

Aplicación de la topografía de alta definición al diagnóstico del estado geométrico de elementos constructivos

Ing. Ernesto Emilio Aguilar Leyva

Universidad de Holguín

eleyva0816@gmail.com

Dr.C Anabel Reyes Ramírez

Universidad de Holguín

areyesr@uho.edu.cu

Dr.C Luis Enrique Acosta Gonzales

Universidad de Holguín

luis.acosta.glez@gmail.com

RESUMEN:

El control dimensional de obras constituye una de las etapas más importantes a realizar durante la ejecución de un proyecto constructivo. Toda vez que el mismo brinda elementos que pueden servir para la toma oportuna de decisiones respecto al comportamiento de un objeto y la detección de deformaciones, tanto constructivas como causadas por la explotación del mismo. De igual manera el diagnóstico geométrico de un elemento, permite certificar que el mismo cumple con los requerimientos en cuanto a forma y dimensiones se refiere, respecto al modelo teórico de este, plasmado en los proyectos de obra. Desde el empleo de instrumentos óptico mecánicos, a la nueva era geoespacial, la contribución de la topografía se ha visto reflejada en la obtención de modelos de As Built más robustos y detallados. Entre las novedades que el desarrollo tecnológico ha brindado a la topografía se encuentra la tecnología HDS (High Definition Survey), la cual ha sido capaz de brindar levantamientos con un alto grado de fidelidad, tanto de objetos como de emplazamientos constructivos. La presente investigación aborda el tema del diagnóstico del estado geométrico de elementos constructivos con empleo de tecnología HDS. Se realiza un análisis del estado actual de las técnicas empleadas para la creación de modelos de As Built, así como se muestran los resultados de los trabajos realizados a un caso de estudio real.

Palabras Claves: Topografía de alta definición, diagnóstico geométrico, elementos constructivos

Application of high-definition topography to the diagnosis of the geometric condition of building elements

ABSTRACT:

The dimensional control of works constitutes one from the most important stages to carry out during the execution of a constructive project. All time that the same one offers elements that can be good for the opportune taking of decisions regarding the behavior of an object and the detection of deformations, so much constructive as having caused by the exploitation of the same one. In a same way the I diagnose geometric of an element, it allows to certify that the same one fulfills the requirements as for form and dimensions he/she refers, regarding the theoretical pattern of this, captured in the work projects. From the employment of instruments optic mechanics, to the new era geoespacial, the contribution of the topography has been reflected in the obtaining of models of Ace more robust and detailed Built. Among the novelties that the technological development has toasted to the topography he/she is the technology HDS (High Definition Survey), which has been able to offer risings with a high grade of fidelity, so much of objects as of constructive locations. The present investigation approaches the topic of the diagnosis of the geometric state of constructive elements with technology employment HDS. He/she is carried out an analysis of the current state of the techniques employees for the creation of models of Ace Built, as well as the results of the works are shown carried out to a case of real study.

Keywords: Topography of high definition, I diagnose geometric, constructive elements.

INTRODUCCIÓN

El patrimonio arquitectónico constituye un testimonio tangible de la evolución histórica, técnica y cultural de las sociedades, siendo su conservación un desafío prioritario para garantizar la transmisión de estos valores a futuras generaciones. Sin embargo, la evaluación precisa de su integridad estructural enfrenta limitaciones metodológicas, particularmente en edificaciones históricas con geometrías complejas o deterioro acumulado. Métodos topográficos tradicionales, como la taquimetría o la nivelación, suelen ser insuficientes para capturar detalles milimétricos o modelar superficies irregulares, lo que dificulta diagnósticos rigurosos (Susta et al., 2022).

