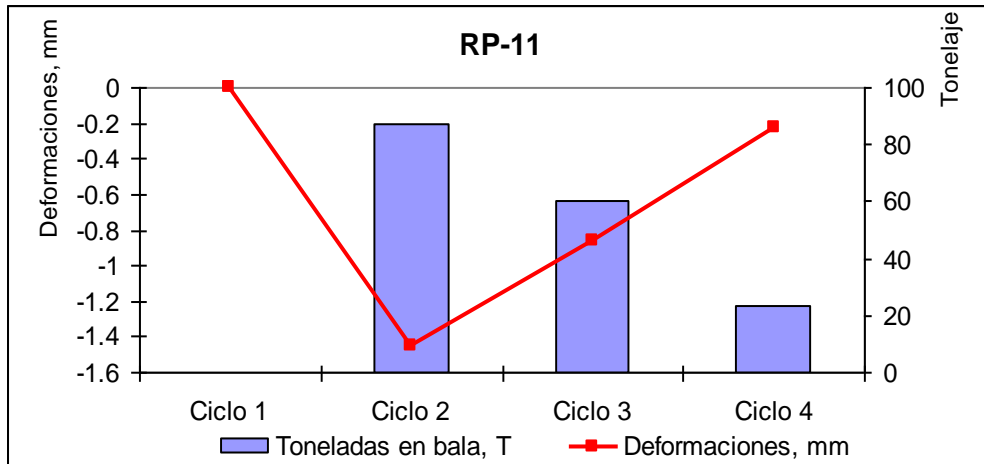
Tabla 2: Valores de las deformaciones o desplazamientos límites de las bases de las cimentaciones				
Denominación y características de la edificación.	Magnitud de las deformaciones límites de la cimentación.(SL)			
	Deformaciones relativas		Asentamientos (cm).	
	Caso	Valor	Caso	Valor
1. Edificios de varias plantas con estructura reticulada de:				
1.1 Pórticos de hormigón armado sin arriostramiento.	Distorsión angular	0,002	Asiento máximo absoluto	8
1.2 Pórticos metálicos sin arriostramiento	Distorsión angular	0,004	Asiento máximo absoluto	12
1.3 Pórticos de hormigón armado arriostrado	Distorsión angular	0,001	Asiento máximo absoluto	8
1.4 Pórticos metálicos arriostrados	Distorsión angular	0,002	Asiento máximo absoluto	12
2 Edificios y estructuras en los que no se producen esfuerzos suplementarios por asiento diferencial	Distorsión angular	0,006	Asiento máximo absoluto.	15
3 Edificios de varias plantas con muros de carga de:	Distorsión angular	0,0016	Asiento medio	10
3.1 Grandes paneles.				
3.2 Bloques o fabricas de ladrillos sin armar.	Distorsión angular	0,002	Asiento medio	10
3.3 Bloques o fabricas de ladrillos armado y con vigas de hormigón armado.	Distorsión angular	0,0024	Asiento medio	15
3.4 Independientemente del tipo de fabrica.	Inclinación transversal	0,005	-	-
4 Estructuras rígidas elevadas:				
4.1 Estructuras de hormigón armado.	Inclinación longitudinal y transversal	0,003	Asiento medio	40
a) Edificios, industrias y silos de estructura monolítica con cimentación por losa.				
b) Idem. De estructura prefabricada.	Idem.	0,003	Asiento medio	30
c) Edificios industriales aislados.	Inclinación transversal Inclinación longitudinal	0,003	Asiento medio	¿
d) Silos aislados, con estructura monolítica.	Inclinación transversal longitudinal	0,004	Asiento medio	40
e) Industria con estructura prefabricada.	Inclinación transversal longitudinal	0,004	Asiento medio	30
4.2 Chimeneas de alturas: (cm)				
a) $H \leq 100$	Inclinación	0,005	S. medio	40
b) $100 < H \leq 200$	Inclinación	0,5 H	S. medio	30
c) $200 < H \leq 300$	Inclinación	0,5 H	S. medio	20
d) $H > 300$	Inclinación	0,5 H	S. medio	10
4.3 Todas las estructuras elevadas hasta 100 m de altura.	Inclinación	0,004	S. medio	20

Anexo 2. Características de los suelos que sustentan la cimentación de las estructuras en Depósitos de sustancias tóxicas “Base de Amoniaco.