En este contexto, la Topografía de Alta Definición (HDS) emerge como una alternativa revolucionaria. Mediante escáneres láser 3D, esta tecnología permite la captura masiva de datos con precisiones de hasta 1-2 mm, generando nubes de puntos densas y modelos tridimensionales fieles a la realidad (Valero et al., 2020). Su aplicación en patrimonio se ha consolidado en la última década, destacándose en la documentación de catedrales góticas, puentes históricos y fortificaciones, donde la detección de deformaciones o desviaciones es crítica para intervenciones preventivas (Troyano-Moreno, 2023)

Este estudio se centra en la Torre del Faro Punta Lucrecia (Banes, Cuba), una estructura neoclásica del siglo XIX que aún funciona como guía marítima. Su valor patrimonial radica no solo en su singular diseño, sino en la preservación de elementos auxiliares originales, como el polvorín y el horno de cal. No obstante, la exposición constante a factores ambientales (vientos salinos, humedad y actividad sísmica moderada) justifica una evaluación geométrica rigurosa para descartar riesgos estructurales.

El objetivo principal de esta investigación es implementar una metodología basada en HDS para diagnosticar deformaciones y desviaciones de verticalidad en la torre, empleando un escáner láser Leica P40 y software especializado (Leica Cyclone, 3DReshaper). Además, se busca establecer un protocolo replicable para el monitoreo de estructuras patrimoniales, integrando tecnologías de vanguardia con enfoques multidisciplinarios de conservación.

METODOLOGÍA

Topografía de Alta Definición

La topografía de alta definición (también conocida como HDS por sus siglas en inglés) es una técnica de captura de datos masiva que utiliza tecnologías como escáner láser 3D, fotogrametría tanto terrestre como aérea, así como ineterferomtria para obtener representaciones con alto nivel de detalle de elementos tales como terrenos, estructuras y objetos de interés con niveles de exactitudes milimétrica.

Se caracteriza por brindar rangos de exactitudes que pueden alcanzar de 1 a 2 milímetros en muchos casos, además de esto permite la captura de forma masiva de gran cantidad de información con tasas de registro de hasta 1 millón de puntos por segundo.

De igual manera es posible reducir los tiempos de trabajos de campo de forma considerable respecto a las técnicas clásicas de capturas de datos. Esto permite su uso en diferentes disciplinas tales como la Ingeniería Civil, arquitectura, minería, arqueología y gestión de infraestructuras. Por sus características es compatible con sistemas basados en metodología de trabajo BIM, esto permite su uso en un sin número de aplicaciones en diferentes ámbitos.

Estaciones HDS

Las estaciones HDS también conocidas como escáner láser, son instrumentos que realizan el barrido de una o múltiples superficies con un haz de láser, recorriendo con éste la ventana angular que le sea establecida, y captando la distancia a la que se encuentra cada uno de los puntos que conforman la superficie. Para ello, emite un haz de láser en dirección al punto que se desea registrar, y obtiene la medición a partir de la reflexión del mismo. De este modo, como resultado de la medición se obtienen las coordenadas

tridimensionales de cada uno de ellos, conformando en conjunto una nube de puntos. Así, se obtiene un modelo discreto del objeto tridimensional que, en función de la densidad del escaneado, es capaz de aproximarse muy bien a la realidad. (Cabrejas-Herrero, 2020)

Existen diferentes tipos de estaciones en el mercado, destacándose la Leica P40 (Figura 1) por su robustez para gran cantidad de entornos y tareas.

Figura 1.

Estación HDS Leica P40.



Fuente: Leica Geosystem (2020)

Este instrumento combina características con una estación total topográfica lo que lo convierte en una herramienta versátil para la realización de levantamientos tridimensionales (Hernández-Peña & González-Abreut, 2019), algunas de las características añadidas a este son:

- Campo de visión completo de 360° x 270°: capturas cubiertas, superficies inferiores de puentes, cañerías elevadas, fachadas altas, columnas y torres. El campo visual del Leica P40 es el mismo de una estación total.
- Compensador de doble eje con calidad de medición topográfica para puntos de vista inversos, topografía tri-lineal y poligonometría: para mayor flexibilidad y libertad, los usuarios del Leica P40 pueden realizar poligonales desde puntos de control con precisión topográfica. La Leica P40 utiliza la misma compensación de dos ejes que se utilizan en las estaciones totales.

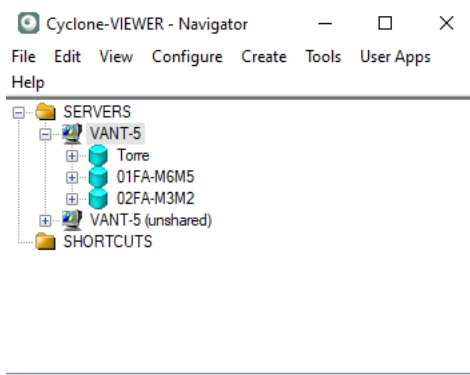
- Precisión de nivel topográfico para cada medición: mientras que algunos escáneres requieren promediar observaciones para acercarse a precisiones topográficas, La Leica P40 entrega precisión topográfica para cada medición individual.
- Excelente alcance de gran utilidad: el rango en distancias del Leica P40 de aproximadamente 300 m para superficies con el 90% de reflectividad y 134 m para superficies con el 18% de reflectividad, cubre la mayoría de los ambientes típicos para instrumentos con medición sin prisma. La alta precisión del Leica P40, el tamaño pequeño del punto laser, y la capacidad de escaneo fino proporcionan un excelente rango útil para alcanzar resultados topográficos

Software Leica Cyclone

Desarrollado por Leica Geosystems, el software Cyclone proporciona un ambiente de trabajo para la gestión, procesamiento y modelación de datos colectados con estaciones HDS (Hernández-Peña & González-Abreut, 2019). La siguiente figura muestra una vista de la ventana de navegación del software Cyclone:

Figura 2.

Ventana de Navegación de Leica Cyclone.



Fuente: Leica Geosystem (2020)

Está compuesto por cinco módulos de software individual para diferentes necesidades y flexible para la personalización del producto.

Algunas de las funciones de estos módulos se relacionan a continuación:

- Cyclone Scan: Controla el proceso de escaneado del equipo.

- Cyclone REGISTER: Ofrece un conjunto de herramientas para registrar o georreferenciar las nubes de puntos escaneadas desde distintas posiciones de manera rápida y precisa.
- Cyclone Survey: Permite extraer rápidamente las características principales y coordinar la información de las nubes de puntos.
- Cyclone Model: Ofrecer todas las funciones disponibles para extraer y medir elementos y crear un modelo 3D a partir de las nubes de puntos.
- Cyclone Publisher: Permite publicar los datos de las nubes de puntos en un formato de vista panorámica que se puede publicar en Internet. El usuario puede visualizar estos datos desde Internet Explorer con el plug-in Leica TrueView permitiendo el acceso desde cualquier lugar del mundo.

El Software 3DReshaper

3DReshaper es un software de uso profesional, desarrolló por Technodigit (perteneciente al grupo Hexágono), para el manejo de nubes de puntos generadas con distintas tecnologías, así como la creación de mallas para el desarrollo de procesos de inspección de superficies. (Technodigit, 2021)

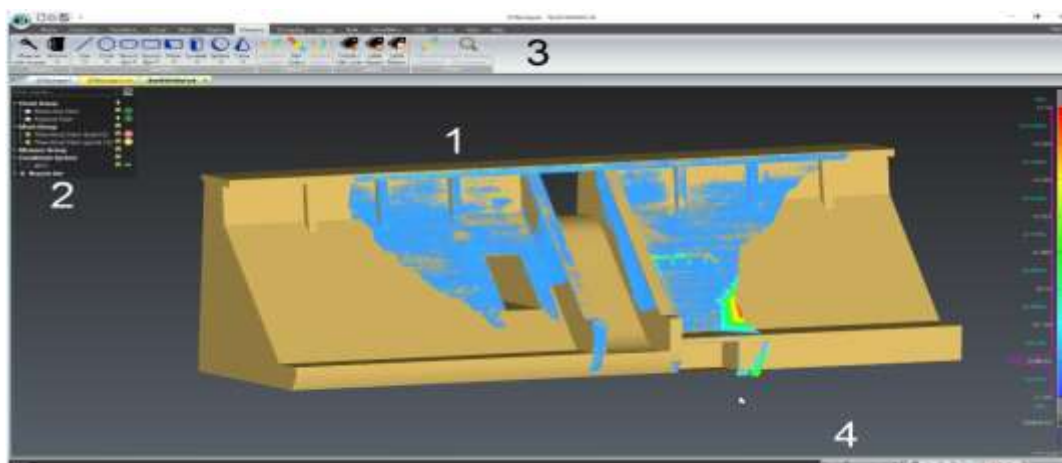
Este software resulta una poderosa herramienta para el modelado 3D de datos, pertenecientes a sensores aerotransportados y escáneres del láser terrestres, sensores móviles o fotogramétricos, permitiendo el procesamiento de nubes de puntos densas, mallado 3D, reconstrucción de superficies y las formas geométricas, así como la comprobación de desviaciones. Además de esto, el software ofrece las herramientas necesarias para desarrollar tareas de:

- Creación de MDT y cálculo de volúmenes
- Verificación de pendientes
- Creación de ortho-imagen
- Inspección de elementos constructivos
- Inspección de túneles
- Inspección de tanques

La interfase gráfica del software está compuesta por las siguientes áreas:

Figura 3.

Interfase gráfica del software 3DReshaper.



Fuente: autores

1. La escena 3D: la cual sirve para desplegar objetos 3D.
2. El árbol (o explorador): Tiene como función ver y actuar recíprocamente con los objetos (las nubes, mallas, el polylines, etc.) qué está en el proyecto actual.
3. La cinta (o Ribbon): con todos los menús y herramientas ordenadas.
4. La barra de estado: con algunos atajos a manejo de unidades, vista, recortes o rejillas. La barra también muestra el número de objetos seleccionados y el nombre del último de estos.

Faro Punta Lucrecia

El Faro de Punta Lucrecia se erige en la costa norte del municipio de Banes, provincia de Holguín, Cuba. Su ubicación fue seleccionada estratégicamente para señalar una zona de arrecifes peligrosos y rutas marítimas cercanas a la bahía de Banes, así como por su proximidad a Punta de Mulas, un área de intensa navegación durante los siglos XIX y XX. Su función era garantizar visibilidad óptima para guiar embarcaciones que transitaban entre Cuba y el Atlántico norte.

Las obras comenzaron el 21 de enero de 1860, pero el terreno abrupto obligó a construir primero un camino que conectara el lugar con los poblados más cercanos. Desde el inicio, surgió un problema crítico: la escasez de mano de obra debido al aislamiento y las duras condiciones laborales. A pesar de ofrecer salarios atractivos, no se logró reclutar suficientes trabajadores. Esto llevó a que el 28 de febrero de 1860, el entonces

Capitán General de Cuba, Francisco Serrano Domínguez, ordenara el traslado de 40 presos de las cárceles de la región oriental para suplir la fuerza laboral.

A principios de 1868, se instalaron la óptica y el sistema de iluminación rotativo, con un alcance de 17.5 millas náuticas en condiciones atmosféricas claras. El 21 de agosto de 1868, el Capitán General Francisco Lersundi comunicó al Ministro de Ultramar en Madrid la finalización de la obra y propuso su inauguración para el 10 de octubre de ese mismo año.

El faro sigue el estilo neoclásico, con una estructura anexa de planta en forma de "O" y un patio central que incluye un aljibe recolector. La base octogonal tiene una altura aproximada de 11 pies, mientras que la torre de sillería, de forma cilíndrica, alcanza los 121 pies. Cuenta con un corredor perimetral con barandillas de hierro y una escalera interior en espiral de 218 peldaños.

Figura 4.

Torre del Faro Punta Lucrecia.