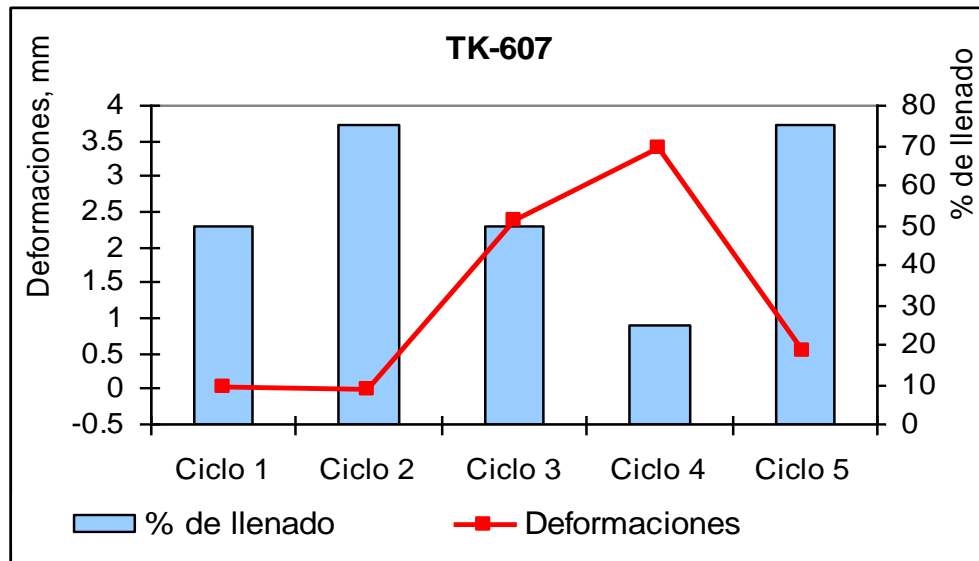
Tabla. Características de los suelos

Capa	Denominación	γ	e	W%	ϕ^0	Consistencia	C	E (Kpa)
1	Suelo laterítico Con perdigones de hierro (relleno)	2.05	1.0	18	34	Dura semidura	0.48	17000
2	Arcilla con resto de materia orgánica, (Relleno)	1.46	2.6	77	9	Suave plástica.	0.27	2800
3	Arena gravosa, lentes de arena	1.62	0.7	24	8	Mullida	0.13	5000
4	Cieno arcilloso con el contenido medio de turba.	1.2	4.0	153	3	Fluida	0.18	500
5	Arcilla deluvial	1.64	1.4	52	12	Plástica dura	0.34	4000
6	Suelos arcillosos eluviales, con eluvios de serpentinita	1.76	1.1	37	24	Dura Semidura.	0.47	12000

Anexo 3 Comportamiento de las deformaciones en la Base de amoniaco del puerto de Moa con respecto a la variación de la carga de uso (% de llenado).



Balas metálicas de almacenamiento de amoniaco



Tanques verticales de preparación de la solución amoniacal

Anexo 3.1

BALA	CARGA DE LAS BALAS DURANTE LAS OBSERVACIONES (t)			
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
RP - 01	0.0	91.0	60.0	23.2
RP - 03	0.1	91.0	60.0	23.2
RP - 04	0.1	92.9	60.0	23.2
RP - 05	0.2	98.8	98.8	98.8
RP - 06	0.2	84.6	91.0	69.1
RP - 07	0.2	92.1	78.0	23.2
RP - 08	0.0	0.0	0.0	0.0
RP - 09	0.0	94.9	94.9	94.9
RP - 10	0.1	106.2	97.0	97.0
RP - 11	0.2	86.9	60.0	23.2
RP - 12	0.1	102.6	62.3	12.1
RP - 13	0.3	100.7	35.5	29.2
RP - 14	0.0	100.7	80.2	80.2
RP - 15	0.1	100.7	60.0	23.2

Anexo 3.2

TANQUES	PORCIENTO DE LLENADO DE LOS TANQUES				
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
Tk-603	25	25	50	75	25
Tk-604	75	75	50	50	25
Tk-607	50	75	50	25	75
Tk-608	75	25	75	75	50

Anexo 4. Resultado del estudio en las Balas

Balas de Amoniaco	Magnitud de las deformaciones		IVG		NVG
	Absolutas (mm)	Relativas	IVGa	IVGr	
1*	-0.70	0.00004	0.01	0.04	Baja
4*	-1.47	0.00005	0.02	0.05	Baja
7*	+1.36	0.00008	0.02	0.08	Baja
8*	+2.67	0.00041	0.04	0.41	Baja
12*	+1.04	0.00003	0.01	0.03	Baja
15*	+0.75	0.00002	0.01	0.02	Baja