Fuente: EcuRed

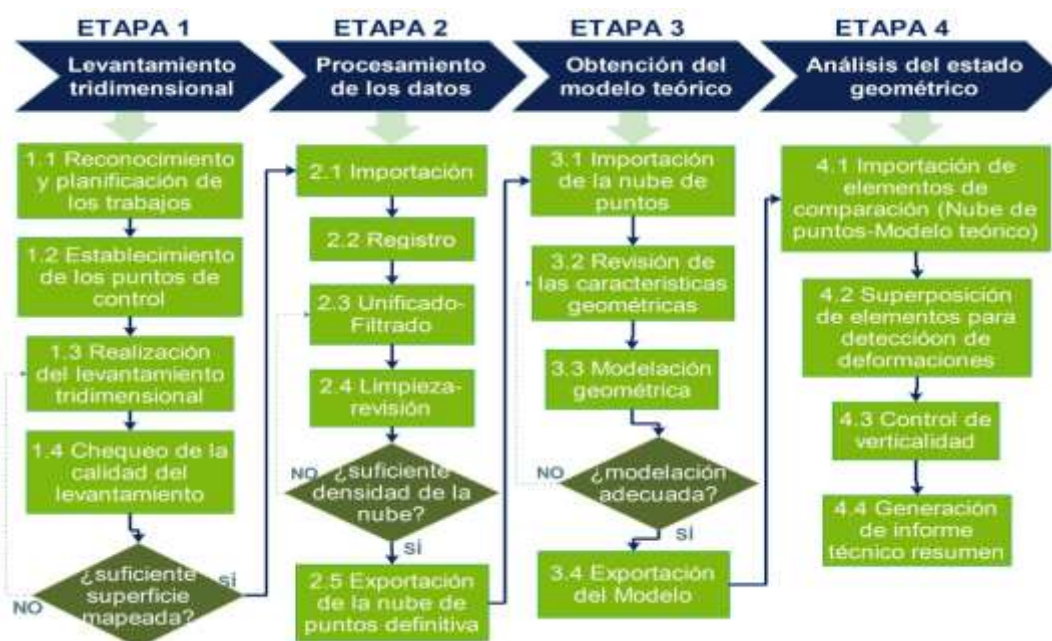
Este faro es único en Cuba por preservar casi intactas las instalaciones auxiliares de su construcción, mantenidas desde el siglo XIX. Entre ellas destacan: El polvorín y el horno de cal. El terraplén con restos de la carrilera usada para transportar piedras. La cantera con bloques semi tallados. La aguada, fuente de agua para preparar la argamasa que unió las piedras de la torre.

Metodología de trabajo empleada

La metodología de trabajo propuesta para el desarrollo del proceso de diagnóstico del estado geométrico de elementos constructivos consta de 4 etapas, tributando una a la otra de forma ordenada con la finalidad de diagnosticar las desviaciones del objeto de estudio respecto a su modelo teórico. El siguiente diagrama muestra las etapas que conforman dicha metodología de trabajo:

Figura 5.

Diagrama de flujo.



Fuente: autores

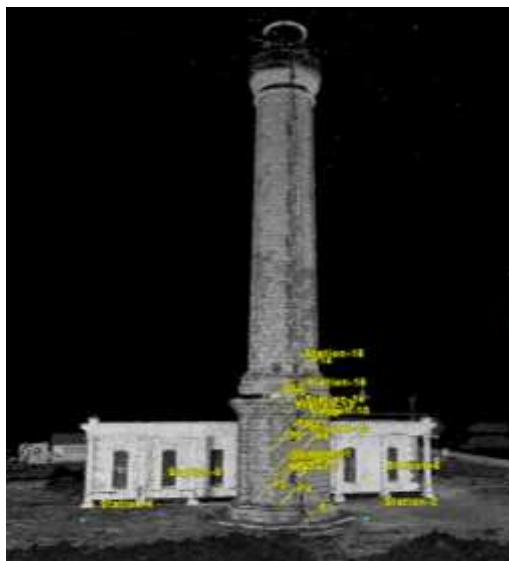
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Levantamiento tridimensional con tecnología HDS

Los trabajos de levantamiento consistieron en el muestreo de forma masiva de todos los elementos que componen el objeto de estudio. Para este fin se empleó una estación HDS Leica P40 con la cual fue necesario realizar un total de 42 estacionamientos para la capturar de todas las características geométricas del objeto de estudio. La siguiente figura muestra una vista de la nube de puntos colectada en condiciones de campo.

Figura. 6.

Nube de puntos colectada en condiciones de campo.



Fuente: autores

Procesamiento de los datos colectados en campo

Con el fin de realizar el procesamiento de los datos colectados referentes al objeto de estudio se empleó el software Leica Cyclone, mediante el cual fue posible realizar tareas tales como importación, registro, unificado, limpieza y filtrado de los datos para la obtención de una nube de puntos densa del objeto de estudio. La siguiente figura muestra un detalle de la nube de puntos definitiva.

Fig. 7.

Nube de puntos definitiva del objeto de estudio. Fuente: autores



Fuente: autores

Para llevar a cabo del análisis del estado geométrico del objeto de estudio se empleó el software 3DReshaper, tomando como insumo principal para el desarrollo de este, la nube de puntos obtenida.

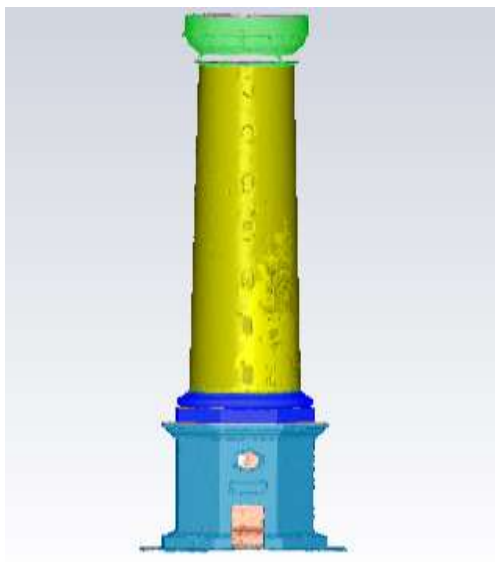
El proceso de análisis se realizó en dos etapas, una inicial donde se detectaron las diferencias presentes ente el objeto de estudio y su modelo teórico. Continuando con la revisión de verticalidad de este.

Obtención del modelo teórico - Análisis de Deformación

Para la detección de las diferencias entre el modelo real y teórico del objeto de estudio, inicialmente fue necesario la creación de un modelo que representara las características tomadas de la nube d puntos. La siguiente figura muestra un ejemplo de este:

Figura 8.

Modelo generado con las características geométricas del objeto de estudio.



Fuente: autores

Seguido de esto fue necesario generar un modelo teórico de este, para dicho fin se creó un cono con las dimensiones ideales de la torre, haciendo superponiendo este sobre el modelo creado, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 9.

Superposición entre modelo teórico y real del elemento.

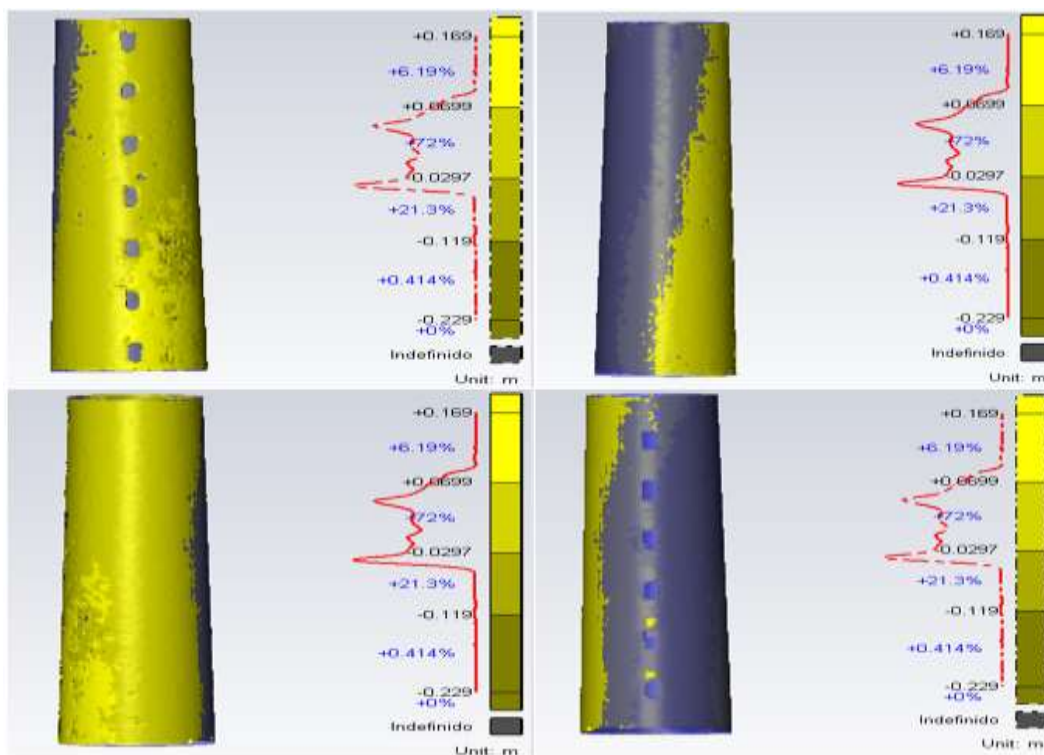


Fuente: autores

Para la detección de las diferencias entre ambos modelos se empleó la herramienta *Comparar\Inspeccionar*, equipada en el módulo *Medir* del software empleado, la siguiente figura muestra un empleo del modelo de deformación generado en las diferentes vistas del objeto de estudio:

Figura 10.

Visualización del modelo de deformaciones.



Fuente: autores

De la inspección realizada se detectó que en la parte posterior de la estructura existen las mayores diferencias entre el modelo real y teórico, llegando a alcanzar valores de hasta cuatro (4) centímetros.

Análisis de Verticalidad

Para el caso de la revisión de la verticalidad del objeto de estudio se empleó el módulo *Inspección* de tanque también equipado en el software seleccionado. Si bien este módulo está concebido para la revisión del

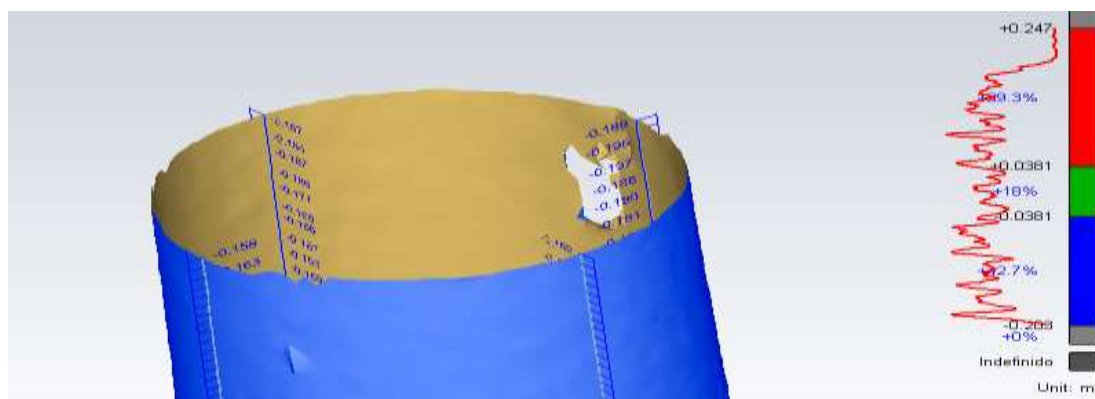
estado geométrico de tanques, por las características geométricas del objeto de estudio pueden ser adaptadas las herramientas para llevar a cabo esta tarea en este.

Para este fin se creó un cilindro con las características geométricas ideales del objeto de estudio. Si bien la figura que más se asemeja a este es un cono, el hecho de que se generase un cilindro con las dimensiones máximas del objeto de estudio permite la inspección de verticalidad de este, toda vez que las magnitudes detectadas han de ser iguales para todos los puntos de inspección, siendo las diferencias de estas indicio de falta de verticalidad.

El análisis se llevó a cabo en dos direcciones, cortando el objeto de estudio en cuadrantes cada 90 grados. La siguiente figura muestra un detalle de la vista superior del objeto estudiado mediante el análisis de verticalidad:

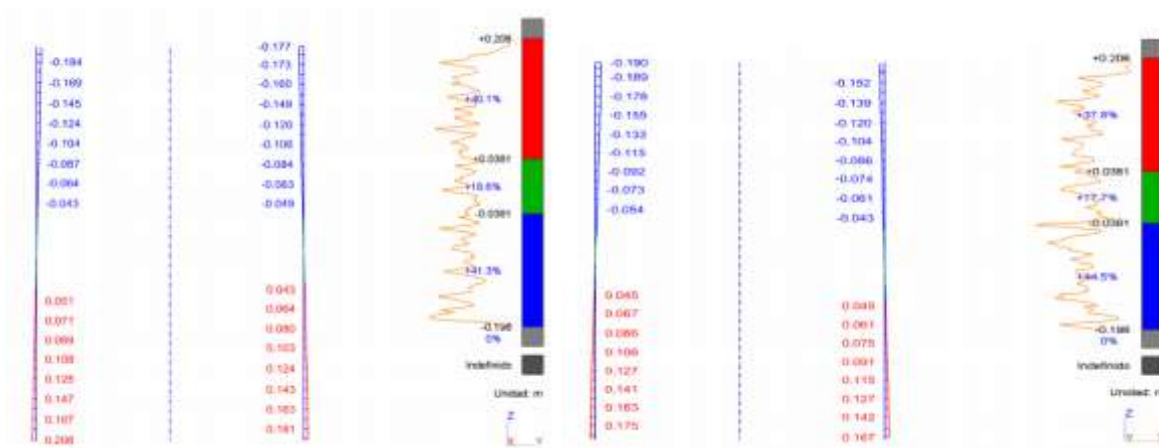
Figura. 11.

Visualización del modelo de Verticalidad.



Fuente: autores

Figura. 12. Esquema de Verticalidad.



Fuente: autores

CONCLUSIONES

El empleo de la topografía de alta definición (HDS) en el diagnóstico geométrico de la Torre del “Faro Punta Lucrecia” ha demostrado ser una herramienta eficaz para la documentación y conservación de estructuras patrimoniales. Mediante el uso del escáner láser Leica P40 y el procesamiento de datos con los softwares Leica Cyclone y 3DReshaper, se identificaron deformaciones máximas de 4 cm en la zona posterior de la torre y desviaciones de verticalidad de 3 cm, valores que, aunque no comprometen su estabilidad estructural actual, evidencian la necesidad de un monitoreo continuo.

La metodología desarrollada en este estudio, que integra captura tridimensional, modelado y análisis comparativo, no solo proporciona un diagnóstico preciso del estado geométrico del faro, sino que establece un protocolo replicable para otras edificaciones históricas con características similares. La falta de datos iniciales limita la determinación del origen temporal de las deformaciones, lo que subraya la importancia de implementar sistemas de registro periódicos para futuros análisis.

Como recomendación, se sugiere la adopción de un programa de monitoreo periódico que combine tecnologías HDS con evaluaciones multidisciplinarias, garantizando así la preservación a largo plazo de este emblemático patrimonio cubano. Este trabajo refuerza el valor de las tecnologías de vanguardia en la conservación del patrimonio, superando las limitaciones de métodos tradicionales y aportando soluciones innovadoras para desafíos estructurales y documentales.

REFERENCIAS

- Cabrejas-Herrero, P. (2020). Control dimensional de aeronaves con sistemas láser escáner UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA].
- Hernández-Peña, L., & González-Abreut, D. (2019). IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA ESCÁNER LÁSER TERRESTRE PARA LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO. IV Convención Internacional de Agrimensura.
- Nieto-Tolosa, M., & Nieto-Martínez, M. (2013). Aportaciones del Modelado Paramétrico a la Toma de Decisiones: Dos Estudios de Caso desde el Proyecto de Arquitectura. Sigradi, I.
- Susta, C., Nigro, P., Mandagaran, M., & Rodríguez-Barros, D. (2022). PATRIMONIO DIGITAL Y MODELOS PARAMÉTRICOS TRIDIMENSIONALES. Sigradi, V.
- Tamayo -Rodríguez, M. (2023). APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT) EN EL CONTROL DIMENSIONAL DE UNA ESTRUCTURA Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya"].
- Technodigit. (2021). Centro de Ayuda del Software 3DReshaper.
- Troyano-Moreno, M. (2023). Implementation of the BIM Methodology for the diagnosis and pathology activities of construction in CEMOSA. CMMoST.
- Leica Geosystem (2020). Manual de Usuario Estación HDS Leica P40.